

EXTRACCIÓN DE REE DE UN MINERAL RICO EN ÓXIDOS DE HIERRO

Extraction of ree from a mineral rich in iron oxides

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Diego Tamayo Soriano ¹
 Antonia Martínez Luévanos ²
 Ma. De Jesús Soria Aguilar ³
 Francisco Raúl Carrillo Pedroz ⁴

Recibido: 22 / 10 / 2021

Aceptado: 24 / 03 / 2022

Publicado: 08 / 04 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.204>

Autor de Correspondencia:
 Diego Alejandro Tamayo Soriano
 Correo: dtamayo@uadec.edu.mx

Resumen

Las tierras raras (REE) han atraído la atención del mundo debido a su importancia para su aplicación en tecnologías avanzadas, lo cual ha generado la optimización y desarrollo de nuevos procesos para su recuperación a partir de relaves de minas, escorias metalúrgicas y yeso fosforado. A nivel mundial las REE, se obtienen principalmente de carbonatitas, rocas ígneas alcalinas, placeres, lateritas y arcillas. La monacita, apatita y los zircones, son los principales minerales que contienen REE.

En este trabajo se presentan los avances del procesamiento de un mineral de hierro con contenidos de REE. Se realizó flotación utilizando ácido graso y depresores de Fe y Si. Las colas fueron procesadas por separación magnética. El material no magnético fue lixiviado utilizando HCl y H₂SO₄ con la finalidad de investigar la influencia del tipo y concentración de ácido. Los resultados obtenidos indicaron que el HCl es el agente más eficiente.

Palabras clave: tierras raras (REE), Extracción, Flotación, Separación magnética, Lixiviación ácida.

Abstract

Rare earths (REE) have attracted the attention of the world due to its importance for its application in advanced technologies, which has generated the optimization and development of new processes for its recovery from mine tailings, metallurgical slags and phosphorous gypsum. Globally, REE are obtained mainly from carbonatites, alkaline igneous rocks, placers, laterites and clays. Monazite, apatite, and zircons are the main minerals that REE contains. This work presents the progress of the processing of an iron ore with REE contents. Flotation was performed using fatty acid and Fe and Si depressants. The tails were processed by magnetic separation. The non-magnetic material was leached using HCl and H₂SO₄ in order to investigate the influence of the type and concentration of acid. The results obtained indicated that HCl is the most efficient agent.

Keywords: Rare earth (REE), Extration, Flotation, Magnetic separation, Acid leaching.

¹ Maestro en Ciencias, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México, dtamayo@uadec.edu.mx

² Doctora en Ciencias, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México, aml15902@uadec.edu.mx, Orcid 0000-0003-3499-1693

³ Doctora en Ciencias, Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Monclova, Coahuila, México, ma.soria@uadec.edu.mx, Orcid 0000-0003-3910-7772

⁴ Doctor en Ciencias, Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Monclova, Coahuila, México, raul.carrillo@uadec.edu.mx, Orcid 0000-0002-0413-0676



INTRODUCCIÓN

Las tierras raras (REE por sus siglas en inglés: Rare Earth Elements) no existen como metales naturales por lo cual se encuentran en la naturaleza contenidas en minerales en estado sólido. Existen más de 250 minerales que contienen REE, sin embargo, solo tres (bastnasita, monacita y xenotima) son explotados por ser económicamente rentables a escala comercial. La bastnasita es el principal mineral portador de REE (Mountain Pass, CA, EE. UU y Bayan Obo, China), y los otros dos existen como depósitos de arenas pesadas [1]. El procesamiento para el beneficio de estos minerales ricos en REE ha sido ampliamente estudiado, con el objetivo de diseñar diagramas de flujo para su procesamiento [2]. Su procesamiento y beneficio establecen combinaciones de procesos de gravimetría, separación magnética y flotación [3,4].

El material utilizado para este trabajo (Mineral R) proviene del norte del Estado de Coahuila, México. Se reporta que en esta zona la mineralización está alojada en estructuras de cuerpos lenticulares y tubiformes en posición vertical y como diseminaciones en cuerpos intrusivos de skarn de carbonatita y ferrocronatita.

En forma cuantitativa, la mayor concentración está en el mineral de hierro (con excelentes características magnéticas) y zinc a partir del valor económico; la parte más valiosa está formada por cuerpos de morfología de venas grandes con altas concentraciones de fosfatos de apatita, con grados de hasta 2% y 4% de óxidos de elementos de REE contenidos juntos con fósforo que varía entre el 5% al 25%.

