Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 10, Nº 19, 87-97 (2007) UNMSM ISSN: 1561-0888 (impreso) / 1628-8097 (electrónico)

Caracterización de los residuos minero metalúrgicos y su posible uso en barreras de ingeniería

Caracterización de los residuos minero metalúrgicos y su posible uso en barreras de ingeniería

Ramiro Huillcañahui T.[1]

RESUMEN

En este trabajo se realizan experimentos de laboratorio de caracterización de residuos de la industria extractiva para evaluar la posibilidad de reutilización de estos (residuos minero metalúrgicos (RMM) y residuos calcáreos) en la construcción de barreras de ingeniería considerando para ello la directiva marco 1999/31/CE, sobre almacenamiento de residuos. Además se estudia la posibilidad de neutralizar la acides y lixiviación de sustancias contaminantes al medio ambiente con el uso de mezclas de diferentes materiales.

Para la realización de éste estudio se emplearon residuos de la industria minera metálica de Pb y Zn y residuos de la industria del mármol, además cemento para neutralizar la acidez.

Los residuos de la industria metálica se encuentran acumulados en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, España. En esta zona existen un total de 89 balsas de residuos minero-metalúrgicos, muchos de ellos conteniendo lodos de flotación, de éstos se han obtenidos 13 muestras de residuos de flotación representativas de los diferentes tipos de residuos. Los residuos de acuerdo a su granulometría se clasifican como un limo. La permeabilidad hidráulica saturada es variable con rangos entre 10^{-7} y 10^{-9} m/s.

Palabras clave: Extracción secuencial, DIN 38414-S4, Sierra de Cartagena.

ABSTRACT

Experiments of laboratory of characterization of residues of the extractive industry to evaluate the possibility of re-utilization of these (RMM) and calcareous residues come true in this work at the construction of barriers of engineering considering for it the executive I mark 1999/31 CE, on storage of residues (residues mining metallurgic).

For the realization of this plan, we did that with the industry of metal trush of Zn and Pb, and metal trush of marmol also for the neutralization.

Metallic industry's residues, find aggregates in The Mining saw of Cartagena -The Union/ Spain. At this zone exist a mining total of 89 rafts of residues metallurgic, many of them containing muds of floating, of these have obtained 13 representative signs of residues of floating of the different kinds of residues.

The residues according to your classification by size of particles classify like slime. The saturated hydraulic permeability is variable with ranges between 10-7 and 10-9 m/s.

Keyworld: Sequential Extraction, DIN 38414-S4, Saw of Cartagena.

1 Master Internacional Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales - RED DESIR. E-mail: rwayra@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

La Comunidad Autónoma de Cataluña a través del Decreto 1/1997 del 7 de enero, regula las condiciones técnicas y administrativas de los depósitos de RMM, clasificándolos según criterios de aceptación para ser depositados en vertederos (Tabla 1), aspecto que nos guiará de marco en la investigación de RMM de la zona de la sierra minera de Cartagena, pues ésta se caracteriza por la gran cantidad de RMM que almacena, así como los impactos contaminantes; de modo que la posibilidad de su reutilización en barreras de ingeniería a través del análisis de los residuos de flotación por poseer propiedades de permeabilidad hidráulica acordes con los parámetros establecidos en la Directiva 1999/31/CE utilizando el procedimiento estándar DIN 38414-S4, es el eje central de esta investigación, que buscado la atenuación de los impactos negativos y riesgos, ha utilizado la composición y/o mezclas de RMM (flotación) con residuos de la industria del mármol ($CaCO_3$), RMM con pH ácidos (aprox. = 1) y pH neutro (aprox.= 8), y RMM con cemento[1,2,3,4].

Método DIN 38414-S4

Este método utiliza como agente extractante agua desionizada y nos proporciona información sobre los efectos adversos que pueden generar los residuos sólidos, de forma tal que al entrar en contacto con el agua se produce una solución lixiviada.

En el presente estudio se hace uso del método DIN 38414-S4 para determinar el riesgo de los residuos, ya que las muestras provienen de presas de relaves que están en contacto con el agua superficial o agua de lluvia, por lo que a veces es útil repetir el proceso de lixiviación varias veces, para simular las condiciones reales en que se encuentra el residuo[5]. Este procedimiento se realiza siguiendo el esquema de la figura 1.2.

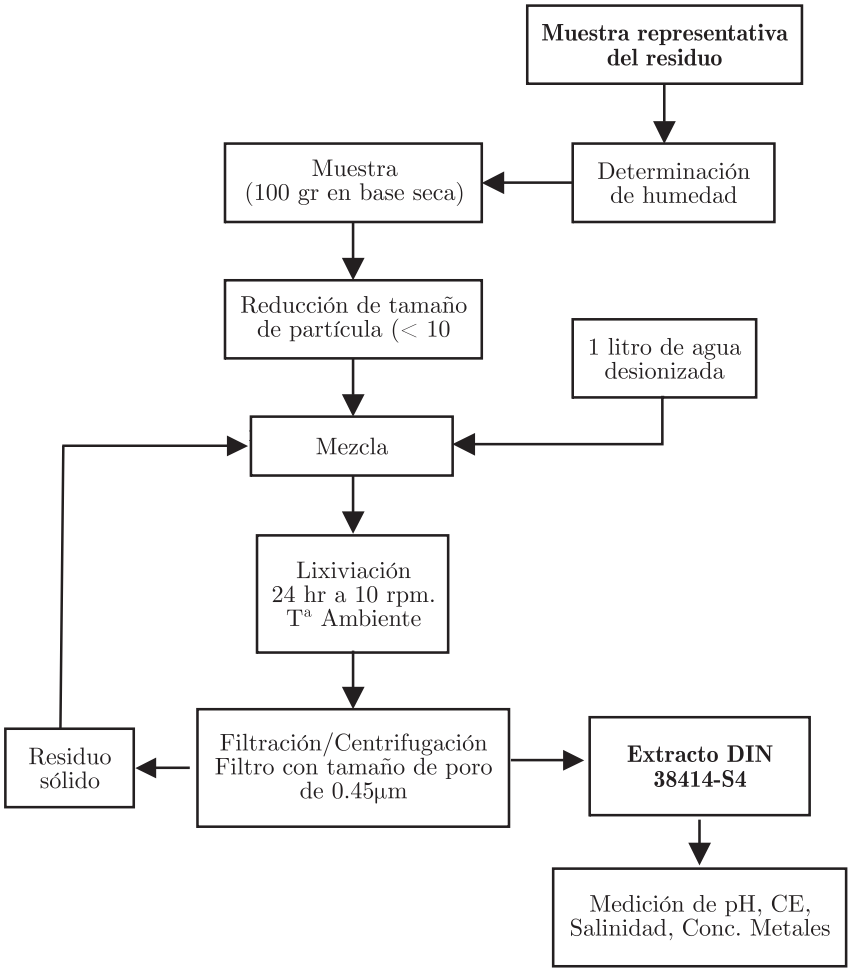


Figura 1. Diagrama de bloques del ensayo experimental de lixiviación DIN 38414-S4.

CRITERIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VERTEDEROS DE RESIDUOS[6,7,8]

La construcción de un depósito de residuos requiere de la existencia de una barrera geológica (BG). Se considera que existe barrera geológica cuando las condiciones geológicas e hidrogeológicas subyacentes y en las inmediaciones de un vertedero, tienen la capacidad de atenuación suficiente para impedir un riesgo potencial para el suelo y las aguas subterráneas, debido a la infiltración o derrame de los lixiviados de los residuos, que se almacenan en el vertedero. La base y los lados del vertedero consistirán en una capa mineral que cumpla unos requisitos de permeabilidad y espesor (Tabla 1.10). El efecto combinado de la BG en materia de protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas superficiales; sea por lo menos equivalente al derivado de los requisitos siguientes:

Tabla 1. Característica de la capa impermeable en el fondo de los vertederos (directiva 1999/31/CE).

Tipo de vertedero	Permeabilidad (k) (m/s)	Espesor de la capa impermeable (m)
Vertederos para residuos peligrosos	1.0×10^{-9}	5
Vertederos para residuos no peligrosos	1.0×10^{-9}	1
Vertederos para residuos inertes	1.0×10^{-7}	1

Cuando la barrera geológica no cumple de forma natural las condiciones antes mencionadas, podrá completarse de forma artificial y reforzarse por otros medios que proporcionen una protección equivalente. El espesor de una barrera geológica artificial no deberá ser inferior a 0.5 metros.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es la realización de estudios experimentales en el laboratorio para evaluar la posibilidad de reutilización de los residuos de la industria extractiva (residuos minero metalúrgicos y residuos calcáreos) en la construcción de barreras de ingeniería considerando para ello la directiva marco 1999/31/CE, sobre almacenamiento de residuos.

Objetivos específicos

Para materializar el objetivo general se desarrollaran una serie de objetivos específicos que se enumeran a continuación:

Caracterización física, química y mineralógica de los residuos.

Evaluación del riesgo ambiental de los residuos considerando la norma DIN recomendada por la directiva europea 2006/21/CE., sobre residuos de la industria extractiva y la directiva de la unión europea 96/61/CE., sobre las mejores técnicas disponibles en el mercado (MTDs).

Evaluar el ciclo de secado y humedecimiento que experimentan los residuos debido a las precipitaciones, considerando la interacción entre el agua y los residuos para ver su capacidad de lixiviación y transferencia de metales y acidez a las aguas superficiales y subterráneas.

Establecer las posibles mezclas de residuos de la industria extractiva (residuos de la minería metálica con residuos de la industria no metálica) y evaluar la capacidad de neutralización de la acidez.

Caracterización geoquímica[9,10,11,12]

Ensayos de lixiviación en sistemas cerrados y abiertos

Sistemas cerrados

Como especifica el método DIN los ensayos de lixiviación se realizaron en sistema cerrado para aislar el conjunto de masa lixiviada del aire del entorno, y evitar que se produzca oxidación, además se disminuye la perdida de solvente (agua milliQ) por evaporación y también por que el sistema de agitación (rotación) empleado lo requiere, bajo este sistema se han realizado la mayoría de los ensayos.

Sistemas abiertos

Se han realizado también ensayos en sistemas abiertos con el objetivo de estimar y cuantificar su variación entre uno y otro sistema, posibilitando de esta manera su empleo de forma indistinta en ensayos de este tipo.

Ensayos de neutralización de acides

Se realizaron estos ensayos con el objetivo de determinar la neutralización de la acides, incrementando el pH a valores superiores a 4, dado que es el limite inferior de riesgo según los criterios de aceptación de la Junta de residuos de Cataluña (Tabla 1.9). Se efectuaron neutralizaciones con residuos de la industria del mármol ($CaCO_3$), neutralizaciones con residuos alcalinos de flotación de la industria minera y con cemento gris (pórtland).

Ensayos de neutralización con residuos de la industria del mármol (carbonatos)

Se tomó como procedimiento la norma DIN 38414-S4, explicada en la parte introductoria siguiendo el esquema de la figura 2.3. Las pruebas se realizaron sobre cuatro RMM (RM-2 pH=0.76, RM-EG8 pH=0.98,

RM-1 pH=1.04, RM-BF5 pH=2.55) que representan alto riesgo por su bajo pH (menos de 4).

Las proporciones que se emplearon de carbonato de calcio ($CaCO_3$) fueron de 1%, 2%, 4%, 8% y 16% en peso, de un total de 2 gr de mezcla para cada ensayo. A la mezcla de residuos se adicionó un volumen de 20ml de agua milliQ en un vial de material plástico transparente cerrado. La pulpa resultante se sometió a una agitación constante durante 24 hr., en un agitador rotatorio a 10 rpm. Luego del periodo de lixiviación la pulpa es centrifugada y filtrada. De la solución se toman lecturas de pH, conductividad eléctrica, salinidad y concentración de metales de cada muestra ensayada.

Ensayos de neutralización con residuos de flotación alcalina de la industria minera

Debido al amplio rango de pH de las muestras de RMM de la SMCU se vio por conveniente mezclar un residuo con alto pH (RM-7 pH=7.93 residuo básico) con residuos altamente ácidos (RM-2 y RM-EG8), las condiciones de lixiviado son las misma que para la neutralización con carbonato, siempre sujeto al procedimiento de la norma DIN.

Las proporciones que se emplearon de residuo alcalino (RM-7) fueron de 16%, 20%, 25%, 30%, 35%, 50% y 60% en peso, de un total de 2 gr de mezcla para cada ensayo. Con estos porcentajes se logro elevar el pH a valores superiores al mínimo establecido por la normativa ambiental de Cataluña.

