

Evaluation of solidifying agents in the process stabilization solidification applied to chemical sludges

José Antonio Pérez^{*,a}, Ysoris Noguera^a, Belén María Paricaguán^b

^a*Departamento de Ingeniería Química, Escuela de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela*

^b*Laboratorio de Polímeros y Derivado Petroquímicos, Centro de Investigaciones Químicas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.-

Different solidifying agents were considered in the stabilization / solidification process applied to chemical sludge generated in an effluent treatment plant from the printing stage in the production of corrugated cardboard, with the aim of chemically stabilizing them and being able to achieve their disposal in a filling sanitary. A total of six alternatives were evaluated, obtaining the average physical characteristics of the sludge: pH 7,36 and moisture content 22,46 %. The average chemical composition of the sludge leachate was: total chromium 0,14 mg/L and total lead 11,39 mg/L, indicating that this is a toxic waste and the mixture cement- (peat-silicate sodium-sludge) was selected with a relation cement sludge 2: 1, managing to reduce lead levels in the leachate by 98,9 %.

Keywords: stabilization/solidification; heavy metals; peat; leachate; solidifying agents.

Evaluación de agentes solidificantes en el proceso estabilización/solidificación aplicado a lodos químicos

Resumen.-

Se consideraron diferentes agentes solidificantes en el proceso estabilización/solidificación aplicado a lodos químicos generados en una planta de tratamiento de efluentes provenientes de la etapa de impresión en la producción de cartón corrugado, con el objetivo de estabilizarlos químicamente y poder lograr su disposición en un relleno sanitario. Se evaluaron un total de seis alternativas, obteniéndose las características físicas promedio del lodo: pH 7,36 y contenido de humedad 22,46 %. La composición química promedio del lixiviado del lodo fue: cromo total 0,14 mg/L y plomo total 11,39 mg/L, indicando que éste es un desecho tóxico y se seleccionó la mezcla cemento-(turba-silicato de sodio-lodo) con una relación lodo cemento 2:1, logrando reducir los niveles de plomo en el lixiviado en 98,9 %.

Palabras clave: solidificación/estabilización; metales pesados; turba; lixiviado; agentes solidificantes.

Recibido: mayo 2017

Aceptado: octubre 2017

1. Introducción

En la actualidad la gestión de los residuos peligrosos es una de las principales preocupacio-

nes en los países industrializados. La resolución de este problema debe ser estudiada desde dos perspectivas: por una parte, controlar el impacto de estos residuos sobre el medio mediante una gestión adecuada de los mismos; y por otra, restaurar los daños producidos en aquellos lugares que se han visto afectados por malas prácticas llevadas a cabo en el pasado. La estabilización/solidificación es un proceso de tratamiento de residuos peligrosos ideado para mejorar la manipulación y propieda-

*Autor para correspondencia

Correo-e: jperez12011@hotmail.com (José Antonio Pérez)

des físicas de los residuos peligrosos, o para limitar la solubilidad (lixiviabilidad) de los constituyentes peligrosos de los residuos peligrosos. Estas tecnologías están basadas en un conjunto de operaciones que, mediante la utilización de aglomerantes y aditivos, reducen la movilidad y toxicidad de los contaminantes contenidos en los residuos convirtiéndolos en aceptables por el medio ambiente previo a su deposición en vertederos [1, 2]. A través del proceso de estabilización/solidificación (E/S), el residuo es químicamente estabilizado y físicamente modificado en una matriz sólida de baja permeabilidad y alta integridad estructural, reduciéndose así, la lixiviación de sus constituyentes peligrosos al medio [3, 4, 5]. Las técnicas de estabilización/solidificación (E/S) están consideradas como la mejor tecnología disponible para el tratamiento de residuos, cuyo principal problema es la presencia de metales, razón por la cual tienen la categoría de residuos peligrosos (RP). Como inversión para el futuro, la mejor estrategia es adoptar medidas de tipo preventivo, encaminadas a reducir la generación de residuos en origen y/o procurar la valorización de los mismos [3]. El problema de la contaminación del medio ambiente se puede establecer en varias ramas, como por ejemplo las aguas residuales y el manejo de los residuos, para dar un tratamiento y disposición final a este tipo de residuos se debe optar por alguna de las tecnologías disponibles para el tratamiento de desechos peligrosos, entre las que destaca: descomposición térmica, fusión en plasma, inmovilización y relleno sanitario controlado.

