

Concentración magnética de tierras raras del yacimiento Capacsaya-Cuzco, Perú.

Junior Rocca¹, Abel Gutarra¹

¹ Laboratorio de Materiales Nanoestructurados, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú

Abstract

The magnetic separation technique is used to concentrate rare earths from a reservoir located in Cuzco-Peru. It is shown that in the range of specific magnetic fields, concentrations of 500% and 200% of La, Ce, Nd and Pr are obtained. The separation was made with a standard Franz Isodynamic equipment, in a dry sample without further processing.

Keywords: (VSM, ferrous minerals, magnetis, iron oxide, pyrite)

1. Introducción

Las Tierras Raras (TTRR) son la base de los dispositivos tecnológicos más avanzados, sin embargo su acceso está limitado. Actualmente China produce alrededor del 80% de la demanda mundial de TTRR. Ésta marcada dependencia ha creado preocupación en EEUU y Europa quienes han visto amenazada su seguridad tecnológica y defensiva [1]. Por ello han planteado iniciativas legislativas como The National Strategic and Critical Minerals Production Act (USA, Sept, 2013) y The European Rare Earths Competency Network (ERECON-2013) con lo cual pretenden reducir esta vulnerabilidad.

Para tener una idea de la relevancia de estos materiales, se puede hacer un largo listado de dispositivos que se basan en ellos: celdas de combustible, teléfonos móviles, displays, pantallas planas, baterías para autos eléctricos, imanes permanentes para generadores eólicos, LEDs, catalizadores, láseres, equipos médicos de rayos X, LapTops, discos duros, fluorescentes compactos etc. [2].

Al contrario de lo que podría pensarse, las TTRR no son escasas, de hecho su abundancia es mayor que la del cobre, plomo, oro y platino. Lo que hace difícil su extracción, es que están dispersas con otros minerales. De acuerdo IUPAC las TTRR son una familia de 17 elementos. Comienzan por el lantano (A=57) y termina con el lutecio (A=71). Se incluyen al escandio y al itrio por tener propiedades físicas y químicas parecidas. Por el rango de sus masas atómicas, es usual clasificarlas como Tierras Raras Livianas (lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, y samario, A=57-62) y Tierras Raras Pesadas (europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio, lutecio, A=63-71). Todas ellas son naturales excepto el prometio, que es obtenido artificialmente. Las TTRR nunca se encuentran como metales puros, sino como óxidos, silicatos, fosfatos carbonatos o haluros. Desde el punto de vista mineralógico las TTRR se encuentran

principalmente como **Bastnasita**, con la fórmula (Ce, La) CO₃(FeOH) con un contenido aproximado de 70% de óxido de tierra rara (OTR); **Monacita** con la fórmula (Ce,La, Nd, Th) PO₄ con un 70% de OTR, generalmente acompañado de 4-12% de Th y una proporción variable de U y como **Xenotime** que es básicamente fosfato de itrio YPO₄ [3,4]. Conociendo la gran demanda mundial por TTRR, y la concentración del mineral en pocos países, se entiende la importancia económica que tendría para el Perú, si se consolida un plan de prospección para conocer nuestro potencial en reservas de TTRR. El INGEMMET comanda esta iniciativa, habiendo reportado la existencia de TTRR en intrusivos en la Cordillera de la Costa (Ica), la Cordillera Blanca (Áncash), la Cordillera Oriental (Puno), la sierra del departamento de La Libertad y en el departamento de Huancavelica [5].

2. Fundamento teórico

El separador magnético permite seleccionar los minerales de acuerdo a su respuesta ante la presencia de un campo magnético. El parámetro físico que los caracteriza es la susceptibilidad magnética. Existen diferentes diseños para lograr una separación eficiente [6]. El mecanismo básico es establecer una competencia entre el desplazamiento de una partícula por efecto de su peso y una fuerza magnética aplicada en dirección transversal a su movimiento, con el fin de desviar su trayectoria. Uno de los equipos más utilizados en los laboratorios es el Franz Isodynamic., que se muestra en la Figura 1. Consiste de un gran electroimán con dos polos alargados longitudinalmente. A través de ellos se desplaza el mineral.



