

Comparación de Métodos de Tratamiento de los Lixiviados Generados por la Disposición No Controlada de Polvo de Acería Sobre Suelo Agrícola

Ruiz G.*, De la Torre E.*, Guevara A.*

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

Resumen: En este trabajo se presenta la evaluación de la contaminación generada por la presencia de polvo de acería (considerado residuo peligroso Clase I por la EPA), depositado directamente sobre suelo agrícola y alternativas para el tratamiento de los lixiviados generados. Con este fin, para la obtención de los lixiviados se instalaron columnas de vidrio de 6 cm de diámetro, en las que se colocó una capa de 15 cm de polvo de acería sobre 50 cm de suelo. Las columnas se irrigaron con flujos constantes de 0.15 mL/h de agua para simular la precipitación promedio de la serranía ecuatoriana. Muestras de los lixiviados generados se recolectaron periódicamente durante cuatro meses para determinar la concentración de metales pesados, encontrándose que su contenido de cromo y arsénico superaba el límite máximo permitido por la normativa TULAS para su descarga a cuerpos de agua dulce. Posteriormente se evaluaron las siguientes alternativas de depuración del efluente: i) estabilización del lixiviado con cemento Portland y cal, ii) depuración mediante procesos combinados de fitorremediación y adsorción, y iii) recuperación de zinc con electrolisis previo al tratamiento del lixiviado con métodos convencionales. La evaluación económica preliminar de la aplicación de estos procesos resultó en costos de operación de US\$ 401.7, 0.4 y 11.8 por metro cúbico de lixiviado tratado, respectivamente.

Palabras clave: lixiviado, suelo, polvo de acería, contaminación

Abstract: This paper addresses the evaluation of the pollution generated by the presence of steel dust (considered hazardous waste Class I by the EPA) deposited directly on an agricultural soil and treatment alternatives for decontamination. For this purpose, in order to obtain leachates, glass columns (6 cm diameter), where were placed 15 cm of steel dust on 50 cm of soil, were installed. The columns were irrigated with constant fluxes of water equivalent to the average precipitations of the Ecuadorian Highland region (0.15 mL/h). Samples of the generated leachates were recollected weekly during four months to determinate the heavy metals content. Thereby, it was found that the effluent exceeded the maximum permitted concentration of chromium and arsenic in Ecuador for may be discharged into freshwater bodies. Afterwards, the following depuration methods of the obtained liquid were employed: i) stabilization of the polluted leachate with Portland cement and lime, ii) depuration of the contaminated liquid with a combination of the phytoremediation and adsorption processes, and iii) recuperation of attractive metals with electrolysis previous the leachate treatment for conventional methods. The preliminary economic evaluation of each procedure resulted in operating costs of \$401.7, \$0.4 and \$11.8 respectively.

Keywords: leachate, soil, steel dust, pollution, stabilization

Artículo recibido el XXX marzo, 2014; revisado XX marzo de 2014.

.La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PIS - 38 - 2012:

"Remediación de los suelos contaminados con metales pesados como Cu, Zn, Cr, Pb, Cd, Hg usando métodos electrocinéticos", que se ejecutó en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

1 INTRODUCCIÓN

En el proceso de fusión y afino de acero se generan cenizas volantes y residuos sólidos que se denominan polvos de acería. Este material contiene principalmente hierro, zinc y plomo y un tamaño de partícula inferior a 40 micras, por esta razón es catalogado como residuo peligroso Clase I en la EPA. Actualmente los polvos de acería no se disponen de forma controlada o evitando el contacto directo con el suelo. En Lasso, una región agrícola ecuatoriana, por ejemplo, el polvo de acería que se genera en las plantas de reciclaje de chatarra se dispone como relleno en quebradas, lo cual constituye una práctica inadecuada, debido a la probable lixiviación de los metales pesados por el agua de lluvia o por los ácidos generados o por los microorganismos presentes en el suelo, ocasionando percolación de los mismos hasta alcanzar el manto freático de la zona. [1] Además el desecho está expuesto al aire libre, y es transportado por el viento hasta la superficie de los suelos cultivables del área.

La oxidación ambiental de los metales expuestos a la intemperie da lugar a la disolución de los mismos y a la acidificación del suelo, mientras que el movimiento del material no consolidado afecta aguas superficiales y subterráneas. La contaminación del suelo con metales pesados es una de las problemáticas más grave, pues éstos son tóxicos, generalmente persisten en el medio natural durante décadas y su eliminación es sumamente difícil a consecuencia de su fuerte retención en los puntos de intercambio de este sistema. [2,3,4].