Todos los métodos mencionados, excepto inmovilización, requieren de una gran inversión inicial en la construcción de la infraestructura requerida para llevar a cabo el tratamiento [6].

Por su parte, la inmovilización con materiales cementantes requiere sólo de una mezcladora de cemento como infraestructura o equipo y se puede hacer el tratamiento *in situ*, *ex situ*, en planta e incluso en planta móvil. Esta tecnología es aplicable al tratamiento de desechos tóxicos por sus niveles de metales pesados, otras especies inorgánicas y recientemente ha sido utilizado para el tratamiento de algunas sustancias orgánicas [7,

8].

El término general 'inmovilización' incluye métodos físicos y químicos tanto para solidificar como para estabilizar los residuos. Un proceso eficaz de inmovilización es aquél donde los potenciales agentes contaminantes son inmovilizados con éxito en una estructura de residuos estabilizados o solidificados y aislados del medio ambiente, haciéndolos inadecuados para la lixiviación [9].

La estabilización es un término general para describir técnicas o métodos mediante los cuales los residuos peligrosos son convertidos en una forma más estable. Normalmente esto se logra mediante la adición de reactivos que mejoran el manejo y las características físicas del residuo, disminuyen la superficie a través de la cual se puede dar la liberación de los contaminantes, reduce o limita la solubilidad de cualquier contaminante presente en el residuo y finalmente reduce la toxicidad de los contaminantes. Se debe entender por lixiviación como el proceso mediante el cual los contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido como el agua [10]. Las tecnologías de E/S fueron aplicadas inicialmente al tratamiento de los residuos radioactivos y posteriormente a los RP, así como a suelos y sedimentos contaminados. En la actualidad se aplican también en otros procesos, entre los que destacan el tratamiento de residuos procedentes de otros procesos de eliminación de contaminación, el tratamiento de suelos contaminados, residuos industriales peligrosos y mezcla de residuos [10, 11, 12]. El proceso de E/S es un tratamiento efectivo, tanto económica como técnicamente, para residuos peligrosos en los cuales no sea económicamente viable la reutilización o el reciclado. Debido a la importancia que está adquiriendo esta tecnología mundialmente para el tratamiento de los residuos industriales y de suelos contaminados, la EPA la considera como la mejor tecnología disponible y demostrada, BDAT (Best Demonstrated Available Technology) para 57 residuos listados por dicho organismo [1, 2, 3].

El objetivo de este estudio fue realizar la evaluación de diferentes agentes solidificantes en el proceso estabilización/solidificación aplicado

a lodos químicos generados en una planta de tratamiento de efluentes provenientes de la etapa de impresión en la producción de cajas de cartón corrugado, con la finalidad de estabilizarlos químicamente y poder lograr su disposición en un relleno sanitario. Dicho lodo es potencialmente peligroso por su contenido de níquel, cromo y cobre. La tecnología de inmovilización es considerada como una técnica muy prometedora por lo simple de su aplicación y su bajo costo, representando una alternativa de solución en el tratamiento de desechos tóxicos. Específicamente se ensayó con el lodo de la empresa y diferentes tipos de materiales cementantes.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestreo

Se cuantificó una población de 683 tambores de aproximadamente 200kg cada uno, los cuales se encuentran debidamente almacenados e identificados como tóxicos.

La selección de estos tambores se hizo en forma aleatoria y a partir de estos se prepararon 10 muestras compuestas formadas por un total de 10 tambores cada una. De cada tambor se tomó una porción cuyo volumen es representativo del material muestreado, una cantidad de 0,5 kg extraídos de diferentes puntos de manera de garantizar la mayor exactitud posible en los resultados de los análisis posteriores.

