

CARACTERIZACIÓN INICIAL DE POLVOS DE ACERÍA Y EVALUACIÓN DE SU LIXIVIABILIDAD EN ÁCIDOS ORGÁNICOS DILUIDOS

P. Delvasto ⁽¹⁾, B. Ibañez-Aldao ⁽²⁾ y D. Sandoval-Ravotti ⁽²⁾

(1) Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Simón Bolívar. Aptdo. 89000. Caracas 1080, VENEZUELA

(2) Coordinación de Ingeniería de Materiales, Universidad Simón Bolívar. Aptdo. 89000. Caracas 1080, VENEZUELA.

E-mail (P. Delvasto): delvasto@usb.ve

RESUMEN

En el presente trabajo, se recolectaron polvos de acería de una planta siderúrgica venezolana, en cuyas operaciones se produce acero a partir de una combinación de 20 % chatarra y 80 % hierro de reducción directa. El análisis químico de las muestras, por espectroscopía de absorción atómica, reveló un contenido (en peso) de: 27,0 % de Fe; 7,1 % de Mg; 4,9 % de Zn; 4,0 % de Ca; 0,7 % de Cr; 0,5 % de Pb y 0,1 % de Cu. El análisis por difracción de rayos X y espectroscopía infrarroja, indicó que las muestras están formadas por magnetita, espinelas de Zn y Cr, carbonato cálcico, sílice y óxidos simples de Zn y Pb. El estudio de los polvos por microscopía electrónica de barrido mostró que los polvos son básicamente aglomeraciones de partículas esféricas con un tamaño medio que varía entre 20 y 0,25 μm .

La lixiviabilidad de estos polvos de acería se evaluó en columnas de percolación. Como lixiviantes se emplearon soluciones diluidas de los siguientes ácidos orgánicos: cítrico, oxálico y tartárico. El pH de las disoluciones usadas se mantuvo alrededor de 3, a fin de evaluar el comportamiento del residuo bajo condiciones de acidez y presencia de aniones orgánicos, similares a la que pueden generar los microorganismos naturales del suelo; simulando así una situación de disposición final de este residuo en vertederos. El lecho de las columnas estuvo constituido por 2,0 kg de una mezcla (en peso) de 80 % de polvos de acería y 20 % de arena silíceo lavada, añadida para facilitar la percolación de las disoluciones. El volumen efectivo de la columna fue de 3.000 mL. Luego de saturarse con agua destilada, las columnas se irrigaron cada 48 horas, con 500 mL de las soluciones lixiviantes, por un período de 4 semanas continuas. En cuanto a la lixiviabilidad del Zn y el Pb presente en los mismos, se encontró que la misma varía entre 80 y 16 mg de metales pesados por kilogramo de polvo de acería, encontrándose incluso que el agua, por sí sola, es capaz también de movilizar estos metales a partir de su percolación a través del residuo. Uno de los ácidos estudiados, el ácido cítrico, se mostró capaz de frenar la lixiviabilidad de estos metales. Esto lo convierte en un agente interesante a adicionar en el sistema de deposición del residuo, para frenar la lixiviación del Zn y del Pb.

Tópico: Tópico 1: Metalurgia Extractiva

Palabras clave: Polvos de acería eléctrica, caracterización, lixiviación, metales pesados.

1. INTRODUCCIÓN

Los polvos de acería son residuos sólidos complejos [1-9], que provienen de los sistemas de limpieza de las corrientes gaseosas que se generan durante las operaciones de fusión y afino del acero, en hornos de arco eléctrico (EAF, por sus siglas en inglés). La química y mineralogía de dichos residuos es variable, y depende, tanto de las condiciones operativas particulares de cada planta siderúrgica, como de las materias primas utilizadas en el proceso. Sin embargo, suelen estar constituidos, fundamentalmente, por partículas discretas de óxidos metálicos simples o complejos [3,5]. Si bien los componentes mayoritarios de los polvos de EAF son óxidos de hierro, los mismos se caracterizan por presentar un contenido importante de metales pesados, como Pb, Zn y Cd, lo que los cataloga como residuos peligrosos [1-9]. Los contenidos en metales pesados de esta clase

de residuos puede resultar particularmente elevada (c. 25% en peso), en operaciones basadas, exclusivamente, en fusión de chatarra. La razón de esto, radica en que la chatarra de acero puede tener múltiples procedencias y, al derivarse de componentes manufacturados desechados, tienden a venir contaminados con metales pesados, tal es el caso, por ejemplo de los componentes de acero galvanizado, cuyo contenido en Zn resulta particularmente alto [1]. Sin embargo, no todas las operaciones de fusión de acero en hornos de arco eléctrico están basadas en la fusión de chatarra. En países que cuentan con hierro de reducción directa (DRI, por sus siglas en inglés), los EAF se alimentan en porcentajes variables con esta materia prima, haciendo que el consumo de chatarra sea menor. En particular, para el caso venezolano (país productor de DRI), una práctica metalúrgica usual de producción de acero estructural convencional, conlleva una carga al horno de 20 % de chatarra y 80 % de DRI. Es de esperarse, por tanto, que prácticas de esta naturaleza conduzcan a polvos de EAF con menores contenidos en metales pesados, aunque, en realidad, poco se conoce acerca de los polvos generados por operaciones siderúrgicas en las cuales el patrón de cargas al horno eléctrico esté fundamentado en hierro de reducción directa. En las siderúrgicas venezolanas, se estima la producción de polvos de EAF entorno a los 25 kg por tonelada de acero líquido producida.