A la mezcla de residuos se adicionó un volumen de 20ml de agua milliQ en un tubo de material plástico transparente cerrado. La pulpa resultante se sometió a una agitación constante durante 24 hr., en un agitador rotatorio a 10 rpm. La pulpa es centrifugada y filtrada para luego tomar lectura del pH, conductividad eléctrica, salinidad y se determinó la concentración de metales en cada muestra ensayada.

Ensayos de neutralización con cemento gris (Pórtland)

También se ensayaron mezclas con cantidades muy pequeñas de cemento de 1%, 2%, 4%, 8% y 16% en peso, de un total de 2 gr de mezcla para cada ensayo, siguiendo el mismo procedimiento de lixiviación de los ensayos anteriores. Se tomaron lecturas de pH, conductividad eléctrica, salinidad y se determinó la concentración de metales en cada muestra ensayada.

RESULTADOS, DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN

pH: En los lodos de flotación es muy variable y depende del depósito o manto de mineral que se explote. El pH varía desde un rango ácido a alcalino (Figura 4.1, Tabla 3.3). Los lodos de flotación resultante del manto piritoso se caracterizan por un pH ácido (pH<6,5), mientras que si se explotan depósitos ubicados en las zonas de materiales carbonatados el pH presenta valores de neutro (pH=6,5-7,5) a alcalino (pH>7,5).

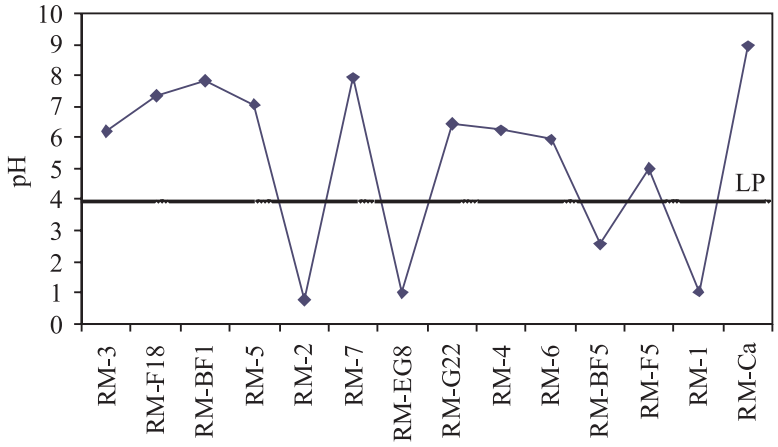


Figura 4.1. Valores de pH de diferentes muestras de residuos tomadas en balsas o presas de lodos de flotación.

Granulometría: Esta propiedad se ha determinado en condiciones húmedas y secas. Los resultados de las curvas granulométricas realizadas, se han representado en el gráfico de la Figura 4.2, donde se aprecia que son muy diferentes. Las características granulométricas muestran que, en condiciones húmedas, el material presenta una granulometría limo-arenosa, con predominio de la fracción limo (Figura 4.2). El 80% de las partículas tiene un tamaño comprendido entre 0.4 y 0.01 mm; en tanto que el 50% está entre 0.1 y 0.01 mm.

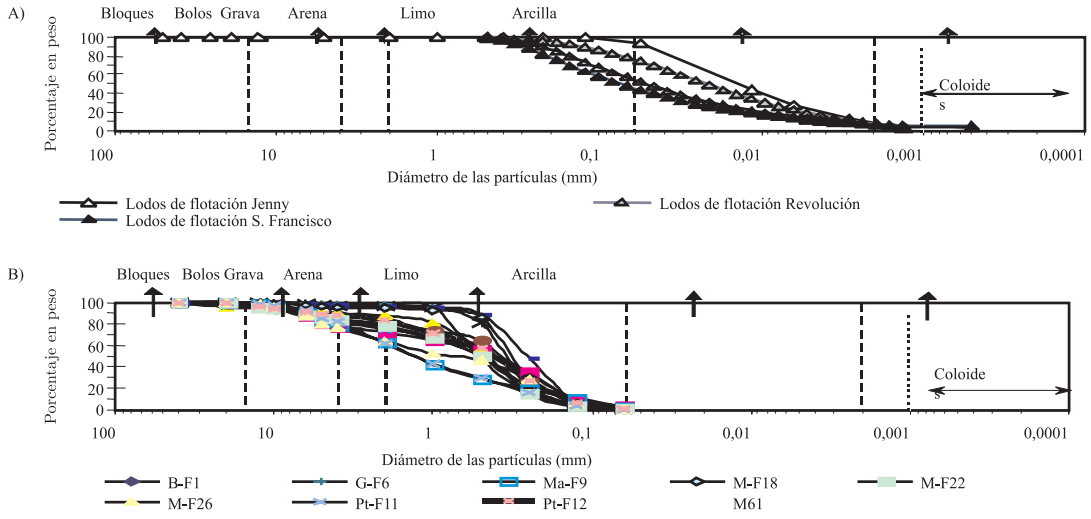


Figura 4.2. Curvas granulométricas de lodos de flotación.

Modificación de los parámetros de la norma DIN

Reducción del volumen de solvente

Con el objetivo de poder realizar los ensayos en el laboratorio, donde no se dispone de grandes espacio para la instalación de grandes agitadores de muestras se procedió a la realización de un método más simplificado de la aplicación de la norma de lixiviados DIN.

Para ello, se han utilizado los volúmenes de 1000 como establece la norma y luego se han comparado los resultados con diferentes volúmenes (500, 200, 20 ml) de agua Milli-Q. El ratio sólido-líquido de 1:10 que establece la norma DIN se mantuvo invariable. En la figura 4.4 se puede ver que este cambio en el volumen no refleja problemas para clasificar los residuos de acuerdo a su resultado, independientemente del volumen de muestra utilizado.

La reducción del volumen de solvente establecido por la norma DIN no representa un cambio significativo en el cambio en el valor de pH, conductividad y salinidad del efluente (Figura 4.4). En todos los casos se ha desarrollado el mismo proceso de agitación (10 soluciones por minuto) de mezcla sólido-líquido con idénticas condiciones de contorno.

