

# Evaluación de la toxicidad de un residuo industrial estabilizado/ solidificado con cemento Portland

---

## Toxicity evaluation of an industrial waste stabilized/ solidified with Portland cement

**CAROLINA MARTÍNEZ-LÓPEZ**

*Estudiante de Ingeniería Ambiental  
Universidad Nacional de Colombia  
camalo37@hotmail.com  
Palmira, Colombia*

**JANNETH TORRES-AGREDO**

*Profesora Asociada  
Universidad Nacional de Colombia  
Grupo Materiales y Medio Ambiente GIMMA  
jtorresa@unal.edu.co  
Palmira, Colombia*

**RUBY MEJÍA-DE-GUTIÉRREZ**

*Profesora Titular  
Universidad del Valle  
Grupo Materiales Compuestos, GMC (CENM)  
ruby.mejia@correounivalle.edu.co  
Cali, Colombia*

*Fecha de recibido: 03/04/2013*

*Fecha de aceptado: 20/01/2014*

**Forma de citar:** MARTÍNEZ, Carolina, TORRES, Janneth y MEJÍA, Ruby. Evaluación de la toxicidad de un residuo industrial estabilizado/ solidificado con cemento portland. Rev.UIS.Ingenierías, 2014, vol.13, n.1, p.p 47-54.

### RESUMEN

Este estudio evalúa la toxicidad asociada a morteros de cemento portland adicionados con un residuo de catalizador gastado de la industria petroquímica denominado FCC, mediante la aplicación de la técnica de Solidificación/ Estabilización (S/E) y la posterior determinación de la lixiviación de los metales pesados contenidos en el residuo. Para tal propósito, se analizó la composición química y mineralógica del residuo, utilizando las técnicas de Fluorescencia de Rayos X, Difracción de Rayos X y espectroscopia de Infrarrojo. Para establecer las características de lixiviación, se aplicaron los ensayos de TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), SPLP (*Synthetic Precipitation Leaching Procedure*) y NEN 7341, en morteros adicionados con un 20% de FCC. Finalmente se comparó lo encontrado en los tres métodos con la legislación ambiental pertinente, concluyendo que el residuo encapsulado en cemento no constituye un problema en términos de lixiviación de contaminantes, por lo que surge como una interesante alternativa para el sector de la construcción.

**PALABRAS CLAVES:** Solidificación/Estabilización, catalizador usado de craqueo catalítico, cemento portland.

### ABSTRACT

This study evaluates the toxicity associated with Portland cement mortar blended with a residue of the petrochemical industry called catalytic cracking catalyst waste (FCC) using the technique of Solidification/Stabilization (S/E). The techniques of X-Ray Fluorescence, X-Ray diffraction and Infrared Spectroscopy permitted to evaluate the Chemical and mineralogical characteristics of the residue. Leaching of heavy metals on blended mortars with 20% w/w FCC - determined by the tests Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), Synthetic Precipitation Leaching

Procedure (SPLP) and NEN 7341 - showed that the encapsulated waste is not a problem from of point of view of environmental issues. The research results of this study are in accord with the environmental standards. The use of FCC surges as a positive alternative for appropriated disposition of materials containing heavy metals.

**KEYWORDS:** Solidification/Stabilization, spent catalytic cracking catalyst, portland cement.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las sociedades industrializadas, grandes productoras de materiales y químicos, traen como resultado el aumento progresivo y considerable de los residuos que contienen metales pesados cada año. Los metales pesados, son contaminantes inorgánicos que existen en una amplia variedad de formas, y en su mayoría son clasificados como tóxicos, mutagénicos y carcinogénicos (Bozkurt, S., et al., 2000).

Estas características permiten catalogar los residuos como peligrosos (Chaaban, M.A. 2001), (Talinli, I.; et al., 2005) debido a que estos tienden a bioacumularse y biomagnificarse a lo largo de las cadenas tróficas, pudiendo además, alcanzar sistemas de abastecimiento de agua mediante la lixiviación de residuos industriales, o por la acción de otros agentes como la lluvia ácida que afecta los suelos, liberando los metales pesados a las aguas subterráneas. Se requiere entonces de una adecuada disposición, evitando así, graves problemas de tipo ecológico y ambiental (Gollmann, M., et al., 2010).