Si bien en los países desarrollados existe una combinación de legislación ambiental estricta y de disponibilidad de diferentes procesos industriales para recuperar metales no férricos a partir de esta clase de residuos [1,2], en países en vías de desarrollo muchas veces los polvos de EAF son dispuestos en vertederos o rellenos sanitarios, a veces en condiciones poco controladas. La situación se agrava cuando estos residuos entran en contacto directo con los suelos, bien por el mismo proceso de elaboración del relleno o cuando el polvo es transportado por los vientos o las aguas de escorrentía a lugares adyacentes del depósito inicial. En este caso, resulta factible que los residuos entren en contacto con la microbiota (seres vivos) del suelo, creando interacciones que pueden impactar, negativamente, sobre la movilidad de los metales pesados en las aguas de percolación, pudiéndose facilitar la extensión del eventual daño medioambiental. Se conoce que, como consecuencia de sus procesos metabólicos, los microorganismos del suelo (bacterias, hongos, levaduras, algas, etc.) son capaces de producir diversos ácidos orgánicos (p. ej. acético, cítrico, oxálico, tartárico, fórmico, glucónico, entre otros)[10-12]. Los ácidos orgánicos de esta naturaleza presentan la particularidad de que pueden atacar a las matrices minerales de los óxidos metálicos – como las que se encuentran presentes en los polvos de EAF - de dos formas, por ataque protónico y por complejación de los metales con los aniones orgánicos de dichos ácidos, haciendo que esta clase de residuos puedan resultar lixiviables bajo condiciones naturales [10-12].

Con base en la realidad anteriormente plasmada, en el presente trabajo se estudió una muestra de polvos de EAF provenientes de una acería venezolana dedicada a la producción de acero al carbono estructural, cuya práctica metalúrgica conlleva, principalmente, la fusión de DRI (80 % de la carga a los hornos). En la primera parte del trabajo, los polvos de partida se caracterizaron, química, mineralógica y morfológicamente, por medio de las técnicas de espectroscopía de absorción atómica (AAS, por sus siglas en inglés), difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR, por sus siglas en inglés) y microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). En la segunda parte del trabajo, los polvos se sometieron a un proceso de lixiviación estática en columnas de percolación, utilizando ácidos orgánicos diluidos como agentes lixiviantes, a fin de evaluar el comportamiento del residuo bajo condiciones de acidez y presencia de aniones orgánicos, similares a la que pueden generar los microorganismos naturales del suelo; simulando así una situación de disposición final de este residuo en vertederos. El fin último del estudio es tratar de establecer las cantidades de metales pesados (Zn y Pb) que se pueden movilizar a partir de polvos de EAF provenientes de procesos de fusión de DRI, bajo estas condiciones tan particulares.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el análisis químico de los principales metales que componen a los polvos de EAF estudiados, 100 mg de polvo se digirieron en 100 ml de agua regia en un reactor calentado eléctricamente, equipado con un condensador para evitar la pérdida de vapores. El líquido se filtró y diluyó con agua destilada en un balón volumétrico de 500 ml, para posteriormente ser analizados sus contenidos de Fe, Zn, Pb, Mg, Cr, Cu y Ca mediante la técnica de AAS, en un espectrómetro Shimadzu AA-6200. El análisis mineralógico por XRD se realizó empleando un difractómetro X'PERT Pro Philips, empleando radiación de cobalto ($\lambda = 1,79 \text{ \AA}$) y un barrido de ángulos 2θ entre 5° y 90° . La identificación de los compuestos se efectuó por comparación con las

fichas estándar del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). El análisis por FT-IR se llevó a cabo triturando en un mortero de ágata KBr y polvo de EAF en una proporción en peso de 98:2. La mezcla se comprimió en una prensa manual hasta obtener una pastilla de 3 mm de diámetro, cuyo espectro infrarrojo se obtuvo en un equipo BRUKER Tensor 2, empleando el software OPUS, con corrección de línea base y compensación atmosférica de CO₂, ajustando la resolución espectral en 2 cm⁻¹ y 32 barridos por espectro. Para la obtención de imágenes por SEM de los polvos, muestras del mismo se recubrieron con grafito conductor mediante *sputtering*, y se llevaron a un microscopio JEOL JSM-6390 a un voltaje de aceleración de 25 kV. La medición del tamaño de partículas se efectuó mediante un software de análisis de imágenes.