En este trabajo se investiga sobre la propuesta de un

esquema de procesamiento de un mineral con contenidos importantes de RRE, utilizando primeramente flotación en espuma, seguido de un proceso de separación magnética y lixiviación ácida de los productos de este proceso.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El primer paso fue llevar a cabo la caracterización del mineral, Tabla 1. Se determinó la composición elemental mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X, con el objetivo de poder identificar los elementos de mayor abundancia del material de estudio. Para esto, se empleó un equipo de fluorescencia de Rayos X Panalytical modelo Epsilon, de la Universidad Autónoma de Coahuila.

Tabla 1. Composición química del mineral de cabeza.

| Elemento | % |
|----------|--------|
| Si | 11.250 |
| P | 2.740 |
| Ca | 11.730 |
| Mn | 1.940 |
| Fe | 47.300 |
| Zn | 1.970 |
| REE | ppm |
| La | 810 |
| Ce | 1000 |
| Pr | 740 |
| Nd | 620 |





Flotación

Se procedió a triturar, pulverizar y moler el material en un molino de bolas por un periodo máximo de 2 horas. Posteriormente, se tamizó el material en seco mediante mallas a diferentes fracciones de tamaños hasta alcanzar partículas de 0.106 mm, o que el material se encontrara por debajo de la malla 150, esto con el objetivo de liberar las especies minerales de interés. Las pruebas de flotación del mineral se realizaron en una celda mecánica tipo Denver. Las condiciones de flotación se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones experimentales de las pruebas de flotación.

| Reactivos | Acondicionamiento (min) | Temp (°C) | Volumen (L) | Mineral (g) | Dosis (g/ton) |
|----------------|-------------------------|-----------|-------------|-------------|-----------------|
| Depresor de Fe | 7 | 25 | 1 | 300 | 200 a 500 g/ton |
| Depresor de Si | 7 | 25 | 1 | 300 | 200 a 500 g/ton |
| Ácido graso | 7 | 25 | 1 | 300 | 200 a 500 g/ton |

Separación magnética

Se procedió a realizar una separación magnética, utilizando un imán de 9 cm de diámetro. Se utilizaron 706 g, con la finalidad de obtener dos productos; mineral no magnético y mineral magnético. Posterior a esta separación, se realizaron lixiviaciones ácidas para cada material obtenido.

Lixiviación ácida

Todos los productos químicos utilizados en los experimentos fueron de grado analítico. Las pruebas de lixiviación se realizaron con dos productos sometidos a distintos tratamientos: 1. Mineral flotado, 2. Mineral sometido a separación magnética. Cada prueba de lixiviación se llevó a cabo en un reactor acoplado a una parrilla de calentamiento y controlando la temperatura. Se mezclaron muestras de 50 g con volúmenes variables de agentes lixiviantes: HCl y H₂SO₄, siguiendo el modelo experimental que se muestra en la Tabla 3.

Después de cada prueba, la solución final se separó del sólido mediante filtración. El sólido se lavó con agua caliente y se secó en un horno a 100°C durante 24 h. Se analizó el sólido final por fluorescencia de Rayos X Panalytical modelo Epsilon.

Tabla 3. Planificación experimental: Experimentos de lixiviación ácida.

| Pruebas de lixiviación | Mineral (g) | Solución lixiviante (mL) | Tiempo (min) | Temp (°C) | Agente lixiviante | Concentración [M] |
|----------------------------|-------------|--------------------------|--------------|-----------|--------------------------------|-------------------|
| Lix Mineral R No magnético | 50 | 200 | 60 | 25 | HCl | 3.79 |
| Lix Mineral R No magnético | 50 | 200 | 60 | 25 | H ₂ SO ₄ | 5.94 |
| Lix Mineral R magnético | 50 | 200 | 60 | 25 | HCl | 3.79 |
| Lix Mineral R magnético | 50 | 200 | 60 | 25 | H ₂ SO ₄ | 5.94 |

RESULTADOS

Inicialmente como proceso de beneficio del mineral, se realizaron pruebas de flotación con el objetivo de poder visualizar mediante los análisis químicos, en que producto de la flotación se concentran las REE (concentrados o colas). Se efectuaron cuatro pruebas.

En la Tabla se muestran los resultados obtenidos por FRX para cada una de las pruebas de flotación. Se observa que el P y Ca, responden a la adición del ácido graso, promoviendo su flo-

tabilidad y concentración. Es aquí donde se observó que las REE, tienden a concentrarse en el principal producto de flotación (concentrados) obteniendo leyes en La y Ce de hasta 1800 ppm para ambos elementos. De igual forma, los reactivos depresores de Fe y Si, cumplieron el objetivo de concentrar en las colas dichos elementos.