Existen diferentes tipos de tratamientos que permiten la transformación de los constituyentes peligrosos de un residuo a formas menos solubles o tóxicas. Entre estas tecnologías se encuentra la de Solidificación/Estabilización (S/E), la cual ha sido ampliamente estudiada durante los últimos años hasta llegar a convertirse en una opción segura y eficaz (Oliveira, D.M, et al., 2003).

La Solidificación hace referencia a las técnicas que confinan los residuos en una matriz sólida (La Grega, M.D., et al., 2001). Esta masa puede consistir en el residuo original o el residuo previamente estabilizado (Wilson, D.; et al., 2002). La estabilización por su parte, son los procesos que envuelven reacciones químicas para minimizar la velocidad de migración de los contaminantes, reduciendo por lo tanto su potencial de lixiviación y toxicidad (Conner, J.R. 1990). En la tecnología de S/E varios agentes pueden ser utilizados, entre ellos el cemento, la cal, polímeros orgánicos, materiales termoplásticos, materiales absorbentes, y materiales cerámicos (Oliveira, D.M, et al., 2003). Se ha reportado que la aplicación de esta tecnología,

particularmente al utilizar cemento portland, presenta grandes ventajas y permite contener tanto compuestos orgánicos como inorgánicos (Paria, S.; Yuet, P.K. 2006). Así mismo, esta técnica ha demostrado ser exitosa para el tratamiento de residuos peligrosos que contienen metales pesados (AL-TAABA, A., PROSE, S.; 1996). Una de las industrias más altamente contaminantes a nivel mundial debido a la toxicidad potencial de sus residuos es la petroquímica (Instituto de investigaciones jurídicas 1992). Entre sus residuos se encuentra el denominado catalizador de craqueo catalítico (FCC), el cual consiste en una zeolita con estructura de aluminosilicatos, cuyo alto contenido de óxidos (alrededor del 90% de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y gran capacidad de dispersión le permite adquirir un comportamiento puzolánico (Pacewska, B., 2000). Este material al ser adicionado al cemento es capaz de incrementar las propiedades de desempeño de los materiales producidos. Su producción se estima en aproximadamente 400.000 toneladas anuales a nivel mundial (Furimsky, E. 1996). Actualmente su disposición es en rellenos de seguridad, lo que supone el desaprovechamiento de un residuo que puede ser reincorporado en el ciclo productivo.

Dado lo anterior, es necesario evaluar la viabilidad ambiental de la utilización del mencionado residuo, es decir establecer la toxicidad asociada a los morteros obtenidos a partir de éste mediante la aplicación de ensayos de lixiviación. Entre las técnicas más utilizadas destacan: TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Proceeding*), y SPLP (*Synthetic Precipitation Leaching Procedure*), desarrolladas durante la década de los 80 por la EPA de los Estados Unidos, y la norma NEN 7341 correspondiente a la normatividad holandesa. Estas permiten determinar la movilidad de los contaminantes presentes en los residuos sólidos a partir de un conjunto de condiciones de laboratorio (Rihm, A.; Arellano, J.; Sancha, A. M. 1998).

En el presente estudio se pretende evaluar la toxicidad asociada a morteros de cemento adicionados con residuo de FCC, mediante la determinación de la lixiviación de los metales pesados contenidos en él, tales como As, Pb, Zn, y Cr, y su posterior comparación con la legislación internacional.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El residuo de catalizador proveniente del proceso de craqueo catalítico (FCC), fue proporcionado por la empresa colombiana de petróleo Ecopetrol, consiste fundamentalmente de un material silicoaluminoso. Se empleó además, un cemento portland comercial no-adicionado (OPC) y arena de Ottawa para la preparación de los morteros. Las características físicas y químicas del FCC y el cemento, se recogen en la tabla 1, donde se aprecia como el FCC presenta una alta composición de alúmina y sílice (en un orden aproximado del 90%), y tiene un tamaño medio de partícula mayor que el cemento. Con objeto de reducir el tamaño de partícula el material fue sometido a un proceso de molienda, para lo cual se utilizó un molino con cuerpos moledores cilíndricos marca *Gilson Company 764 AVM*, logrando obtener un material con tamaño medio de 19,87  $\mu\text{m}$  para un tiempo total de molienda de 5 horas.