La lixiviabilidad de estos polvos de acería se evaluó en columnas de percolación cilíndricas, manufacturadas en plexiglás, de 45 cm de alto y 10 cm de diámetro. Como lixiviantes se emplearon agua destilada (pH=5,6) como control y soluciones diluidas de los siguientes ácidos orgánicos: cítrico (C₆H₈O₇), oxálico (C₂H₂O₄) y tartárico (C₄H₆O₆). Las concentraciones de las disoluciones de dichos ácidos fueron, respectivamente 0,5 g/l, 0,2 g/l y 0,41 g/l. Dichas concentraciones garantizaron que el pH de todas las disoluciones de ácidos orgánicos usadas se mantuviera alrededor de 3. Estas condiciones se buscan ya que permiten evaluar el comportamiento del residuo bajo condiciones de acidez y presencia de aniones orgánicos, similares a la que pueden generar microorganismos [10-12]; simulando así una situación de disposición final de este residuo mezclado en presencia de suelo natural, por ejemplo, en vertederos poco controlados. El lecho de las columnas estuvo constituido por 2,0 kg de una mezcla (en peso) de 80 % de polvos de acería y 20 % de arena silíceo lavada, añadida para facilitar la percolación de las disoluciones. El volumen efectivo de la columna fue de 3.000 mL. Luego de saturarse con agua destilada, las columnas se irrigaron cada 48 horas, con 500 mL de las soluciones lixiviantes, por un período de 4 semanas continuas. El análisis químico para Fe, Zn y Pb, de los líquidos lixiviados recogidos, se realizó mediante AAS. Todas las experiencias de lixiviación se realizaron por duplicado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra la composición química general de los polvos de acería de origen venezolano, analizados en el presente trabajo, y su comparación con otros polvos de EAF originados en diversos países cuyos resultados se encuentran reportados en la literatura.

Tabla 1. Contenido en diversos metales de varios polvos de acería EAF originados en algunos países [2,5,8,9] y su comparación con los evaluados en el presente trabajo

Elemento (% en peso)	E.E.U.U [2]	Jordania [8]	Australia [9]	Brasil [5]	Venezuela (Este trabajo)
Fe	24,9 - 46,9	24	27,1	36,5	27,0 ± 0,3
Zn	11,1 - 26,9	29,1	23,1	28,5	4,9 ± 0,2
Pb	1,1 - 3,8	3,64	1,78	4,05	0,45 ± 0,03
Cd	0,03 - 0,15	0,11	0,05	0,07	<1.d.
Cr	0,06 - 0,58	0,14	0,15	0,00	0,71 ± 0,15
Cu	0,06 - 2,32	0,25	0,17	0,35	0,090 ± 0,004
Ca	1,9 - 10,0	3,16	6,1	1,73	4,0 ± 0,7
Mg	0,8 - 2,9	2,66	1,2	0,23	7,1 ± 1,7
Si	1,4 - 2,5	1,57	1,5	1,12	n. d.
Mo	0,02 - 0,08	n.d.	0,015	n.d.	n. d.
Mn	2,5 - 4,6	4,11	1,96	1,95	n. d.

Abreviaturas: n.d.(no determinado). l. d. (Límite de detección de la técnica). Las desviaciones estándar mostradas corresponden a cuatro (4) réplicas

Tal y como se aprecia, el polvo de acería EAF estudiado presenta un porcentaje de Zn entre cuatro y seis veces menor que el de sus contrapartes de otros países, y es, incluso, dos veces menor que el valor típico mínimo registrado para los Estados Unidos, de acuerdo con el estudio de Nyirenda [2]. Algo similar ocurre con el Pb, metal pesado para el cual el polvo de acería estudiado presenta valores porcentuales entre dos y diez veces menores a los típicos basados en procesos de fusión de chatarra de acero. Es notorio también el hecho de que los contenidos de Cd en los polvos de EAF son menores al límite de detección de la técnica (~ 5 ppb), lo que indica

que este peligroso metal pesado se encuentra prácticamente ausente del residuo. Este nivel bajo de metales pesados es consecuencia de que el patrón de cargas a los hornos de la acería de la cual provienen esté basada en el uso de hierro de reducción directa (DRI). Esta materia prima, por el contrario, suele presentar elevados contenidos de ganga no metálica, razón que podría explicar que los contenidos de Mg y Ca sean relativamente elevados en comparación con los otros polvos de acería EAF mostrados en la tabla. Resalta el caso del Mg, cuyo porcentaje en peso dentro de los polvos venezolanos supera hasta treinta veces el contenido típico de este metal en polvos de acería de otras procedencias. No obstante, faltaría establecer si los contenidos de silicio (que es un componente típico de la ganga no metálica en el DRI) en los polvos EAF estudiados en el presente trabajo son también elevados, para poder establecer una mejor relación entre estos hechos. Este análisis no fue realizado en el marco del presente trabajo. El bajo contenido relativo de metales pesados de los polvos EAF venezolanos, hace que, de acuerdo con la clasificación hecha por Nyirenda [2], se le catalogue como un residuo de tipo intermedio (entre 1 % y 15 % en peso de Zn). Esta clase de polvos de EAF es la más difícil de reciclar y no resulta interesante para la recuperación secundaria de metales no féreos como el Zn. Su disposición en vertederos, sin embargo, podría implicar importantes perjuicios medioambientales, ya que una planta de acería mediana, que produzca alrededor de 1500 TM de acero por día, estaría generando diariamente 37 TM de este residuo, o lo que es lo mismo, se estarían depositando en el medio ambiente cerca de 2 TM de metales pesados (Zn y Pb).

