

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE RESIDUOS INDUSTRIALES PELIGROSOS POR MEDIO DE COLUMNAS TERMOSTATIZADAS Y DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO

Jaime VITE¹, Manuel VITE² y Carmen CARREÑO¹

¹Departamento de Estudios del Ambiente, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) Apdo. Postal 18-1027 México 11801, D. F. México.

²Universidad de Guadalajara, José Guadalupe Zuno # 48, Zapopan 45101, Jalisco, México.

(Recibido septiembre 1997, aceptado octubre 1998)

Palabras clave: lixiviación de metales pesados, residuos industriales peligrosos, columna termostatzada

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue valorar las eficiencias de lixiviación de metales pesados utilizando columnas termostatzadas para tratar residuos sólidos industriales peligrosos; que representan, por el volumen con que se generan y su alta toxicidad, un gran problema para su tratamiento y disposición. El trabajo incluye también el diagrama de una Planta Piloto para extracción de metales pesados, así como la estimación de los costos de la misma. Tanto el proceso como el equipo fueron patentados en los Estados Unidos de América y en México. Para el desarrollo de este estudio se utilizaron cuatro columnas termostatzadas acopladas. Los desechos fueron finamente molidos y suspendidos en una pulpa acuosa agregando de 10 a 40 gL⁻¹ de ácido mineral o hidróxido de sodio hasta alcanzar el pH de 2, 5, 7 y 10. Se utilizaron de 4 a 10 gL⁻¹ de bisulfito de sodio y de 0.3 a 1.5 g de dodecil sulfato de sodio. En algunos casos con este método fue posible remover hasta el 100% de los metales pesados. Se utilizaron la espectrometría de emisión por plasma para determinar las concentraciones de los cationes en los licores de lixiviación y la técnica de difracción de rayos X para las aleaciones metálicas.

ABSTRACT

The purpose of this paper was to measure the heavy metals leaching efficiency from dangerous solid wastes using thermostatted columns; wastes which, due to their volume and toxicity are a serious problem to be solved. This work includes a diagram of a pilot plant to leach heavy metals, cost estimation is included. Process and device were patented in the U.S.A. and Mexico. For this study four coupled thermostatted columns were used. The wastes were finely ground and suspended in water until a pulp was obtained. 10 to 40 g L⁻¹ of mineral acid or sodium hydroxide were added to reach pH values of 2, 5, 7 and 10. 4 to 10 g L⁻¹ of sodium bisulphite and 0.3 to 0.5 g of sodium dodecyl sulfate were also added to the pulp. In some cases this method can remove 100% of the heavy metals content. To study the heavy metals removal efficiency, coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) was utilized. The metallic alloys in the samples were studied by X-ray diffraction.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Programa para la Minimización y Manejo Integral de Residuos Industriales Peligrosos en México 1996-2000 (PRORIP), en el país se generan 8 millones de toneladas anuales de RIP, sin incluir a los jales mineros, también considerados peligrosos y producidos en cantidades entre 300,000 y 500,000 toneladas diarias (SEDESOL 1993). Estos desechos contienen diferentes concentraciones de metales tóxicos y valiosos susceptibles de ser recuperados, evitando de esta forma la posible contaminación al ambiente.

En los últimos años se han realizado diversos estudios so-

bre la estrategia de eliminación o disminución de toxicidad por contenido de metales pesados en desechos sólidos industriales, cuando se aplican tecnologías tales como incineración (Fernández 1992, Carnes 1992, Buscholz 1994) y recuperación de metales de la industria electroquímica (Wiaux y Nguyen 1990, Rajeshwar *et al.* 1994, Ajmal 1996). Otros han desarrollado trabajos para separar metales utilizando el proceso de flotación (Moussavi y Carleson 1990, Huang 1995), la remoción de metales por intercambio iónico (Petruzzelli *et al.* 1995) o por lodos activados (Chang 1995).

En este estudio se analizaron 8 muestras de desechos sólidos industriales provenientes del Valle de México, divididos en

tres sectores industriales, de las cuales 6 fueron de la industria metalmeccánica, una de la industria química y una de la industria metalúrgica.

Para la lixiviación de los metales, se utilizó un sistema acoplado de 4 columnas termostatzadas, se realizó un análisis cuantitativo del contenido metálico de cada una de las muestras utilizando la técnica de espectrometría de emisión por plasma, antes y después de ser lixiviadas. Las aleaciones metálicas y los componentes presentes en la muestra, fueron estudiados utilizando la técnica de difracción de rayos X.

Antecedentes

En el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) se ha logrado, a nivel laboratorio, la extracción de metales pesados de desechos sólidos industriales utilizando columnas termostatzadas, entre ellos: platino, oro, plata, zinc, germanio, manganeso, cobre, cromo, vanadio y arsénico. Muchos de estos metales fueron recuperados simultáneamente logrando una eficiencia hasta del 100%. El proceso y el equipo utilizados para tal fin han sido desarrollados y construidos en el ININ y fueron patentados por Vite (1994) en los Estados Unidos de América. También se ha logrado recuperar metales pesados de lodos de aguas residuales (Vite *et al.* 1997). Así mismo se realizaron evaluaciones por PIXE de la eficiencia de lixiviación de metales de arenas de fundición por Aspiazu *et al.* (1995).

Pretratamiento de las muestras

A las muestras previamente se les eliminó la humedad, posteriormente fueron trituradas en un molino de martillos, obteniendo un tamaño de partícula de 0.15 mm, utilizando una malla No. 60. Se colocaron 400 g en 4 porciones de 100 g cada una, para ser tratadas utilizando columnas termostatzadas; además también se trataron 100g de muestra para análisis por difracción de rayos X y por espectrometría de emisión por plasma.