**Tabla 1.** Características químicas y físicas del FCC y del cemento utilizado

Características	FCC	Cemento (OPC)
Composición química, %		
SiO <sub>2</sub>	48,09	19,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41,57	4,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,91	3,61
CaO	0,22	64,46
MgO	0,13	1,52
K <sub>2</sub> O	0,09	0,39
TiO <sub>2</sub>	0,85	0,34
Pérdidas por ignición	2,19	2,58
<b>Propiedades Físicas:</b>		
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2,63	3,20
Tamaño medio de partícula ( $\mu\text{m}$ )	83,00	16,07

Para la evaluación de las características mineralógicas del residuo FCC se aplicaron las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), e Infrarrojo (IR). Para el caso de la técnica de DRX se utilizó un equipo RX *Rigaku RINT 2200*, con lámpara de cobre. Por otro lado, el ensayo de IR se llevó a cabo en un espectrómetro *Spectrum 100 de Perkin Elmer*, en un rango de longitudes de onda de 650 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

Para determinar la viabilidad de la técnica de S/E empleando FCC como adición al cemento portland, se prepararon morteros con una relación cemento: arena de 1:2,75, utilizando arena de Ottawa. Los morteros

fueron elaborados en proporciones del 20% de FCC con respecto a la cantidad de cemento, y una relación agua/cementante de 0,52. Las muestras fueron sumergidas en agua saturada con Ca(OH)<sub>2</sub>, a temperatura ambiente, por un periodo de 28 días. Cumplido este tiempo, se procedió a realizar los ensayos de lixiviación.

Para determinar la movilidad de los contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos desde la matriz del residuo hasta el medio ambiente se utilizaron los métodos TCLP (EPA. Test Method 1311.2013) y SPLP (EPA. Test Method 1312. 20013)

### 2.1 Aplicación del ensayo de TCLP

Para la aplicación del ensayo de TCLP, inicialmente se disminuyó el tamaño de partícula de los morteros hasta alcanzar un diámetro de aproximadamente 10 mm. Luego se procedió a seleccionar el fluido de extracción como lo indica la norma correspondiendo en este caso al fluido No. 1, que consiste en una mezcla de 5,7 ml de ácido acético glacial y 64,3 ml de hidróxido de sodio, diluida a un volumen de 1 L con agua destilada. La cantidad de fluido de extracción debe ser de 20 veces el peso de la muestra; por este motivo se tomaron 10 gramos de la muestra en 200 ml de fluido extractor, y se llevó a cabo un proceso de agitación continua durante un periodo de  $18 \pm 2$  horas aproximadamente, a una temperatura de  $22 \pm 3^\circ \text{C}$ . Seguidamente, se realizaron las filtraciones empleando un filtro de fibra de vidrio de tamaño efectivo de poro de 0.7  $\mu\text{m}$ . Con el objetivo de conservar las muestras, los extractos fueron acidificados mediante la adición de ácido nítrico hasta lograr alcanzar un pH de 2. El análisis del extracto de TCLP consiste en la determinación de los metales pesados presentes, para lo cual se empleó un Espectrofotómetro de Absorción Atómica marca *Perkin Elmer*, referencia *Analyst 400*.

### 2.2 Aplicación del ensayo de SPLP

El ensayo de SPLP fue aplicado de modo similar al TCLP, sin embargo, en este caso se empleó un fluido que consiste en una solución compuesta de ácidos sulfúrico y nítrico (60/40 en peso) diluido a un volumen de 1L de agua destilada, hasta obtener un pH de  $4,20 \pm 0,05$ . El material se mezcla con la solución anterior y se somete a agitación continua y posterior filtración, de manera similar que en el ensayo de TCLP. Los extractos se acidificaron a un pH de 2 mediante adición de ácido nítrico. Finalmente, se analizaron los metales pesados empleando la técnica de Absorción Atómica.

