

Diseño De Un Sistema De Tratamiento De Los Lixiviados Generados Por La Disposición No Controlada De Polvo De Acería Sobre Suelo

Ruiz M.*; Guevara A.*; De la Torre E.*

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito, Ecuador
e-mail: magaruhi@yahoo.es; alicia.guevara@epn.edu.ec; ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Resumen: El presente trabajo aborda el diseño de un sistema de tratamiento de los lixiviados generados por la disposición no controlada de polvo de acería sobre suelo agrícola. Para esto, se colocaron 15 cm de polvo de acería sobre 50 cm de suelo en columnas de vidrio de 6 cm de diámetro y 75 cm de altura; los sistemas se irrigaron con flujos constantes de agua de 0.15 mL/h equivalentes a la precipitación promedio anual de la serranía ecuatoriana. A fin de evitar el efecto pared y garantizar una distribución uniforme del agua en toda la sección transversal, se colocó tela de lana de vidrio sobre el sólido. Los lixiviados generados se recolectaron cada tres días durante cuatro meses y se caracterizaron por espectrofotometría de absorción atómica, encontrándose que presentaban concentraciones de cromo mayores a 0.5 mg/L, límite especificado por el TULAS para las descargas líquidas a agua dulce. A continuación los efluentes se estabilizaron con cemento y cal en relaciones líquido/sólido de 0.4, 0.5 y 0.6, hallándose que las dos primeras entregan un producto que cumple con la humedad recomendada de 10 % para su confinamiento en rellenos sanitarios. Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se diseñó un sistema de tratamiento de 2 m³ mensuales de líquido, proponiéndose el siguiente proceso: mezcla del lixiviado en relaciones líquido/sólido de 0.5 respecto al cemento y 2.0 respecto a la cal; moldeo y compactación de la mezcla; curado y secado de los bloques cada tres días; y transporte de los bloques al relleno sanitario. Para esto, se requiere una inversión inicial de US\$ 38 782.00 y un capital de operación mensual de US\$ 803.48.

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

Abstract: This paper addresses the design of a treatment system for leachate generated by the uncontrolled disposal of steel dust on agricultural land. For the development of the methodology presented in this manuscript, columns of glass (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 equivalents to the average precipitations of the Ecuadorian Highland region (0.15 mL/h). To avoid the "wall effect", fiberglass (6 cm diameter, 0.8 mm thickness) was located on the solid in order to distribute the water uniformly throughout the transversal section. Leachates were collected every three days during four months and characterized by atomic absorption spectrophotometry. Thus, it was found that the effluents exceeded the maximum permitted concentration of chromium and arsenic in Ecuador for may be discharged into freshwater bodies. Subsequently, the effluent was stabilized with cement and lime in liquid/solid ratios of 0.4, 0.5 and 0.6; the liquid/solid ratios of 0.4 and 0.5 allow obtaining blocks that meet the recommended moisture to be confined in landfills (10 %). Finally, a treatment system of 2m³/month capacity was designed based on the results. Thereby, the following process was proposed: mixing of the leachate in liquid/solid ratios of 0.5 and 2.0 relative to cement and lime respectively, molding and compacting of the mixture, curing and drying of the blocks every three days and transportation of the blocks to the landfill. This system requires an initial investment of US\$ 38 782.00 and an operating costs of US\$ 803.48 monthly.

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

1 INTRODUCCIÓN

La demanda nacional y mundial de acero aumenta a un ritmo importante, especialmente a causa del crecimiento de las economías emergentes [1]. La Asociación Mundial del Acero [2] reportó para el 2012 una producción mundial de 1 518 millones de toneladas, pese a la crisis económica de la Unión Europea que afectó gravemente al sector de la construcción. [1]