Desarrollo experimental

En este trabajo se realizó la lixiviación de metales pesados de desechos sólidos industriales empleando para ello 4 columnas termostatzadas acopladas. Un esquema del sistema y dispositivos utilizados se puede apreciar en la Fig. 1. Cada sesión de experimentos se realizó con valores de pH de 2, 5, 7 y 10 para cada una de las columnas, respectivamente. El flujo de aire introducido a cada columna fue de $1700 \text{ cm}^3/\text{min}$ y se mantuvo constante una temperatura de 60°C durante 2 horas, se tomó la lectura del pH cada 10 minutos y si éste variaba se agregaba ácido sulfúrico 0.5 ML^{-1} ó hidróxido de sodio 0.5 ML^{-1} para mantener la solución en los pH antes mencionados.

Se utilizaron de 4 a 10 gL^{-1} de bisulfito de sodio y de 0.3 a 1.5 gL^{-1} de dodecil sulfato de sodio. Estos fueron combinados con el desecho sólido industrial para formar la pulpa, posteriormente se separó el sólido del líquido (licores), mediante un embudo buchner y un kitazato.

La toxicidad de los desechos industriales fue establecida de acuerdo a la norma NOM-CRP-001/93, que se refiere a los procedimientos para llevar a cabo las pruebas de extracción que deter-

minan si los constituyentes de cierto residuo sólido se encuentran en un nivel tóxico.

A continuación se indica el origen de las muestras según la información proporcionada por cada una de las empresas:

MUESTRA	INDUSTRIA
M1. Desechos de arenas	Metalúrgica
M2. Baños de cromo	Metalmeccánica
M3. Residuos de pelusa	Metalmeccánica
M4. Desechos sólidos, polvos	Metalmeccánica
M5. Desechos sólidos, polvos	Metalmeccánica
M6. Desechos de decapado de latón	Metalmeccánica
M7. Desechos de esmaltes	Metalmeccánica
M8. Desechos de pinturas	Química

Análisis de los desechos por difracción de rayos X y por espectrometría de emisión por plasma

Se operó un difractómetro de rayos X Siemens D-500, a través del cual se determinaron las distancias interplanares en los materiales policristalinos, con el fin de conocer la matriz de la muestra problema. El equipo se utilizó aplicando el método de polvos; esto significa que durante la operación del equipo se

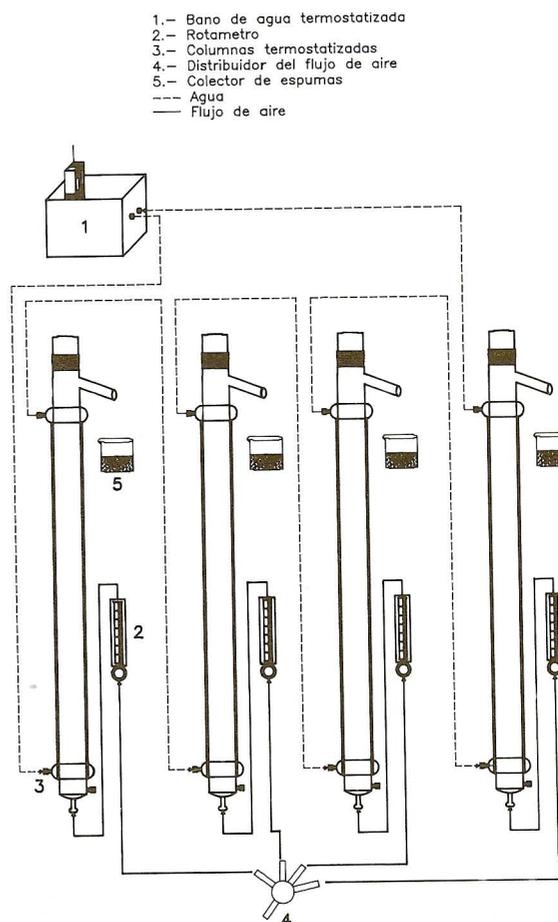


Fig.1. Esquema del proceso utilizado para la extracción de metales pesados de muestras de desechos sólidos industriales

mantuvo constante la longitud de onda de los rayos X y lo que se varió fue el ángulo de difracción. Las muestras seleccionadas se homogeneizaron perfectamente, se tomó una porción de cada una para ser analizada en el difractor y se colocó en un portamuestras de metal (5 cm X 5.5 cm aprox.); al aplicarle presión con un cubreobjetos se logró que la muestra quedara bien adherida. Posteriormente se colocó la muestra dentro del equipo para la obtención del difractograma experimental.

Las condiciones de operación fueron las siguientes:

Ánodo: cobre

Longitud de onda: 1.54406 nm

Intervalo de barrido: 4° - 70°

Tiempo de lectura: 1.0 seg

Tamaño de paso: 0.03°

Se obtuvo un difractograma por cada muestra con el objeto de conocer los compuestos existentes antes y después de la lixiviación y para obtener la eficiencia del proceso de extracción.

La interpretación de los patrones de difracción se logró utilizando el paquete DIFRAC AT V3.3 (1995), que contiene los patrones teóricos de los elementos y compuestos cristalinos que se conocen.

Las muestras también fueron analizadas utilizando la técnica de espectrometría de emisión por plasma; a través de esta técnica se pueden determinar casi todos los elementos de la tabla periódica, con excepción de halógenos y gases.