### 2.3 Aplicación de la norma NEN 7341

El ensayo de disponibilidad NEN 7341, permite valorar el grado de fijación de los constituyentes tóxicos a la matriz cementante, y por lo tanto evaluar el comportamiento de la lixiviación a largo plazo. Para su realización, en primer lugar las muestras se someten a un proceso de molienda para reducir su tamaño de partícula hasta 125  $\mu\text{m}$  aproximadamente. La extracción se llevó a cabo por medio de dos etapas, utilizando agua acidulada con  $\text{HNO}_3$  a una relación líquido-sólido (L/S)=50 l/kg, por lo que se dispuso de 5 g de muestra en 250 ml de agua destilada. Durante el primer paso se aplicó un proceso de agitación constante para mantener las partículas en suspensión, y de modo paralelo se adicionó ácido nítrico (1N) permanentemente hasta alcanzar un pH=7. Una vez se realizó este proceso de filtración, se desarrolló de forma similar el segundo paso, en el cual bajo mezcla continua se disminuyó su pH hasta lograr mantenerlo en un valor cercano a 4. Las muestras tuvieron un periodo de contacto con el medio lixivante de 3 horas para cada etapa. Para finalizar, se filtró nuevamente al vacío con un filtro de vidrio de tamaño efectivo de poro de 0,7  $\mu\text{m}$ . El líquido extraído fue acidificado hasta alcanzar un pH=2 para su conservación y posterior análisis (NNI. Netherlands Normalization Institute. NEN 7341. 1996)

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Caracterización del residuo

La figura 1 presenta el difractograma de Rayos X (DRX) del residuo FCC. Se observa que el FCC posee tanto material amorfo como cristalino. En este caso se identifica un levantamiento de la línea base entre 15 y 35° (2 $\theta$ ), que indica la presencia de amorficidad en el material.

Entre los componentes cristalinos se observa un patrón correspondiente al de un material tipo aluminosilicato sódico hidratado de carácter zeolítico, similar a la faujasita F (2 $\theta$  = 6.19°, 15.6°, 23.58°) ( $\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{24}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) (JUNG-HSIU, W., et al., 2003) (SU, N.; CHEN, Z., FANG, H., 2011) y (TSENG, Y., HUANG, Ch.; HSU, K., 2005) Adicionalmente se aprecia la presencia de caolinita (K) y cuarzo (Q). La presencia de la caolinita se debe a que ésta es utilizada en los catalizadores de craqueo como una matriz inerte (FALABELLA, E., 1993).

En la figura 2 aparece el espectro de Infrarrojo del FCC, el cual es típico para un material aluminosilicato.

Se presenta una banda intensa ubicada a 1080  $\text{cm}^{-1}$ , la cual corresponde a las vibraciones asimétricas de los enlaces Si-O-Si y/o Al-O-Si. La banda ubicada en 909  $\text{cm}^{-1}$  se atribuye a las vibraciones del enlace Al-OH, mientras que la banda observada alrededor de 798  $\text{cm}^{-1}$  se atribuye a las vibraciones de estiramiento simétrico del enlace Si-O-Si o Si-O-Al. La banda a 560  $\text{cm}^{-1}$  se asocia al aluminio octaedral presente en la mullita. La banda ancha y débil entre 3000-3600  $\text{cm}^{-1}$  y la ubicada en 1630  $\text{cm}^{-1}$  se pueden atribuir a la presencia de agua en la muestra, correspondientes a vibraciones de valencia -OH (asimétrica y simétrica) y de deformación H-O-H (LEE, W.K.W.; VAN DEVENTER, J.S.J., 2003) (PRUD'HOMME, E., et al., 2011) y (Autor, 2012)