El análisis mineralógico de este residuo, realizado mediante XRD y mostrado en la figura 1, indica que las principales fases presentes son las siguientes (se especifica el número de la ficha ICDD de cada compuesto): Fe_3O_4 , ICDD 89-0950; ZnFe_2O_4 , ICDD 77-0011; FeCr_2O_4 , ICDD 89-2618; MgFe_2O_4 , ICDD 88-1943; ZnO , ICDD 89-1397; CaCO_3 , ICDD 03-0596; SiO_2 , ICDD 83-1833; $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, ICDD 03-0184; FeCl_3 , ICDD 78-2123 y PbO , ICDD 85-1292. Dichas fases se encuentran en consonancia con las fases minerales reportadas en la literatura para polvos de EAF de diversa procedencia [2-9].

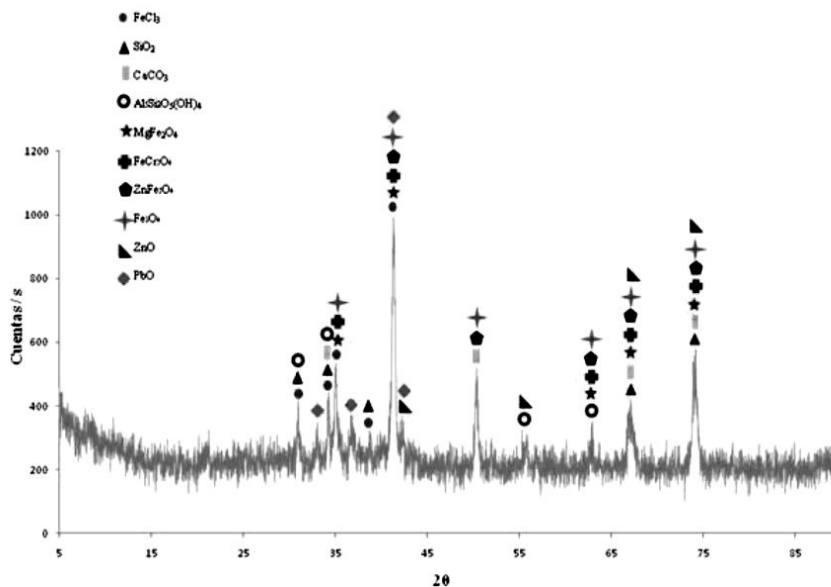


Figura 1. Difractograma de los polvos de acería EAF de procedencia venezolana estudiados en este trabajo. Se evidencia la presencia de fases correspondientes a óxidos simples y espinelas, así como cloruros, carbonatos y silicatos.

Continuando con el análisis mineralógico y químico de este residuo, la figura 2 muestra el espectro infrarrojo típico de los polvos de acería estudiados. La asignación de bandas correspondiente se especifica en la tabla 2. En primer lugar, se encuentra una banda aguda de intensidad media a 3644 cm^{-1} correspondiente a vibraciones de tensión del grupo O-H libre; estos grupos OH corresponden, probablemente, a aquellos que son adsorbidos por algún grupo higroscópico presente en los polvos, por ejemplo el CaO y son típicos de minerales arcillosos [5]. También se observa una señal poco intensa, pero amplia, a 3102 cm^{-1} que, se pueden asociar con las vibraciones de tensión de los grupos O-H del agua, que se puede encontrar como humedad en la muestra o como fases hidratadas.