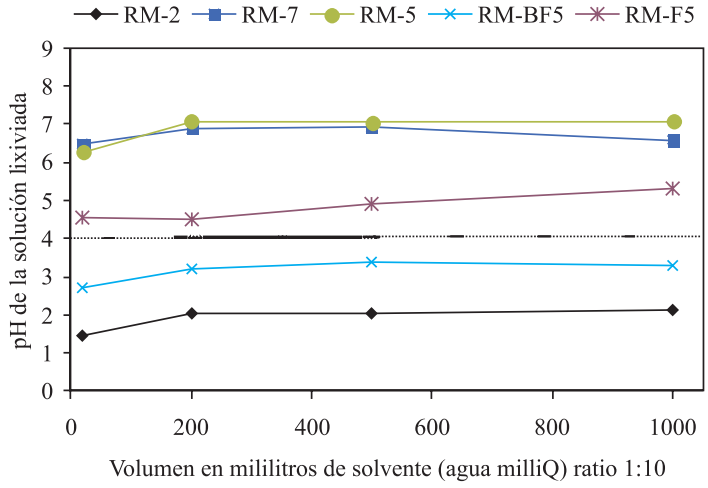


Figura 4.4. Variación del volumen del solvente (agua milli-Q) manteniendo el ratio de sólido liquido en 1:10 y constante el tiempo de lixiviado (24hrs).

Si bien el método DIN de Lixiviación establece como parámetros de ensayo 100 gr. de muestra seca en 1000 ml. de agua mili-Q, sin embargo su viabilidad pragmática en la ejecución de los ensayos Batch en laboratorio evidencia una imposibilidad en su manejo a nivel instrumental y por la gran cantidad o pluralidad de muestras y ensayos que se han determinado en el presente estudio, razón por la cual se ha realizado ensayos de escalamiento del método variando el volumen en valores de 1000 ml., 500

ml., 200 ml., 20 ml, manteniendo siempre el ratio de sólido: líquido de 1:10 estipulado por el método DIN y el tiempo de lixiviado (24 horas). Los resultados del escalamiento de volumen, como se observa en la figura 4.4 corrobora lo planteado.

Respecto a los ensayos con residuos ácidos y con volúmenes menores, se observa la tendencia a obtener valores de pH menores a los obtenidos con la escala del método DIN, obteniéndose de esta manera un margen de mayor seguridad en los resultados; advirtiéndose el uso en los ensayos de los residuos ácidos debido a que estos representan mayor riesgo de movilidad de metales al ponerse en contacto con agua lo que da lugar a un lixiviados acuosos rico en metales pesados y sulfatos.

Modificación del tiempo de agitación

El cambio en el tiempo de agitación se puede observar la existencia de una tendencia a disminuir el pH en las muestras ácidas, sin embargo en el caso de las muestras con pH cercano a la neutralidad se puede apreciar que se produce un incremento con el aumento del tiempo de agitación. En ninguno de los casos se aprecia un cambio de la medida superior a la unidad, lo que nos indica que a efectos de evaluar el riesgo ambiental considerando este parámetro tiene muy poca importancia.

Esto es debido a que el rango establecido de acuerdo a este parámetro oscila entre 4 y 13 para clasificar los residuos de acuerdo a una de las tres categorías (CI, CII, CII) establecidas por la legislación vigente.(Tabla 1.9)

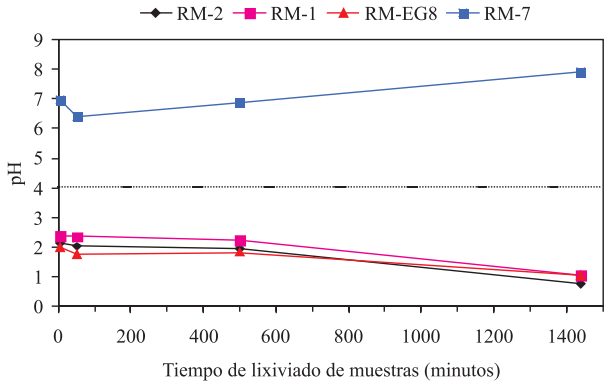


Figura 4.5. Variación del tiempo de agitación manteniendo el ratio de sólido liquido en 1:10 y el tiempo de lixiviado (24hrs).

Respecto a la variación del tiempo de agitación, se ha mantenido la proporción de sólido-líquido de 1:10 con tiempos de lixiviación de 05 minutos, 50 minutos y 500 minutos, se ha realizado los ensayos con el objetivo de cuantificar la variación del parámetro de pH, conductividad y salinidad.

Se evidencia así mismo que estos ensayos pueden presentar utilidad en campo para la obtención de resultados referenciales, debido a que la variación que presentan es alrededor de una unidad del valor del pH para residuos ácidos y alrededor de 2 magnitudes de pH para residuos alcalinos.

Hemos de señalar que en el caso de que el estudio se realice para evaluar el riesgo de un determinado residuos se ha de aplicar la norma de las condiciones que están establecidas, pues la heterogeneidad de estos materiales requiere que el ensayo se haga con volumen de muestras grandes. Además se aconseja el uso de patrones de referencias, blancos y varias muestras, por lo menos dos para obtener un valor medio. Esto siempre será una cuestión que las condiciones económicas pueden limitarlos.

Influencia de las condiciones de ensayo

La norma DIN para delimitar el riesgo ambiental y clasificar los residuos en su correspondiente categoría (CI, CII, CIII) (Tabla 4.5) establece la realización del ensayo en condiciones cerradas y con las muestras secas en estufa.

En nuestro caso hemos realizado el procedimiento de acuerdo a la norma y variando los criterios de secado de la muestra y se han realizado los ensayos con el sistema cerrado y abierto.

El hecho de realizar el ensayo en sistema abierto se debe a que estamos evaluando el riesgo ambiental de un material que esta en condiciones atmosféricas, y que su riesgo ambiental se produce por su contacto con el oxigeno y el agua de lluvia.

Ensayo en sistema abierto y sistema cerrado

En la figura 4.6 se ilustran los resultados obtenidos en 13 muestras donde el ensayo se ha realizado en sistema abierto y sistema cerrado. Los resultados muestran que la influencia de las condiciones de contorno no tiene un gran efecto sobre el valor del pH, cuando el residuo es muy ácido, sin embargo cuando el residuo presenta un pH superiores a 5 la diferencia en algunas muestras es superior a la unidad. Hemos de señalar que para pH superiores a 4 estos residuos no presentan riesgo ambiental, según los criterios establecidos por la legislación vigente (Tabla 4.5).