Tabla 4. Resultados de las flotaciones

| Ley Mineral R | Si | P | Ca | Mn | Fe | Zn | La | Ce |
|---------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|------|------|
| | % | % | % | % | % | % | p pm | ppm |
| Cabeza | 11.250 | 2.740 | 11.730 | 1.940 | 47.300 | 1.970 | 1000 | 1000 |

| Leyes (concentrados) | Si | P | Ca | Mn | Fe | Zn | La | Ce |
|-----------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|------|------|
| | % | % | % | % | % | % | ppm | ppm |
| Mineral R Flotación 1 | 8.120 | 4.320 | 19.350 | 1.250 | 32.740 | 2.430 | 1800 | 1800 |
| Mineral R Flotación 2 | 6.150 | 3.870 | 20.820 | 1.990 | 39.360 | 2.070 | 1400 | 1400 |
| Mineral R Flotación 3 | 7.070 | 3.950 | 19.650 | 1.820 | 40.070 | 2.320 | 1500 | 1500 |
| Mineral R Flotación 4 | 2.630 | 2.560 | 8.890 | 3.250 | 57.370 | 1.020 | 800 | 700 |

| Leyes (colas) | Si | P | Ca | Mn | Fe | Zn | La | Ce |
|-----------------------|--------|-------|--------|-------|---------|--------|-----|------|
| | % | % | % | % | % | % | ppm | ppm |
| Mineral R Flotación 1 | 13.010 | 2.550 | 10.900 | 2 | 48.950 | 1.8800 | 700 | 900 |
| Mineral R Flotación 2 | 10.490 | 2.750 | 11.070 | 2.110 | 48.780 | 2.17 | 700 | 1100 |
| Mineral R Flotación 3 | 10.710 | 1.840 | 8.060 | 2.100 | 51.7100 | 1.950 | 500 | 800 |
| Mineral R Flotación 4 | 6.960 | 1.690 | 6.670 | 2.620 | 53.620 | 1.830 | 600 | 800 |





En este punto, observando que las leyes de Fe en las colas de flotación, se elevaron gracias a los reactivos depresores de Fe, se procedió a procesar por separación magnética las cuatro colas de flotación.

El objetivo de este proceso, es poder eliminar la mayor cantidad de Fe de las colas de flotación y determinar si las REE tienden a concentrarse en el producto magnético o No magnético. A continuación, en la Tabla 5, se muestran los resultados de FRX.

Se observa que de una ley de cabeza de 47.040% en Fe, el producto No magnético disminuyó a una ley del 24.380% en Fe. En este producto, los elementos Si, P y Ca, se concentran significativamente, al igual que el La y Ce, con leyes de 1700 ppm y 1800 ppm respectivamente. Por otra parte, para el producto magnético las leyes de los elementos La y Ce decayeron hasta 600 ppm y 700 ppm.

Tabla 5. Resultados de separación magnética.

| Ley Cabeza Mineral R (colas de flotación) | Si | P | Ca | Mn | Fe | Zn | La | Ce |
|-------------------------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|------|------|
| | % | % | % | % | % | % | ppm | ppm |
| | 8.570 | 3.160 | 13.780 | 2.230 | 47.040 | 2.210 | 930 | 1000 |
| Ley Magnético | Si | P | Ca | Mn | Fe | Zn | La | Ce |
| | % | % | % | % | % | % | ppm | ppm |
| | 6.750 | 1.930 | 7.360 | 2.710 | 56.880 | 1.790 | 600 | 700 |
| Ley No magnético | Si | P | Ca | Mn | Fe | Zn | La | Ce |
| | % | % | % | % | % | % | ppm | ppm |
| | 9.040 | 3.850 | 23.190 | 0.910 | 24.380 | 3.100 | 1700 | 1800 |

El siguiente proceso para la extracción de las REE, consistió en lixiviar los productos del proceso de la separación magnética. En la Tabla 6 se presentan los resultados de mayor relevancia.

Las lixiviaciones se realizaron utilizando H₂SO₄ y HCl como agentes lixiviantes. Para las pruebas de lixiviación del material magnético utilizando los mismos ácidos lixiviantes, se observa que, con ambos ácidos, el P es lixiviando en su totalidad, el Fe presenta una mejor respuesta de disolución utilizando H₂SO₄, y las REE tienden a disolverse con mayor eficacia utilizando HCl.