La tasa de generación de polvos residuales de acería se estima entre 12 y 14 kg de polvo por tonelada de acero manufacturada [3], lo que se traduce en una producción de más de 17 millones de toneladas de este desecho con base en la cifra señalada para el 2012 por la Asociación Mun-

dial del Acero[2]. En Ecuador, Acería del Ecuador C.A. [4] reporta 1 000 t anuales de este residuo, mientras que en Novacero S.A. se obtienen 3 200 t de polvo de acería al año. [5]

El polvo de acería es un residuo tóxico con alto contenido de metales pesados y tendencia a generar lixiviados de elevada alcalinidad. Varios autores lo definen como un residuo peligroso y alertan sobre la posibilidad de percolación de sus elementos pesados desde las capas superiores del suelo hasta acuíferos subterráneos. Consecuentemente, la disposición en el suelo de este desecho peligroso amenaza no sólo con la contaminación de éste sino también del agua. [6]

En Lasso, una región agrícola ecuatoriana, el polvo de acería que se genera en determinadas 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 por los microorganismos presentes en el suelo, ocasionando percolación de los mismos hasta alcanzar el manto freático de la zona. [3] Adicionalmente, el desecho está expuesto al aire libre, de modo que fácilmente puede ser transportado por el viento hasta la superficie de los suelos cultivables del área. La normativa ambiental vigente en Ecuador controla con severidad las prácticas de la industria siderúrgica y establece sanciones muy fuertes a las empresas que, por sus operaciones, provoquen daños al entorno. La Constitución política de Ecuador indica en el artículo 396 que “cada uno de los actores de los procesos de producción, distribución, comercialización y uso de bienes o servicios asumirá la responsabilidad directa de prevenir cualquier impacto ambiental, de mitigar y reparar los daños que ha causado, y de mantener un sistema de control ambiental permanente.” [7]. Por lo tanto, el diseño de un sistema de tratamiento de los desechos líquidos generados por la disposición no controlada de polvo de acería sobre suelo agrícola aporta con una solución a esta inadecuada práctica de la industria del acero.

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; 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.

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

Se recolectó una muestra representativa de 5 kg de polvo de acería y, en la zona agrícola aledaña Cuchitingue, 50 kg de suelo cultivable no afectado. Las muestras obtenidas se caracterizaron física y químicamente, determinándose las siguientes propiedades: densidad real y aparente, porosidad, humedad, pH, conductividad y granulometría, además del contenido total de: Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Pb y Zn por absorción atómica. 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, recolección y caracterización de los lixiviados generados por polvo de acería y percolados a través de suelo agrícola

Para evaluar el riesgo de contaminación del suelo y del medio hídrico debido a la percolación de los elementos que componen el polvo de acería, se procedió con ensayos en columna. Para ello se dispusieron tres columnas de vidrio de 6 cm de diámetro y 75 cm de altura a modo de lisímetros de drenaje. 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 co-

lector. 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/hequivalentes a la precipitación media anual de Latacunga igual a 455 mm [8].

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.

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 (EPA 1311) y un ensayo de resistencia a la compresión (INEN 1485), a fin de comprobar si los bloques pueden ser depositados en celdas de confinamiento superficiales.

2.4 Diseño del sistema propuesto para el tratamiento de los lixiviados

Determinados el caudal promedio de los lixiviados y la mejor formulación para la estabilización de los efluentes con cemento y cal, se diseñó el sistema de tratamiento y se dimensionaron los equipos necesarios para la encapsulación del lixiviado. Dado que el flujo de agua potable irrigada a los lisímetros fue teóricamente igual a la tasa de precipitación de la región cuyo suelo se empleó en la presente investigación, se asumió que el caudal de descarga de los lixiviados en las columnas es el mismo en el área de transferencia que le corresponde, de modo que la capacidad del sistema de tratamiento se determinó mediante un escalado con áreas, resultando igual a 2 m³/mes.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del suelo y del polvo de acería

Las propiedades físicas y químicas del suelo agrícola cultivable y del polvo de acería originales se exponen a continuación, en la Tabla 1.