En general, el polvo de acería es un residuo tóxico, debido a su alto contenido de metales pesados y a su tendencia a generar *lixiviados* de elevada alcalinidad. Consecuentemente la disposición de este desecho peligroso sobre el suelo amenaza con la contaminación de éste y la del agua. [5]. Se denomina lixiviado al líquido resultante de la percolación de un fluido a través de cualquier material permeable, arrastrando gran cantidad de los componentes presentes en el sólido que atraviesa [6]. Normalmente el agua que entra en contacto con un residuo sólido peligroso recoge una importante cantidad de los componentes que lo conforman, quedando muy contaminada. [7].

Existen algunas alternativas de tratamiento de este tipo de lixiviados que contienen metales pesados, entre las cuales se pueden citar las siguientes:

- i) la técnica de fitorremediación, que emplea plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar, convertir y degradar contaminantes. [8],
- ii) la encapsulación de los contaminantes en una matriz sólida, que es una de las prácticas más empleadas para el tratamiento de residuos sólidos potencialmente peligrosos a disponerse en rellenos sanitarios [9]. Esta alternativa es la más difundida en nuestro país, pues se considera una de las más económicas y sencillas de aplicar
- iii) la valorización de lixiviados afectados con polvo de acería para la recuperación de metales valiosos como el

plomo y el zinc también es una opción interesante. Entre los tratamientos que se pueden aplicar para este fin están los métodos electroquímicos, los cuales aprovechan los procesos de óxido - reducción para que la especie de interés se deposite en cátodos que posteriormente se someterán a procesos pirometalúrgicos de fusión. [10,11]

En el presente trabajo se busca evaluar la aplicación de los métodos convencionales y no convencionales señalados, para el tratamiento de los lixiviados generados por polvo de acería que son percolados a través de suelo agrícola a causa de la distribución no controlada de estos residuos peligrosos, una vez que el problema ambiental de contaminación a causa de la presencia de dichos lixiviados lamentablemente está dado. Además se determina la alternativa con mayor factibilidad de aplicación industrial con base en los costos de cada tratamiento.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la metodología se procedió con la recolección y caracterización de muestras de suelo y polvo de acería. Se realizan ensayos en columna para la producción, recolección y caracterización de los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través del suelo; y la estabilización de éstos con cemento Portland y cal. Adicionalmente se compararon las alternativas de tratamiento de estos lixiviados desde el punto de vista económico.

2.1 *Recolección y caracterización de las muestras de suelo y polvo de acería*

Se recolectó una muestra representativa de 15 kg de polvo de acería (residuo industrial) y 50 kg de suelo no afectado por contaminación industrial en la zona agrícola aledaña Cuchitingue-Latacunga, empleándose en ambos casos el método de muestreo aleatorio simple. Las muestras obtenidas se caracterizaron física, química y mineralógicamente, determinándose las siguientes propiedades: densidad real y aparente, porosidad, humedad, pH, conductividad, poder retentivo de agua y granulometría, además del contenido total de: Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Pb y Zn por absorción atómica (equipo Perkin Elmer Analyst 300) y la concentración de materia orgánica en el suelo agrícola por el método estandarizado de Walkley - Black. El análisis mineralógico se efectuó por difracción de rayos X (equipo Bruker D8 Advance) en muestras de suelo y polvo de acería. Además se desarrolló una prueba toxicológica TCLP sobre el polvo de acería con base en la metodología EPA 1311.

2.2 *Ensayos en columna para la producción de los lixiviados generados por polvo de acería y percolados a través del suelo agrícola a nivel de laboratorio*

Con el objetivo de obtener lixiviados de polvo de acería, para evaluar el riesgo de contaminación del suelo debido a la percolación de los elementos que componen dicho polvo se procedió a realizar ensayos en columna.

Para ello se dispusieron a modo de lisímetros de drenaje a nivel de laboratorio tres columnas de vidrio de 6 cm de diámetro y 75 cm de altura, diseñadas para recuperar 400 mL de la solución de suelo cada tres días, correspondientes al 25 % de la humedad del suelo cada 9 h según lo definido por Zapata (2002). [12]

En la base de los lisímetros se colocó 5 cm de material filtrante (granito, malla 4 - 6) que permitió el paso del líquido percolado hacia el espacio colector. El espacio colector se conformó de un embudo que conectó la parte más baja de la columna con un vaso de precipitación de 250 mL, mientras que en la cámara de drenaje se colocó 15 cm de polvo de acería sobre 50 cm de suelo. Las columnas se sometieron a flujos constantes de agua potable de 0.15 mL/h, equivalentes a la precipitación media anual de Latacunga de 455 mm. [13]

Como resultado de la percolación del líquido a través de las capas de polvo y suelo en las columnas se obtuvieron lixiviados sobre los cuales se determinaron el caudal, el pH y la concentración de Ag, Al, As, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Na, Hg, Ni, Pb, Si, V, Zn y carbono orgánico total. Los datos obtenidos para cada parámetro se analizaron con el método ADEVA en el programa StatGraphics.