De acuerdo al resultado del valor de pH medido se puede señalar que 5 de las 13 muestras analizadas presentan un valor inferior al límite establecido para considerar un residuo con riesgo ambiental de acuerdo a la legislación vigente en la CE (Tabla 4.5)

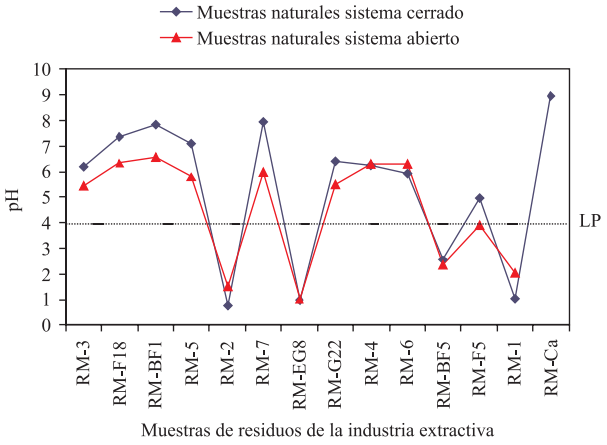


Figura 4.6. pH de 13 muestras de residuos de flotación y 1 residuo de las canteras de mármol ($CaCO_3$) muestreadas en la SMCU., los ensayos de lixiviación fueron realizados sobre muestras naturales en sistema cerrado y abierto.

Ensayo con muestras secas en estufa y muestras con la humedad natural del terreno

En el caso de las muestras con humedad natural y las secas en estufa se puede apreciar que las mayores diferencias se observan para muestras que presentan pH superiores a 5.

En las muestras que tienen un pH ácido las diferencias son muy pocas, generalmente inferior a la unidad (Figura 4.7), independientemente de las condiciones iniciales de la muestra. En ningún caso se aprecia una diferencia superior a la unidad y en todos ellos el valor que se obtiene indica que la muestra tiene riesgo ambiental. Solamente en el caso de la muestra RM-F5 se aprecia un valor ligeramente superior al límite establecido.

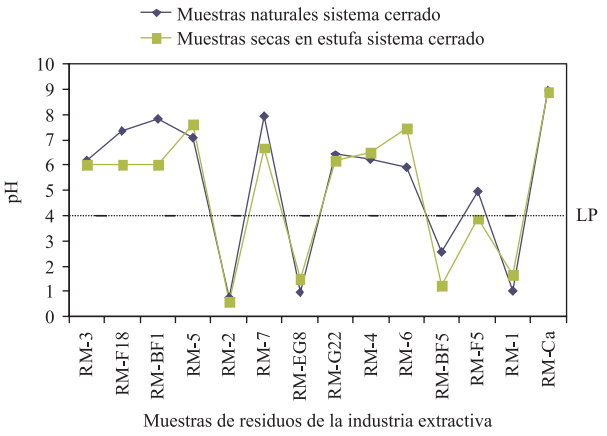


Figura 4.7. pH de 13 muestras de residuos de flotación y 1 residuo de las canteras de mármol ($CaCO_3$) muestreadas en la SMCU, los ensayos de lixiviación fueron realizados sobre muestras naturales y muestras secas en estufa y ambos ensayos en sistema cerrado.

Como se observa, en párrafos precedentes las condiciones físicas de los ensayos de lixiviación no tienen mayor injerencia en los parámetros medidos o cuantificados, salvo una pequeña variación con residuos alcalinos o ligeramente alcalinos, incrementando sus valores, ello con respecto a los ensayos Batch con muestras en estado natural (muestras húmedas) en ensayos cerrados y abiertos.

Al igual que en los ensayos en los sistemas abiertos, los ensayos en sistemas cerrados en muestras naturales (húmedas) y muestras secadas en estufa no presentan mayor variabilidad, con excepción de algunos alcalinos.

Neutralización y concentración de los ensayos

Neutralización con carbonato de calcio ($CaCO_3$)

El empleo de carbonato de calcio en la neutralización de la acidez de las aguas es uno de los métodos más comunes (Hedin et al., 1994a, 1994b. Skousen, 1998, Zipper y Jage, 2001, y DEP, 2001).

En las 4 muestras analizadas con rango de pH entre 0.76 y 2.55 (Figura 4.8), se puede apreciar que para mezclas superiores a el 4% en peso de $CaCO_3$ respecto al total de residuo se logra la neutralización de tres muestras (RM-1, RM-2, RM-BF-5) de residuos en más de 3 unidades y su valor queda por encima del establecido por la legislación vigente (pH=4, Tabla 1.9).

La neutralización de todas las muestras estudiadas incluida la muestra RM-EG8 solo se logra para la adición de un 8% en peso de $CaCO_3$.

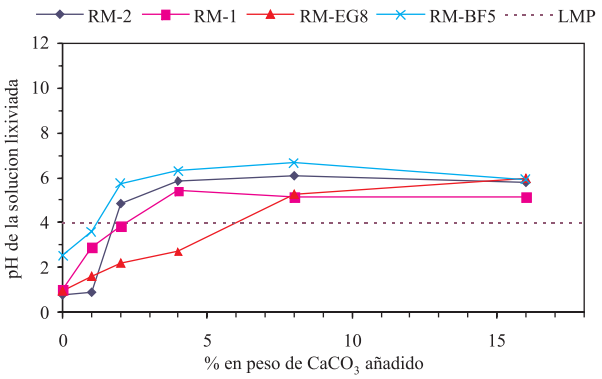


Figura 4.8. Comportamiento del pH de las muestras con el incremento de $CaCO_3$ en varias proporciones.

Concentración de metales en el lixiviado

La concentración de los metales As, Ni y Pb en el lixiviado a partir de la adición a los residuos de un 8% en peso de $CaCO_3$ es inferior al límite establecido por la normativa ambiental, para considerar un residuos con riesgo ambiental en estos metales que se consideran como peligrosos.

