

Diseño de Sistemas de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario El Inga mediante Electrocoagulación y Fitorremediación

Alicia Guevara, Lorena Guanoluisa, Ernesto de la Torre

Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Metalurgia Extractiva
Quito, Ecuador (Tel: 593-2-2236562; e-mail: alicia.guevara@epn.edu.ec)

Resumen: El objetivo de este trabajo es diseñar un sistema de tratamiento para los lixiviados generados en el relleno sanitario El Inga, los cuales presentan elevados contenidos de DBO5 (3 000–4 000 mg/L), sólidos suspendidos (200 - 340 mg/L), DQO (700–6 000 mg/L) y color (800 a 5 546 mg Pt-Co/L). Para este propósito se emplea el proceso de electrocoagulación como tratamiento primario, con 8 electrodos de aluminio durante 20 min de operación, con una densidad de corriente de 53 A/m². Como segundo tratamiento se usa la fitorremediación aplicada en un sistema de humedales de flujo subsuperficial vertical y la adsorción en carbón activado como tratamiento terciario. La combinación de estos procesos redujo el nivel de concentración de los contaminantes hasta valores aceptados por la ordenanza 213 del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (MDMQ) para descargas líquidas. Se trataron dos muestras procedentes del vertedero, uno de lixiviado crudo y otro de lixiviado que había recibido tratamientos de lodos activados y bioreactores de membranas. En el primer caso, luego de electrocoagulación del lixiviado crudo se alcanzaron altas remociones para sólidos suspendidos (78,6 %), DBO5 (73,5 %), DQO (40,4 %) y color (79,4 %). En el sistema de humedales (2,5 L/día) los porcentajes de eliminación de contaminantes son de 13,2 %, 91,2 % y 65,4 % respectivamente. Se empleó adsorción en columnas empacadas de carbón activado para la remoción de color (70,7 %). En el segundo caso se empleó la fitorremediación alcanzando porcentajes de remoción para los SS, DQO y color de 2,9 %, 56,8 %, 50,3 % respectivamente. En la adsorción con carbón activado la concentración de los mismos parámetros disminuyó en un 85,9 %, 73,9 % y 92,7 % respectivamente.

Palabras clave: fitorremediación, electrocoagulación, lixiviados de vertederos

Abstract: The aim of this paper is to design a treatment system for leachate generated at El Inga landfill, which have high contents of BOD5 (3 000–4 000 mg/L), COD (700–6 000 mg/L), suspended solids (200–340 mg/L) and color (800 to 5 546 mg Pt-Co/L). For this purpose, electrocoagulation process was used as the primary treatment with 8 aluminum electrodes during 20 min of operation, with a current density of 53 A/m². Phytoremediation applied to a vertical subsurface flow wetland system as secondary treatment and adsorption on activated carbon as tertiary treatment. The combination of these processes reduced the level of pollutant to values accepted by Ordinance 213 of the Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (MDMQ) for liquid discharges. Two leachate samples were treated, a raw leachate and a leachate that had been processed with activated sludge treatment and membrane bioreactors. In raw leachate electrocoagulation process high removals were achieved for suspended solids (78,6 %), BOD5 (73,5 %), COD (40,4 %) and color (79,4 %). In wetland system (2,5 L/day) rates of contaminant removal are 13,2 %, 91,2 % and 65,4 % respectively. Adsorption was used in packed columns of activated carbon for removal of color with a value of 70,7 %. For detoxification of pretreated leachate in the landfill was used phytoremediation with removal percentages for SS, COD and color of 2,9 %, 56,8 %, 50,3 %, respectively. In adsorption with activated charcoal concentration decreased 85,9 %, 73,9 % and 92,7 % respectively.

Keywords: phytoremediation, electrocoagulation, landfill leachate.

1. INTRODUCCIÓN

Los lixiviados que se generan en un relleno sanitario son uno de los líquidos más contaminados y contaminantes que se conozcan. Los lixiviados presentan altos contenidos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos y de sustancias tóxicas como metales pesados, entre otros compuestos. Los lixiviados pueden contaminar aguas subterráneas, aguas superficiales y suelos, por esta razón los rellenos sanitarios se impermeabilizan, se drenan y sus lixiviados recogidos se tratan empleando la combinación de varios métodos. (Giraldo, 2001)

La depuración de lixiviados a través de los distintos sistemas de tratamiento convencionales involucran un alto costo tanto en construcción como en operación (procesos aeróbicos 20 \$/m³, osmosis inversa 10 \$/m³, procesos biológicos 45 \$/m³). A pesar de esto, en muchos casos los porcentajes de remoción de contaminantes son deficientes, por este motivo se han diseñado métodos alternativos de depuración, de bajo costo y alta eficiencia como son los humedales artificiales, la electrocoagulación y la adsorción con carbón activado (Giraldo, 2001)

El tratamiento de los lixiviados es uno de los problemas más desafiantes en la problemática de la depuración de las aguas residuales y por tanto es imperativo establecer métodos de tratamiento de efluentes generados en rellenos sanitarios que consideren la tecnología existente en el país y traten en su real dimensión la problemática de este tipo de contaminación en el Ecuador.