Figura 1. Equipo Franz Isodynamic empleado en este trabajo.

Las partículas con alta susceptibilidad, sentirán la fuerza magnética desviando su trayectoria para ser recolectados por una bandeja ubicada en la parte final del recorrido de las partículas. En la Figura 2, se muestra un diagrama de la rampa que se coloca entre los polos del electroimán y por los cuales desciende el mineral debido al ángulo de inclinación θ . Además, la rampa se inclina un ángulo lateral, denominado φ en la Figura 2. Sobre una partícula que desciende, se aplican dos fuerzas. Una de ellas es la componente del peso $F_{gx} = mgsen\varphi$, y la otra, en dirección opuesta, la fuerza magnética F_m producida por el electro imán. Si la partícula no es magnética, seguirá el camino de caída debido a su peso, depositándose en la bandeja cercana al vértice bajo de la rampa. En caso que sea magnética, esta partícula podría ser desviada por la fuerza F_m , depositándose en la otra bandeja.

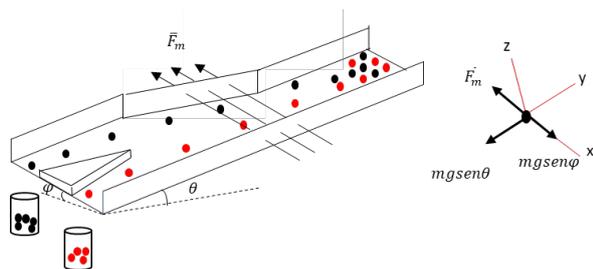


Figura 2. El mineral, desciende por la rampa. Las partículas magnéticas (color negro) son desviadas por la fuerza magnética. Las no magnéticas se deslizan por gravedad al punto más bajo de la rampa.

Una partícula magnética de masa m_p que se encuentra entre los polos del electroimán, experimenta una fuerza \vec{F}_m originado por el campo B,

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu_0} (\chi_p - \chi_f) m_p B \nabla B,$$

considerando, $\chi_p \gg \chi_f$, y simplificando la masa de la partícula,

$$\chi_p = \frac{\mu_0 g sen \varphi}{B \nabla B}.$$

Si se tiene un grupo de partículas, se puede encontrar el valor de corriente que hace que la mitad de la masa total sea se parada como magnética. En esas condiciones, la ecuación (3) se puede escribir como,

$$\chi_p = K \frac{sen \varphi}{I^2},$$

donde K es una constante que se obtiene calibrando el equipo con compuestos estándar; I es la corriente que hace que la mitad de la masa cargada se separe como magnética. La ecuación (4) permite obtener la susceptibilidad promedio de un grupo de partículas magnetizables.

3. Procedimiento experimental

3.1 Separación magnética por residuos

Este procedimiento se realiza por etapas, y se describe en la Figura 4. Se carga el equipo con una masa inicial m_0 de mineral. Bajo la aplicación de una corriente inicial I_1 al electroimán, la masa inicial se divide en una fracción magnética m_{1M} y un residuo m_{1R} . El residuo m_{1R} , se vuelve a pasar por el separador, pero esta vez se le aplica una corriente $I_2 > I_1$. Se obtiene una fracción magnética m_{2M} y un residuo m_{2R} . Este último se vuelve a cargar y se le aplica una corriente $I_3 > I_2$. Este proceso se repite hasta los valores límites de corriente que permite el electroimán, o hasta que la masa separada como magnética sea muy pequeña.