Se debe señalar que el objetivo de este ensayo fue únicamente obtener lixiviados percolados, que serán caracterizados y tratados con fines de depuración, en este caso no se profundiza en el estudio del transporte de fluidos al interior de las columnas, ya que no es el fin de este estudio.

2.3 Estabilización de los lixiviados con cemento Portland y cal

Para estabilizar los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través del suelo se los estabilizó en distintas cantidades (80 mL, 100 mL y 120 mL de agua) con 160 g de cemento Portland y 40 g de cal, siendo el lixiviado el agente de fraguado de la mezcla.

Los sólidos estabilizados se caracterizaron física y químicamente, determinándose las siguientes propiedades: densidad aparente, humedad, pH y conductividad. Adicionalmente se desarrolló una prueba toxicológica TCLP bajo el método EPA 1311 y un ensayo de resistencia a la compresión INEN 1485 sobre los bloques, a fin de determinar si éstos pueden ser depositados en celdas de confinamiento superficiales.

2.4 Comparación de métodos no convencionales de tratamiento de lixiviados

Sobre la base del caudal promedio de los lixiviados obtenidos, se definió el diagrama de tratamiento de dichos lixiviados por estabilización con cemento y cal y se lo evaluó económicamente a fin de definir el costo de operación del sistema con esta alternativa.

Adicionalmente los resultados obtenidos se comparan con otras alternativas de tratamiento como:

- Depuración del lixiviado con fitorremediación y adsorción.

- Valorización del polvo de acería mediante la recuperación de zinc por electrólisis previo al tratamiento del lixiviado por métodos convencionales (precipitación, filtración, adsorción).

De este modo, se dispone de herramientas para la comparación y la definición de la mejor opción de manejo ambiental de los lixiviados generados considerando el punto de vista operativo y la evaluación económica de implementación de las tres alternativas propuestas: estabilización del lixiviado, depuración por fitorremediación y adsorción y recuperación de zinc previo al tratamiento del lixiviado con métodos convencionales.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización física y química del suelo agrícola y el polvo de acería a nivel de laboratorio

Las propiedades físicas y químicas del suelo agrícola y del polvo de acería originales se exponen en la Tabla 1, donde comprueba que el polvo de acería utilizado es un residuo sólido peligroso, pues al menos el 50 % de las partículas que lo componen tienen un diámetro inferior a 100 μ m.

Las propiedades del suelo lo clasifican como agrícola por su contenido de materia orgánica (10.9 %), neutro de acuerdo al pH y normal respecto a la conductividad, mientras que el polvo de acería resulta excesivamente alcalino y ligeramente salino. Asimismo, se advierte que el polvo de acería es 1,3 veces más denso que el suelo agrícola, lo que da lugar a la formación de una capa estable de polvo de acería en la interface de los sólidos.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas iniciales del suelo agrícola y el polvo de acería

Propiedad	Unidad	Suelo	Polvo
Densidad aparente	g/mL	0.8	0.9
Densidad real	g/mL	1.8	2.5
Porosidad	%	52.9	62.8
Humedad	%	8.1	3.6
pH	-	6.9	12.7
Conductividad	μ S/cm	235	344
Contenido de materia orgánica	%	10.9	-
Tamaño de partícula d50	μ m	112.3	94.0

Cuchitingue se ubica en la parroquia Aláquez de Latacunga, en la zona del páramo [14] y por lo tanto, el suelo empleado en el presente trabajo presenta las características de los suelos de páramo de Ecuador, esto es: estructura estable con alta porosidad (53 %), densidad aparente baja menor a 0.9 y humedad alta (8 %) y permanente [15] Así, juegan un papel importante en la captación de agua primaria, la misma que se distribuye a la población. [16].

En la Tabla 2 se presenta la composición del suelo agrícola, determinada por digestión ácida combinada con espectrofotometría de absorción atómica, al inicio y final de los ensayos en columna.

De los elementos acumulados en el complejo del suelo agrícola, el sodio es el que manifiesta en mayor proporción, seguido del calcio, potasio y aluminio. El plomo,

zinc, cromo y cobre, al contrario, se presentan en concentraciones traza, pero se evidencia la incorporación de cromo y zinc al suelo agrícola afectado con polvo de acería. En consecuencia, el polvo de acería aporta al suelo una significativa cantidad de cromo y zinc.

Tabla2. Composición elemental inicial y final del suelo agrícola

Elemento	Unidades	Concentración	
		Muestra inicial	Muestra final
Na	%	43.7	40.2
Ca	%	14.2	13.5
K	%	11.0	10.9
Al	%	6.2	6.1
Pb	mg/kg	315.5	235.1
Zn	mg/kg	313.9	384.9
Cr	mg/kg	89.6	106.9
Cu	mg/kg	78.0	41.6

En la Tabla3 se presenta la composición elemental del polvo de acería antes y después de los ensayos en columna, determinada por digestión ácida y espectrofotometría de absorción atómica.