En este trabajo se plantea el uso de la electrocoagulación como tratamiento primario, la fitorremediación en humedales artificiales como proceso secundario y la adsorción con carbón activado en columnas rellenas como fase de acabado para la depuración de lixiviados del relleno sanitario. El Inga dispone actualmente de un sistema de tratamiento que no ha reportado los resultados esperados según informe de la Empresa Metropolitana De Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP, 2011). El presente estudio se realizó tanto para el lixiviado crudo, como para un lixiviado que ha tenido tratamientos (lodos activados y bioreactores de membranas). Por lo tanto, los resultados para el efluente pre-tratado permitirán mantener los procesos ya existentes y mejorarlos mediante el acondicionamiento de dos nuevos procesos como la fitorremediación y la adsorción.

2. METODOLOGIA

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron dos tipos de lixiviados procedentes del relleno sanitario El Inga, estos son: a) lixiviado crudo y b) lixiviado que ya había recibido tratamientos (lodos activados y bioreactores de membranas). Se busca diseñar un sistema de depuración para los dos tipos de lixiviados que tienen altas concentraciones de parámetros como DBO₅, DQO, sólidos totales, color, coliformes, entre otros. Para este propósito se emplean procesos como la electrocoagulación, la fitorremediación (con humedales artificiales) y la adsorción en carbón activado para reducir la

concentración de los contaminantes a valores menores a los establecidos por la norma técnica de la ordenanza 213 del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Un resumen de los procedimientos utilizados se presenta a continuación

2.1. Caracterización de efluentes

Las muestras se tomaron en las piscinas de recolección de lixiviados del relleno sanitario El Inga, mediante la normativa técnica ecuatoriana NTE INEN 2 169:98. Con las muestras recolectadas se realizaron análisis de: DBO₅ (APHA 5210 B), DQO (APHA 5220 D), sólidos suspendidos (APHA 2540 D), sólidos totales disueltos (APHA 2540 C), sólidos totales (APHA 2540 B), color (APHA 2120) y coliformes fecales (APHA 9222 D). La concentración de metales pesados (Cd, Cu, Cr, Ni, Ag, Fe, Pb, Ba, As, Se, Hg y Co) se analizó con el equipo de Absorción Atómica AAAnalyst 300 (Perkin Elmer).

2.2. Ensayos de electrocoagulación

Para tratar el lixiviado se realizaron ensayos con placas de aluminio (electrodos) de distintos tamaños (7,5x5x0,1 cm y 15,5x6x0,3 cm), para volúmenes de 1 y 3 L de lixiviado respectivamente. Se emplearon intensidades de corriente de 1,5 y 4 A, aplicadas a los electrodos de aluminio (6 y 8 placas). Los ensayos se realizarán durante 90 min y se recolectarán muestras cada 10 min para evaluar la variación de concentración de sólidos suspendidos y color en un equipo HACH DR 2800. Estos ensayos permitieron determinar el tiempo requerido para el proceso y el número de electrodos para la aplicación de la electrocoagulación como método de tratamiento primario del lixiviado.

El cálculo para la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos después del tratamiento de electrocoagulación se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$CR(\%) = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad (1)$$

Donde, C_o y C_f son las concentraciones de las aguas residuales antes y después de la electrocoagulación, respectivamente, en mg/L.

2.3. Fitorremediación

2.3.1. Hidroponía

Se emplearon dos métodos de cultivo i) en agua y ii) en sustrato inerte (grava-piedra pómez), para el desarrollo de pastos (miel, elefante, ryegrass y dallis), alfalfa y maní forrajero. Para el cultivo en agua se utilizó semilla sexual (proveniente de la flor) colocada en esponjas de poliuretano (2x2x2 cm) hasta su germinación (4-10 días). Una vez alcanzado un tamaño aproximado de raíz 15 cm y tallo 30 cm se trasplantó al medio de cultivo final (grava-piedra pómez). El cultivo de maní forrajero y pasto elefante se realizó con material vegetativo (injertos de plantas desarrolladas) directamente en la grava-piedra pómez. Se usaron los mismos tiempos de germinación que en el cultivo

en agua. La nutrición de las plantas comienza cuando la segunda hoja verdadera aparece. Se utilizaron soluciones nutritivas (K 300-500 mg/L, N 150-225 mg/L, P 30-45 mg/L, Ca 150-300 mg/L, Mg 40-50 mg/L, Zn 0,05-0,1 mg/L, Mn 0,5-1 mg/L, Mo 0,03-0,05 mg/L, B 0,3 -0,5 mg / l, Fe 2-4 mg/L), sugerido por Paladines, 2010 y Gilsanz, 2007. De este estudio se determinaron las especies mejor adaptadas a este tipo de cultivo.

Para definir las especies de plantas más resistentes, así como aquellas con mayor capacidad de absorción de metales pesados, se realizaron ensayos con soluciones sintéticas de Cu y Zn de 5 y 10 mg/L y DQO de 4000 mg/L. Este tratamiento se llevará a cabo hasta que los niveles de concentración de los metales y DQO sean menores a los establecidos en la normativa ambiental (Cu: 1 mg/L; Zn: 2 mg/L; DQO: 123 mg/L), (MDMQ, 2007). El análisis del contenido remanente de metales pesados se realizará por absorción atómica para las soluciones sintéticas tratadas. Al finalizar el proceso de fitorremediación, se determinó la cantidad de metales presentes en la raíz, en las hojas y tallos por disgregación ácida y absorción atómica.