El plasma se inicia mediante una descarga de chispa, una fotocelda detecta esta llama y pone en marcha el dispositivo automático de sintonización de impedancia entre el generador y la antorcha; en la espectrometría, un nebulizador neumático convierte la muestra líquida en aerosol, que pasa a través de una cámara de condensación donde se eliminan las gotas y finalmente se introduce en la antorcha del plasma. Ésta consiste en tres tubos de cuarzo concéntricos que están rodeados por una bobina de inducción conectada a un generador de radio frecuencia. La fuerza electromotriz inducida en la antorcha causa la ionización del gas neutro (argón) creando así un plasma que alcanza una temperatura de 10⁴ °K, lo que permite la excitación de los átomos que componen la muestra que se analiza. La radiación característica es dispersada, por una red de difracción en sus líneas espectrales. La rotación de esta red de difracción, dirigida por un motor de pasos controlados por una computadora, permite la selección de la longitud de onda deseada y el examen de las líneas espectrales secuencialmente.

Las intensidades de las líneas pueden convertirse por medio de un receptor optoelectrónico, en una tensión eléctrica que es proporcional a la concentración del elemento analizado. Con este equipo se pueden hacer tanto análisis cualitativos como cuantitativos, estando el instrumento en ambos casos completamente controlado por una computadora, que no solo dirige el proceso de medida, sino que también libera al operador de la realización de ajustes, manipulación y cálculos.

Para el análisis de las muestras, éstas fueron procesadas por duplicado y se leyeron tres veces consecutivas en dos distintas ocasiones. En las incertidumbres están incluidas las variaciones propias del proceso y reflejan la homogeneidad de la muestra.

Los patrones utilizados fueron soluciones estándar certificadas proporcionados por la compañía E. M. Science:

ELEMENTO	LOTE	CONCENTRACIÓN CERTIFICADA (g/L)
Cobre	33301	0.997
Hierro	34087	1.000
Níquel	33275	1.008
Cromo	34234	1.002
Zinc	33196	1.005
Titanio	34019	1.010

Así mismo los límites de detección estuvieron definidos de acuerdo con la IUPAC y para los elementos tratados son los siguientes:

ELEMENTO	LÍMITES DE DETECCIÓN (ppm)
Cobre	0.997
Hierro	1.000
Níquel	1.008
Cromo	1.002
Zinc	1.005
Titanio	1.010

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se calcularon las eficiencias de extracción de metales de la columna termostatazada para cuatro electrolitos con diferencia en el pH. La eficiencia de extracción se calculó mediante la expresión:

$$E (\%) = [(C_f * 1000 \text{ mL}) / C_i * 100 \text{ g}] * 100 \quad (1)$$

donde: C_f= concentración de metales en las muestras de licores, después de la extracción (mg/L) y C_i= Concentración de metales en las muestras sólidas, antes de la extracción (mg/g, E (%)).

Como se mencionó anteriormente, se recibieron 8 muestras de diferentes sectores industriales. En las siguientes tablas se incluyen los resultados de los análisis cuantitativos de los metales presentes, utilizando la técnica de espectrometría de emisión por plasma, los análisis fueron realizados antes y después del proceso de lixiviación.

La muestra 1 (M1) proviene de una industria metalúrgica, los análisis utilizando la espectrometría de emisión por plasma identificaron Cr (31 mg/g), Fe (1.32 %) y Ni (35 mg/g) en la muestra original, como lo indica la **Tabla I**. Durante el proceso, el pH 10 fue el que favoreció la disolución del metal en la solución lixivante utilizando las columnas termostatazadas. Como lo indica la **Tabla II**, también fué posible la extracción de Cr, Fe y Ni, en pequeñas concentraciones, en el caso de este último se obtuvo una eficiencia de extracción a pH de 7 y 10 mayor que en el proceso utilizado por el laboratorio, que realizó la digestión y el análisis por espectrometría de emisión por plasma, basado en Littlejohn (1991). Mediante este método, se utilizan ácidos o bases para lograr la disolución de los metales presentes en el desecho; sin embargo la experiencia desarrollada, utilizando agentes reductores (bisulfito de sodio) y tensoactivos (dodecil sulfato

de sodio) así como columnas termostáticas, permitirán en algunos casos obtener mayores eficiencias de lixiviación que las logradas en el laboratorio de análisis químicos para la digestión de las muestras. La cinética del proceso, los mecanismos de las reacciones y las especies químicas cuando se utilizan columnas termostáticas son aún desconocidos, por lo que en esta área hay gran material para su estudio tomando en cuenta, sobre todo la diversidad de composición y estructura de los desechos sólidos industriales existentes.

Para establecer los componentes de una aleación, se compara con las tarjetas JCPDS (Journal Comitè Powder Difracción Standard) del equipo, analizando los espectros de difracción de rayos X, en la muestra original (M1-A) y en la muestra después de haber sido lixiviada a pH 10 (M1-B). No se observó ninguna diferencia de extracción en las muestras debido a la baja concentración del contenido metálico.

Tabla I. MUESTRA 1 (M1). CONCENTRACIONES DE LOS METALES PRESENTES EN LA MUESTRA ORIGINAL DE DESECHOS DE ARENAS (C_i) Y EN LOS LICORES DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN (C_f) A DIFERENTES pH

Elemento	C_i (mg/g)	C_f (mg/L)			
		pH2	pH5	pH7	pH10
Cr	31 ± 5	0.15 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.15 ± 0.01	0.9 ± 0.05
Fe	1.32 ± 0.05*	266 ± 5	365 ± 5	43 ± 1	3.7 ± 0.1
Ni	35 ± 5	0.70 ± 0.05	0.60 ± 0.05	22 ± 1	5.2 ± 0.1

* %

Tabla II. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS DE DESECHOS SÓLIDOS DE BAÑOS DE CROMO

Elemento	C_i (mg/g)	% de extracción			
		pH2	pH5	pH7	pH10
Cr	4.838	6.129	4.838	29.03	
Ni	20	17.14	100	100	
Fe	20	26	3.26	2.8	
pH	2	5	7	10	

La muestra 2 (M2) proviene de una industria metalmeccánica, el desecho proporcionado por la empresa fue sólido de residuos de baños de cromo. De esta muestra se pudo extraer Zn, Cr y Ni, como lo indica la **Tabla III**. Las eficiencias de extracción de los metales en los desechos industriales están descritas en la **Tabla IV**. Las concentraciones de estos metales en las muestras originales fueron de 0.37%, 9.56 % y 0.38 % respectivamente. El pH que favoreció la lixiviación de los metales fue de 2. En este intervalo fue posible recuperar 40.56 % de Cr, 91.83% de Zn y 100% de Ni. Estos resultados fueron obtenidos al realizar una sola extracción de la muestra y para optimizar este proceso, lo que ya no es objeto de esta investigación, sería necesario realizar más procesos de lixiviación sobre la misma muestra a un pH de 2. Se obtiene de esta manera el metal que hubiera estado ocluido en el desecho.