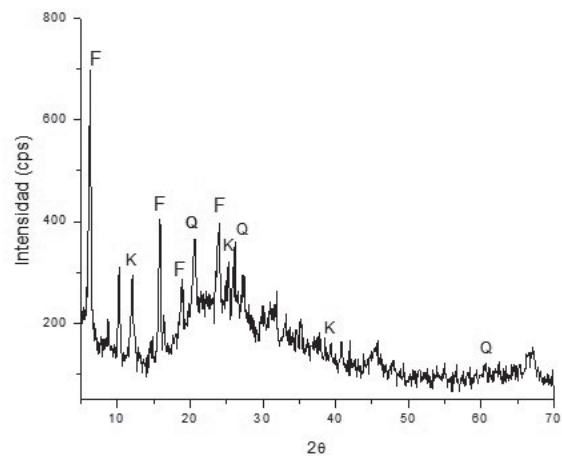


Figura 1. Difractograma de Rayos X para el FCC. F: faujasita, Q: Cuarzo, K: caolinita

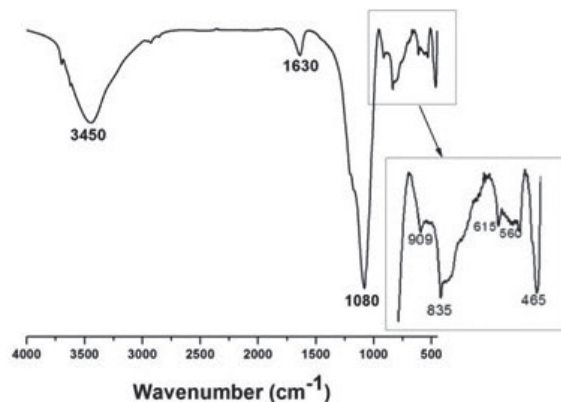


Figura 2. Espectro Infrarrojo del FCC

### 3.2 Resultados de los ensayos de toxicidad

En la tabla 2 se observa la lista de los metales pesados presentes en la muestra original de FCC y el cemento

empleado; el análisis inicial se realizó con el propósito de conocer si éste incluye o no concentraciones adicionales, capaces de causar interferencia en el ensayo de toxicidad. Se aprecia que el residuo FCC posee altas concentraciones de metales pesados, cuya inadecuada disposición puede generar efectos indeseables tanto en el medio ambiente como en la salud humana; estas características lo convierten en un residuo peligroso, por lo cual el material requiere de un tratamiento especial previo a su disposición (CEPIS-OPS. Guía para la definición y clasificación de residuos peligrosos. www.cepis.org.co., 2013) (Treviño, C. 1998) y (RAPAPORT, D. 2000)

Los valores obtenidos a partir de la aplicación de las técnicas TCLP, SPLP y NEN 7341 a los morteros adicionados con el 20% de FCC se presentan en la tabla 3.

**Tabla 2.** Identificación de los metales presentes en el FCC y cemento

Metales (mg/Kg)	FCC	CEMENTO (OPC)
Zn	81	0,60
Cr	19	48
Pb	25	--
As	12	--

--No se encuentra presente

**Tabla 3.** Resultados del ensayo de TCLP, SPLP y NEN 7341 en morteros adicionados con el 20% de FCC

Metales (mg/L)	TCLP	SPLP	NEN 7341
Zn	0,41	0,12	0,1
Cr	0,11	<0,05	<0,05
Pb	*	<0,13	*
As	*	<0,002	0,00172

\*Por debajo del límite de detección

Al analizar los valores reportados en la tabla 3 se puede observar que las cantidades de los metales presentes en el mortero de cemento portland adicionado con FCC son inferiores a los encontrados inicialmente en el material original, demostrando que la técnica de S/E para el FCC fue efectiva. Estos resultados coinciden con lo encontrado por diversos autores (Furimsky, E. 1996), (Rattanasak, U., et al., 2001) y (Sun, D., et al., 1998), quienes afirman que la adición parcial de este subproducto en morteros de cemento da como resultado la formación de un material estable, con bajo potencial

de toxicidad, por lo que su empleo desde el punto de vista ambiental en el sector de la construcción es válido.