2.3.2. Humedales artificiales

Se llevó a cabo el dimensionamiento y la implantación de dos humedales de flujo sub-superficial vertical, que se desarrollaron con las dos especies de plantas que presentaron mayor resistencia y mejor adaptación a las soluciones que contenían metales pesados. Las pruebas se realizaron con los dos tipos de lixiviado estudiados, que han sido tratados previamente por electrocoagulación, en este caso se usa un flujo de 20 L/día.

Con el fin de diseñar humedales construidos de flujo vertical, se consideró que estos se comportan como reactores de flujo pistón ideales en los cuales los contaminantes son degradados siguientes modelos cinéticos de primer orden. (García y Corzo, 2008). La ecuación siguiente permite determinar la superficie de los humedales:

$$A_s = \frac{Q}{k_v * \epsilon * h} * \ln \left[\frac{C_o}{C_f} \right] \quad (2)$$

Donde, A_s es la superficie de los humedales (m^2); Q es el flujo de entrada ($m^3/día$); k_v es la constante cinética ($día^{-1}$), ϵ es la porosidad, h es la profundidad de los humedales. Para determinar las dimensiones se utilizó la relación $L:W = 2:1$

2.4. Adsorción en columnas de carbón activado

Como método de depuración final se empleó una columna de 5 cm de diámetro y 57 cm de altura del lecho, que se llenó con 300 g de carbón activado. El efluente resultante del proceso de fitorremediación, ingresa a la columna con un caudal de 0,04 mL/h durante 2 h. Una muestra de 2 L fue tomada al final del ensayo para el análisis de los parámetros evaluados.

2.5. Esquema del sistema de tratamiento

Con base en los mejores resultados obtenidos para los diferentes ensayos realizados (electrocoagulación, fitorremediación y adsorción) se definió el esquema de tratamiento para 120 $m^3/día$ de lixiviado de El Inga. La evaluación económica preliminar se obtuvo de los costos involucrados en la implementación de un reactor de electrocoagulación, un sistema de humedales artificiales y columnas de carbón activado, bajo el criterio de que el efluente final debe cumplir con las condiciones establecidas en la Ordenanza 213 del MDMQ para descargas líquidas.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de Lixiviados

En la Figura 1 se presentan los dos lixiviados del relleno sanitario. La primera muestra corresponde al efluente contenido en la piscina N°2, el cual no ha recibido ningún tipo de tratamiento (LIXIVIADO 1). La segunda pertenece al lixiviado almacenado en la piscina N°18, el cual ya ha sido tratado por medio de lodos activados y bioreactores de membrana en las instalaciones de El Inga (LIXIVIADO 2).

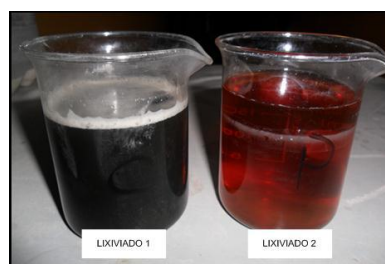


Figura 1. Lixiviados del relleno sanitario El Inga

En la Tabla 1 se presentan los resultados principales de los análisis de las muestras de lixiviados estudiados y su comparación con la normativa ambiental vigente.

Tabla 1. Caracterización de los lixiviados

PARÁMETRO	UNIDAD	LIX. 1	LIX. 2	Ordenanza 213
Coliformes fecales	NMP/100m L	23	3,6	Remoción > 99 %
Color	mg Pt-Co/L	5 546	1 243	Inapreciable en dilución 1/20
DBO ₅	mg/L	3 675	<2	70
DQO	mg/L	6 750	710	123
pH	-	8,14	8,81	5 – 9
Sólidos sedimentables	mg/L*h	<0,1	<0,1	1
S.Suspendidos	mg/L	710	204	100
Sólidos totales	mg/L	12 988	10 616	1600
Cobre	mg/L	1,08	1,08	1,0
Plomo	mg/L	0,9	0,6	0,2
Zinc	mg/L	2,41	2,41	2,0

Casi todos los parámetros analizados son superiores a los establecidos en la normativa ambiental vigente. Con los valores de DQO y DBO₅ se determinó la relación DBO₅/DQO que nos permite definir de manera aproximada que tipo de lixiviado es cada uno. Para el caso del lixiviado 1, la relación DBO₅/DQO es de 0,54. Este valor según Kurniawan et al., 2005, indica que es un lixiviado joven por lo cual presenta concentraciones medianas de carboxilos y es susceptible de biodegradación, por lo tanto los procesos biológicos de remoción de carga orgánica trabajaran con buenos resultados. En el caso del lixiviado 2, la relación es de 0,0028, lo que señala que es estable, por tanto presenta compuestos que ya no son biodegradables. Este efluente al ser más estable es más difícil de tratar.

3.2. Ensayos de electrocoagulación

3.2.1. Efectos del tiempo de tratamiento

En la Figura 2 se presenta el efecto del tiempo de tratamiento en la remoción de sólidos suspendidos. En estos ensayos se trabajó con 3 L de lixiviado, aplicada una densidad de corriente de 53 A/m² (I=4 A y A=0,0777 m²) y con su equivalente 1 L con densidad de corriente de 53 A/m² (I=1,5 A y A=0,0230 m²).