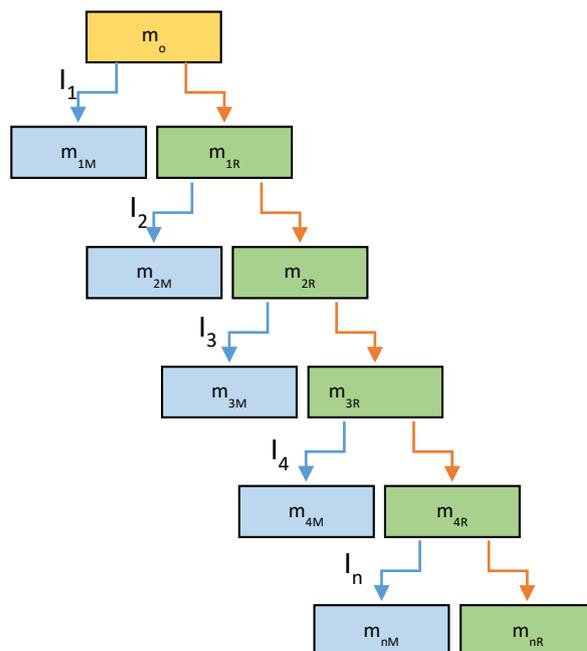


Figura 4. Diagrama de bloques que muestra el proceso de separación magnética por residuos. La masa inicial se fracciona en partes magnéticas (M) y residuos (R) bajo diferentes corrientes I del electroimán. Los residuos retornan al separador bajo una corriente mayor a la anterior.

3.2 Selección y caracterización de las muestras

Las muestras provienen del yacimiento en Capacsaya, enviadas por la compañía minera Rio Sol. Para este trabajo, los especialistas de la mina nos enviaron muestras de dos sitios del yacimiento. En lo que sigue, estas muestras se diferencian como provenientes de la ZONA A y de la ZONA B. Para las muestras de la ZONA A, se reportan los procesos de análisis detallados que nos llevaron a elegir aquella que tenía la mayor concentración de TTRR. Para el mineral de la ZONA B, se trabajó directamente con la que tenía la mayor concentración de TTRR. Como se verá, la concentración inicial de TTRR en la ZONA B es superior a las de la ZONA A.

3.3 Preparación de las muestras antes de la separación magnética

Para que el proceso de separación magnética sea reproducible, es necesario tener un buen control sobre la preparación de las muestras. Para las pruebas se siguió el siguiente procedimiento.

- Molienda en jarra cerámica con bolas de alúmina.
- Deslamado de la muestra. Consiste en el lavado de la muestra para retirar las partículas menores de 37micras (malla #400).
- Secado de muestras. La humedad hace que se aglomeren las muestras, provocando que la gravedad afecte en mayor proporción que el campo magnético. Se deja la muestra esparcida en una bandeja dentro de un horno a 50°C por un día.
- Tamizado. Las muestras deben ser separadas por tamaño, así evitamos que la separación por campo magnético sea influenciada por las dimensiones de las partículas. Se decidió trabajar con tamaño de muestras de 150 a 250 micras aproximadamente (100 mesh a 50 mesh), estándar con el que se trabaja en minería.
- Se hace pasar la muestra por el separador Franz a una corriente pequeña, 0.3 amperios, para retirar la parte ferromagnética que obstruiría el canal del equipo.

3.4 Caracterización de los minerales separados magnéticamente

3.4.1 Caracterización mineralógica de los minerales de la ZONA A

Se recogieron muestras de 5 lugares del yacimiento de la ZONA A y se las denominó: RS19, RS32, RS34, RS40, RS53. En las Tablas 1 y 2 se presentan el contenido de Tierras Raras y otros elementos encontrados. En la Tabla 3, se muestran los minerales identificados por difracción de rayos X.

Tabla 1. Contenido de TTRR según ICP de las muestras obtenidas del yacimiento Capacsaya de la ZONA A.

Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
RS19	111.8	155.3	12.15	36.8	6.4	0.79	5.83	0.98	6.29	1.25	3.64	0.56	3.67	0.56
RS32	1.489	2.300	185.8	494.9	58.75	6.28	47.61	4.63	20.13	2.66	6.12	0.8	5.21	0.79
RS34	123.6	183.9	16.13	48.9	7.64	1.04	6.28	0.89	5.44	1.0	2.84	0.43	2.88	0.42
RS40	125.5	237.4	23.9	81.6	12.71	1.17	12.57	1.71	10.25	67.92	5.82	0.86	5.92	1.3
RS53	96.5	183	17.87	59.6	9.58	1.01	9.63	1.24	7.45	1.47	4.32	0.63	4.41	0.81