La muestra 3 (M3) proviene de la misma empresa que la muestra 2, pero en este caso el desecho es de residuos de pelusa. El análisis cuantitativo practicado a la muestra original detectó al Zn, Cr y Ni en concentraciones de 3.35 %, 10.72% y 22.02 %, respectivamente, como lo indica la **Tabla V**. El pH que favoreció el proceso de lixiviación fue ácido en un intervalo de 2, donde

Tabla III. MUESTRA 2 (M2). CONCENTRACIONES DE LOS METALES PRESENTES EN LA MUESTRA ORIGINAL DE RESIDUOS DE BAÑOS DE CROMO (C_i) Y EN LOS LICORES DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN (C_f) A DIFERENTES pH

Elemento	C_i (%)	C_f (mg/L)			
		pH2	pH5	pH7	pH10
Zn	0.37 ± 0.03	362 ± 10	347 ± 6	68 ± 2	<6.25
Cr	9.56 ± 0.1	3878 ± 50	1838 ± 25	1404 ± 25	1670 ± 10
Ni	0.38 ± 0.02	400 ± 20	258 ± 5	192 ± 3	10.50 ± 0.1

Tabla IV. PORCENTAJES DE EXTRACCIÓN DE METALES DE BAÑOS DE CROMO

Elemento	C_i (%)	% de extracción			
		pH2	pH5	pH7	pH10
Cr	40.56	19.22	14.68	17.46	
Zn	91.83	93.78	18.37	1.68	
Ni	100	67.89	50.52	2.76	
pH	2	1	7	10	

fue posible recuperar 4.84% de Cr, 24.32% de Zn y 24.5 de Ni (**Tabla VI**). Las concentraciones de estos metales en el desecho original fueron muy elevadas; por ello los resultados de lixiviación son relativamente bajos. Sin embargo, las concentraciones de los metales en los licores de extracción utilizando la columna termostática fueron entre 519 y 5397 mg/L, lo que quiere decir que se logran altas concentraciones en la extracción de metales. Para optimizar este proceso se recomendaría un paso similar a la muestra anterior, es decir, repetir mayor número de veces el proceso sobre la misma muestra a pH 2 hasta lograr la mayor extracción de los metales ocluidos.

Tabla V. MUESTRA 3 (M3). CONCENTRACIONES DE LOS METALES PRESENTES EN LA MUESTRA ORIGINAL DE RESIDUOS DE PELUSA (C_i) Y EN LOS LICORES DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN (C_f) A DIFERENTES pH

Elemento	C_i (%)	C_f (mg/L)			
		pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Zn	3.35 ± 0.1	815 ± 10	247 ± 51	42 ± 3	<6.25
Cr	10.72 ± 0.2	519 ± 5	11.50 ± 0.5	2.74 ± 0.5	18.10 ± 0.5
Ni	22.02 ± 0.5	5397 ± 100	2588 ± 100	898 ± 10	15.36 ± 0.8

Tabla VI. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS DE RESIDUOS DE PELUSA

Elemento	C_i (%)	% de Extracción			
		pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Cr	4.84	0.1	0.02	0.16	
Zn	2432	7.37	4.23	0.1	
Ni	24.51	1.75	4.07	0.08	
pH	2	5	7	10	

La muestra 4 (M4) provino también de una industria metalmeccánica, su consistencia física fue en polvos, que se trataron de la misma manera que las muestras anteriores. En la muestra original de este desecho industrial se identificaron Cr, Cu, Zn y Ni con 15.86, 38.37, 42.91 y 11.50 (mg/g) respectivamente, como lo indica la **Tabla VII**. Los porcentajes de lixiviación se indican en la **Tabla VIII**. Como puede observarse, las concentraciones de los metales son pequeñas. El único caso en que fue posible extraer el 100% del metal presente fue en un intervalo de pH de 2 y el metal extraído fue el níquel.

TABLA VII. MUESTRA 4 (M4). CONCENTRACIONES DE LOS METALES PRESENTES EN LA MUESTRA ORIGINAL DE DESECHOS SÓLIDOS (C_i) Y EN LOS LICORES DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN (C_r) A DIFERENTES pH

Elemento	C_i (mg/g)	C_r (mg/L)			
		pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Cr	15.86±0.03	11.85±0.2	0.61±0.02	10.5±0.5	9.4±0.1
Cu	38.37±0.23	12.28±0.4	87.19±1.6	461±10	540±10
Fe	—	5.51±0.1	5.58±0.2	23±1	0.1±0.1
Zn	42.91±0.1	123.0±16.5	130.95±2.4	424±5	242±10
Ni	11.50±0.02	1350±50	896.7±20	94±2	60±2

TABLA VIII. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS DE DESECHOS SÓLIDOS DE POLVO

Elemento	% de extracción/mg/g de Fe			
	pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Cr	0.7471	0.038	0.64	0.59
Cu	0.3272	0.27	12.01	14.07
Fe	5.51	5.58	23	10.1
Zn	2.86	3.05	9.88	5.63
Ni	100	77.97	8.17	5.21
pH	2	5	7	10