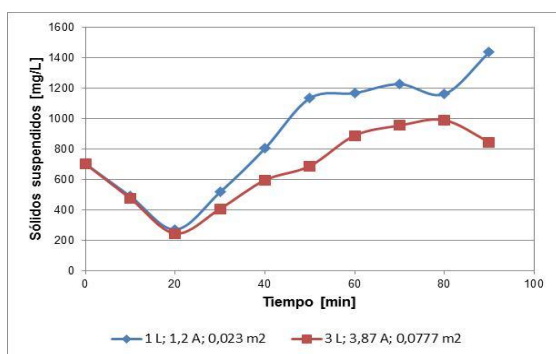


Figura 2. Efecto del tiempo de tratamiento en la remoción de sólidos suspendidos

En la Figura 2 se observa que la electrocoagulación tiene un efecto significativo en la reducción del contaminante, el mayor porcentaje se alcanza al minuto 20 para ambos casos. Para el reactor de 3 L, se alcanzó una remoción del 65 %; mientras que para 1 L, se alcanzó el 61 %. La similitud de las reducciones alcanzadas se debe a que en las dos experiencias se utilizó la misma densidad de corriente (53 A/m²). La cantidad de volumen tratado, en este caso, no afecta el porcentaje de remoción alcanzada siempre que se mantenga el valor de densidad de corriente.

3.2.2. Efecto del número de electrodos

Los ensayos se realizaron con 6 y 8 placas. Los resultados de la Figura 3 muestran una marcada diferencia entre la eficiencia de remoción al trabajar con 6 y 8 electrodos de aluminio después de 90 min. Para la remoción de DQO, se muestra una diferencia de 21 %, para el DBO₅ fue del 23 %, para el color del 76 % y en el caso de los SS fue de 45 %. Los resultados son favorables, con reducciones superiores al

70% para tres de los cuatro parámetros analizados utilizando 8 electrodos. En el caso de los 6 electrodos los porcentajes son bajos con valores inferiores al 50 % en todos los parámetros analizados. Lo cual sugiere una mejor eficiencia utilizando 8 electrodos.

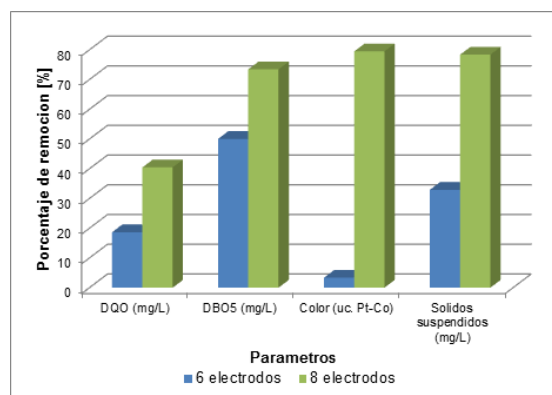


Figura 3. % remoción de DQO, DBO₅, color y SS para 6 y 8 electrodos

Una vez determinados los parámetros requeridos como son número de electrodos (8) y tiempo de tratamiento (20 min), se realizó el procesamiento de 20 L del Lixiviado 1, previo a su ingreso al humedal.

3.3. Fitorremediación

3.3.1. Selección preliminar plantas para fitoremediación

En la Figura 4 se presenta el porcentaje de absorción de cobre, por las distintas especies forrajeras estudiadas.

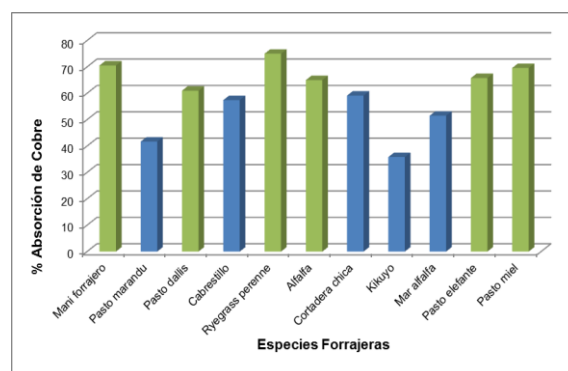


Figura 4. % de absorción de las distintas especies forrajeras utilizando solución sintética de 5 mg/L de cobre

Los mayores porcentajes de absorción de cobre, se dan para seis especies: maní forrajero, pasto dallis, ryegrass perenne, alfalfa, pasto elefante y pasto miel. La especie pasto dallis no presenta un alto porcentaje de absorción; sin embargo, fue seleccionada debido a la facilidad de obtención de la semilla al igual que la alfalfa [Guevara et al., 2009; Quishpe, 2010] y pasto elefante.

Las especies restantes a pesar de pertenecer al mismo tipo de especie muestran remociones menores al 60 %, esto se debe a que cada tipo de planta presenta características diferentes y esto define cuáles son más aptas para la remoción.

3.3.2. Resultados de Hidroponía

Los cultivos hidropónicos se realizaron de acuerdo a la facilidad de obtención de semillas, así para ryegrass, alfalfa, pasto dallis y pasto miel se realiza con las semillas sexuales y cultivo inicial en agua. En el caso de maní forrajero y pasto elefante, la siembra se realizó con material vegetativo.