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	μS/cm	235	344
Tamaño de partícula d50	μm	112.3	94.0

Con base en la información presentada en la Tabla 1, se comprueba que el polvo de acería es un residuo sólido peligroso, pues al menos el 50% de las partículas que lo componen tienen un diámetro inferior a 100 µm, siendo perjudiciales para la salud humana porque pueden causar daños al sistema respiratorio. El pH del suelo agrícola lo clasifica como neutro y la conductividad como normal, mientras que el polvo de acería resulta excesivamente alcalino y ligeramente salino.

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

Tabla 2. 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
Fe	%	2.7	2.6
K	%	11.0	10.7
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

De los elementos acumulados en el complejo del suelo agrícola, el sodio es el que manifiesta en la mayor proporción, seguido del calcio, potasio y aluminio. El plomo, zinc, cromo y cobre, al contrario, se presentan en concentraciones traza. Sin embargo, se evidencia la incorporación de cromo y zinc al suelo agrícola afectado con polvo de acería, y una dilución del resto de elementos indicados. Esto demuestra que el polvo de acería aporta con una importante cantidad de cromo y zinc al suelo.

En la Tabla 3 se anota en seguida la composición elemental del polvo de acería antes y después del desarrollo de los ensayos en columna, determinada por espectrofotometría de absorción atómica. Los datos tabulados evidencian que éste es un residuo peligroso a causa de la presencia de elementos pesados como zinc, plomo y cadmio. La especie más concentrada 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.

Tabla 3. 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

A continuación se presenta la Tabla 4, en la que se exponen los resultados obtenidos para la caracterización toxicológica de la muestra de polvo de acería inicial. En ésta se advierte que, en el marco de la normativa EPA 1311, con la que se determina la toxicidad de residuos industriales, 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.

Tabla 4. Caracterización toxicológica del polvo de acería conforme al método EPA 1311

Elemento	Concentración del extracto lixiviado (mg/L)	Límite máximo permisible (mg/L)*
Pb	195.0	5.0
Cd	11.00	1.00
As	0.7	5.0
Ni	0.4	2.0
Ba	0.2	100.0
Fe	0.1	30.0
Cr	0.1	5.0

*Fuente: Environmental Protection Agency, 2003 [9]

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

A continuación se representa gráficamente, en la Figura 1, el perfil en el tiempo de los metales pesados que superaron los límites máximos establecidos por la normativa ecuatoriana TULAS, Libro VI, Anexo 1, titulado “Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua”, para la descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce. Éstos corresponden al cromo y al arsénico, cuya concentración es mayor a 0.5 y 0.1 mg/L respectivamente [10] en determinados puntos.

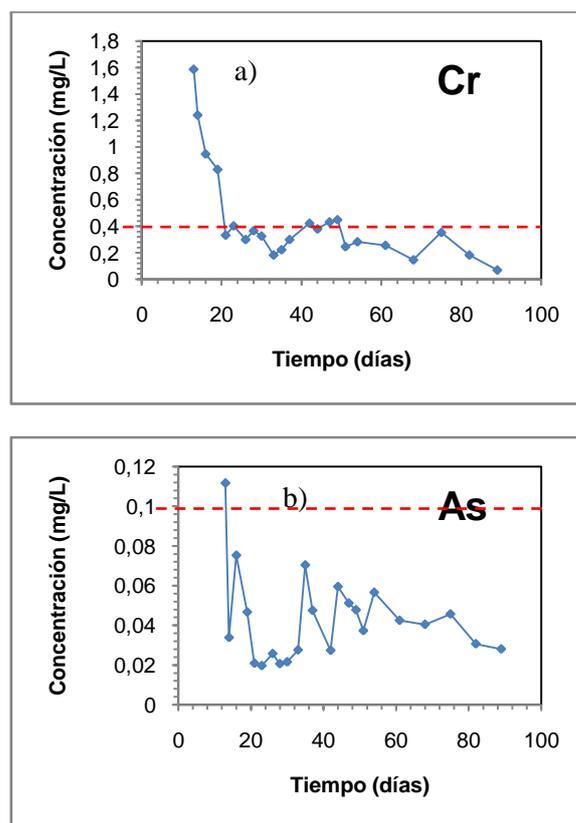


Figura 1. Concentración de a) Cr y b) As en los lixiviados en función del tiempo

Enfrentando los valores representados en la Figura 1 a la normativa ecuatoriana TULAS (Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua), se advierte que el cromo supera el límite máximo establecido, y en una proporción hasta tres veces mayor, durante los prime-