El material No magnético, presentó una mejor respuesta en la disolución de La y Ce, al utilizar ácido clorhídrico, obteniendo leyes de 50 ppm y 440 ppm respectivamente. De igual forma, tanto el P y el Ca fueron prácticamente diluidos en su totalidad. La ley de Fe al utilizar HCl no presenta un significativo cambio. Por otro lado, al utilizar ácido sulfúrico como agente lixivante en este mismo material, el valor de mayor relevancia se observó en la ley de Fe, obteniendo una ley final de 16.980%. Para el caso del La y Ce, no se presentaron cambios relevantes en sus leyes.

Tabla 6. Resultados de las pruebas de lixiviación.

| | Si | P | Ca | Mn | Fe | Zn | La | Ce |
|--------------------------------------------------------|--------|---|-------|-------|--------|--------|-----|-----|
| | % | % | % | % | % | % | ppm | ppm |
| Lix Mineral R magnético H ₂ SO ₄ | 12.210 | 0 | 8.960 | 0.910 | 33.070 | 0 | 420 | 500 |
| Lix Mineral R magnético HCl | 18.160 | 0 | 0 | 1.290 | 48.630 | 0.0500 | 270 | 180 |

| | Si | P | Ca | Mn | Fe | Zn | La | Ce |
|-----------------------------------------------------------|--------|---|--------|----|--------|----|-----|------|
| | % | % | % | % | % | % | ppm | ppm |
| Lix Mineral R No magnético H ₂ SO ₄ | 8.710 | 0 | 12.520 | 0 | 16.980 | 0 | 690 | 1000 |
| Lix Mineral R No magnético HCl | 19.760 | 0 | 0.820 | 0 | 42.870 | 0 | 50 | 440 |





CONCLUSIONES

Se valida lo reportado en la literatura, donde se menciona que los procesos de separación magnética en concentrados con REE no son muy eficientes, proponiendo que el método de flotación es el indicado para la concentración de REE.

Para este trabajo, basándonos en los análisis químicos por FRX, se observa que el método de mayor eficacia para la concentración de REE es la flotación, obteniendo leyes, en el peor de los casos de 800 ppm hasta 1400 ppm, 1800 ppm de La y Ce, valores prácticamente similares a los obtenidos en el producto No magnético del proceso de separación magnética (1700 ppm y 1800 ppm de La y Ce). Por lo cual, la separación magnética, para este caso de estudio, es un proceso que no aporta datos significativos en la línea del beneficio de las REE.

En términos de porcentajes de extracción, el H₂SO₄ en el material magnético logra lixiviar el 48.14% de La y 50% de Ce. Con HCl, se disuelve el 66.66% de La y 82% de Ce. En cambio, para el material No magnético, se obtuvieron valores de extracción con H₂SO₄ de 14.81% de La y 0% de Ce. Los mejores resultados para este material se obtuvieron con el HCl, alcanzando extracciones hasta del 93.82% de La y 56% de Ce.

El utilizar H₂SO₄ y HCl para lixiviar ambos materiales (Mineral R magnético y No magnético) demuestra que la vía de mayor eficacia para disolver el La y Ce, es el HCl, a una concentración de 3.79 [M]. Sin embargo, es importante realizar distintas pruebas de lixiviación con variadas concentraciones de ácidos, que sirvan para hacer más eficiente el proceso.

RECONOCIMIENTOS

El autor agradece al CONACyT por la beca otorgada con No 887854. Al programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Facultad de Ciencias Químicas, y a la Facultad de Metalurgia (ambas de la Universidad Autónoma de Coahuila), por la infraestructura prestada

para las pruebas y caracterización realizadas para este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Kim and S. Jeong, "Separation of monazite from placer deposit by magnetic separation", *Minerals*, vol. 9, pp. 149, 2019. <https://doi.org/10.3390/min9030149>
- [2] H. Cui and C. G. Anderson, "Alternative flowsheet for rare earth beneficiation of Bear Lodge ore", *Minerals Engineering*, vol. 110, pp. 166-178, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.04.016>
- [3] R. G. Rejeith and M. Sundarajan, "Combined magnetic, electrostatic, and gravity separation techniques for recovering strategic heavy minerals from beach sands", *Geotechnology*, vol. 36, pp. 959-965, 2018. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1403523>
- [4] W. Xiong, J. Deng, B. Chen, S. Deng and D. Wei, "Flotation-magnetic separation for the beneficiation of rare earth ores", *Minerals Engineering*, vol. 119, pp. 49-56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.01.014>

Cómo citar este artículo:

Tamayo Soriano, D. A., Martínez Luévanos, A., Soria Aguilar, M. de J., & Carrillo Pedroza, F. R. (2022). M.C EXTRACCIÓN DE REE DE UN MINERAL RICO EN ÓXIDOS DE HIERRO. *EPISTEMUS*, 15(31). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.204>