Figura 5. Cultivos hidropónicos

En la Figura 6 se presentan los porcentajes de absorción de Zn y Cu, respecto al tiempo, por las plantas que presentan una mejor adaptabilidad a las soluciones contaminantes, estas son maní forrajero y pasto elefante cultivadas en grava-piedra pómez y con material vegetativo.

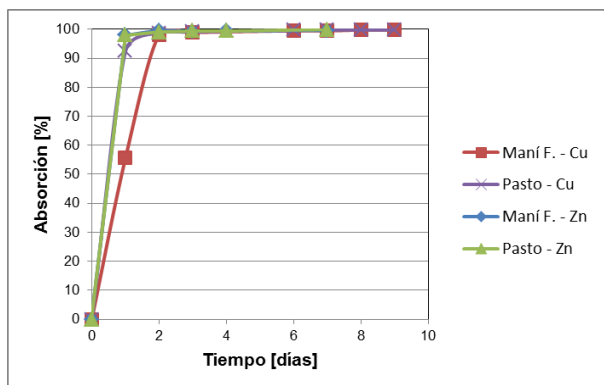


Figura 6. Comparación de la capacidad de absorción de zinc y cobre entre maní forrajero y pasto elefante en función del tiempo

Las plantas de maní forrajero llegan a alcanzar una absorción máxima de 99,8 % para Cu y 99,8 % para el Zn. Las plantas reducen la concentración del contaminante a niveles permitidos por la norma ambiental vigente con valores de 0,20 mg/L de zinc y 0,18 mg/L de cobre a partir del primer y segundo día respectivamente. Las plantas de pasto elefante alcanzan un valor máximo de absorción de 99,8 % para el cobre y 99,9 % para el zinc, en este caso también las plantas reducen la concentración del contaminante a niveles permitidos por la normativa vigente con valores de 0,75 mg/L de cobre y 0,20 mg/L de zinc a partir del primer día.

3.3.3. Humedales artificiales

Los humedales debido a su principio funcionan con la ayuda de la gravedad, por tanto fue necesaria la construcción de una estructura para aprovechar este fenómeno. El diseño de humedales a nivel piloto se realizó con una pendiente de

0,07 m, establecida de acuerdo a los criterios de pérdida de carga mencionados por Sánchez, 2010. El material exterior usado para la estructura es acero al carbono recubierto con pintura anticorrosiva para evitar su deterioro, los humedales son cajas rectangulares de polipropileno comercial, con perforaciones laterales que permiten el flujo del fluido, como se muestra en la Figura 7.

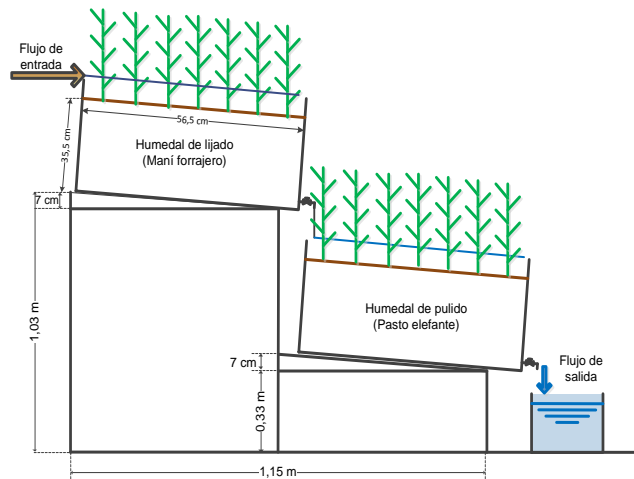


Figura 7. Esquema de humedal construido en el Departamento de Metalurgia Extractiva

El esquema de distribución de las capas del medio granular en los humedales artificiales se muestra en la Figura 8. La instalación completa del sistema de tratamiento por fitorremediación mediante humedales artificiales ocupa un área superficial total de 1,28 m². En cada humedal se tienen 40 plantas de cada especie (maní forrajero y pasto elefante)

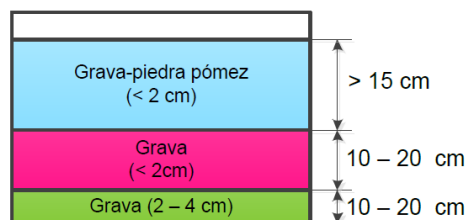


Figura 8. Distribución de capas del medio granular en el humedal

En el humedal construido se procesaron los dos lixiviados (crudo y pre-tratado). El lixiviado crudo fue previamente depurado por electrocoagulación y el lixiviado pre-tratado en el Inga se lleva directamente a este proceso.

En la Tabla 2 se detallan los resultados obtenidos luego del tratamiento en el humedal para estos dos efluentes. En el Lixiviado 1, previamente tratado por electrocoagulación se tiene que en la DBO₅ y DQO hay una eliminación de 91,6% y 65,4% respectivamente. Lo cual podría indicar que las plantas han utilizado parte de la carga contaminante (compuestos nitrogenados, sulfurados, etc.) como nutrientes para su desarrollo. Para los SS, ST y sólidos totales disueltos las remociones son similares, con valores alrededor del 15%. Lo cual indica que la sedimentación no está siendo efectiva;

sin embargo, para los SS este porcentaje es suficiente para obtener una concentración cercana a lo estipulado en la normativa (100 mg/L). Los metales pesados Cu y Zn, presentan remociones de 92,6 % y 91,9 % respectivamente, los cuales son previsible debido a los resultados obtenidos con soluciones sintéticas. Sus concentraciones disminuyen hasta los valores establecidos en la norma ambiental (1 mg/L para Cu y 2 mg/L para Zn). El color no se encontraba bajo lo requerido en la normativa por lo cual se realizó un proceso adicional de adsorción en carbón activado.