Tabla 2. Otros elementos presentes en las muestras obtenidas del yacimiento Capacsaya de la ZONA A

Muestra	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	S	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%
RS19	6.04	1.38	1.78	0.19	0.66	4.75	1.02	0.12
RS32	2.42	9.63	12.38	1.44	3.56	0.13	2.11	0.08
RS34	6.91	0.25	1.6	3.67	0.13	3.22	0.09	0.15
RS40	0.47	13.5	6.71	0.05	6.91	0.2	0.02	0.07
RS53	2.51	7.82	7.67	1.21	7.81	0.42	0.02	0.16

Tabla 3. Difracción de rayos X de las muestras obtenidas del yacimiento Capacsaya de la ZONA A.

Muestra	Formulas	RS19	RS32	RS34	RS40	RS53
Cuarzo	% SiO ₂	32	11	32	6	15
Muscovita	% KAl ₃ Si ₃ (OH) ₂ F _{0.2}	1	10	13	0	0
Hematita	% Fe ²⁺ -O ₃	<L.D.	9	<L.D.	2	1
Pirita	% FeS ₂	<L.D.	2	<L.D.	1	2
Feldespato-K Ortoclasa	% KAlSi ₃ O ₈	1	1	9	5	10
Ilmenita	% Fe ²⁺ TiO ₃	<L.D.	0	<L.D.	0	0
Plagioclasas (Oligoclase)	% (Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈	9	0	11	0	0
Dotomita	% CaMg(CO ₃) ₂	6	56	4	2	2
Plagioclasas (Albita)	% NaAlSi ₃ O ₈	50	3	29	0	0
Calcita	% CaCO ₃	0	7	<L.D.	7	2
Anatasa	% TiO ₂	0	0	<L.D.	0	0
Fluorapatito	% Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	0	0	0	4	3
Actinolita	% Ca ₂ (Mg,Fe ²⁺) ₇ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	0	0	0	41	49
Diópsido	% CaMgSi ₂ O ₆	0	0	0	22	<L.D.
Clorita (Cinocloro)	% (Mg,Fe ²⁺) ₃ Al(Si ₂ Al) ₂ O ₁₀ (OH) ₂	0	0	0	3	12
Hornblenda	% Ca ₂ (Mg ₄ (Al,Fe ²⁺))Si ₈ AlO ₂₂ (OH) ₂	0	0	0	7	5
Titanita	% CaTiSiO ₅	0	0	0	0	<L.D.

Los análisis de ICP y DRX demuestran que la muestra RS32 es la que contiene mayor concentración de TTRR. Por lo tanto, se eligió para la separación magnética. En adelante a esta muestra de la denominará muestra obtenida de la ZONA A.

3.4.2 Concentración de TTRR en las muestras separadas magnéticamente de la ZONA A

Después de la separación para diferentes corrientes (lo que equivale a diferentes intensidades de campo magnético) se determinó el contenido de TRRS en cada una de ellas. Se utilizó la técnica ICP por su bajo límite de detección. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración de TTRR en el mineral separado magnéticamente de la ZONA A.

Muestra	Ce	La	Nd	Pr	Sm
Amp	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0	2300	1489	494.9	185.8	58.75
0.1	286	185.5	54.9	20.5	7.63
0.3	289	188.5	66.1	23	8.95
0.5	>500	1530	474	179.5	59.6
0.7	9810	6370	2120	804	230
0.9	>500	2290	714	273	85.5

1.1	1160	751	257	93.7	31.5
1.3	625	399	147.5	51.3	19.9
1.5	384	235	87.1	29.7	14.35
1.5 parte no B	301	168	82	25.5	14.05

En la Figura 5, se muestran los resultados de la Tabla 4, graficados en barras, donde se aprecia con claridad el aumento de concentración de TTRR para una corriente de separación de 0,7 A.