2.2. Caracterización del lodo en estudio

Una vez realizadas las muestras compuestas se procedió a caracterizar tanto física como químicamente, esto con el objetivo de conocer de manera integral el tipo de lodo al cual se le realizará el tratamiento.

2.3. Propiedades físicas

En cuanto a las propiedades físicas del lodo, se evaluaron el pH, contenido de humedad y contenido de sólidos, debido a que estas variables influyen directamente en el procesamiento del desecho durante la aplicación de la estabilización/solidificación. Específicamente el contenido de sólidos ayuda en la determinación de la relación

desecho-agente solidificante, y el contenido de humedad es importante ya que indica si se debería añadir o remover agua en el procesamiento. La determinación se realizó por triplicado a cada una de las muestras compuestas descritas anteriormente y con la finalidad de caracterizar el lodo, se tomó el valor máximo, mínimo y promedio de la variable determinada.

2.3.1. Composición química del lixiviado del lodo

Con el objetivo de conocer el nivel de toxicidad del lodo en estudio se determinó la composición química del lixiviado por triplicado a las muestras compuestas, característica ésta que indica la capacidad migratoria de los componentes del desecho en condiciones extremas. Dicha composición química está basada en el contenido de metales pesados, específicamente zinc total, plomo total, cromo total y cobre total, debido a que la planta de tratamiento, de donde se originó el desecho sólido, procesaba efluentes contaminados con tintas flexográficas inorgánicas en la cual predominan los metales anteriormente descritos.

A cada una de las muestras se le realizó una extracción con un fluido acuoso durante 20 horas, siguiendo la metodología indicada por la Norma COVENIN N° 2797-91, para obtener el lixiviado del lodo. Posteriormente el lixiviado de cada extracción se analizó por absorción atómica para determinar su composición química.

2.4. Generación de alternativas

Para lograr el objetivo de estabilizar química y mecánicamente el lodo en estudio. Se consideró un desecho de tipo inorgánico (contentivo de compuestos de metales pesados), se seleccionaron como agentes solidificantes los siguientes materiales cementantes y puzolánicos: cemento, cal, ceniza y silicato de sodio; además de un aditivo específico para mejorar las características del desecho, como lo es la turba. En virtud de lo anterior fueron propuestas seis alternativas quedando de la siguiente manera: Alternativa 1: Basada en cemento. Alternativa 2: Cemento-ceniza. Alternativa 3: Cemento-silicato de sodio. Alternativa 4: Cal-ceniza. Alternativa 5: Basada en cemento, previo pretratamiento con turba.

Alternativa 6: Cemento-silicato de sodio, previo pretratamiento con turba.

La selección de agentes solidificantes de tipo inorgánico, como el cemento, cal, ceniza y silicatos solubles se fundamentan en que estos se adaptan mejor a residuos inorgánicos, especialmente aquellos que contienen metales pesados, debido a que ellos son retenidos como hidróxidos insolubles o carbonatos en la estructura endurecida, como resultado del elevado pH de los agentes solidificantes. Además otro criterio de selección es la economía, ya que estos materiales presentan una amplia disponibilidad y un bajo costo relativo en comparación con los agentes solidificantes de tipo orgánico (polietileno, polibutadieno, poliéster, urea-formaldehído, entre otros). Por otro lado, se seleccionó el cemento *Pórtland* tipo I, ya que es el cemento normal usado para propósitos de construcción y por ende el de mayor disponibilidad en el mercado.

Con el objetivo de lograr una relación óptima lodo-agente solidificante, se prepararon mezclas en diferentes proporciones para cada alternativa. A continuación se presentan en las Tablas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 las proporciones para la aplicación del proceso estabilización/solidificación propuestas para dichas mezclas:

Tabla 1: Proporción de la mezcla cemento-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)	
	Cemento	Lodo
T1	66,7	33,3
T2	50,0	50,0
T3	33,3	66,7

Tabla 2: Proporción de la mezcla cemento-ceniza-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)		
	Cemento	Ceniza	Lodo
T4	30,0	20	50,0
T5	13,3	20	66,7

2.5. Evaluación de las alternativas

Para la evaluación de cada una de las alternativas se tomo en consideración aquella mezcla de

Tabla 3: Proporción de la mezcla cemento-(lodo-silicato de sodio).