ros 19 días de ensayo, de modo que los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través del suelo agrícola no podrían ser descargados a cuerpos de agua dulce. Se advierte lo mismo para el arsénico, sólo que éste supera el valor máximo de 0.1 mg/L en un único punto al inicio del ensayo. Cabe indicar que respecto al resto de elementos analizados, la concentración máxima establecida no se supera durante el período de cuatro meses de los ensayos en columna.

En la Figura2 se representa a continuación el contenido de carbón orgánico de los lixiviados en el tiempo. En ésta se advierte que el contenido de carbón orgánico de los lixiviados se mantiene prácticamente constante, lo cual sugiere que la deficiente aireación del suelo agrícola impidió la solubilización de la fracción orgánica en el agua de percolación.

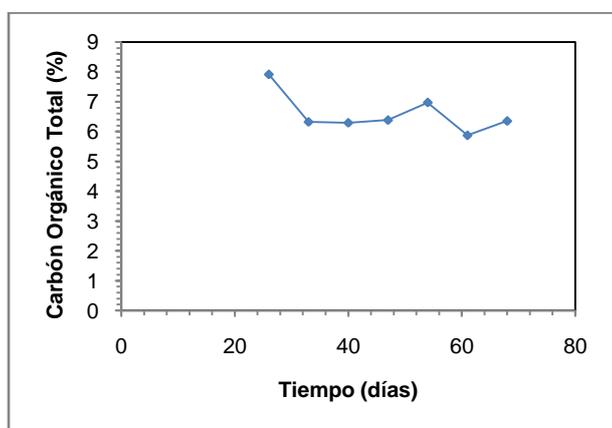


Figura2. Carbón orgánico total de los lixiviados en función del tiempo

En la Figura3 se representa el pH de los lixiviados en función del tiempo y el límite máximo establecido en por la normativa TULAS para el pH de los efluentes descargados a cuerpos de agua dulce.

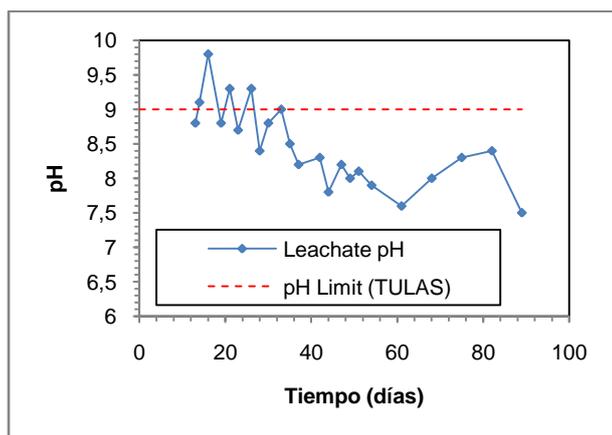


Figura3. pH de los lixiviados en función del tiempo

En la Figura3 se advierte que durante los primeros 30 días los lixiviados superaron en límite establecido para el pH de los efluentes descargados a los cuerpos de agua dulce, igual a 9 en la normativa TULAS [10], pero posteriormente el pH no sobrepasó el límite. Asimismo, se nota que el pH de los lixiviados no supera el valor de 11, lo cual explica la baja tasa de disolución de elementos como el plo-

mo (soluble en rangos de pH de 12 a 13). Sin embargo, se observa 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

Los resultados de la estabilización de los lixiviados con cemento y cal se presentan a continuación, en la Tabla5. Éstos se refieren a la densidad, humedad, pH, conductividad y resistencia a la compresión de los sólidos estabilizados con las distintas formulaciones.