Tabla3. Composición elemental inicial y final del polvo de acería

Elemento	Unidades	Concentración	
		Muestra inicial	Muestra final
Zn	%	16.4	15.6
Fe	%	9.8	8.7
Cd	%	0.8	0.4
Pb	mg/kg	124.1	106.3

Con base en la composición química del polvo de acería, se comprueba que éste es un residuo peligroso a causa de la presencia de elementos pesados tales como zinc, plomo y cadmio. La especie más abundante es el zinc, un metal con baja solubilidad en el acero y la escoria fundida. Sin embargo, el polvo de acería es un desecho rico en zinc aún después de la percolación del agua potable.

En todos los casos, en la muestra final, se observa una disminución de la concentración de los elementos analizados, lo que indica una disolución parcial y la consecuente contaminación a los suelos que tengan contacto directo con estos materiales.

En la Tabla4 se expone la composición mineralógica de la muestra de suelo original.

Tabla4. Composición mineralógica inicial del suelo agrícola

Mineral	Formula	Contenido (%)
Grupo plagioclasas	(Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	82.0
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	7.0
Cummingtonita	(Mg,Fe) ₇ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	7.0
Magnetita	Fe ₃ O ₄	2.0
Cuarzo	SiO ₂	2.0

La estructura química de la fase sólida del suelo agrícola, determinada por su mineralogía, es rica en silicatos. De éstos, una fracción importante (7%) le corresponde a la arcilla caolinita, un silicato de aluminio que en este caso conforma la fracción activa del suelo, adicionalmente se destaca la presencia de cummingtonita y magnetita.

En la Tabla5 se detalla la composición mineralógica del polvo de acería antes de los ensayos en columna. Se observa que el óxido de zinc en forma de zincita es el mineral más abundante en el polvo de acería ensayado. Entonces, dado que este mineral es relativamente insoluble en agua, no se espera una alta concentración de zinc en los lixiviados resultantes de los ensayos en columna a corto término, los demás minerales en general no presentan alta solubilidad en agua.

En este caso, la toxicidad de este material estará principalmente asociada a la presencia de elementos en traza como Cr, Cd, Pb, Cu, entre otros.

Tabla5. Composición mineralógica inicial del polvo de acería

Mineral	Formula	Contenido inicial (%)
Zincita	ZnO	40.0
Maghemita	Fe ₂ O ₃	33.0
Periclasas	MgO	8.0
Hematita	Fe ₂ O ₃	6.0
Magnetita	Fe ₃ O ₄	5.0
Cuarzo	SiO ₂	4.0
Plagioclasas	(Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	4.0

A continuación en la Tabla6 se presentan los resultados obtenidos para la caracterización toxicológica (prueba TCLP) de la muestra de polvo de acería inicial. En el marco de la normativa EPA 1311, se puede observar que la concentración de cadmio y plomo supera el máximo permisible en 11 y 39 veces respectivamente, de modo que el polvo de acería se clasifica como un residuo tóxico y peligroso que no puede ser depositado libremente sobre el suelo como actualmente sucede. Los elementos como el As, Ba, Cr, Fe, Hg, Ni, Ag y Se se encuentran bajo el límite máximo permisible.

Tabla6. Caracterización toxicológica del polvo de acería conforme al método EPA 1311 [17]

Elemento	Concentración del extracto lixiviado (mg/L)	Límite máximo permisible (mg/L)
As	0.7	5.0
Ba	0.2	100.0
Cd	11.0	1.0
Cr	0.1	5.0
Fe	0.1	30.0
Hg	<0.0001	0.2
Ni	0.4	2.0
Ag	<0.01	5.0
Pb	195.0	5.0
Se	0.1	1.0

* Fuente: (EPA, 2003)

3.2 Caracterización química de los lixiviados generados por una capa de polvo de acería percolados a través de suelo agrícola

En la Figura 1 se presentan los cambios en la concentración (mg/L) de los metales pesados Cr, As y Zn obtenidos a través del tiempo en los ensayos realizados en columnas durante 90 días.

En cada gráfica se puede verificar que la concentración de los elementos analizados en el lixiviado es variable a lo largo del tiempo y que los valores más altos se obtienen al inicio del proceso de percolación, aunque la disolución continúa a lo largo del tiempo.