Muestra	Porcentaje (%)	
	Cemento	Lodo
T6	50,0	50,0
T7	33,3	66,7

Nota: El lodo se humedece con una solución acuosa de silicato de sodio al 10 % v/v.

Tabla 4: Proporción de la mezcla cal-ceniza-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)		
	Cal	Ceniza	Lodo
T8	25,0	25,0	50,0
T9	16,6	16,6	66,7

Tabla 5: Proporción de la mezcla cemento-turba-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)		
	Cemento	Turba	Lodo
T10	31,2	6,2	62,6
T11	26,6	20,0	53,4

Tabla 6: Proporción de la mezcla cemento-turba-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)		
	Cemento	Turba	Lodo
T12	31,2	6,2	62,6

Nota: El lodo se humedece con una solución acuosa de silicato de sodio al 10 % v/v.

lodo, cuya composición química en el lixiviado presentará el mayor contenido de metales (plomo), garantizando de esta manera la estabilización de las muestras de menor concentración.

Debido a las características físicas que presentó el lodo, se hizo necesaria la adición de agua en cada alternativa para lograr de esta manera la consistencia adecuada de la mezcla.

En las tres primeras alternativas, se utilizó el mismo procedimiento, el cual consiste en mezclar adecuadamente los materiales cementantes correspondientes con el lodo, adicionando agua hasta obtener la consistencia apropiada.

En la alternativa 4, el procedimiento seguido consistió en primer lugar, en el humedecimiento

del lodo con una solución diluida de silicato de sodio (10 %v/v) en una proporción de aproximadamente 18mL por cada 100g de lodo, seguido por la adición de mezcla del cemento y agua necesaria.

En la alternativa 5, se le realizó un pretratamiento al lodo con la Turba debido a su comprobada capacidad de retener metales pesados; este pretratamiento se llevó a cabo al poner en contacto por aproximadamente 1 hora la turba y el desecho, adicionando también, la cantidad de agua suficiente para homogeneizar la mezcla, y de esta manera alcanzar un mayor rendimiento en la acción de la turba. Una vez finalizado el pretratamiento, se procedió a la adición del cemento a la mezcla anteriormente descrita para completar así el proceso de estabilización/solidificación.

Igualmente, en la alternativa 6 se realizó el pretratamiento con la turba, añadiendo después la solución de silicato de sodio, aproximadamente en la misma proporción de la alternativa 4 y finalmente se le adicionó a esta mezcla la cantidad de cemento correspondiente.

Para cada una de las alternativas descritas anteriormente las mezclas resultantes del tratamiento se vacían en moldes, en donde ocurre la etapa de fraguado y endurecimiento, que tiene una duración de 7 días. De manera general, una vez solidificada la muestra de lodo tratado se procedió a triturarla hasta un tamaño de partícula menor de 2mm aproximadamente, para posteriormente realizarle las pruebas de lixiviación (TCLP) según Norma COVENIN N° 2797-9, con el objetivo de determinar la eficiencia del proceso, debido a que ésta establece el grado de inmovilización de los metales pesados contenidos en el desecho.

De manera que la comparación entre las concentraciones de los metales en el lixiviado del lodo antes y después del tratamiento sea confiable, la cantidad de lodo utilizado para las mezclas fue la misma que se empleó para la prueba de lixiviación del lodo no tratado, al igual que la cantidad del fluido de extracción utilizado, garantizando de esta manera las mismas condiciones para el análisis.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del desecho

El primer paso que se realizó en el proceso de estabilización/solidificación fue la caracterización física del desecho a tratar debido a que éstas afectan significativamente el proceso de tratamiento y la propia formulación química de éste.