Tabla5. Propiedades físicas y químicas de los sólidos estabilizados

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	%	5.44	8.15	11.33	<10
pH	—	7.65	7.72	8.47	4 – 13
Conductividad	µS/cm	307	294	288	<100 000
Resistencia a la compresión	kPa	964.91	771.60	584.42	>50

*L/S = masa de líquido/masa de sólido

**Fuente: Ruiz, 2003 [11]

Como se observa en la Tabla5, 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.

En la Tabla6 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.

Tabla6. Caracterización toxicológica de los sólidos estabilizados conforme al método EPA 1311

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

*L/S = masa de líquido/masa de sólido

**Fuente: Environmental Protection Agency, 2003 [9]

Con base en la metodología EPA 1311 y la información tabulada en la Tabla6, 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.

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

Considerando el caudal promedio de descarga de los efluentes obtenidos en las columnas, 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 [5], se estima que la tasa de generación de los lixiviados en el área total de suelo afectado por la deposición de polvo de acería es 2 m³/mes. Además, la mejor formulación para la estabilización por encapsulación de los lixiviados generados por el polvo de acería y percolados a través del suelo agrícola corresponde a una relación líquido/sólido igual a 0.4. Por lo tanto, las materias primas necesarias para el tratamiento son 4 t de cemento Portland y 1 t de cal.

El proceso 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 la máquina mezcladora DasWell, modelo JZR350DW, con un motor eléctrico de 9.7 kW y una bomba de 0.75 kW de potencia [12].

Posteriormente la pulpa se conducirá hacia la máquina de vibro-compactación Menegotti, modelo MBM-3, con una potencia instalada de 2 HP [13]. En ésta, los moldes irán llenándose con la mezcla durante 30 s, el barredor automático retirará el exceso de material sobre los moldes y la 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 durante 3 días hasta ser llevados al relleno sanitario para su disposición en celdas de confinamiento.

En cuanto a la recolección de los lixiviados, se pueden construir drenes de recolección como el que se presenta en la Figura 4.

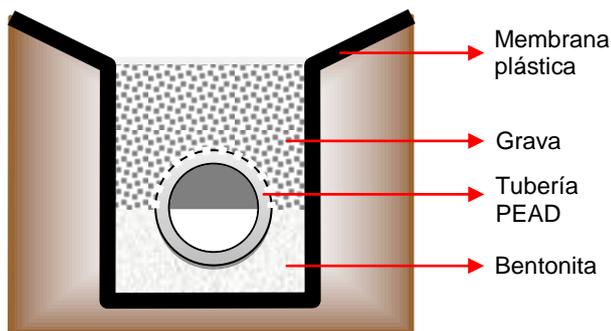


Figura 4. Sistema de recolección de lixiviados

Fuente: Sánchez, González, Morales, Pineda, & Semadeni, 2003[14]

Los drenes de recolección consistirán en tuberías de polietileno de alta densidad ranuradas hasta la mitad de su diámetro. La parte ciega de la tubería se ubicará hacia abajo, y se cubrirá con bentonita, mientras que la parte superior agujereada se empacará con grava. El piso de la instalación se revestirá con geomembranas de polietileno de alta densidad de 2.5 mm de espesor y tendrá una pendiente de 1 % [11]

En la Figura5 se presenta a continuación el diagrama de bloques del sistema propuesto para el tratamiento de los

lixiviados generados por polvo de acería y percolados a través de suelo.