Tabla 2. Remoción de contaminantes por fitorremediación para el lixiviado 1 (luego de la electrocoagulación) y para el lixiviado 2

PARÁMETRO	% REMOCIÓN LIXIVIADO 1 (después de la electrocoagulación)	% REMOCIÓN LIXIVIADO 2
Coliformes fecales	---	44,4
Color aparente	--	50,3
DBO ₅	91,6	---
DQO	65,4	56,8
Sólidos suspendidos	13,2	2,9
Sólidos totales	16,3	38,4
Sól. totales disueltos	16,3	40,0
Cobre	92,6	94,4
Zinc	91,9	98,3

Para el lixiviado 2, la DQO, la degradación de materia orgánica por presencia de oxígeno alrededor de la raíz ó por absorción en las plantas arroja resultados de remoción cercanos al 60 %, valor semejante al obtenido para el lixiviado 1 (65 %). Con lo cual se comprueba la capacidad fitorremediadora de las dos especies cuando se tiene compuestos orgánicos. La eliminación de sólidos totales y disueltos alcanza valores alrededor del 40 % mientras que para los SS se tiene una remoción del 2,9 %, ocasionada por la baja concentración inicial, por tanto, ya no se retienen en el medio granular en cantidades apreciables como los ST y disueltos. Los resultados para los metales pesados son previsible con remociones superiores al 90 %, lo cual indica la capacidad de absorción de metales por parte de las plantas. Las concentraciones obtenidas están bajo lo estipulado en la normativa ambiental (1 mg/L para Cu; 0,2 mg/L para Pb y 2 mg/L para Zn).

Se observa, al final de la prueba, que los parámetros evaluados no se encuentran bajo los límites permisibles de la norma ambiental vigente, por lo cual se decidió emplear también con este efluente la adsorción en carbón activado teniendo como parámetro de mayor influencia el color.

3.4. Adsorción en columnas de carbón activado

Para este proceso se utilizó una columna con 300 g de carbón activado y un caudal de ingreso de 2,5 L/h. En las Tabla 3 se presentan los resultados finales para el efluente luego de la depuración con carbón activado. La remoción del

color alcanza valores de 70 %, similares a los obtenidos por Méndez et al., 2009 (60 %), lo cual indicaría la reducción de la materia orgánica remanente que es la que proporciona la coloración. Esto se verifica en los parámetros de DQO y DBO₅, los cuales presentan valores de 90,3 % y 15,5 % respectivamente. Por otro lado, los sólidos totales y disueltos presentan remociones con valores alrededor del 85 %. Estos resultados a diferencia de los obtenidos para los demás parámetros son alcanzados después de realizase 7 recirculaciones del efluente a través de la columna.

Tabla 3. Remoción de contaminantes con carbón activado del lixiviado 1 tratado previamente por electrocoagulación y fitorremediación

PARÁMETRO	% REMOCIÓN
Color aparente	70,7
DBO ₅	15,5
DQO	90,3
Sólidos suspendidos	27,3
Sólidos totales	85,1
Sólidos totales disueltos	86,3

En la Figura 8 se puede observar el aspecto de los diferentes efluentes, desde el lixiviado 1 (inicial), seguido de los resultantes luego de los procesos de electrocoagulación, fitorremediación y adsorción. El lixiviado crudo presenta una coloración oscura la cual se ve drásticamente reducida (remoción del 79 %) al pasar a través del tratamiento primario. En esta etapa presenta un color café claro debido a la eliminación de la mayor parte de sustancias suspendidas. Al final de tratamiento secundario, el color prácticamente no presenta variación. Los resultados cuantitativos muestran un aumento en su valor de 1140 a 1990 mg Pt-Co/L debido a la formación de compuestos húmicos. Es en el proceso de acabado donde se retiró todo el color del lixiviado, con lo cual se obtuvo un efluente cuyas características permiten su descarga a los cauces de agua, según la normativa ambiental para descargas líquidas presentadas en la Ordenanza 213.



Figura 8. Variación de color durante los tratamientos

En la Tabla 4 se presentan los resultados del tratamiento con carbón activado del lixiviado 2 previamente depurado por fitorremediación. El mayor porcentaje de adsorción se obtuvo para el color (92,7 %) conjuntamente con la DQO (73,9 %) y sólidos suspendidos (85,9 %), con estas remociones se alcanzó los valores estipulados en la

normativa (inapreciable en dilución 1/20 para color, 123 mg/L para DQO y 100 mg/L para SS). Por otro lado, los sólidos totales y disueltos presentan remociones con valores que rodean el 75 %. Estos resultados a diferencia de los obtenidos para los otros tres parámetros son alcanzados después de realizarse 5 recirculaciones del efluente a través de la columna.