En la tabla 4, se indican los límites máximos permisibles de los metales objeto de estudio, acorde a lo establecido por la legislación de Estados Unidos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la normativa de la Unión Europea (UE), para el caso de agua de uso doméstico. Esta información fue adquirida de fuentes de la EPA, la OMS, y la directiva 98/83/EC de Europa, respectivamente (EPA., <http://water.epa.gov>., 2013) (WHO., 2001) y (Diario oficial de las comunidades Europeas. <http://www.lenntech.es/aplicaciones/potable/normas/estandares-europeos-calidad-agua-potable.htm#ixzz13C1IJX00>., 2013)

**Tabla 4.** Límites máximos permisibles de los metales pesados para el caso del agua según la EPA, OMS y UE

Límites Máximos permisibles (mg/L)			
Metales	EPA	OMS	UE
Zn	5,00	3,00	**
Cr	0,10	0,05	0.05
Pb	0.015	0,01	0.01
As	0,05	0,01	0.01

\*\*No hay información disponible para este elemento

Al comparar la información reportada en las tablas 3 y 4, se evidencia que los valores correspondientes a los metales Zn, Cr y As reportados en la Tabla 3 son inferiores a los límites máximos permisibles establecidos por la legislación. En el caso del plomo, para las técnicas TCLP y NEN 7341, su contenido queda por debajo del límite de detección, por lo que no es fácil realizar la comparación con la tabla, sin embargo debido a su bajo contenido tras la aplicación del ensayo SPLP, y al grado tan restrictivo de la normatividad citada se puede inferir que su retención en la matriz cementante ha sido efectiva.

En términos generales, los resultados encontrados a partir de la aplicación de los tres procedimientos fueron muy cercanos. No obstante es importante destacar que cada uno intenta recrear un escenario diferente, que para el caso del TCLP corresponde a la simulación de la acción de los ácidos orgánicos generados en un sitio de co-disposición sin impermeabilización de fondo, empleando con este fin una solución de ácido acético. Por otra parte, el SPLP intenta representar el efecto de lluvia ácida, por lo que emplea un búfer de ácido acético y sulfúrico con un pH de  $4,2 \pm 0,05$ , constituyendo un ataque relativamente más agresivo que el anterior. El

método NEN 7341 permite determinar la cantidad de un componente que pueda ser liberado al exterior por procesos de lixiviación a partir de materiales granulares expuestos a condiciones extremas, valorando así el grado de fijación de los contaminantes a la matriz cementante.

#### 4. CONCLUSIONES

Al realizar el análisis de las concentraciones iniciales de los metales pesados para el FCC, se logró determinar que debido a su alto contenido de metales pesados, este se puede clasificar como un residuo peligroso. No obstante, una vez aplicada la técnica de S/E, los contaminantes quedan encapsulados por lo que presentan una cantidad de lixiviación muy baja.

Se demostró que el cemento tiene la capacidad de fijar este tipo de metales, considerando además que fue evaluado mediante diferentes técnicas (unas más agresivas que otras), y que las comparaciones se llevaron a cabo con la norma más restrictiva. Por lo anterior, se concluye que desde el punto de vista de la lixiviación de contaminantes, este residuo puede ser empleado como adición al cemento en la proporción estudiada.

Finalmente se destaca la importancia de la reutilización de un residuo industrial, cuyo aprovechamiento, adicionalmente disminuye en igual proporción la cantidad de cemento a emplear, por tanto reduce el consumo de recursos naturales, el gasto energético y la liberación de gases tipo CO<sub>2</sub> propios de la producción de cemento.