Entre las propiedades físicas analizadas se encuentra el pH, el cual como se observa en la Tabla 7, varía desde un valor mínimo de 5,971 hasta un valor máximo de 8,786, y con un promedio de 7,359 ver Tabla 8, esto se debe a que las condiciones necesarias de pH en la unidad de coagulación, precipitación y sedimentación de la planta de tratamiento para que se forme dicho lodo están alrededor del pH neutro.

Por otro lado, los resultados del contenido de humedad y el contenido de sólidos, como se muestra en la Tabla 8, presentan amplios rangos de valores. Esto se debe, en primer lugar, a que el tiempo de almacenamiento del lodo en los tambores no es el mismo, por lo tanto los de mayor tiempo presentaron una mayor deshidratación.

Además, las condiciones climáticas también afectan las características físicas del lodo ya que estos tambores se encuentran almacenados al aire libre y algunos de ellos presentaban deterioro.

Asimismo el bajo contenido de humedad que presenta el lodo (valor promedio 22,46 %) indica que es necesario la adición de agua, ya que se requiere agua para la hidratación de los materiales cementantes en cada una de las alternativas de aplicación del proceso estabilización/solidificación, es decir, se descarta la posibilidad de un pretratamiento para eliminar el agua.

3.2. Composición química de lixiviado de lodo

Los valores obtenidos de la composición química del lixiviado del lodo de cada una de las muestras, se observa en la Tabla 9, indica que para cada metal existe una gran variabilidad de resultados, lo cual se puede atribuir a la variación de las características del efluente tratado en la planta de tratamiento, originado por la diversidad de pigmentos (colores) utilizados en cada fase de producción de tintas flexográficas.

Tabla 7: Propiedades físicas de los lodos químicos según metodología de [13].

Muestra	pH (pH \pm 0.001)	Humedad promedio (H \pm 0.0001) %	Sólidos totales promedio (ST \pm 0.0001) %	Sólidos volátiles promedio (SV \pm 0.0001) %	Sólidos fijos promedio (ST \pm 0.0001) %
A1	6,216	5,9504	94,0496	65,3247	34,6753
A2	5,971	6,1127	93,8873	70,1877	29,8123
A3	6,051	5,4212	94,5788	68,8769	31,1231
A4	6,298	18,8748	81,1252	54,9718	45,0282
A5	8,216	9,4703	90,5297	37,5308	62,4692
A6	8,786	31,6161	68,3839	50,7529	49,2471
A7	8,170	20,8037	79,1963	40,3191	59,6809
A8	8,017	27,2807	72,7193	52,7240	47,2760
A9	8,128	51,0056	48,9944	54,4925	45,5075
A10	7,744	48,1143	51,8857	55,6418	44,3582

Tabla 8: Valor máximo, mínimo y promedio de las propiedades físicas del lodo.

Propiedad	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
pH	5,971	8,786	7,359
Humedad (%)	5,4212	51,0056	22,4650
Sólidos totales (%)	48,9944	94,5788	77,5350
Sólidos volátiles (%)	37,5308	70,1877	55,0822
Sólidos fijos (%)	29,8123	62,4692	44,9177

Tabla 9: Resultados del análisis químico correspondiente al lixiviado del lodo químico en estudio según metodología [14].

M	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr \pm σ)	Cobre total (Cu \pm σ)	Plomo total (Pb \pm σ)	Zinc total (Zn \pm σ)
A1	0,21 \pm 0,01	0,48 \pm 0,02	34 \pm 2	1,72 \pm 0,02
A2	0,10	0,29 \pm 0,03	11 \pm 1	2,8 \pm 0,2
A3	0,25 \pm 0,05	0,9 \pm 0,1	42 \pm 1	2,60 \pm 0,02
A4	0,14 \pm 0,02	0,077	4,1 \pm 0,3	0,16 \pm 0,01
A5	0,2 \pm 0,1	0,078 \pm 0,002	3,3 \pm 0,4	0,065 \pm 0,005
A6	0,10	0,10 \pm 0,01	1,72 \pm 0,06	0,080 \pm 0,008
A7	0,10	0,077	0,45	0,015 \pm 0,005
A8	0,10	0,077	3,6 \pm 0,2	0,06 \pm 0,02
A9	0,10	0,19 \pm 0,03	14 \pm 1	1,0 \pm 0,2
A10	0,10	0,077	0,45	0,075 \pm 0,005

M: muestra.