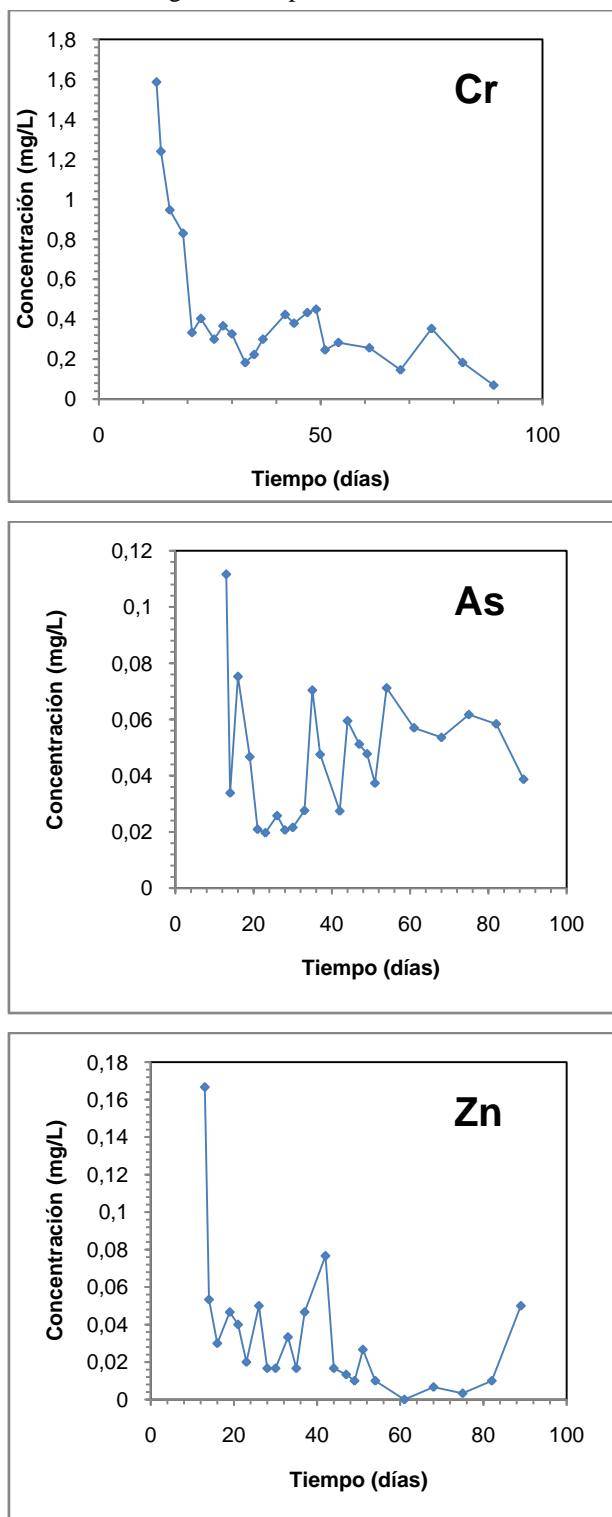


Figura 1. Concentraciones de Cr, As y Zn en los lixiviados generados a partir de polvos de acería en función del tiempo

Si se comparan los valores representados en la Figura 1 con los de la normativa ecuatoriana TULAS (Libro VI, Anexo 1: “Norma de calidad ambiental y de descarga de

efluentes Recurso Agua”), se advierte que el cromo supera el límite máximo establecido de 0.5 mg/L y en una proporción hasta tres veces mayor, durante los primeros 19 días de ensayo, de modo que los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través de suelo no podrían ser descargados directamente a los cuerpos de agua dulce.

Para el caso del arsénico sucede algo similar. Éste supera el valor máximo (0.1 mg/L) al inicio del ensayo y posteriormente su disolución continúa, pero los valores reportados para el análisis del lixiviado no superan el límite mencionado. Respecto al resto de metales pesados como hierro, cobre, níquel, entre otros, la concentración máxima obtenida no se sobrepasa el límite permisible establecido durante el período de cuatro meses en los que se realizaron los ensayos en columna [18]

En la Figura 2 se representa la variación del pH de los lixiviados en función del tiempo del ensayo, además del límite máximo establecido por la normativa TULAS para este parámetro en el caso de efluentes descargados a cuerpos de agua dulce.

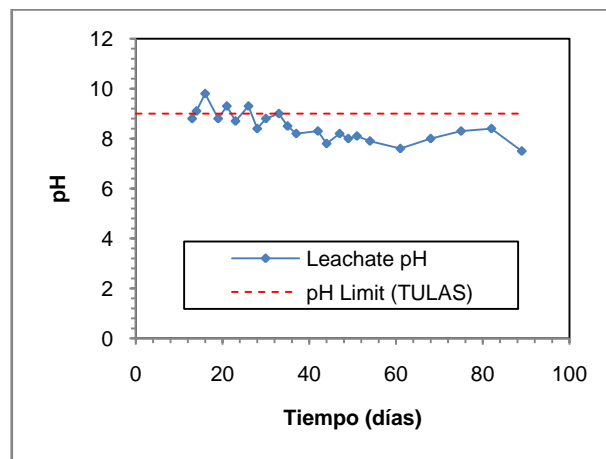


Figura 2. pH de los lixiviados en función del tiempo

En la Figura 2 se advierte que los lixiviados superaron el límite establecido para el pH durante los primeros 30 días, a partir de los cuales este parámetro no sobrepasó el límite máximo. Asimismo, se observa que el pH de los lixiviados no supera el valor de 11, lo cual explica la baja tasa de disolución de elementos como el plomo, el cual es muy soluble en rangos de pH de 12 a 13. Sin embargo, se advierte una tendencia a la baja de esta propiedad con el tiempo, lo que implica una acidificación de los líquidos y por tanto una mayor tasa de disolución de los elementos cuya solubilidad aumenta con la disminución del pH.