Tabla 4. Remoción de contaminantes de lixiviado 2

PARÁMETRO	% REMOCIÓN
Color aparente	92,7
DQO	73,9
Sólidos suspendidos	85,9
Sólidos totales	76,6
Sólidos totales disueltos	74,4

En la Figura 9 se puede observar el aspecto de los diferentes efluentes, desde el lixiviado 2 (inicial, pre-tratado por medios biológicos en El Inga), seguido de los resultantes luego de los procesos de fitorremediación y adsorción.

A diferencia del lixiviado 1, este ha recibido un tratamiento in situ con lodos activados y biorreactores de membrana por lo cual el color inicial que presenta es un café-pardo. Después de la fitorremediación, el aspecto visual del lixiviado no difiere mucho del inicial; sin embargo, en forma cuantitativa se señala una remoción del 50 %. Al igual que para el lixiviado 1, la mayor eliminación del color se tuvo en el proceso de adsorción en carbón activado (92,7 %). Al finalizar el tratamiento de este efluente presentó las condiciones para ser descargado en cauces de agua, según lo estipulado en la normativa ambiental para descargas líquidas de la Ordenanza 213 del MDMQ.

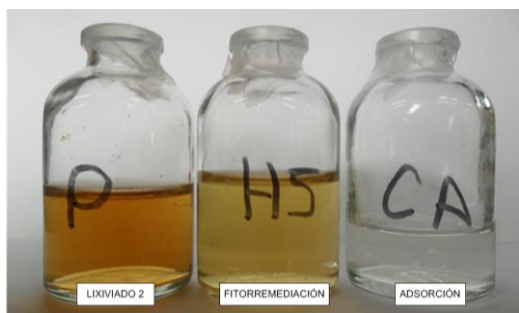


Figura 9. Variación de color durante los tratamientos

3.5. Esquema del sistema de tratamiento

En la Figura 10 se observa el esquema del sistema de tratamiento que se sugiere para depurar el lixiviado crudo. Esta propuesta incluye los procesos de electrocoagulación, la fitorremediación y la adsorción.

La combinación de estos procesos permite obtener un efluente que cumple los parámetros establecidos en la norma ambiental vigente.

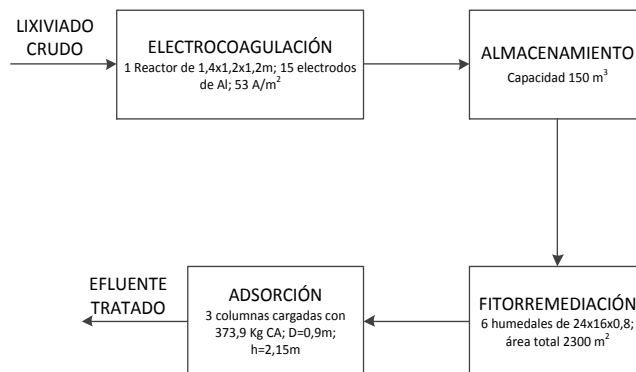


Figura 10. Esquema de tratamiento para el lixiviado crudo

En la Figura 11 se presenta un diagrama esquemático del proceso a aplicar para el caso del lixiviado crudo. Se requiere una celda, seis humedales y tres columnas de carbón activado.

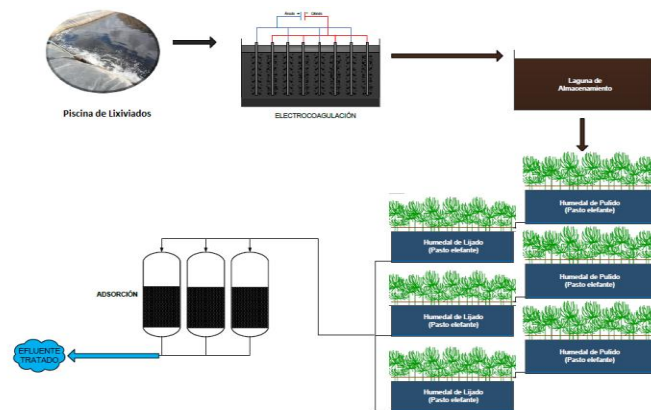


Figura 11. Diagrama esquemático de tratamiento para el lixiviado crudo

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los costos de implementación del sistema de depuración propuesto.

Tabla 7. Costos de implementación de tratamiento Lixiviado 1

ÍTEM	COSTO [\$]
ELECTROCOAGULACIÓN	
Material del reactor	1 200,00
Electrodos (15)	150,00
Energía eléctrica [\$/día]*	13,56
Electrodo disuelto [\$/120 m ³]*	98,53
SUBTOTAL 1	1 350,00
FITORREMEDIACIÓN	
Excavación (1 800 m ³)	4 232,00
Grava (2 944 tn)	38 548,00
Impermeabilización (2 688 m ²)	10 080,00
Plantas (24 000)	2 400,00
Bombeo y estructuras de control	8 337,50
SUBTOTAL 2	63 597,50
COLUMNAS DE CARBÓN ACTIVADO	
Material de columnas y bombeo	502,00
Carbón activado (1 121,7 kg)	1 559,16
SUBTOTAL 3	2 061,16
COSTO TOTAL	67 008,66

*Costos de operación

En la Figura 12 y la Figura 13 se observa el esquema del sistema de tratamiento para detoxificar el lixiviado 2 (pre-tratado biológicamente). En este caso se requiere la aplicación de procesos de fitorremediación y adsorción con carbón activado.