La muestra 5 (M5), al igual que las tres anteriores proviene de una industria metalmeccánica. Los desechos sólidos fueron de una empresa cromadora. En la muestra original se identificó solamente el Cr, ya que de acuerdo con la empresa éste era el único metal presente en sus desechos; sin embargo, después de la extracción se pudo también detectar la presencia de otros metales como Cu, Ni y Zn, como lo indica la **Tabla IX**. En la **Tabla X** se encuentran los resultados de los procesos de lixiviación, en donde el pH que logró mejores eficiencias de extracción fue de 2, con la excepción del Ni en donde, en pH de 7 se pudo obtener mayor cantidad de metal. Es de mencionarse que las concentraciones de los metales en los licores fueron considerables, ya que se pudo lixiviar desde 47.30 mg/g de Fe hasta 365.3 mg/g de Zn.

TABLA IX. CONCENTRACIONES DE LOS METALES PESADOS PRESENTES EN LA MUESTRA ORIGINAL DE DESECHOS SÓLIDOS (C_i) Y EN LOS LICORES DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN (C_r) A DIFERENTES pH

Elemento	C_i (%)	C_r mg/mL			
		pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Cr	9.80±0.2	3543±50	744.5±60	924.0±98	1676±30
Cu	—	47.30±2.0	29.20±0.4	7.09±0.8	1.67±0.01
Ni	—	99.6±1.5	88.07±2.1	150±8.6	87.12±2.1
Zn	—	365.3±12.5	191.5±2.8	22.49±2.1	28.93±0.6

TABLA X. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS SÓLIDOS DE POLVOS

Elemento	mg/g del metal/% de extracción de Cr			
	pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Cr	36.15	7.59	9.42	17.1
Zn	365.3	191.5	22.49	28.93
Ni	99.6	88.07	150	87.02
Fe	473	29.2	7.09	1.67
pH	2	5	7	10

La muestra 6 (M6) proviene de desechos de decapado de latón de una empresa metalmeccánica. El material original se destacó por tener altas concentraciones Cr, Cu, Zn, Fe y Ni que fueron de 18.22, 8.90, 5.67, 0.18 y <0.004% respectivamente como lo indica la **Tabla XI**. En los licores de extracción el pH que favoreció la lixiviación fue de 2, donde fue posible recuperar 3631, 3158, 595, 615 y 134.0 mg/g de Zn, Cr, Fe, Cu y Ni, respectivamente. Las eficiencias de extracción de estos metales están descritas en la **Tabla XII**. El único metal que pudo ser extraído eficientemente fue el níquel, del cual se obtuvo mayor concentración en los licores utilizando columnas termostatazadas, que lo reportado por el laboratorio de análisis químicos. En esta muestra, igual que en otras que se han analizado, se puede incrementar la eficiencia de extracción realizando más procesos de extracción sobre la misma. Otra posibilidad es incrementar la concentración de los reactivos que intervienen en el procedimiento.

TABLA XI. MUESTRA 6 (M6). CONCENTRACIONES DE LOS METALES PRESENTES EN LA MUESTRA ORIGINAL DE DECAPADO DE LATÓN (C_i) Y EN LOS LICORES DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN (C_r) A DIFERENTES pH

Elemento	C_i (%)	C_r (mg/mL)			
		pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Ni	<0.004	134.0±3.7	7.20±0.4	6.23±0.2	6.37±0.8
Cr	18.22±0.55	3158±35	11.21±0.6	1.22±0.02	25.11±0.5
Fe	0.18±0.007	65.02±0.6	6.15±0.03	0.32±0.05	0.41±0.08
Cu	8.90±0.017	2678±87	525±9.4	566±2.4	12.97±0.3
Zn	5.67±0.21	3631±119	—	—	—

TABLA XII. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS DE DESECHOS DE DECAPADO DE LATÓN

Elemento	% de extracción del metal			
	pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Cr	17.33	0.06	0.006	0.1378
Fe	36.12	3.41	0.17	0.22
Ni	100	100	100	100
Cu	30.08	5.89	6.35	0.14
Zn	64	—	—	—
pH	2	5	7	10

La Muestra 7 (M7) proviene de una industria de esmaltados, clasificados dentro de la industria metalmeccánica. Esta muestra tuvo concentraciones relativamente bajas de metales de Cr, Ni, Fe y Zn que fueron de 25 µg/g, 0.46 %, 0.45 % y 43 µg/g respectivamente, como lo indica la **Tabla XIII**. El pH que favoreció el proceso de extracción de metales estuvo en un intervalo ácido, pH de 2 a 5. Las eficiencias de extracción de estos metales están descritas en la **Tabla XIV**. El único metal extraído con eficiencia total fue el Zn, que desde un intervalo de pH de 2, 5, 7 y 10 se pudo recuperar en forma más eficiente que los licores de digestión del Laboratorio de Análisis Químicos. Sin embargo, Cr, Ni y Fe se pudieron recuperar sólo en un pequeño porcentaje.