3.3 Estabilización por encapsulación de los lixiviados

Uno de los métodos de tratamiento de los lixiviados de polvos de acería percolados a través del suelo que se propone en este trabajo es la estabilización. En este caso el lixiviado se usa como líquido de fraguado y se mezcla con cemento y cal en distintas proporciones (sección 2.3).

Los resultados de estos ensayos de estabilización de los lixiviados con cemento y cal se presentan en la Tabla 7. Los parámetros analizados en este caso son: densidad, humedad, pH, conductividad y resistencia a la compresión de los sólidos estabilizados, que son evaluados sobre un sólido antes de su disposición final en rellenos sanitarios.

Tabla 7. Propiedades físicas y químicas de los sólidos estabilizados [19]

Propiedad	Unidad	L/S = 0.4	L/S = 0.5	L/S = 0.6	Límite*
Densidad	g/mL	0.57	0.57	0.62	–
Humedad	%	5.4	8.1	11.3	<10
pH	–	7.6	7.7	8.4	4 - 13
Conductividad	μS/cm	307	294	288	<100 000
Resistencia a la compresión	kPa	964.9	771.6	584.4	>50

*Fuente: (Ruiz, 2003)

L/S representa la relación líquido (lixiviado) y sólido (cemento y cal)

Como se observa en la Tabla 7, el sólido estabilizado con una relación L/S igual a 0.6 no cumple con el límite establecido para la humedad, aunque no se advierte ningún problema respecto a los otros parámetros. En cambio, las propiedades de los sólidos obtenidos con las relaciones L/S igual a 0.4 y 0.5 satisfacen los límites fijados para todas las propiedades, de modo que cumplirían los requerimientos para ser depositados en celdas de confinamiento.

En la Tabla 8 se exponen los resultados registrados para la caracterización toxicológica de los sólidos estabilizados. Además se incluyen los límites de toxicidad de metales lixiviados mediante la metodología EPA 1311, a fin de determinar si las muestras ensayadas se consideran tóxicas.

Tabla 8. Caracterización toxicológica de los sólidos estabilizados conforme al método EPA 1311 [17]

Elemento	Concentración del extracto lixiviado (mg/L)			Límite máximo permisible (mg/L)*
	L/S = 0.4	L/S = 0.5	L/S = 0.6	
As	0.0495	0.0986	0.0062	5.0
Cd	<0.01	<0.01	<0.01	1.0
Cr	0.03	0.38	0.48	5.0
Fe	8.27	1.48	7.77	30.0
Ni	<0.01	<0.01	<0.01	2.0
Pb	<0.10	<0.10	<0.10	5.0
Se	0.04	0.05	0.02	1.0

*Fuente: (EPA, 2003)

Con base en la metodología EPA 1311 y la información tabulada en la Tabla 8, se infiere que los sólidos obtenidos a partir de la estabilización de los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través de suelo agrícola no pueden ser considerados tóxicos, ya que su concentración en todos los casos es menor a la máxima permisible.

En conclusión, la mejor formulación para la estabilización por encapsulación de los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través del suelo corresponde a la relación L/S igual a 0.4.

3.4 Sistema propuesto para el tratamiento de los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través del suelo

Considerando el caudal promedio de descarga de los efluentes obtenidos en las unidades experimentales, igual a 0.09 mL/h, y la tasa de producción del polvo de acería en la empresa de reciclaje de chatarra, igual a 9 t/día [20], se estima que la tasa de producción de los lixiviados en el área total de suelo afectado por la deposición de polvo de acería es 2 m³/mes. De este modo, las materias primas necesarias para el tratamiento son 4 toneladas de cemento Portland y 1 tonelada de cal.

El proceso de estabilización que se propone inicia con la recolección de los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través del suelo, los cuales se almacenarán en un tanque de 2.1 m³. Posteriormente, el primer día de cada mes, el líquido recogido se mezclará durante 4 min con el cemento y la cal en una máquina mezcladora.

Posteriormente la pulpa se conducirá hacia una máquina de vibro-compactación. En ésta, los moldes irán llenándose con la mezcla durante 30 s, un barredor automático retirará el exceso de material sobre los moldes y una prensa compactará la mezcla. Entonces los bloques de sólido estabilizado caerán sobre un tablero situado debajo de la máquina de vibro-compactación y se secarán a temperatura ambiente, para finalmente ser llevados al relleno sanitario para su disposición final, una vez que se tiene la seguridad de que no liberarán metales pesados al ambiente.