#### 5. REFERENCIAS

- BOZKURT, S.; MORENO, L.; NERETNIEKS, I. Long term processes in waste deposits. *The Science of Total Environment*. 2000, vol. 250, núm. 1-3, pp.101-121.
- CHAABAN, M.A. Hazardous waste source reduction in materials and processing technologies. *Materials and Processing Technologies*. 2001, vol. 119, núm. 1-3, pp.336-343.
- TALINLI, I.; YAMANTÜRK, R.; AYDIN, E.; BASAKCILARDAN-KABAKS, S. A rating system for determination of hazardous wastes. *Journal of Hazardous Materials*. 2005, vol. 126, núm. 1-3, pp. 23-30.
- GOLLMANN, M.; DA SILVA, M.; MASUERO, A.; DOS SANTO, J.H. Stabilization and solidification of Pb in cement matrices. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, vol. 179, núm. 1-3, pp. 507-514.
- OLIVEIRA, D.M; CASTILHOS, J.A.; MIOTELLO, E. Avaliac o da solidificac o/estabilizac o de borras oleosas utilizando caulinita e vermiculita como materials adsorbentes. *XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental*. Joinville Santa Catarina: 2003, pp. 1-18.
- LA GREGA, M.D.; BUCKINGHAM, P.L.; EVANS, J.C. *Hazardous wastes management*. 2a edición. New Jersey: McGraw- Hill, 2001. 1202 p.
- WILSON, D.; BALKAU, F.; THURGOOD, M. Solidificación y Estabilización. Manual de Formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo. 2002. <[www.uneptie.org/pc/hazardouswaste/menu.htm](http://www.uneptie.org/pc/hazardouswaste/menu.htm)>. [consulta: 31 -1- 2013].
- CONNER, J.R. *Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 692 p. ISBN.0-442-20511-2
- PARIA, S.; YUET, P.K. Solidification/Stabilization of organics and inorganics contaminants using portland cement: a literature review. *Environmental Reviews*. 2006, vol. 14, pp. 217-255.
- AL-TAABA, A.; PROSE, S.; Treatment Study for in-Situ Stabilization/Solidification of soil contaminated with methylene Blue. *Environmental Technology*. 1996, vol. 17, núm. 2, pp.191-197.
- Instituto de investigaciones jur dicas. La industria petrolera ante la regulaci n jur dico-ecol gica en México. 1  edici n. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad universitaria, México, 1992, 251p. ISBN 968-36-2378-6.
- PACEWSKA, B.; BUKOWSK, M.; WILINSKA, I. Influence of some aggressive media on corrosion resistance of mortars with spend cracking catalyst. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2000, vol. 60, núm. 1, pp. 257-264.
- FURIMSKY, E. Review of spent refinery catalyst: environment, safety and utilization. *Catalysis Today*. 1996, vol. 30, núm. 4, pp. 223-293.
- RIHM, A.; ARELLANO, J.; SANCHA, A. M. Uso de test de lixiviación para caracterización de residuos del área minera y reflexiones sobre gestión de residuos