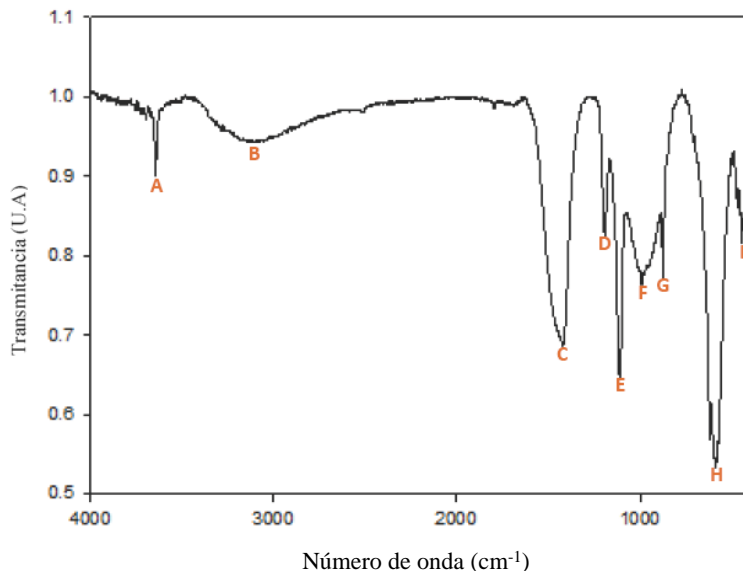


Figura 2. Espectro FT-IR de la muestra de polvos de acería analizada. Las letras mayúsculas sobre la figura denotan bandas espectrales que se identifican en la tabla 2.

Tabla 2. Grupos funcionales asociados a las bandas del espectro FT-IR de la muestra de polvos de acería mostrado en la figura 2.

Letra	Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación
A	3644	Vibraciones de tensión O-H
B	3102	Vibraciones de tensión O-H
C	1421	Vibraciones de grupos CO ₃ ²⁻
D	1193	Estiramiento asimétrico O-C-C
E	1112	Vibraciones del enlace Si-O
F	991	Vibraciones del enlace Si-O
G	874	Grupos funcionales de azufre
H	585	Vibraciones metal oxígeno (óxidos simples y espinelas)
I	443-419	Vibraciones metal oxígeno (óxidos simples y espinelas)

Por otra parte, se encuentran bandas a 1421 cm⁻¹, correspondientes a vibraciones de grupos carbonatos y, también, a 1193 cm⁻¹ y 874 cm⁻¹, correspondientes ambas a estiramientos de los mismos grupos carbonato. De acuerdo con estudios previos [5], se pueden encontrar estos grupos funcionales en los polvos de acería como consecuencia de la presencia de carbonatos hidratados de Zn y Pb (hidrocincita e hidrocerusita), sin embargo, los análisis por XRD mostrados en la figura 1 no corroboran la existencia de éstos compuestos en los polvos de acería estudiados. No obstante, de acuerdo con los porcentajes de Zn y Pb, determinados mediante AAS, que se presentan en la tabla 1, dichos elementos se encontrarían formando mayoritariamente ZnO y PbO. Por lo tanto, si se considera que pudiesen existir carbonatos hidratados de Zn y Pb, éstos estarán presentes en muy baja proporción respecto a las otras fases presentes en los polvos de acería estudiados. Lo más probable es que dicha banda se corresponda con la presencia de carbonato de calcio en la muestra. La banda aguda a 1112 cm⁻¹ y la banda de 991 cm⁻¹ corresponden a las vibraciones del enlace Si-O, posiblemente de cuarzo o silicatos presentes en los polvos [5]. La señal que se encuentra a 874 cm⁻¹ se atribuye a enlaces S-O, es decir, grupos funcionales de azufre; en este sentido, Bruckard y colaboradores [9], atribuyen la presencia del S en los polvos de acería a los siguientes compuestos: CaSO₄, Na₂SO₄ y K₂SO₄, sin embargo, al igual que el presente trabajo, dichos compuestos no se detectaron mediante XRD, muy probablemente debido a su baja proporción respecto a las otras fases presentes en los polvos estudiados. No es descartable tampoco, que su presencia sea debida al uso de gas natural o de coque durante las operaciones de fusión en el EAF. Las señales hacia 585cm⁻¹, 443 cm⁻¹ y 419

cm⁻¹ son características del enlace M-O de óxidos simples y espinelas, identificados previamente en los análisis de XRD mostrados en la figura 1.

Con respecto al análisis morfológico realizado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) a las muestras de polvos de acería venezolanos, se aprecia claramente en la figura 3 que los mismos presentan una variabilidad importante de tamaños. A aumentos menores, como se muestra en la figura 3 (I), pueden encontrarse partículas irregulares de hasta 120 μm de tamaño en coexistencia con partículas globulares cuyo tamaño varía entre 20 μm y 0,25 μm . La forma esferoidal de las partículas de menor tamaño mostradas en las figuras 3 (II) a la (IV), indica que se formaron en el estado líquido o que condensaron desde el estado gaseoso. Las partículas de mayor tamaño pueden provenir de la aglomeración y posible sinterización de partículas más pequeñas durante el arrastre y acopio de los polvos en el proceso de limpieza de los gases del EAF.