La Muestra 8 (M8) proviene de desechos de pintura de una industria química. El producto original tuvo altas concentraciones de Ti (13.80 %), ya que de acuerdo con la empresa éste

TABLA XIII. MUESTRA 7 (M7). CONCENTRACIÓN DE LOS METALES PRESENTES EN LA MUESTRA ORIGINAL DE DESECHOS DE ESMALTES (C_i) Y EN LA DE LOS LICORES DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN (C_f) A DIFERENTES pH

Elemento	C_i (%)	C_f (mg/L)			
		pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Cr	25*±2	0.22±0.05	<0.075	0.30±0.05	<0.075
Ni	0.46±0.02	145±5	181±6	111±3	0.50±0.05
Fe	0.45±0.05	44±3	60±2	16±1	1.5±0.1
Zn	43*±5	35±3	21±1	10.5±0.5	<6.25

*µg/g

TABLA XIV. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS DE DESECHOS DE ESMALTES

Elemento	pH	% de extracción			
		pH 2	pH 5	pH 7	pH 10
Cr	8.8	0.003	0.012	0.003	
Ni	31.5	393	24.13	0.1	
Fe	9.77	13.33	3.55	0.33	
Zn	100	100	100	100	
pH	2	5	7	10	

era el único metal presente en sus desechos, pero al momento de rea-lizar los análisis en los licores de lixiviación, se detectó la presencia de otros metales como Ni, Cr, Zn y Fe, como lo indica la **Tabla XV**. En la **Tabla XVI** se indican los resultados de los procesos de lixiviación. Se trabajó solamente a pH de 2 y 5 debido a que en pH de 7 y 10, la pulpa bloqueaba la entrada del aire al interior de la columna. El pH donde se lograron mayores eficiencias de extracción fue de 5, con excepción de Zn en donde a pH de 2 se pudo obtener mayor cantidad de metal. Es de mencionarse que a pH de 5 se extrajo Ti, Ni, Cr, Zn y Fe con 0.294, 6.02, 43.48, 82.33 y 652.0 mg/g, respectivamente.

En este desecho es necesario optimizar los procesos para lograr mayores eficiencias en la obtención de Ti de las muestras. Lo cual motiva a seguir realizando estudios de investigación con otros electrolitos que pudiesen facilitar este proceso.

DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

En esta planta experimental se eliminaría primero la humedad de las muestras, pudiendo éstas presentarse en diferentes formas como son: pasta de pinturas, arenas, polvos, estopa impregnada con arena. Una vez eliminada la humedad se pasarían estas muestras a un molino de bolas, para obtener un tamaño de grano de aproximadamente 0.15 mm. Posteriormente se pasaría la muestra a un tanque preparador de pulpa y de ahí a la columna termostatazada. Concluyendo el proceso de lixiviación, se colocaría la muestra en un tanque receptor de pulpa, para separar los sólidos y las soluciones (donde se hallan los metales) se utilizará un filtro prensa, obteniéndose la solución con metales recuperados y los filtros de lodos. Éstos últimos irían a confinamiento y a los primeros se les daría otro uso (como abono).

Con el objeto de interpretar los resultados del laboratorio a una posible planta piloto se propone un diseño para tratar 100

TABLA XV. MUESTRA 8 (M8). PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE LOS METALES PRESENTES EN LA MUESTRA DE DESECHOS DE PINTURAS (C_i) Y EN LA DE LOS LICORES DEPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN (C_f) A DIFERENTES pH

Elemento	C_i (%)	C_f (mg/L)	
		pH 2	pH 5
Ti	13.8±0.1	25.04±0.5	40.58±0.5
Ni	—	3.29±0.3	6.02±0.5
Cr	—	12.20±0.1	43.48±0.75
Zn	—	283±18	82.33±0.50
Fe	—	241.25±3.0	652.0±5.0

TABLA XVI. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS DE DESCHOS SÓLIDOS DE UNA EMPRESA DE PINTURAS

Elemento	pH	mg/g del metal/% de extracción Ti	
		pH 2	pH 5
Cr	8.8	0.003	0.012
Fe	31.5	393	24.13
Zn	9.77	13.33	3.55
Ni	100	100	100
Ti	2	5	7
pH	2	5	10

kg/h de desecho industrial (**Fig. 2**); así mismo, se da una lista de los posibles costos para su instalación (**Tabla XVII**).

El aporte de este diseño es que se basa en un equipo y proceso originales. La planta operará en forma intermitente y se obtendrán los datos y parámetros para su escalamiento industrial.

CONCLUSIONES

El equipo y el proceso utilizado para lixiviar metales de arenas de fundición, podría utilizarse para lixiviar metales de Residuos Industriales Peligrosos (RIP).

El pH que favoreció con mayor frecuencia la extracción de metales fue de 2, excepto en la muestra 1 que fue de 10.

Mediante este proceso se puede, en algunos casos, obtener mayores eficiencias de lixiviación de metales a nivel laboratorio de desechos sólidos industriales, que los obtenidos en los procesos de digestión de las muestras por la técnica de espectrometría de emisión por plasma, la cual está basada en procedimientos internacionales (Littlejohn 1991).

Para optimizar el proceso de lixiviación de metales donde la concentración de éstos es elevada y la extracción relativamente baja es necesario realizar otros procesos de lixiviación sobre la misma a pH más favorables, tal es el caso de las muestras 2, 3, 5, 6 y 8, ya que en esta investigación, el propósito fue estudiar los porcentajes de lixiviación de los metales cambiando los rangos de pH.

El aporte del diseño de una planta piloto para el tratamiento de desechos sólidos industriales, es de que se basan en diseño, proceso y equipo originales, tratándose de una columna que operaría en forma intermitente con capacidad para 100 Kg/h de residuo industrial.