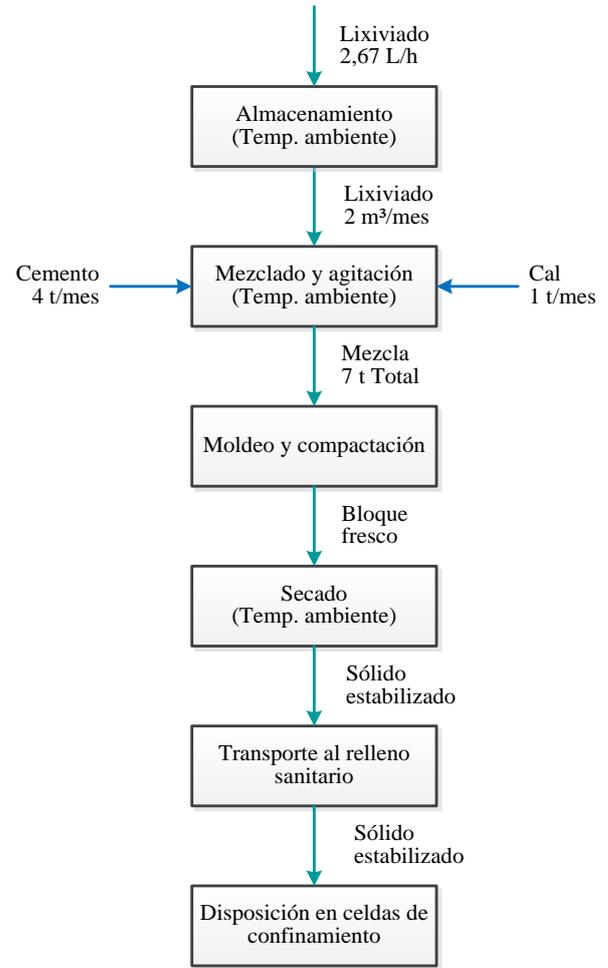


Figura5. Diagrama de bloques del sistema propuesto para el tratamiento de los lixiviados

3.5 Evaluación económica del sistema propuesto

A continuación se presenta, en la Tabla7, la inversión requerida para la construcción y puesta en marcha de la planta de tratamiento. Dado que las muestras de polvo de acería y de suelo agrícola ensayadas en el presente proyecto corresponden al sector de Lasso, Cotopaxi, se va a considerar el importe de un predio en esa región en el cálculo de la inversión en terrenos.

Tabla7. Estimación de la inversión fija

Inversión fija	Valor (US\$)
Terreno	6 300.00
Construcciones	10 500.00
Maquinaria y equipos	12 282.00
Otros activos	9 700.00
Total	38 782.00

En la Tabla8 se especifica el capital de operación que se requiere para la estabilización de los lixiviados, asumiendo que la planta responsable de los efluentes dispone del personal necesario para el desarrollo del proceso. Éste se estima en US\$ 803.48 para 2 m³ de lixiviado producido mensualmente.

Tabla 8. Estimación de la inversión mensual en materiales directos

Material	Cantidad	Unidad	Valor (US\$/unidad)	Inversión (US\$/mes)
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				803.48

Si bien el objeto del sistema propuesto en la presente investigación no es la producción de un bien o servicio sino la remediación de un pasivo ambiental, la industria que lo implemente no percibirá ingresos como tal sino que se evitará el pago de multas por infracciones ambientales. En Ecuador, el incumplimiento de las normas técnicas ambientales se castiga con una multa de entre 20 y 200 salarios básicos unificados [10] en función del nivel y tiempo de la infracción, además de la restauración del recurso natural afectado. Entonces, dado que desde 2013 el salario básico en Ecuador es igual a US\$ 318.00 [15], el importe que se dejaría de pagar si se efectúa el tratamiento de los lixiviados generados por el polvo de acería es mínimo US\$ 6360.00 por auditoría.

4 CONCLUSIONES

Los lixiviados generados por polvo de acería y percolados a través de suelo agrícola 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). La estabilización de los mismos con cemento y cal en una relación L/S igual a 0.4 es una alternativa efectiva para la obtención de bloques que pueden ser dispuestos en rellenos sanitarios.