Para el Cd el límite se logra para mezclas superiores al 8% en peso. Solamente en el caso del Zn la concentración sigue siendo superior a la establecida por la normativa de residuos (Tabla 4.6), los resultados ver figura 4.9

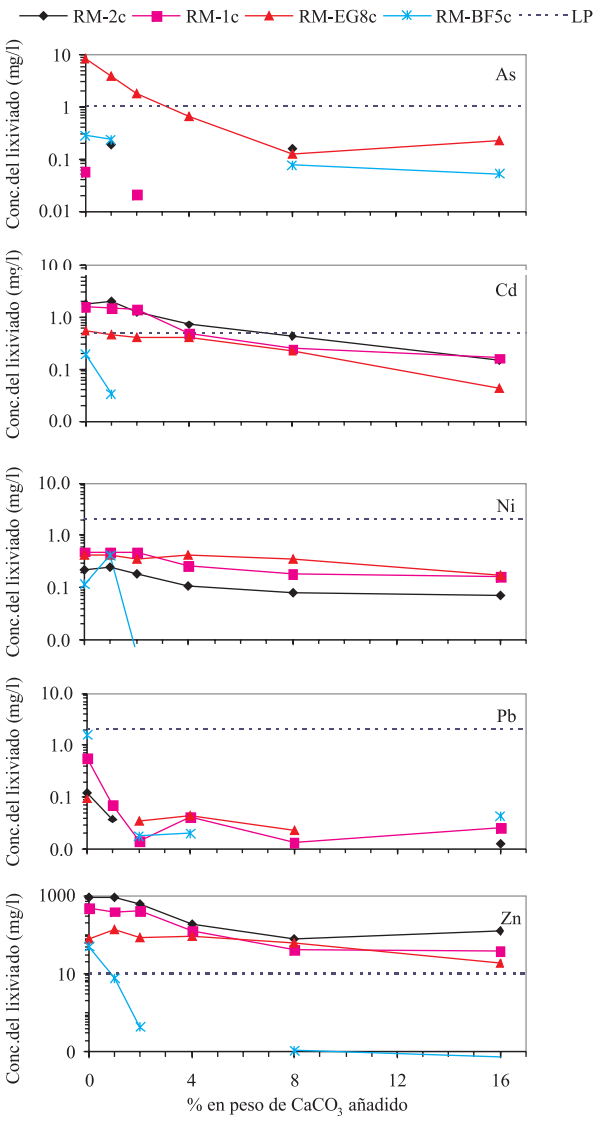


Figura 4.9. Concentración de metal (As, Cd, Ni, Pb y Zn en mg/l) en el lixiviado de las muestras de residuo neutralizadas, con % en peso de $CaCO_3$.

Neutralización con cemento

En el caso del cemento, el ensayo se realizó con las mismas muestras que con el carbonato de calcio. Se puede observar en la Figura 4.10, que el proceso de neutralización incrementa el pH en más de 4 unidades para las muestras (RM-1, RM-2, RM-BF5) cuando se le ha añadido el 8% en peso de cemento a la muestra de residuo, además de incrementar el valor del pH de la muestra RM-EG8 hasta el valor limite establecido para considerar el residuo con riesgo ambiental en la categoría de CIII (Tabla 4.8).

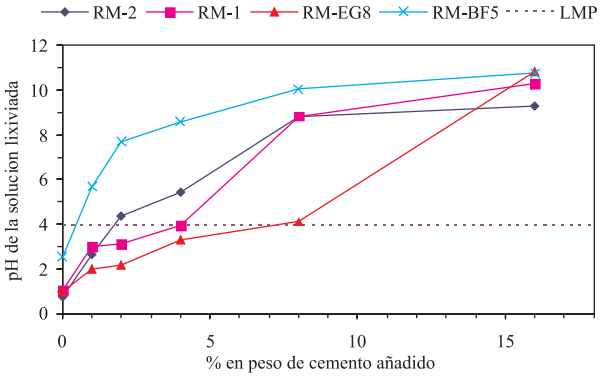
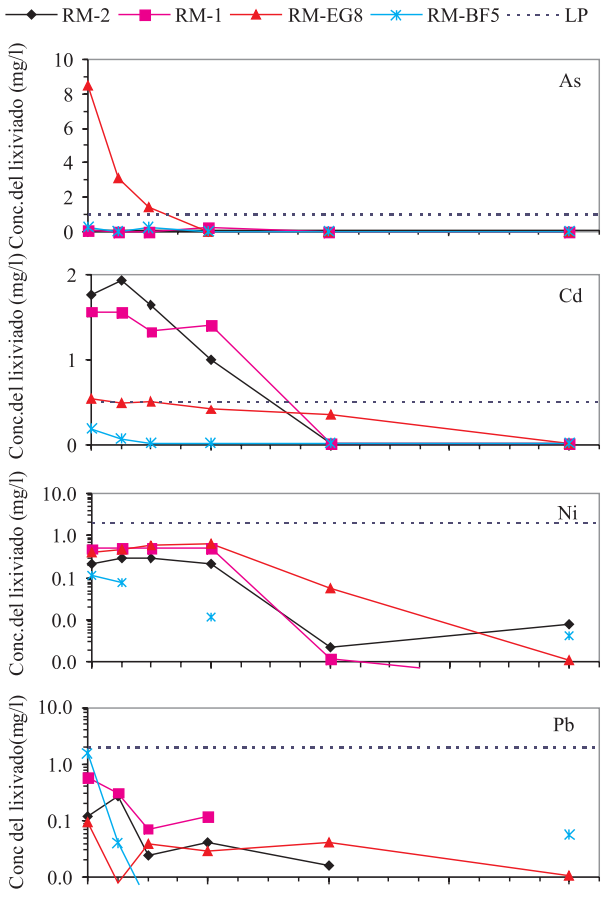


Figura 4.10. Comportamiento del pH de las muestras con el incremento de cemento en varias proporciones.

Concentración de metales en el lixiviado[13, 14]

La concentración de los metales As, Cd, Ni y Pb en el lixiviado es inferior al limite establecido como residuo de riesgo a partir de la adición del 8% en peso de cemento y a partir del 16% es inferior también en el Zn para todas las muestras.

Hemos de señalar que este resultado obtenido con el cemento no se logra ni con el uso del $CaCO_3$ ni con la adición del residuo alcalino, para ninguna de las proporciones de mezclas analizadas. (ver figura 4.11)



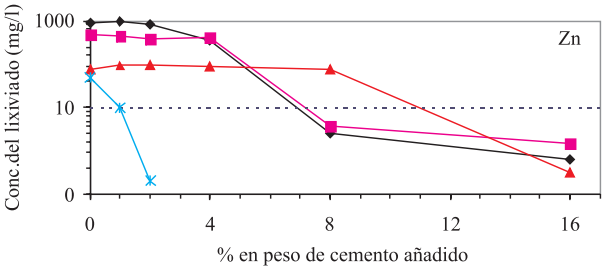


Figura 4.11. Concentración de metal (As, Cd, Ni, Pb y Zn en mg/l) en el lixiviado de las muestras de residuo, neutralizadas con % en peso de cemento.

Neutralización con un residuo alcalino (muestra RM-7, pH = 7.93)

Al existir residuos de una misma naturaleza con un rango de pH que varia desde 0.76 a 7.93, se decidió analizar el poder de neutralización entre ellos (Figura 4.12). Se tomaron dos muestras representativas de pH muy ácidos (RM-2 = 0.76 y RM-EG8 = 0,98).