 σ : desviación estándar correspondiente a la corrida de cada muestra.

En la Tabla 9 se observa que la muestra que presenta mayor contenido de plomo en el lixiviado es la muestra A3 con un valor de 42mg/L, por esta razón esta muestra fue seleccionada para la

evaluación de las alternativas, ya que de esta manera se garantiza la estabilización de los lodos con menor contenido de plomo lixiviante.

Los resultados correspondientes a la composición química del lixiviado del lodo mostrados en la Tabla 10, indican que el lodo en estudio es un desecho tóxico, debido a que la concentración promedio del plomo en el lixiviado es de 11,46mg/L, la cual excede en un 129,20% el límite máximo permisible (5mg/L), establecido por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables en el decreto 2211 de la Gaceta Oficial de Venezuela N° 4418, para la disposición de desechos que contenga este metal, sin embargo, la concentración promedio de cromo, cobre y zinc de 0,14 mg/L, 0,23 mg/L y 0,85 mg/L respectivamente se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles (1 y 10 mg/L).

Tabla 10: Valor máximo, mínimo y promedio de la composición química del lixiviado del lodo.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio*	Máxima permisible**
Cromo	0,10	0,25	0,14	1,00
Cobre	0,077	0,9	0,23	10,00
Plomo	0,45	42	11,46	5,00
Zinc	0,015	2,8	0,86	10,00

*: cuando la muestra presenta un valor por debajo del límite detectado por el equipo, se asumió este como valor de la variable.

**: exigida por el M.A.R.N.R..

3.3. Evaluación de las alternativas

Una vez seleccionado la muestra A3 esta fue incorporada a cada una de las alternativas propuestas generando el lodo solidificado y a continuación se presentan los resultados que evidencian la efectividad del tratamiento.

Tabla 11: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 1.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T1	2,39 \pm 0,07	0,450 \pm 0,003	4,10 \pm 0,02	0,018
T2	2,03 \pm 0,03	0,88 \pm 0,02	0,45	0,018
T3	1,50 \pm 0,02	0,69 \pm 0,02	0,45	0,018

Tabla 12: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 2.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T4	6,14 \pm 0,03	0,80 \pm 0,02	1,55 \pm 0,09	0,018
T5	4,39 \pm 0,05	0,20 \pm 0,01	0,45	0,018

Tabla 13: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 3.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T6	1,34 \pm 0,02	0,410 \pm 0,008	8,20 \pm 0,01	0,09 \pm 0,01
T7	6,34 \pm 0,02	0,38 \pm 0,06	0,45	0,018

La efectividad del proceso estabilización/solidificación fue evaluada sólo a través de la comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de toxicidad (TCLP) de la muestra de lodo tratada y no tratada. De esta manera se logró

Tabla 14: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 4.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T8	5,14 \pm 0,02	0,25 \pm 0,01	0,45	0,06 \pm 0,01
T9	3,7 \pm 0,1	0,63 \pm 0,01	0,45	0,018

Tabla 15: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 5.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T10	3,5 \pm 0,1	0,60 \pm 0,02	5,3 \pm 0,2	0,10 \pm 0,01
T11	0,48 \pm 0,02	0,83 \pm 0,01	0,45	0,08 \pm 0,01

Tabla 16: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 6.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T12	0,14 \pm 0,03	0,22 \pm 0,01	0,45	0,10 \pm 0,01

determinar la estabilidad química del desecho tratado y por ende el efecto potencial contaminante de éste sobre el ambiente. Como se puede observar en las Tablas 11, 12, 13 y 14 la proporción lodo-agente solidificante 2:1 en cada una de las alternativas es la que presenta mejores resultados con respecto a la concentración de plomo, la cual es menor 0,45 mg/L para todas ellas, lo que representa un porcentaje de reducción de más del 98,9%. No obstante, al comparar cada una de estas alternativas con la proporción 2:1, como se muestra en la Tabla 17, todas presentan un incremento en las concentraciones de cromo en el lixiviado con respecto al lodo no tratado.