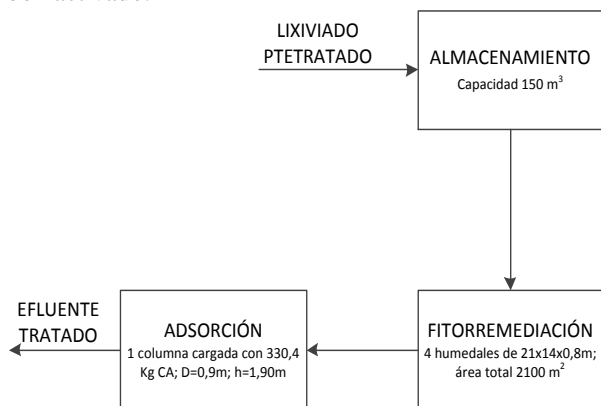


Figura 12. Esquema de tratamiento para el lixiviado 2 (pretratado biológicamente en El Inga)

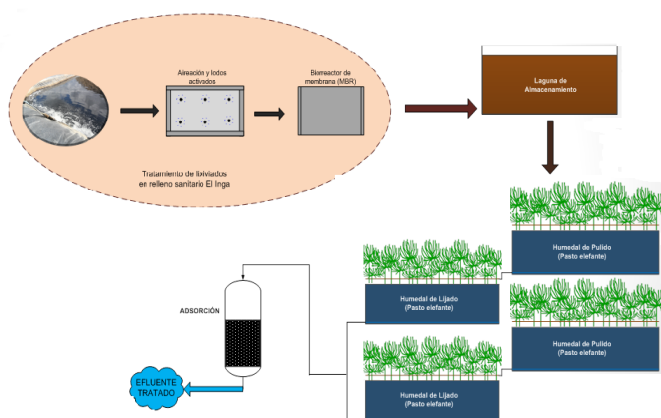


Figura 13. Diagrama esquemático de tratamiento para el lixiviado 2

En la Tabla 8 se presentan los costos asociados con esta implementación, que ascienden a 36538 dólares.

Tabla 8. Costos de implementación

ÍTEM	COSTO [\$]
FITORREMEDIACIÓN	
Excavación (960 m ³)	2 208,00
Grava (1 536 tn)	20 112,00
Impermeabilización (2 100 m ²)	7 875,00
Plantas (12 000)	1 200,00
Bombeo	2 250,00
Estructuras de control	2 100,00
SUBTOTAL 1	35 745,00
COLUMNAS DE CARBÓN ACTIVADO	
Material de columna	84,00
Carbón activado (330,4 kg)	459,26
Bomba	250,00
SUBTOTAL 2	793,26
COSTO TOTAL	36 38,26

4. CONCLUSIONES

La depuración de lixiviado sin tratamiento (crudo) se realizó con un sistema que constó de tres etapas: electrocoagulación, fitorremediación y adsorción. Los porcentajes de remoción para cada etapa se describen a continuación:

PARÁMETRO	ELECTRO	FITO	ADSORCIÓN	FINAL
Color	79,4 %	< 1 %	70,7 %	94,4 %
DBO ₅	73,4 %	91,6 %	15,5 %	98,1 %
DQO	40,4 %	65,4 %	90,3 %	98,0 %
Sólidos suspendidos	78,5 %	13,2 %	27,3 %	86,5 %

El tratamiento del lixiviado crudo tiene un costo por metro cubico de 1,58 USD.

Para el lixiviado pre-tratado se aplicó directamente el proceso de fitorremediación seguido de la adsorción debido a su baja concentración de contaminantes. Los porcentajes de remoción para cada etapa se describen a continuación.

PARÁMETRO	FITO	ADSORCIÓN	FINAL
Color	50,3 %	92,7 %	96,4 %
DQO	56,8 %	73,9 %	87,7 %
Sólidos suspendidos	2,9 %	85,9 %	86,3 %

El tratamiento del lixiviado crudo tiene un costo por metro cubico de 0,36 USD.

5. REFERENCIAS

- [1] García, J. y Corzo, A., 2008, "Depuración con humedales construidos", Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, pp. 59-93.
- [2] Empresa Metropolitana de Gestion Integras de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP), 2011, "Tratamiento de lixiviados en El Inga", Informe de tratamiento de lixiviado.
- [3] Municipio del Distrito Metropolitano de Quito MDMQ, 2007, "Norma Técnica que regula los contaminantes asociados a descargas líquidas industriales, comerciales y de servicios".
- [4] Paladines, O., 2004, "Principales recursos forrajeros para las tres regiones del Ecuador", Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, pp. 38-43.
- [5] Gilsanz, J., 2007, "Hidroponía", INIA, Montevideo, Uruguay, p. 13-15.
- [6] García, J. y Corzo, A., 2008, "Depuración con humedales construidos", Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, pp. 59-93.
- [7] Guevara, A., De la Torre, E., Villegas, A. y Criollo, E., 2009, "Uso de la rizofiltración para el tratamiento de efluentes líquidos de cianuración que contienen cromo, cobre y cadmio", Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S1 (2), 871.
- [8] Quishpe, Á., 2010, "Tratamiento de efluentes líquidos de la industria del curtido, mediante precipitación química, adsorción en carbón activado y rizofiltración", Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador, pp. 56-70.