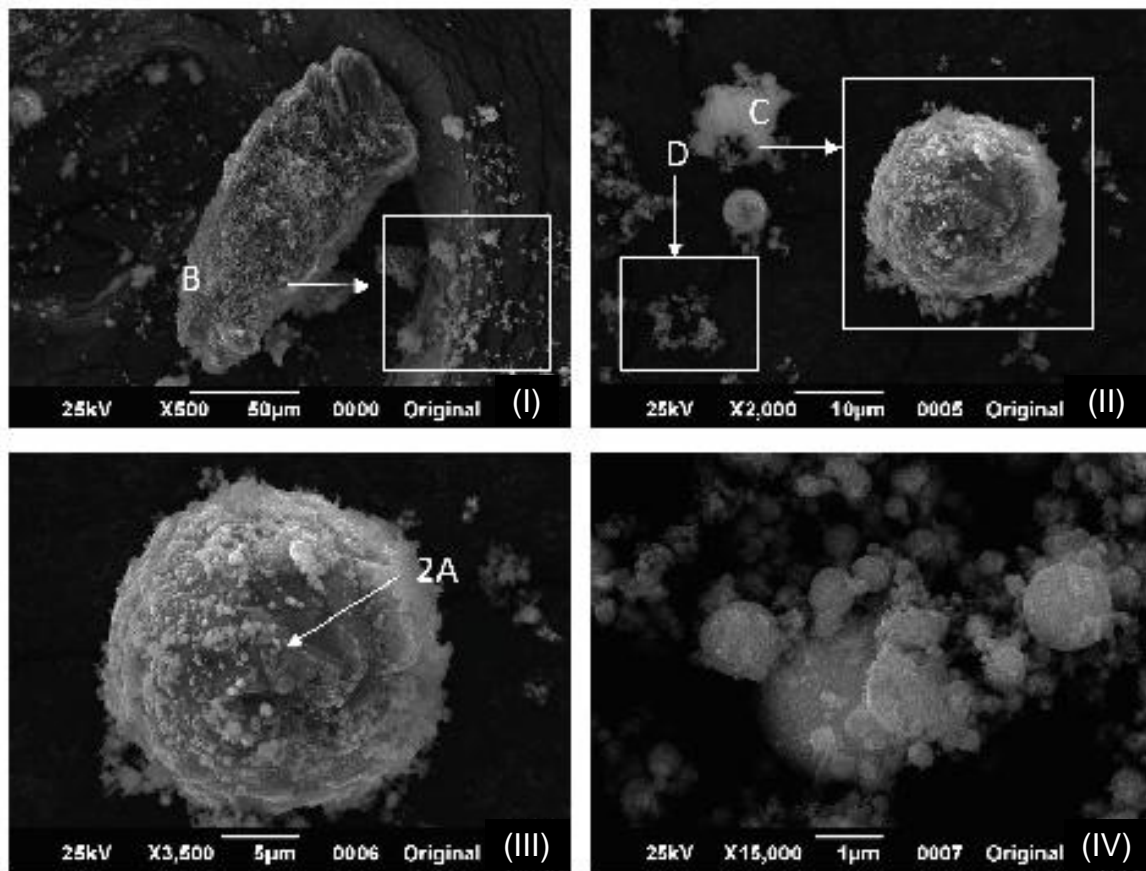


Figura 3. Imágenes SEM típicas de las partículas que conforman los polvos de acería analizados. (I) Muestra una partícula irregular de gran tamaño, recubierta a su vez de partículas más pequeñas y rodeada de gránulos dispersos (detalle B). (II) y (III) Un acercamiento en la zona B de la imagen (I) muestra partículas esféricas de aproximadamente 20 μm que también están recubiertas de partículas menores. Finalmente, en (IV), que corresponde con acercamiento hacia la zona 2A de la imagen (III), muestra que esas partículas más pequeñas son el realidad cúmulos de partículas esferoidales de entre 0,25 y 2 μm .

En cuanto a la lixiviabilidad de los metales pesados presentes en los polvos de acería cuando se emplean ácidos orgánicos diluídos, los resultados se muestran en la figura 4. Como se aprecia en la figura 4 (I), el agua destilada *per se*, empleada como control, fue capaz de movilizar cantidades importantes de metales de la columna de residuo, aunque en mayor medida Pb (37,5 mg) que Zn (25 mg), para 28 días de tratamiento. Esto equivale a que, bajo las condiciones de riego descritas, se movilizan 23,4 mg Pb/kg de polvo y 15,6 mg de Zn/kg de polvo, utilizando meramente agua como medio lixivante (para este cálculo debe tenerse en consideración que la columna de percolación contiene, de manera efectiva, 1,6 kg de polvos de acería). Por su parte, el ácido tartárico diluído – figura 4 (II) – muestra una tendencia inversa, ya que este ácido favorece la lixiviabilidad del Zn

notablemente, alcanzándose movilizaciones del orden de 46,9 mg Zn/kg de polvo y de 31,9 mg Pb/kg de polvo. Los resultados que se obtienen con el ácido cítrico – figura 4 (III) - son mucho menores, incluso, que los obtenidos con el agua destilada. En este caso el Pb se moviliza mucho mejor que el Zn, sin embargo, el proceso de lixiviación llevado a cabo solamente es capaz de movilizar 11,6 mg Pb/kg de polvo y 4,7 mg de Zn/kg de polvo.