3.5 Evaluación económica del sistema propuesto y comparación con métodos alternativos

A continuación en la Tabla 9 se presenta el capital de operación que se requiere para la estabilización de los lixiviados, asumiendo que la planta responsable de los efluentes dispone de todos los activos y personal necesario para el desarrollo del proceso.

Tabla 9. Estimación de la inversión mensual en materiales directos

Material	Cantidad	Unidad	Valor unitario (US\$)	Inversión mensual (US\$)
Cemento	4	t/mes	152.80	611.20
Cal	1	t/mes	160.00	160.00
Agua	11.8	m ³ /mes	0.31	3.66
Diésel	31.4	gal/mes	0.91	28.57
Electricidad	0.7091	kWh/mes	0.07	0.05
Total para 2 m³/mes				803.48

El tratamiento con esta alternativa costaría US\$ 401.74/m³, pero presenta como ventajas que la tecnología necesaria para la estabilización de un efluente con cemento y cal es relativamente simple, sea adecuada en poco espacio y el personal encargado del proceso no precisa capacitación especial ni un control del tratamiento por largos períodos.

Adicionalmente, la alternativa de tratamiento de lixiviados por estabilización se contrastará con las siguientes alternativas: depuración de lixiviados por métodos no convencionales, propuesta por Guanoluisa (2012) y recuperación de zinc por electrólisis previo al tratamiento del efluente con

métodos convencionales, desarrollada por De la Torre, Guevara y Espinoza (2013). [10,21]

Guanoluisa (2012) propone un sistema de tratamiento de lixiviados por fitorremediación y adsorción en carbón activado, con los cuales se logra reducir la concentración de metales pesados y de materia orgánica hasta valores aceptados por la ordenanza 213 del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (MDMQ). El proceso consta de un sistema de humedales artificiales con flujo subsuperficial vertical con pasto elefante (material vegetativo) y grava (sustrato inerte) y una columna de carbón activado para la depuración final. Esta alternativa implica costos de operación de US\$ 0.36 por m³ de lixiviado. [21]

De la Torre, Guevara y Espinoza (2013) proponen la recuperación de zinc del lixiviado por medio de una electrólisis con ánodos de plomo y cátodos de aluminio a pH entre 4 y 5 con 400 A/m² durante 8 h, y una fusión del zinc catódico con cloruro de amonio a 450 °C durante 2 h. Bajo estas condiciones se logra recuperar el 71 % del metal en forma de zinc con 99 % de pureza, a un costo de operación de US\$ 11.84 por m³ de líquido tratado según los cálculos hechos por Ricarte (2013). [10,22]

En la Tabla 10 se resumen los costos que implica el tratamiento de los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través del suelo, por las tres técnicas de depuración consideradas en este trabajo. Además se listan los residuos que se generan con cada uno de los tratamientos propuestos.

Tabla 10. Costo de los métodos de tratamiento del lixiviado [10,21]

Método	Costo (US\$/m ³)	Residuo
Estabilización del lixiviado por encapsulación	401.7	Ninguno que requiera tratamiento adicional
Depuración del lixiviado mediante fitorremediación y adsorción*	0.4	Lodo residual a tratar
Recuperación de zinc por electrocoagulación y fusión**	11.8	Lodo residual a tratar

* Fuente: (Guanoluisa, 2012)

** Fuente: (De la Torre, Guevara, & Espinoza, 2013)

De acuerdo a los costos de la Tabla 10, se observa que la estabilización de los lixiviados con cemento y cal es la alternativa más costosa, comparada con las técnicas alternativas citadas en este trabajo. Sin embargo en varias ocasiones se recurre a la estabilización como la mejor alternativa de tratamiento debido a la facilidad de implementación y porque una vez terminado el proceso no se dispone de residuos remanentes a tratar.

En el caso de los lixiviados generados por polvo de acería depositado sobre suelo agrícola, el contenido de zinc (0.03 mg/L en promedio) es muy bajo para la aplicación de la alternativa de recuperación propuesta por De la Torre, Guevara y Espinoza (2013).

El menor costo se obtiene en el caso del tratamiento por fitorremediación y adsorción con carbón activado propuesto

por Guanoluisa (2012), aunque no están considerados los costos adicionales que involucra el tratamiento de los lodos residuales.

4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se demostró mediante ensayos realizados a períodos cortos de tiempo (3-4 meses) que la disposición no controlada de polvo de acería sobre suelo agrícola afecta a éste último con la incorporación de metales pesados como Zn, Cr, As, entre otros. Se espera por tanto que a períodos superiores de tiempo (meses o años, como ocurre realmente) los niveles de contaminación sean aún más elevados. Por tanto los polvos de acería no deben ser dispuestos en contacto directo con el suelo como sucede actualmente y los suelos ya afectados deberán ser tratados para su depuración.