Este incremento de la concentración de cromo en el lixiviado del lodo tratado, se puede atribuir

Tabla 17: Porcentaje de reducción de las alternativas.

Metal	Porcentaje de reducción (%)			
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Cromo	-500	-1656	-2436	-1380
Cobre	54	86,6	74,6	26,6
Plomo	98,9	98,9	98,9	98,9
Zinc	99,3	99,3	99,3	99,3

a que mayormente este elemento está presente en el desecho en su estado de valencia 6+, ya que los pigmentos inorgánicos utilizados en el proceso productivo contienen el cromo en forma de dicromato. Este estado de valencia del cromo le confiere una alta movilidad, debido a que este es más soluble que el Cr^{3+} en soluciones alcalinas.

Debido a estos resultados, surgió la necesidad de realizarle un pretratamiento al desecho con el objetivo de mejorarlo para la aplicación del proceso estabilización/solidificación, es decir, considerar la reducción del Cr^{6+} a Cr^{3+} , ya que este tiene una menor solubilidad y toxicidad. El pretratamiento se realizó a la alternativa 1 (proporción 2:1) debido a que esta presenta un menor incremento en la concentración de cromo.

Para la etapa de pretratamiento planteada, se consideró como aditivo la turba, la cual tiene la propiedad de reducir el Cr^{6+} a Cr^{3+} , así como también retener este último, ya que de los grupos funcionales oxigenados presentes en la turba pueden oxidarse y acomplejarse al metal en su forma más reducida. Este pretratamiento se puede catalogar como una depuración química, debido a que la turba reacciona con los constituyentes del desecho y a su vez los atrapa.

De esta manera se generó la alternativa 5, la cual está conformada por la mezcla cemento-(lodo-turba), en donde se fijaron dos proporciones de mezcla, una con alto contenido de turba (20 %) y otra con bajo contenido de turba (6,20 %). Los resultados del análisis del lixiviado, mostrados en la Tabla 15, indican que se necesita una gran cantidad de turba, debido a que con un 20 % todavía existe un incremento en la concentración de cromo con respecto al lodo no tratado, siendo esto una desventaja debido a que se incrementa el

volumen del producto final de estabilización.

Por tal motivo, surge la alternativa 6, que está conformada por la mezcla cemento-(turba-silicato de sodio-lodo), en donde el silicato aumenta la capacidad encapsulante como se demuestra en los resultados de la Tabla 16, en donde se logró la reducción de la concentración de cromo con un 6,20 % de turba, es decir, con poca cantidad de esta.

Por lo tanto, la alternativa seleccionada desde el punto de vista ambiental fue la 6, debido a que esta estabiliza el lodo de manera eficaz, solventando el problema de la alta solubilidad del Cr^{6+} , obteniéndose de manera un desecho solidificado que cumple con las regulaciones ambientales solucionando un problema en lo que respecta a la disposición de residuos sólidos.

Finalmente, el tipo de procedimiento escogido para la aplicación en campo del proceso es la mezcla en planta de tipo discontinuo, debido a la cantidad de desecho a tratar y a la manera como está dispuesto este en su sitio de almacenamiento, además de permitir un buen control sobre las proporciones y homogeneidad de la mezcla. De esta manera, el proceso consistirá en la adición de las cantidades establecidas de lodo, turba y agua a la mezcladora de tal forma de homogeneizar la mezcla, para luego dejarla en reposo durante una hora, posteriormente se combina con la solución de silicato de sodio y el cemento. El material resultante se vacía en los tambores respectivos, donde se lleva a cabo el fraguado.