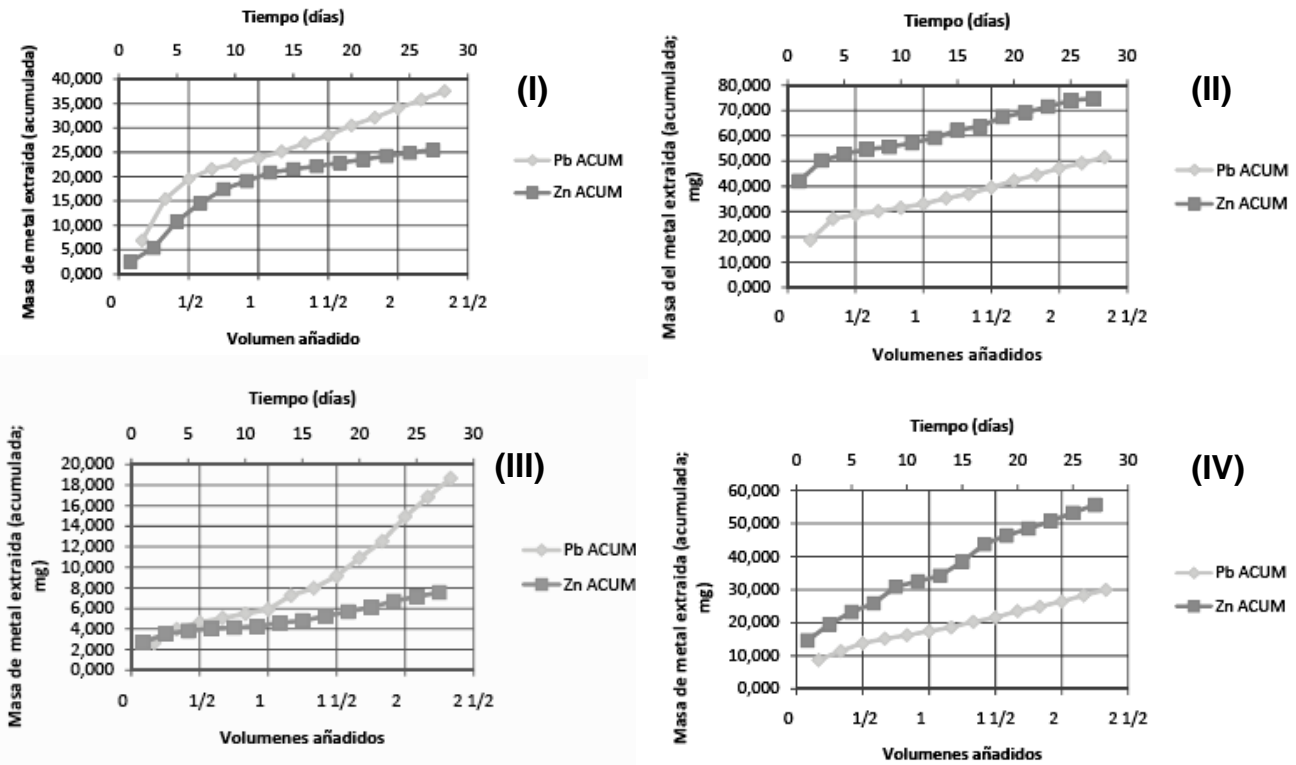


Figura 4. Lixiviabilidad del Zn y del Pb presente en los polvos de acería venezolanos estudiados en el presente trabajo, expresada en masa acumulada (mg) de metal extraído de una columna de 2 kg de residuo durante 28 días. (I) Control irrigado con agua destilada, (II) columna irrigada con ácido tartárico, (III) columna irrigada con ácido cítrico, (IV) columna irrigada con ácido oxálico. Los volúmenes añadidos se refieren a las veces que se irriga la columna con un volumen de lixivante igual al volumen de la columna ocupado por el residuo, en este caso, 3 litros.

Finalmente, para el caso del ácido oxálico diluido – figura 4 (IV) – se tiene una situación similar a la del ácido tartárico, es decir, disuelve mejor al Zn que al Pb, aunque con unos rendimientos un tanto menores. El ácido oxálico movilizó 34,4 mg Zn/kg de polvo y 18,8 mg de Zn/kg de polvo. Llama la atención en estos resultados que los ácidos orgánicos estudiados presentan comportamientos muy diferentes. La razón de estas variaciones puede subyacer en el hecho de que cada uno de ellos es capaz de formar complejos, de distinta estabilidad, con los metales pesados durante la lixiviación, de tal suerte que pudieran generarse compuestos insolubles (sales orgánicas) que se queden atrapados dentro de la propia columna, ayudando así a frenar el proceso de lixiviación del metal pesado. Puede ser este el caso del ácido cítrico, cuyos rendimientos de movilización metálica no llegan a superar los del agua destilada. Es posible que se generen citratos de Zn y de Pb que resulten insolubles y permanezcan adheridos a las partículas del polvo en la columna. Probablemente, desde un punto de vista medioambiental, un resultado de este tipo resultaría promisorio, ya que, al fomentar el crecimiento de microorganismos productores de este ácido en la zona en donde se disponen los polvos de EAF, se podría limitar la movilización de metales pesados como el Zn y el Pb a través de las aguas de percolación.