La difracción de rayos X es una técnica valiosa, para obtener información sobre aleaciones metálicas o acerca de los com-

TABLA XVII. RESUMEN DEL ESTIMADO DE COSTOS DE LA PANTA PILOTO

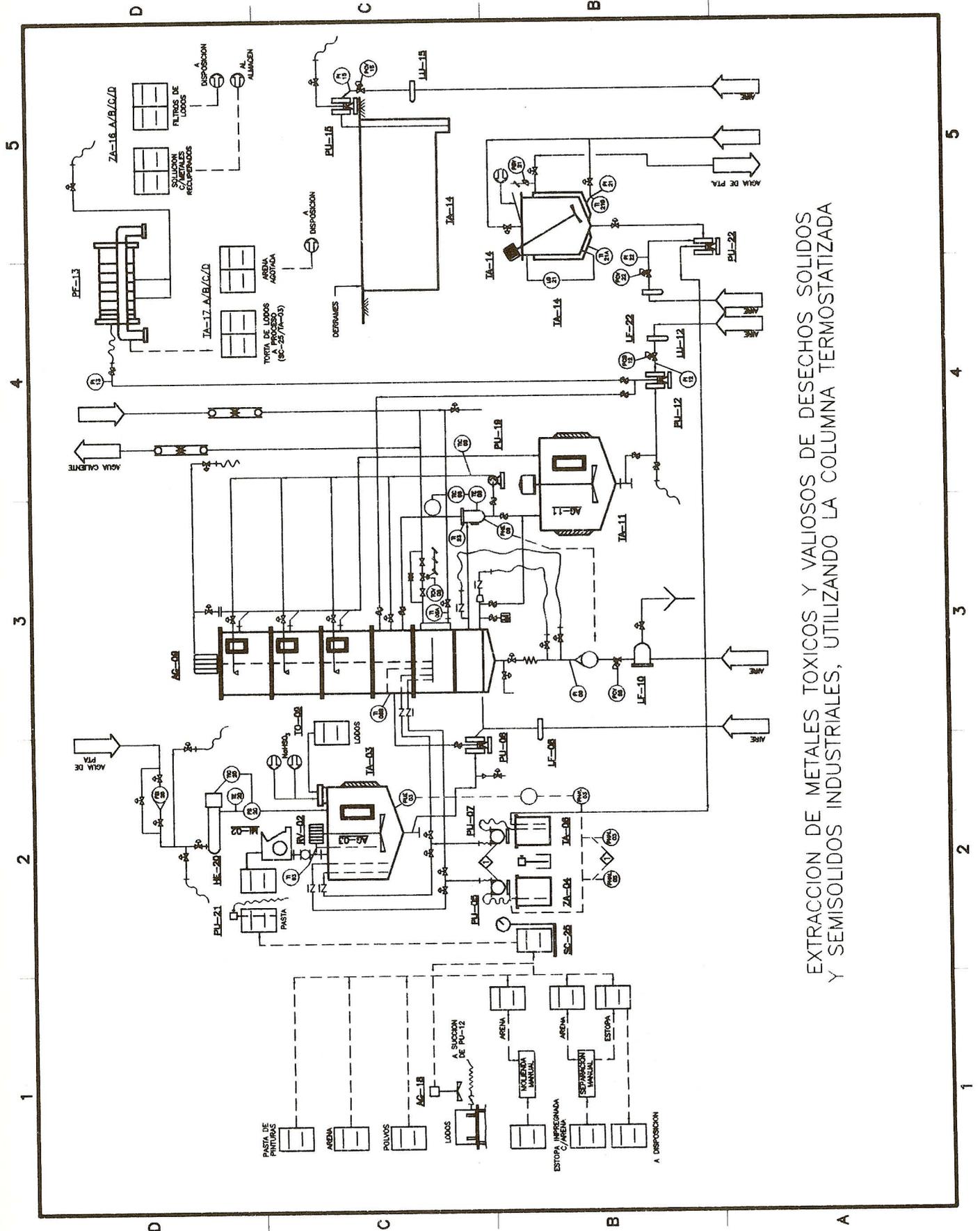
DESCRIPCIÓN	EQUIPO Y/O MATERIAL	MANO DE OBRA (INSTAL.)	FLETES, SEGUROS, DERECHOS	GASTOS IMPORTACIÓN	COSTO TOTAL (% con respecto al gran total)
TERRENO					
a. Estudios					
b. Honorarios, contratos, impuestos					
c. Costo del edificio					
ACONDICIONAMIENTO DEL TERRENO					
EDIFICIOS: Proceso/Servicios					
a. Instalaciones nuevas					
b. Renovación de existentes					8.67
SERVICIOS					
a. Aire acondicionado					
b. Eléctrico/Teléfono					3.47
c. Tuberías/Plomería					0.94
d. Protección vs. incendio					
e. Aislamiento					
f. Pintura					1.04
EQUIPO					0.87
a. Equipo de proceso	29.25	0.92	1.94	2.57	34.68
b. Instrumentos, controles	2.64	0.66	0.142	0.05	3.5
c. Partes de repuesto					
MOBILIARIO Y ACCESORIOS					
OTROS					
a.					
b.					
COSTO DIRECTO TOTAL	31.89	1.58	2.08	2.62	59.17
INGENIERÍA					
a. Ingeniería de detalle					7.7
PROCURACIÓN					
CONSTRUCCIÓN					
a. Costo indirecto mano de obra					3.55
b. Supervisión contratista					2.07
GASTOS DE ARRANQUE					
CONTINGENCIAS					1.77
TOTAL					4.14
	0	0	0	0	20.42
GRAN TOTAL	31.89	1.58	2.08	2.62	100.00

Nota: la cotización se encuentra en porcentajes referidos al gran total que, en dólares americanos del 11 de mayo de 1998, es de \$328,023.50

AGRADECIMIENTOS

puestos presentes en la matriz del desecho, con la excepción de que este último no sea amorfo como fue el caso de la muestra 6. Además permite caracterizar la matriz química de cada residuo industrial y de las aleaciones metálicas presentes en la muestra, así como verificar la solubilidad que tuvo cada metal de acuerdo con el intervalo de pH en el proceso de lixiviación.

Los análisis de este trabajo se realizaron en el ININ. Agradecemos al Ing. Ricardo Soria por su participación en los análisis de espectrometría, al Dr. Jesús Palacios y al Dr. Pedro Bosch por los análisis de difracción de rayos X. Así como la colaboración en los planos preliminares de la planta piloto de los ingenieros Orlando García Arenas y Miguel Ángel García.



