

# Ocurrencia de elementos químicos de Tierras Raras en yacimientos tipo Óxido de Hierro-Cobre-Oro andinos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**Daniel Werner**<sup>1</sup>, Alumno de sexto año

**Rodrigo Gomila**<sup>2</sup>, Alumno de postgrado

**Gloria Arancibia**<sup>2</sup>, Profesora Asociada

<sup>1</sup>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINERÍA

<sup>2</sup>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y GEOTÉCNICA

## INTRODUCCIÓN

Las Tierras Raras (conocidas como REE por su nombre en inglés, Rare Earth Elements) corresponden al grupo de 17 elementos químicos que incluye a los **lantánidos**, escandio e itrio. Estos elementos no son tan escasos como parece, pero encontrarlos en una concentración económicamente viable, es poco común. Las REE pueden encontrarse en distintas concentraciones en la naturaleza: como elementos constituyentes básicos de un **mineral**, en cuyo caso su concentración será de **elemento mayor** (porcentaje en peso); o como reemplazo de algunos átomos de la **red cristalina**, en cuyo caso su concentración química será de **elemento menor**, o **traza** (ppm y ppb).

El uso principal de estos elementos se da en la fabricación de variados dispositivos tecnológicos de última generación y en industrias metalúrgicas. Su negocio está siendo cada vez más rentable, ya que sus

precios han subido, hasta en un 650%, entre 2002 y 2008. Estos valores varían desde US\$6.600/kg para el europio a US\$165/kg para el lantano. Países como Estados Unidos, China y Australia tienen las mayores reservas mundiales, mientras que Chile no tiene un **ambiente geológico** que favorezca la formación de yacimientos de estos minerales [1]. Sin embargo, el aumento de los precios de mercado y el avance del desarrollo tecnológico han despertado nuevamente el interés por la exploración geológica de estos elementos [2].

Estudios previos muestran que en el caso de Chile (situado en un ambiente geológico de margen convergente de placas), existe una concentración significativa de REE en un cierto tipo de mineralización, conocida como yacimientos de Óxido de Hierro-Cobre-Oro (IOCG por sus siglas en inglés, Iron Oxide Copper Gold) [3]. En nuestro país, estos depósitos se encuentran localizados, principalmente, en la Cordillera de la Costa, entre Antofagasta y La Serena, y están asociados genéticamente al **arco magmático** desarrollado en el periodo Jurásico al Cretácico Inferior (aproximadamente 200 a 100 millones de años de edad). También se documenta su fuerte relación temporal y espacial con la **Zona de Falla Atacama**, una estructura de rumbo nort-sur de varios cientos de kilómetros de largo [3] (Figura 1). Las rocas en este sector corresponden, principalmente, a **rocas intrusivas y extrusivas**, las cuales han sido alteradas hidrotermalmente dando origen a brechas y vetas compuestas por minerales de magnetita-hematita-apatito y óxidos y/o sulfuros de cobre (además de oro), característicos de la mineralización IOCG.

El objetivo de este trabajo es evaluar la ocurrencia de REE en este tipo de yacimiento mediante la recopilación bibliográfica de los datos geoquímicos publicados. Este estudio constituye una primera aproximación acerca de dónde focalizar la exploración geológica de estos elementos.

## METODOLOGÍA

La metodología consistió en la recopilación de información de la bibliografía existente y su integración geológica. Esto se basó, esencialmente, en la interpretación de **tablas geoquímicas** publicadas de muestras de rocas y de minerales de depósitos de IOCG chilenos. Luego de la revisión bibliográfica, se seleccionó cuatro casos de estudio de IOCG, según los siguientes criterios: consistencia interna de la información (localización de las muestras, medición geoquímica comparable de los elementos de interés) y representatividad geológica (presencia de rocas intrusivas, rocas extrusivas, rocas mineralizadas y minerales representativos del ambiente geológico).