Los resultados muestran que solamente para una mezcla donde se añade a la muestra (RM-2) un 20% en peso del alcalino (RM-7 = 7.93) se logra la neutralización de la muestra por encima del límite establecido en la legislación ambiental.

En el caso de la muestra RM-EG8 es necesario añadir el 50% en peso del residuo alcalino para que su pH supere el límite establecido.

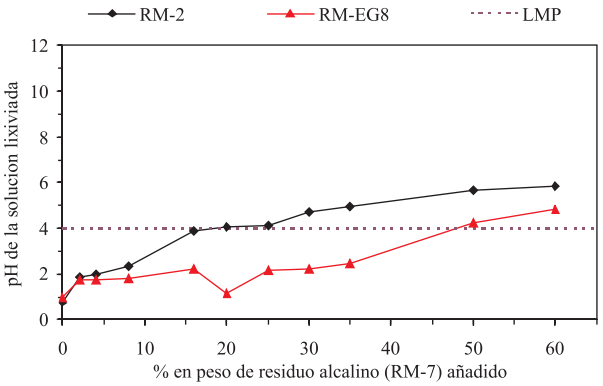


Figura 4.12. Comportamiento del pH con el incremento de residuo alcalino en varias proporciones

Concentración de metales en el lixiviado

Para mezcla superiores al 20% se logra una concentración en el lixiviado inferior al límite establecido para el As (Tabla 4.7).

En el caso del Pb la concentración en el lixiviado inicial sin añadir residuo es inferior al límite establecido en las dos muestras.

En el intervalo de adición de un 20% a un 50% en peso se aprecia la liberación del Pb en una de las muestras (RM-EG8), luego para una mezcla del 60% se observa como este valor desciende por debajo del límite establecido (Tabla 4.7).

La concentración de Cd siempre es superior al límite establecido independientemente de la proporción de mezcla de residuos que se utilice.

Para el Ni la concentración es siempre inferior al valor establecido para los residuos de clase CIII en los dos casos analizados.

El Zn mantiene una concentración muy elevada independientemente de los volúmenes de mezcla que se hayan utilizado, se aprecia una ligera disminución para la mezcla de 60% en peso.

En todos los casos la concentración es superior en un orden de magnitud al valor establecido en los residuos de clase CIII (ver Figura13).

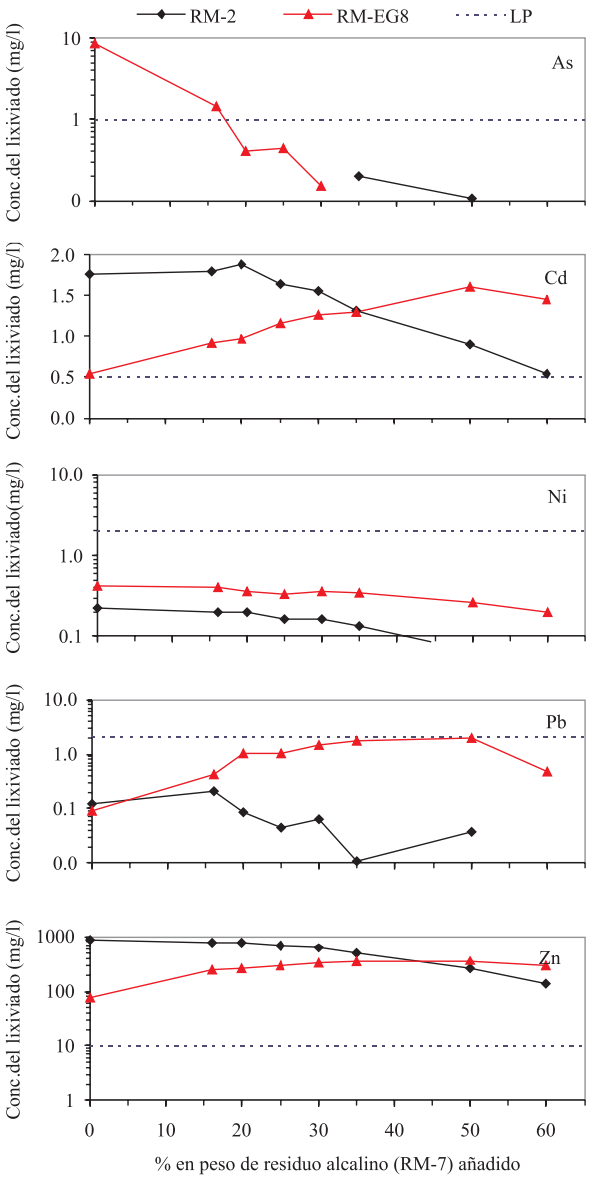


Figura 4.13. Concentración de metal (As, Cd, Ni, Pb y Zn en mg/l) en el lixiviado de las muestras de residuo, neutralizadas con % en peso de residuo alcalino (RM-7, pH= 7,93).

Posible uso de los residuos en barreras de ingeniería o barreras geológicas (BG)

La construcción de vertedero deberá estar situada y diseñada de forma que cumpla las condiciones necesarias establecidas en la Tabla 4.10. El objetivo de la barrera geológica (BG) es impedir la contaminación del suelo, de las aguas subterráneas o de las aguas superficiales y garantizar la recogida eficaz de los lixiviados y su correcto tratamiento.

Como hemos vistos en la parte inicial del capitulo los residuos de flotación de la industria extractiva en la SMCU cumplen los requisitos de permeabilidad establecido para la construcción de BG (Tabla 1.10). Lo único que se ha de hacer es eliminar en ello la posibilidad de que lixivien una masa de metal superior a los límites establecidos por la legislación vigente. El poder dar uso a estos materiales constituye un objetivo importante en el campo de las ciencias ambientales y la ingeniería.

Los resultados han mostrado que los residuos de la industria del mármol cumplen tanto los criterios de permeabilidad como los de lixiviado asea se clasifican como un residuo inerte.

Los de la industria metálica de la SMCU si se neutralizan con una mezcla superior a 8 y menor de un 16% en peso de cemento cumplen los requisitos de no liberar sustancias contaminantes (en el caso de los metales al medio). Sin embargo en el caso del sulfato aun sigue siendo una limitante, pues supera el límite de residuo inerte, y habría que clasificarlo como Clase II.