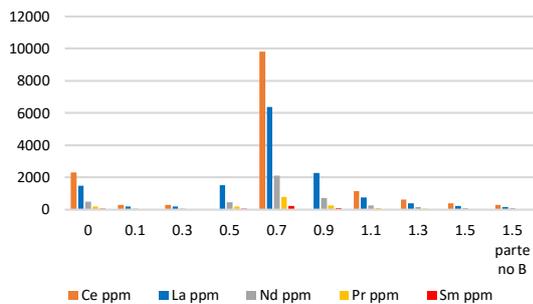


Figura 5. Concentración de TTRR en el mineral separado magnéticamente de la ZONA A, en función de las corrientes del electroimán.

3.7 Composición elemental por ICP de los minerales de la ZONA B.

Como se explicó, para los minerales recogidos de esta ZONA B, se eligió para la separación magnética, aquella que presentó la mayor concentración de TTRR, según ICP, sin hacer un análisis completo de las otras muestras de menor concentración. A esta muestra seleccionada, se la llamo muestra de la ZONA B. Su contenido de TTRR se muestra en la tabla 5. Su contenido inicial de TTRR supera al mineral de la ZONA A.

Tabla 5. Contenido de TTRR según ICP de las muestras obtenidas del yacimiento Capacsaya de la ZONA B.

Muestra	Ce	La	Nd	Pr	Sm
ZONA B	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	6150	5080	1065	433	94.3

3.8 Concentración de TTRR en las muestras separadas magnéticamente de la ZONA B.

Se aplicaron los mismos valores de corriente al electroimán que se aplicaron a los minerales de la ZONA A. Y la composición elemental se obtuvo por ICP. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Se aprecia que los máximos valores de TTRR se encuentran para las muestras separadas con una corriente del electroimán de 0,7 A. De igual manera que para los minerales de la ZONA A.

Tabla 6. Concentración de TTRR en el mineral separado magnéticamente de la ZONA B.

Muestra	Ce	La	Nd	Pr	Sm
A	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0	6150	5080	1065	433	94.3
0.3	1195	957	203	81.5	21
0.5	1610	1295	274	112.5	26.4
0.7	12100	9270	2050	840	172.5
0.9	8620	6840	1480	624	128
1.1	7050	5170	1185	511.1	97.2
1.3	3800	2970	645	267	54.2
1.5	2990	2470	516	215	43.7
1.5 parte no B	1100	848	186	76.5	16.75

En la Figura 6, se muestran las concentraciones de TTRR para diferentes corrientes del electroimán. Se puede apreciar que, para estas muestras de la ZONA B, también se alcanza un máximo de concentración de TTRR para una corriente del electroimán de 0,7 A.

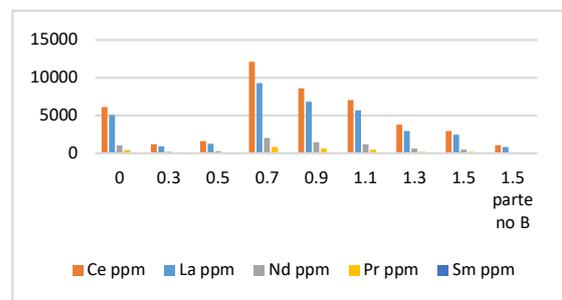


Figura 6. Concentración de TTRR en el mineral separado magnéticamente de la ZONA B, en función de las corrientes del electroimán.

3.9 Apreciación visual de los minerales separados magnéticamente.

La acción del separador magnético puede ser apreciada incluso con un microscopio óptico de bajo aumento. En la Figura 10, se puede observar que a bajos valores de corriente, es decir, cuando el campo magnético separador es débil ($\approx 0,05A$), se concentran partículas de magnetita caracterizadas por su coloración oscura y forma angulosa. Esto se debe a su alto valor de susceptibilidad magnética.