4. CONCLUSIONES

Las técnicas de caracterización utilizadas en la presente investigación y la comparación de los resultados obtenidos con la bibliografía, permiten concluir que los polvos de acería generados en operaciones de hornos de arco eléctrico cuyos patrones de carga están dominados por la fusión de hierro de reducción directa (DRI) como materia prima, presentan una composición química tal que el contenido en metales pesados que presenta (específicamente Zn y Pb), puede llegar a ser hasta seis veces menor que el que presentan polvos de acería producidos en operaciones de fusión de chatarra. Sin embargo, en lo referente a la morfología del material y fases mineralógicas presentes, el carácter general de los polvos provenientes de la fusión de DRI no difieren en demasía de los polvos provenientes de la fusión de chatarra, ya que los procesos térmicos, termodinámicos y cinéticos son, en ambos casos, básicamente los mismos.

En cuanto a la lixiabilidad del Zn y el Pb presente en los mismos, bajo condiciones similares a las existentes en suelos, se encontró que la misma varía entre 80 y 16 mg de metales pesados por kilogramo de polvo de acería, encontrándose incluso que el agua, por sí sola, es capaz también de movilizar estos metales a partir de su percolación a través del residuo. Uno de los ácidos estudiados, el ácido cítrico, se mostró capaz de frenar, más bien, la lixiabilidad de estos metales. Esto lo convierte en un agente interesante a promover o adicionar en el sistema de deposición del residuo, para frenar la lixiviación del Zn y del Pb.

Agradecimientos

La presente investigación fue posible gracias al apoyo financiero del Decanato de Investigación y Desarrollo (DID) de la Universidad Simón Bolívar, bajo el proyecto número S1-IN-CAI-002-08.

REFERENCIAS

1. X. Castells, "Reciclaje de residuos industriales"; 2000, Ediciones Díaz de Santos, Madrid.
2. R.L. Nyirenda, "The processing of steelmaking flue-dust: a review"; *Minerals Engineering*, Vol. 4 (1991), p. 1003-1025.
3. T. Sofilic, V. Novosel-Radovi, S. Cerjan-Stefanovic, A. Rastovcan-Mioc, "The mineralogical composition of dust from an electric arc furnace"; *Materiali in tehnologije* 39 (2005), p. 149-154
4. V. Orescanin, L. Mikelic, T. Sofilic, A. Rastovcan-Mioc, K. Uzarevic, G. Medunic, L. Elez, S. Lulic, "Leaching properties of electric arc furnace dust prior/following alkaline extraction"; *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, Vol. 42 (2007), p. 323 - 329
5. F. Machado Martins, J. M. dos Reis Neto, C. J. da Cunha, "Mineral phases of weathered and recent electric arc furnace dust"; *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 154 (2008), p. 417-425
6. J. G. M. da Silva Machado, F. Andrade Brehm, C. A. Mendes Moraes, C. A. dos Santos, A. C. Faria Vilela, "Characterization Study of Electric Arc Furnace Dust Phases"; *Materials Research*, Vol. 9 (2006), p. 41-45
7. D. M. Lenz, F. B. Martins, "Lead and zinc selective precipitation from leach electric arc furnace dust solutions"; *Revista Matéria*, Vol. 12 (2007), p. 503 - 509
8. R. A. Shawabkeh, "Hydrometallurgical extraction of zinc from Jordanian electric arc furnace dust"; *Hydrometallurgy*, Vol. 104 (2010), p. 61-65
9. W.J. Bruckard, K.J. Davey, T. Rodopoulos, J.T. Woodcock, J. Italiano, "Water leaching and magnetic separation for decreasing the chloride level and upgrading the zinc content of EAF steelmaking baghouse dusts"; *International Journal of Minerals Processing*, Vol. 75 (2005), p. 1-20
10. N. Jain, D. K. Sharma, "Biohydrometallurgy for nonsulfidic minerals - a review"; *Geomicrobiology Journal*, Vol. 21 (2004), p. 135-144
11. S. N. Groudev, "Biobeneficiation of mineral raw materials"; *Minerals & Metallurgical Processes*, Vol. 16 (1999), p. 19-28
12. Z. Golab, M. Orłowska, "The effect of amino and organic acids produced by the selected microorganisms on metal leaching"; *Acta Microbiologica Polonica*, Vol. 37 (1988), p. 83-93