- peligrosos en América Latina. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. 26 (AIDIS 98). Lima, 1-5 noviembre de 1998. CEPIS. -038116. pp.1-8.
- EPA. Test Method 1311. Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). Code of Federal Regulations, 40 CFR part 261, appendix II, 1991, <<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1311.pdf>>. [Consulta: 14-1-2013].
- EPA. Test Method 1312. Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP), 1991. <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1312.pdf>. [Consulta: 14-1-2013].
- NNI. Netherlands Normalization Institute. NEN 7341. Leaching characteristics of solid (earthy and stony) building and waste materials. Leaching tests. Determination of the availability of inorganic components for leaching. Delft. 1996.
- JUNG-HSIU, W.; WU, W.; HSU, K. The effect of waste oil-cracking catalyst on the compressive strength of cement pastes and Mortars. *Cement and Concrete Research*. 2003, vol. 33, núm. 2, pp. 245-253.
- SU, N.; CHEN, Z.; FANG, H. Reuse of spent catalyst as fine aggregate in cement mortar. *Cement and concrete composites*. 2011, vol. 23, núm. 1, pp. 111-118.
- TSENG, Y., HUANG, Ch.; HSU, K. The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2005, vol. 32, pp. 782-787.
- FALABELLA, E. Papel das Zeolitas em Catalizadores de Craqueamiento; Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED. Catalizadores y Absorbentes. Tamices Moleculares; *Primer Curso Iberoamericano. Subprograma V*. Red Temática VA. 1993.
- LEE, W.K.W.; VAN DEVENTER, J.S.J. Use of infrared Spectroscopy to study Geopolimerization of heterogeneous Amorphous Aluminosilicates, *Langmuir*. 2003, vol. 19, pp. 8726-8734.
- PRUD'HOMME, E.; MICHAUD, P.; SOUSSEIN, E.; PEYRATOUT, C.; SMITH, A. ROSIGNOL, S. In situ inorganic foams prepared from various clays at low temperature. *Applied Clay Science*. 2011, vol. 51, pp. 15-22. Autor, 2012.
- CEPIS-OPS. Guía para la definición y clasificación de residuos peligrosos. <[www.cepis.org.co](http://www.cepis.org.co)>. [Consulta:20-1-2013]
- TREVIÑO, C. New EPA rule will affect spent catalyst management. *Oil & Gas Journal*. 1998, vol.96, núm. 41, pp. 62-64.
- RAPAPORT, D. Are spent hydrocracking catalysts listed hazardous wastes?. *Hydrocarbon Processing*. 2000, pp. 49-53.
- RATTANASAK, U.; JATURAPITAKKUL, C.; SUDAPRASERT, T. Compressive strength and heavy metal leaching behaviour of mortars containing spent catalyst. *Waste Management & Research*. 2001, vol. 19, núm. 5, pp. 456-464.
- SUN, D.; LI, X.; BRUNGS, M.; TRIMM, D. Encapsulation of heavy metals on spent fluid catalytic cracking catalyst, *Water Science and Technology*. 1998, vol. 38, núm. 4, pp. 211-217.
- EPA. Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable. EPA 815-F-00-007, 2000. <<http://water.epa.gov>>. [Consulta 3 -2-2013].
- WHO. Guidelines for Drinking-water Quality Available, 4a edition, 2011, pp. 541.
- Diario oficial de las comunidades Europeas. Estándares Europeos de la calidad del agua potable. Directiva 98/83/EC sobre la calidad del agua destinada a consumo humano. 1998. <<http://www.lenntech.es/aplicaciones/potable/normas/estandares-europeos-calidad-agua-potable.htm#ixzz13C1IJX00>>. [Consulta 3-2-2013].

## 6. AUTORES

**Carolina Martínez López.** Ingeniera Ambiental, Universidad Nacional de Colombia. Es miembro activo del Grupo de Investigación en Materiales y Medio Ambiente, ha participado en diversos proyectos de investigación en la Universidad Nacional de Colombia, financiados por Colciencias y es coautora de artículos y ponencias en eventos especializados nacionales e internacionales.

**Janneth Torres Agredo.** Tecnóloga Química e Ingeniera de Materiales, Doctora en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Materiales. Es Profesora Asociada de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira y Coordinadora del Grupo de Investigación en Materiales

y Medio Ambiente – GIMMA, ha participado en diversos proyectos de investigación relacionados con el uso de puzolanas y manufactura de nuevos materiales, con la Universidad del Valle y la Universidad Nacional de Colombia, algunos de los cuales financiados por Colciencias. Autora de artículos en diversas revistas, y de ponencias en eventos especializados nacionales e internacionales.

**Ruby Mejía de Gutiérrez.** Química de la Universidad del Valle, con un Máster y Doctorado en Ciencias Químicas (Materiales) de la Universidad Complutense de Madrid. Profesora Titular de la Universidad del Valle y Coordinadora de los programas de Maestría y

Doctorado en Ingeniería área de énfasis Ingeniería de Materiales. Ha ejecutado, desarrollado y dirigido más de 30 proyectos de investigación relacionados con materiales de construcción, valorización de desechos y subproductos industriales, procesos de activación alcalina y geopolimerización, desarrollo de materiales compuestos, y estudios de durabilidad y corrosión de materiales, en el marco de los cuales ha dirigido tesis doctorales, de maestría y pregrado. Es directora del grupo de investigación Materiales compuestos – GMC de la Universidad del Valle (CENM) y autora de un número apreciable de artículos nacionales e internacionales.