Los depósitos seleccionados fueron los siguientes: a) Carmen de Fierro; b) Mantoverde; c) Cerro Negro Norte; d) Productora (Figura 1). En estos yacimientos se obtuvo datos geoquímicos de roca total, de rocas intrusivas (granodioritas y dioritas), rocas extrusivas (andesitas y tobas), **rocas hidrotermales** mineralizadas (brechas y vetas hidrotermales) y de minerales (magnetita, apatito, monacita, anfíbola, rutilo).

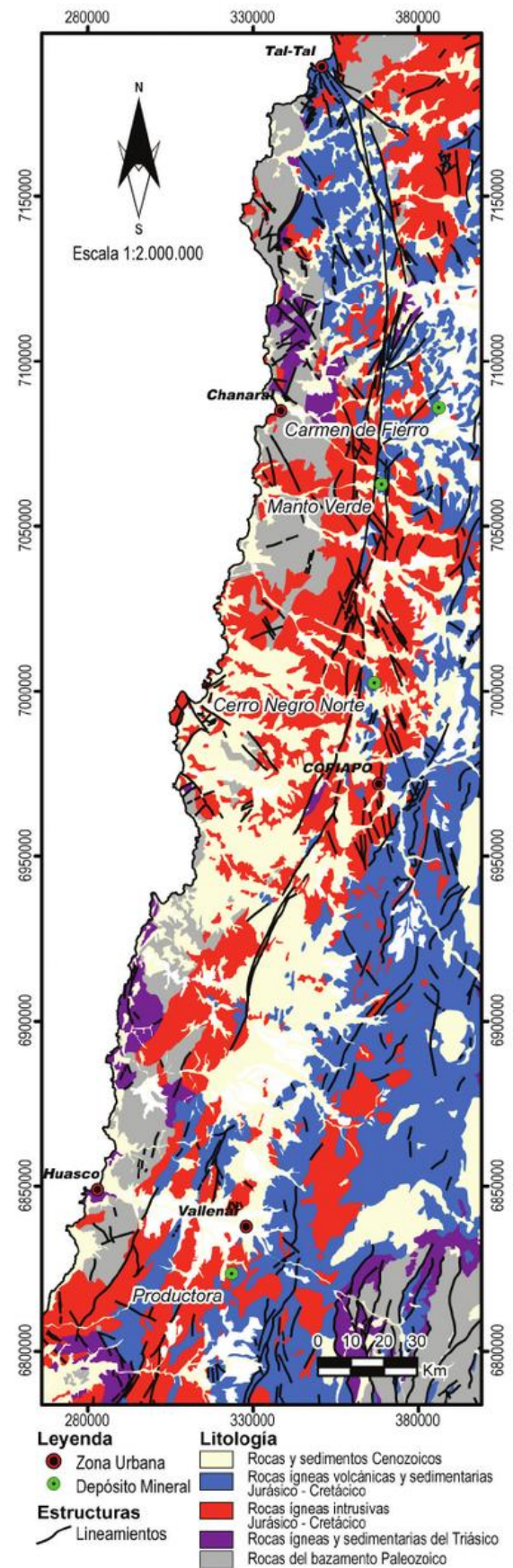


Figura 1: Mapa geológico simplificado (modificado de [4] y [5]), que muestra la ubicación de los casos de estudio seleccionados. Los lineamientos mostrados corresponden a la Zona de Falla Atacama.

El análisis de los resultados químicos en los distintos tipos de rocas y en los distintos minerales, entregó una idea de qué elementos trazas están presentes, en qué concentración y qué tan significativa es su anomalía. En los ejemplos tomados de la bibliografía, los análisis químicos fueron realizados con diferentes técnicas que son comparables entre sí.

## RESULTADO Y DISCUSIÓN

Según los datos recopilados, la concentración más importante de elementos de Tierras Raras corresponde a aquellos ubicados en la tabla periódica entre el lantano y el gadolinio y, en este trabajo, se presentan como la sumatoria de sus concentraciones ( $\Sigma\text{REE}$ ). También se discute la presencia de vanadio, el cual, si bien no es una Tierra Rara en el sentido estricto, se considera elemento de interés porque sus características geoquímicas y económicas son similares.