EXTRACCION DE METALES TOXICOS Y VALIOSOS DE DESECHOS SOLIDOS Y SEMISOLIDOS INDUSTRIALES, UTILIZANDO LA COLUMNA TERMOSTATIZADA

Fig.2. Diseño de la planta piloto utilizando una columna termostatizada

TAG DESCRIPCION	TO-09 COLUMNA DE LIXIVIACION
DIAMETRO ALTURA MATERIAL PRESION OPER. Kg/cm ² Man. TEMP. OPER. °C	610 mm 4175 mm (NOTA 1) AC.CAR/KYNAR ATMOSFERICA 60°C

TAG DESCRIPCION	PF-13 FILTRO PARA PULPA Y LODOS
TIPO CAPACIDAD AREA DE FILTRACION MATERIAL PRESION DISEÑO Kg/cm ²	PRESA 23 LPM POLIPROPILENO

TAG DESCRIPCION	LF-10 FILTRO COALESCENTE
TIPO CAPACIDAD MATERIAL FILTRACION	COALESCENTE 9.0 m ³ /h act. ALUMINIO 0.1 MICRAS

TAG DESCRIPCION	SC-25 BASCULA
TIPO CAPACIDAD	0-100 Kg

TAG DESCRIPCION	TA-03 TANQUE PREPARADOR DE PULPA	TA-04 TQ.P/DOSIF. DE H ₂ SO ₄	TA-06 TQ.P/DOSIF. DE SOSA	TA-11 TANQUE RECEPTOR DE PULPA	TA-14 FOSA RECEPTORA DE DERRAMES
DIMENSIONES mm CAPACIDAD m ³ TIPO MATERIAL PRESION OPER. Kg/cm ² TEMP. OPER. °C	762ø X 700L 0.35 VERTICAL AC.CAR/KYNAR ATMOSFERICA 65	0.057 VERTICAL H.D.P.E. ATMOSFERICA AMBIENTE	0.057 VERTICAL H.D.P.E. ATMOSFERICA AMBIENTE	762ø X 803L 0.40 VERTICAL AC.CAR/KYNAR ATMOSFERICA 60	1200 X 1200 X 1000 1.44 FOSA CONCRETO/LADRILLO ANTIACIDO ATMOSFERICA 60

TAG DESCRIPCION	PU-05 BOMBA DOSIFICAR DE H ₂ SO ₄	PU-07 BOMBA DOSIFICAR DE SOSA	PU-08 BOMBA PARA TRANF. PULPA
TIPO CAP. DE DISEÑO LPM CABEZA M. LIQ. MATERIAL POTENCIA KW	PERISTALTICA 0.5 7 POLICARBONATO/VITON 0.075	PERISTALTICA 0.5 9 POLICARBONATO/NEOPRENO 0.075	DIAFRAMA 60 13 KYNAR/TEFLON

S I M B O L O G I A	
	VALVULA CHECK
	VALVULA DE BOLA
	VALVULA DE DIAFRAGMA
	BOMBA CENTRIFUGA
	BOMBA PERISTALTICA
	BOMBA DE DIAFRAGMA
	BOMBA PARA DESCARGA DE TAMBORES
	INTERCAMBIADOR DE CALOR
	BASCULA

Fig.2. (Continuación). Descripción de la simbología de la planta piloto

REFERENCIAS

- Ajmal M. (1996). Studies on removal and recovery of Cr(VI) from electroplating waste. *Water Res.* 30, 1478-82.
- Aspiazu J., Vite J., Vivero R. y Méndez B. (1995). Evaluación por PIXE (Haz externo) de la eficiencia de lixiviación de una columna termostaticada para el tratamiento de arenas. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 11, (1), 31-38. 1995.
- Buscholz B. y Landsberg S. (1994). Leaching dynamics studies of municipal solid waste incinerator ash. *Atmos. Environ.* 28, 3617-24.
- Carnes R. A. (1992). Metal and incinerators: the latest regulatory phase. *J. Hazard Mater.* 30, 340-53. 1992.
- Chang D. (1995). Simulation of activated sludge cultures for enhanced heavy metal removal. *Water Environ. Res.* 67, 822-7.
- Fernández M. A. (1992). Behavior of heavy metals in the combustion gases of urban waste incinerators. *Environ. Sci. Technol.* 26, 1040-7.
- Huang S. D. (1995). Adsorbing colloid flotation of heavy metals ion from aqueous solution at large ionic strength. *Environ. Sci. Technol.* 29, 2802-7.
- Littlejohn D. (1991) Atomic Spectrometry. *J. Analyt. Atomic Spectr.* 6, 137-151.
- Moussavi M. y Carleson T. E. (1990). Foam separation of metal ions in air pressurized tanks. *Plat. Surf. Finish* 77, 44-6.
- Petruzzelli D. (1995). Ion exchange process for chromium removal and recovery from tannery wastes. *Ind. Eng. Chem. Re.* 34, 2612-17.
- Rajeshwar K. (1994). Electrochemistry and the environment *J. Appl. Electrochem.* 24, 1077-91.
- Vite J. (1994). Apparatus and process for extracting metal values from foundry sands. U. S. Patent 5 356 601.
- Vite J. (1994). Apparatus and process for extracting metal values from foundry sands. U. S. Patent 5 376 000. Dec.
- Vite J., Vite M. y Carreño C. (1997). Leaching of heavy metals from waste water sludge using a thermostatted column. *Int. J. Environ. Pollution.* 8, 201-208
- Wiaux and Nguyen T. (1990). Recovered value from electroplating industry waste. *Met. Finish* 88, 85-86.