Los lixiviados generados por polvo de acería y percolados a través de suelo no cumplen con los límites establecidos por la normativa ecuatoriana TULAS para su descarga a cuerpos de agua dulce, debido a su concentración de cromo (mayor a 0.5 mg/L) y arsénico (mayor a 0,1 mg/L). Además presentan una concentración promedio de zinc de 0.03 mg/L

La estabilización de lixiviados con cemento y cal en una relación L/S igual a 0.4 es una alternativa costosa (US\$ 401.7/m³) para la obtención de bloques que pueden ser dispuestos en rellenos sanitarios. Aunque su implementación sea sencilla, estos valores indican que se deben buscar alternativas para el tratamiento de los lixiviados contaminados con metales pesados generados por la disposición no controlada de residuos peligrosos sobre suelos agrícolas.

Una vez que los lixiviados generados por la disposición no controlada de polvos de acería están presentes, se plantea como una alternativa de tratamiento para su depuración el uso de la fitorremediación y la adsorción con carbón activado, sin embargo dadas las características de los lixiviados analizados la solución real debe iniciar por la prohibición del contacto de estos materiales directamente con el suelo.

5 REFERENCIAS

- [1]. Sandoval, D. (2010). *Remediación por lixiviación dinámica de polvos de acería usando disoluciones de ácidos orgánicos*. (Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero de Materiales), Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Colombia.
- [2]. Colin, B. (2001). *Environmental Chemistry* (Segunda ed.). Nueva York, Estados Unidos: W.H. Freeman and Company.
- [3]. Thompson, L., & Troeh, F. (1988). *Los suelos y su fertilidad* (Cuarta ed.). Madrid, España: Editorial Reverté.
- [4]. Bautista, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*.

- Mérida, Yucatán, México: Editorial de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- [5]. Señas, L., Maiza, P., Marfil, S., & Valea, J. (2003). Impacto ambiental producido por morteros cementicios con polvos de acería. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 24(3), 47-53.
- [6]. Fernández, A. (2006). *Contaminación por lixiviados*. Recuperado el 8 de agosto de 2012, de http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbanismo/2006/10/13/156373.php
- [7]. Giraldo, E. (2003). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Avances recientes. *Revista de ingeniería Uniandes*, 14(8), 44-55.
- [8]. Navarro, J., Aguilar, I., & López, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Revista científica de ecología y medio ambiente Ecosistemas*, 16(2), 10-25.
- [9]. Doménech, X. (1995). *Química del suelo El impacto de los contaminantes* (Tercera ed.). Madrid, España: Miraguano Ediciones.
- [10]. De la Torre, E., Guevara, A., & Espinoza, C. (Julio de 2013). Valorización de polvos de acería mediante recuperación de zinc por lixiviación y electrólisis. *Revista Politécnica*, 32(1), 51-56.
- [11]. Elías, X. (2012). *Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santis.
- [12]. Zapata, R. (2002). *La solución del suelo*. Recuperado el 20 de junio de 2012, de http://www.bdigital.unal.edu.co/1650/2/rauldarzoia_patahernandez.20022.pdf
- [13]. Instituto Geográfico Militar. (2006). *Carta Topográfica: Latacunga*. Recuperado el 20 de noviembre de 2012, de http://www.igm.gob.ec/cms/files/cartabase/enie/ENIEIII_E4.htm
- [14]. Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de "Alaquez". (2011). *Datos generales de la parroquia "Aláquez"*. Recuperado el 9 de septiembre de 2014, de http://www.alaquez.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=81:datos-generales&Itemid=211
- [15]. Mena, P., Josse, C., & Medina, G. (2000). *Los suelos del Páramo*. Quito, Ecuador: Editorial Abya Yala.
- [16]. Farley, K., Kelly, E., & Hofstede, R. (2004). Soil organic Carbon and water retention after conversion of grasslands to Pine plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems*(7), 729-739.
- [17]. EPA, E. P. (2003). *Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure*. Recuperado el 13 de febrero de 2013, de <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1311.pdf>
- [18]. Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2003). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes Recurso agua*. Recuperado el 19 de febrero de 2013, de http://www.efficacitas.com/efficacitas_es/assets/Anexo%201.pdf
- [19]. Ruiz, U. (2003). *Recomendaciones técnicas generales para el diseño y construcción de celdas de confinamiento y rellenos sanitarios*. Recuperado el 20 de noviembre de 2012, de <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados>
- [20]. Alvarez, E. (2010). *Hasta el humo se reutiliza*. Recuperado el 20 de noviembre de 2012, de <http://www.vistazo.com/ea/especiales/imprimir.php?Vistazo.com&id=4376>
- [21]. Guanoluisa, L. (2012). *Diseño de un sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario El Inga mediante electrocoagulación y fitorremediación*. (Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico), Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [22]. Ricaurte, J. (2013). *Diseño de una planta para valorizar los residuos de polvos de acería*. (Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico), Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.