De esto se desprende que para poder ser usado para impermeabilizar los vasos de los depósitos de residuos controlados o las presas de residuos es necesario introducir un elemento que logre la precipitación del sulfato hasta los límites establecidos.

CONCLUSIONES

Síntesis de resultados e interpretaciones

Los estudios realizados con las 13 muestras de residuos procedentes de la industria extractiva nos ha permitido avanzar en el conocimiento de las propiedades de los residuos minero-metalúrgicos (RMM), de este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Los RMM de la SMCLU se caracterizan por una granulometría limo-arcillosa.

De acuerdo al sistema unificado de los suelos se clasifican como un limo arenoso. En el caso de los residuos de la industria del mármol su granulometría es arcillosa.

La humedad de los RMM presenta grandes variaciones con valores entre 1 y el 17%.

Los RMM estudiados se caracterizan por una permeabilidad entre 10^{-7} y 10^{-9} m/s.

Los estudios de lixiviado efectuados sobre las muestras representativas de los RMM de la Sierra Minera de Cartagena - La Unión (SMCU) ha permitido conocer que estos residuos representan un riesgos e impactos ambiental para la zona y que en ellos están latentes los problemas generados por las actividades minero-metalúrgicas durante la prologada explotación de los mismos.

El uso de los ensayos de lixiviado (DIN) en la caracterización de los RMM ha posibilitado su clasificación y determinar el grado de riesgo ambiental para su disposición final en vertederos controlados. De acuerdo a los criterios de masa de metal lixiviado, CE, pH los residuos se clasifican como de Clase III (peligrosos).

El uso de el cemento como material de neutralización ha permitido mostrar que es posible llevar los residuos a la case de residuo Clase II, con la adición de un 16% de cemento, del peso total. Esto es para lograr la salida de los elementos que se consideran peligrosos para el medio ambiente. Ha que trabajar en la eliminación del sulfato que es el único que supera el límite establecido para llevarlo a Clase I, como residuo inerte.

La neutralización de RMM con otros residuos de las industrias extractivas es viable a nivel de laboratorio, por lo que queda la fase de extrapolarlos a escalas industriales o a nivel de terreno.

De los resultados del lixiviado y la neutralización de la acides se observan múltiples aristas en el tema de los RMMM.

En los diferentes ensayos de escalamiento del método DIN, se pudo comprobar que seguían obteniéndose resultados muy similares al de un ensayo siguiendo los parámetros estándar del método.

Recomendaciones / aplicaciones prácticas

Se recomienda para futuras líneas de investigación tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

Continuar con el estudio de los procesos de caracterización geoquímica de los residuos minero-metalúrgicos, con el objetivo de poder profundizar en este aspecto controlando otras variables como son los posibles cationes intercambiables y, poder establecer dentro de la matriz del residuo las fases minerales que producen la generación de contaminantes.

Realizar ensayos en columna, con el objetivo de obtener resultados más confiables acordes con los procesos de precolación en el campo. Además es necesario simular a escala experimental una Barrera Geológica con la utilización de los residuos y ver su viabilidad práctica y económica.

Trabajar en la búsqueda de una posible aplicación industrial de los residuos minero-metalúrgicos debido al elevado volumen y alta concentración en una variedad de metales de riesgo potencial para el medio ambiente.

Se considera que los resultados alcanzados con las metodologías empleadas en este trabajo pueden ser aplicables a diferentes zonas mineras tanto Españolas como Peruanas.

Los resultados muestran la posibilidad emergente de composición y mezcla con otros materiales como el yeso, la arcilla, lodos de depuradora, etc para la obtención de resultados más atenuados o que permitan su estabilización y ulterior aprovechamiento como barreras de ingeniería al cumplir los requisitos de permeabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración del departamento de química analítica de la Universidad de Girona- Cataluña-España por haber facilitado sus laboratorios para los análisis de elementos por medio de ICP, a las doctoras Victoria Salvadó Jefa del Departamento de Química Analítica, las Dras. Manuela Hidalgo, Mónica Iglesias y Eva Margui por su ayuda en los diversos ensayos. A los profesores del master y especialmente al Dr. Roberto Rodríguez por su dedicación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Benzaazoua, M. Marion, P. Picquet, I. *et al.* (2004). "The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage". *Minerals Engineering* 17 (2): 233-243 FEB.
2. Calabrese, E J. Kostecki, PT. Dragun, J. (2005). *Contaminated soils, sediments and water: Science in the real world.* Publication: New York Kluwer Academic Publishers, 2005. (libro digital)
3. Diario Oficial de la Generalitat de Cataluña. N° 2307-13.1.1997.
4. Departamento de medioambiente de la comunidad autónoma de Cataluña. http://www.gencat.net/
5. DIN 38414-S4, *German standards methods for the examination of water, waste water and sludge; group S (sludge and sediments); determination of leachability by water (S4).*
6. García, C. (2004). *Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena - La Unión.* Tesis universidad de Murcia. 453 pp.
7. ITGE (Instituto Tecnológico Geominero de España) (1995). *Contaminación y depuración de suelos.* Publicaciones del ITGE. 330 pg.
8. Kesimal, A. Yilmaz, E. Ercikdi, B. (2004). "Evaluation of paste backfill mixtures consisting of sulphide-rich mill tailings and varying cement contents". *Cement and concrete research* 34 (10): 1817-1822 OCT.
9. Marguí, G.E. (2003). *Evaluación de la Movilidad de Zn, Pb, Cd, y Ni, en zonas mineras abandonadas, caracterización de residuos de minería mediante extracción secuencial y test de lixiviación.* Tesis Universidad de Girona. 137 pp.
10. Ovejero, G., Jacquin, J.P. y Servajean, G. (1976). "Les mineralisations et leur contexte geologique dans la Sierra de Cartagena (Sud Est de L`Espagne)". Bull. Soc. Geol. France, t. XVIII, 3, 619 633.
11. Robles - Arenas, V. *et al.* (2006). *Sulphide - mining impacts in the physical environment: Sierra de Cartagena - La Union* (SE Spain) case study
12. Rodríguez, P. R. (2002). *Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): Influencia del comportamiento hidromecánico.* Tesis Universidad Politécnica de Cataluña. 459 pp.
13. Tessier, A. Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979). "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate traces metals". *Anal. Chem.* 51, pp. 844–851.
14. U.S.E.P.A. (1994). *Technical Resource Document (Extraction and beneficiation of ores and minerals).* Vol. 1, Lead-Zinc.