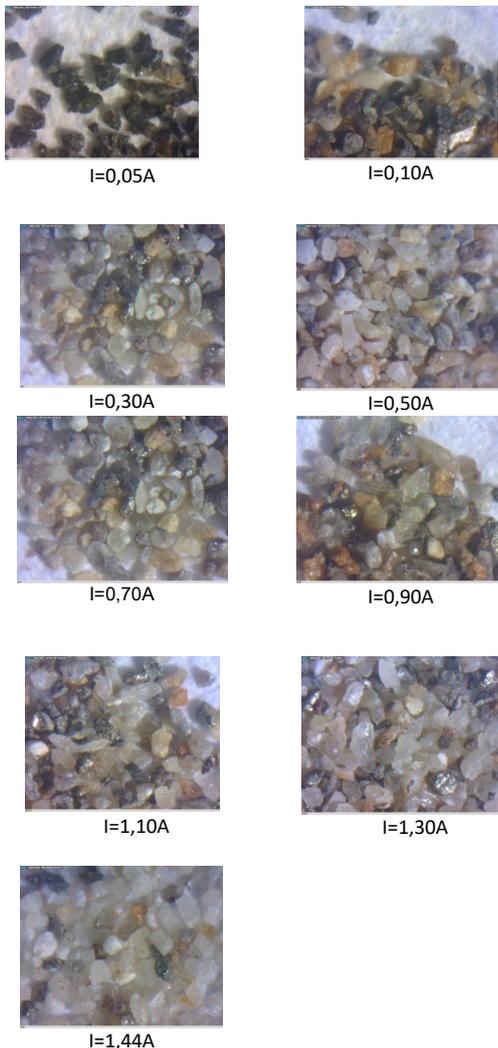


Figura 10. Microscopía óptica de los minerales separados magnéticamente para diferentes valores de corriente de la muestra de la ZONA A.

A medida que se incrementa la corriente en el electroimán, la apariencia de las partículas va variando hacia coloración clara y aspecto vidrioso, correspondiente a minerales de baja susceptibilidad, en su mayoría silicatos como cuarzo o feldespatos.

4. Conclusiones

doi : 10.15460/Tecnia.21354

El tamaño de la partícula influye en la eficiencia de la separación debido a que la fuerza magnética debe superar a la componente del peso de la partícula. Todas las muestras fueron tamizadas para obtener tamaños entre 150 - 250 μm , de esta forma se obtuvieron resultados validos comparativamente, pero no se tiene seguridad de haber encontrado el tamaño óptimo para una mayor eficiencia de recolección. Es posible que los minerales magnéticos sigan embebidos dentro una matriz no magnética (como feldespatos) aumentando el peso de la partícula y de esta forma superando la fuerza magnética. Esto produciría una dispersión del material magnético.

Los resultados del uso del separador magnético demuestran claramente que se logra un aumento notable de la concentración de varios elementos de TTRR, especialmente los livianos como La, Ce, Nd. El mineral de la ZONA A tenía una concentración inicial de La de 2 300 ppm y luego de concentrarlo usando una corriente de magnetización de 0,7 A aumenta su concentración a 9 810 ppm. El mineral de la Zona B, tenía una concentración inicial de Ce de 6 150 ppm, luego de la concentración a 0,7 A incrementa su concentración a 12 100 ppm. Estos resultados demuestran que la técnica de separación magnética aplicada al mineral del Yacimiento de Capacsaya, incrementa su concentración de TTRR.

Agradecimientos

Los autores agradecemos Al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (Innovate Perú), por financiar el proyecto, de acuerdo al contrato 128-PNICP-PIAP-2015.

REFERENCIAS

- [1] Pothen F. and Fink K. (2015). A Political Economy of China's Export Restrictions on Rare Earth Elements. Center for European Economic Research.
- [2] J. Stöhr. H. C. Siegmann. Magnetism. From Fundamentals to Nanoscale Dynamic. Springer (2016).
- [3] Yasuo Kanazawa a, Masaharu Kamitani. Rare earth minerals and resources in the world. Journal of Alloys and Compounds 408-412 (2006) 1339-1343
- [4] Lucas J., Lucas P.(2015) Rare Earths, Science, Technology, Production and Use. Pages 31-46. Elsevier.
- [5] Rios Carranza A. GEONOTICIAS. Revista oficial de la sociedad Geológica del Perú. Año XXI - N°2. Junio 2016. Pag.32.
- [6] J. Svoboda, *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 4, pag. 173-192, Gordon and Breach Science Publishers S.A., Malaysia (1993).