Sin embargo, las ventajas y desventajas de los diferentes procesos de E/S varían con el proceso, los aglomerantes, el residuo, las condiciones del lugar y otros factores específicos [12]. Los procesos que están basados en reacciones de cementación con puzolanas o con reactivos inorgánicos son, en general, de bajo coste y fáciles de utilizar, sin embargo, aumentan el volumen del material final a manejar. Los procesos basados en encapsulación con materiales poliméricos orgánicos apenas producen aumento del volumen, y tienen un elevado rendimiento, pero generalmente su coste es elevado, con materiales que son costosos, y en algunos casos conllevan dificultades de tratamiento. Se pueden utilizar

diferentes ensayos de lixiviación, dependiendo de la característica que deseamos conocer de los sólidos estabilizados/solidificados [15]. Por todo esto a la hora de evaluar las ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de E/S hay que tener en cuenta las condiciones específicas asociadas a cada una; la determinación de la estrategia de E/S óptima desde el punto de vista económico requiere el estudio de las características del producto final generado, así como de la disponibilidad, cantidad y coste de los aglomerantes y aditivos empleados en cada uno de los procesos viables en base a una potencial implementación [1].

4. Conclusiones

El lodo es catalogado como un desecho sólido tóxico, ya que la concentración de plomo total en el lixiviado (11,43 mg/L) estando por encima del límite máximo permitido (5 mg/L).

La adición de silicato de sodio a la mezcla cementante reduce el tiempo de fraguado y endurecimiento del producto final, así como también disminuye el volumen final del mismo.

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que la turba puede ser usada en el tratamiento de lodos químicos con contenido de metales pesados.

El proceso estabilización/solidificación representa una solución técnica viable para el problema de disposición final de los lodos químicos estudiados, ya que estos pueden ser convertidos en un desecho sólido que cumpla con el decreto 2211 de la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 44118.

Referencias

- [1] Roger D. Spence and Caijun Shi, editors. *Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes*. CRC press, 2004.
- [2] J. R. Conner, editor. *Chemical fixation and solidification of hazardous wastes*. Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [3] Angel Irabien y J. J. Rodríguez. *Los residuos peligrosos, caracterización, tratamiento y gestión*. Síntesis, Madrid, España, 2006.
- [4] Rachana Malviya and Rubina Chaudhary. Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1):267–276, 2006.
- [5] C. S. Poon and K. W. Lio. The limitation of the toxicity characteristic leaching procedure for evaluating cement-based stabilised/solidified waste forms. *Waste Management*, 17(1):15–23, 1997.
- [6] G. Tchobanoglous, Hilary Theisen, and S. A. Vigil. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. McGraw-Hill, 1993.
- [7] Maricruz Vargas Camareno and Luis Guillermo Romero Esquivel. Tecnología de inmovilización de desechos peligrosos en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 19(3):3–8, 2006.
- [8] Carlton C. Wiles. Solidification and stabilization technology. In *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*, chapter 7.3, pages 7.31–7.46. McGraw Hill, 1997.
- [9] David Wilson, Fritz Balkau y Maggie Thurgood. *Manual de formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo*. ISWA, primera edición, 2002.
- [10] Michael D. LaGrega, Philip L. Buckingham y Jeffrey C. Evans. *Gestión de residuos tóxicos: tratamiento, eliminación y recuperación de suelos*. McGraw-Hill, 1996.
- [11] Edwin F. Barth, Paul de Percin, and M. M. Arozarena. *Stabilization and solidification of hazardous wastes*. Number 186. Noyes Data, 1990.
- [12] Jesse R. Conner and Steve L. Hoeffner. A critical review of stabilization/solidification technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(4):397–462, 1998.
- [13] Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri, and Eaton Andrew D., editors. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. APHA, 18th edition, 1992.
- [14] COVENIN 2797-1991, Desechos tóxicos o peligrosos. método de lixiviación. COVENIN, 1991.
- [15] Miriam Pérez Clemente. Estabilización/solidificación de metales peligrosos en matrices geopoliméricas que contienen zeolitas. Trabajo Especial de Grado, Dep. Ingeniería Química y Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016.