Para el tratamiento mensual de 2 m³ del lixiviado generado por polvo de acería y percolado a través de suelo se propone el siguiente proceso: 1) recolección y almacenamiento del lixiviado por un mes, 2) mezcla del lixiviado con 4 t de cemento y 1 t de cal durante 4 min, 3) moldeo y compactación de la mezcla por 30 s, 4) secado de los bloques al ambiente durante 3 días, y 5) transporte de los bloques estabilizados al relleno sanitario. La construcción y puesta en marcha de la planta de tratamiento requiere una inversión fija de US\$ 38 782.00 y un capital de operación de US\$ 803.48 mensual. De este modo se evitarán las multas debidas al incumplimiento de la normativa ambiental, que en Ecuador corresponden a mínimo US\$ 6360.00 en cada auditoría.

5 REFERENCIAS

[1] Gerdau S.A., «Demanda mundial de acero tocará récord el 2012,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.gerdau.cl/demanda-mundial-de-acero-tocara-record-el-2012/>. [Último acceso: 20 noviembre 2012].

[2] Asociación Mundial del Acero, «Crude steel production,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.worldsteel.org/statistics/crude-steel-production.html>. [Último acceso: 20 noviembre 2012].

[3] D. Sandoval, «Remediación por lixiviación dinámica de polvos de acería usando disoluciones de ácidos orgánicos,» Sartenejas, Colombia, 2010.

[4] Acería del Ecuador C.A., «Tratamiento de humos,» 2011. [En línea]. Available: http://www.adelca.com/sitio/esp/reciclaje_emisionde_gases.php. [Último acceso: 20 noviembre 2012].

[5] E. Alvarez, «Hasta el humo se reutiliza,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.vistazo.com/ea/especiales/imprimir.php?Vistazo.com&id=4376>. [Último acceso: 20 noviembre 2012].

[6] L. Señas, P. Maiza, S. Marfil y J. Valea, «Impacto ambiental producido por morteros cementicios con polvos de acería,» *Revista Ciencia e Ingeniería*, vol. 24, n° 3, pp. 47-53, 2003.

[7] Asamblea Nacional de Ecuador, «Constitución de Ecuador,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.asambleanacional.gov.ec/documentos/Constitucion-2008.pdf>. [Último acceso: 20 noviembre 2012].

[8] Instituto Geográfico Militar, «Carta Topográfica: Latacunga,» 2006. [En línea]. Available: http://www.igm.gob.ec/cms/files/cartabase/enie/ENIE_III_E4.htm. [Último acceso: 20 noviembre 2012].

[9] Environmental Protection Agency, «Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure,» 2003. [En línea]. Available: <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1311.pdf>. [Último acceso: 13 febrero 2013].

[10] Ministerio del Ambiente de Ecuador, «Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes Recurso agua,» 2003. [En línea]. Available: http://www.efficacitas.com/efficacitas_es/assets/Aneo%201.pdf. [Último acceso: 19 February 2013].

[11] U. Ruiz, «Recomendaciones técnicas generales para el diseño y construcción de celdas de confinamiento y rellenos sanitarios,» 2003. [En línea]. Available: http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitio_scontaminados. [Último acceso: 20 noviembre 2012].

[12] Daswell Maquinaria Co. Ltda., «Introducción de Mezcladora de concreto con motor diesel,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.mezcladora-de-concreto.es/product/p12.html>. [Último acceso: 25 octubre 2013].

[13] Ingeniería VDM Ltda., «Máquina para bloques MBM - 3,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.vdm.cl/Productos/Bloqueras.html>. [Último acceso: 23 octubre 2013].

[14] J. Sánchez, R. González, R. Morales, L. Pineda y I. Semadeni, *Manejo de residuos industriales*, México D.F.: Ciencias tecnológicas, 2003.

[15] Ministerio de Relaciones Laborales de Ecuador, «Tablas de incremento para la remuneración mínima sectorial y tarifas 2013,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.relacioneslaborales.gob.ec/tablas-de>

incremento-para-la-remuneracion-minima-sectorial-y-tarifas/. [Último acceso: 29 noviembre 2013].