La Figura 2 muestra el contenido de  $\Sigma\text{REE}$  de los distintos tipos de roca, según su porcentaje en peso de  $\text{SiO}_2$ , compuesto principal de la corteza terrestre. A modo de conocer la concentración primaria en la naturaleza de los elementos de interés, se incluye la composición promedio de la **corteza continental superior (UCC)** [6]. Se puede observar, además, que sólo superan la concentración promedio de  $\Sigma\text{REE}$  de la corteza continental superior (del orden de 100 ppm), algunas brechas y vetas hidrotermales, mientras que, en general, las rocas extrusivas (tobas y andesitas) y rocas intrusivas (granodioritas y dioritas) muestran una concentración considerablemente menor. En este caso, estas últimas corresponden a la roca de caja (roca primaria) de una alteración hidrotermal que da origen a las brechas y rocas hidrotermales mineralizadas (roca secundaria). Este proceso geológico habría facilitado el enriquecimiento de REE en las rocas hidrotermales y el empobrecimiento relativo en las rocas de caja adyacentes. Sin embargo, se observa que las rocas hidrotermales no tienen un único patrón de comportamiento geoquímico, por lo que el enriquecimiento no es homogéneo. Esto sugiere que otros factores, que no fueron analizados en este trabajo, influyeron en esta distribución: composición química y origen del fluido hidrotermal que produjo la alteración y cambios en las condiciones de presión y temperatura que favorecen o inhiben la precipitación de algunos minerales, entre otros.

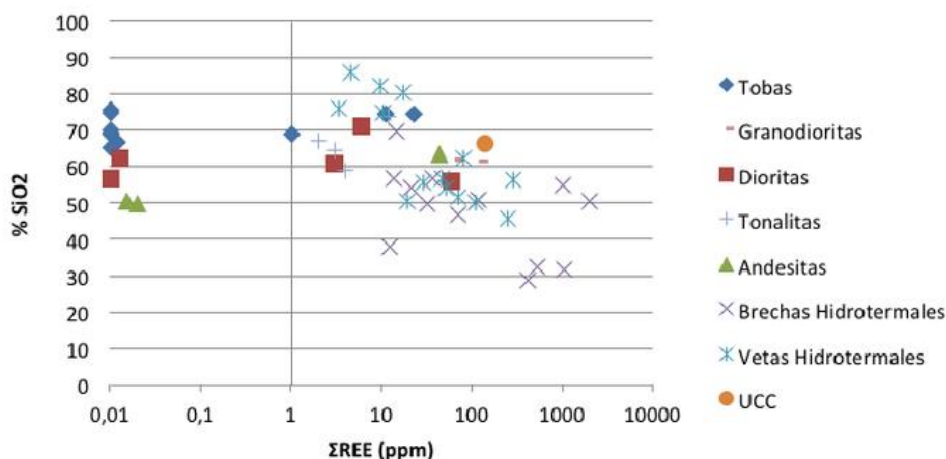


Figura 2: Suma de la concentración de REE ( $\Sigma\text{REE}$ ) en escala logarítmica según el contenido de sílice de las rocas representativas de los casos de estudio [7], [8], [9], [10], [11]. UCC corresponde al valor promedio de la corteza continental superior [6].

En el caso de la geoquímica de minerales, el análisis se realizó según el tipo de mineral y su concentración en  $\Sigma\text{REE}$  y en vanadio. En la Figura 3a) se puede observar que la monacita tiene concentraciones de hasta cuatro órdenes de magnitud más alta que el promedio de la corteza terrestre. El apatito, en cambio, muestra concentraciones muy variables, que pueden alcanzar hasta dos órdenes de magnitud más altos que el promedio cortical. El rutilo, por su parte, tiene contenidos de  $\Sigma\text{REE}$  más bajos que el apatito y la monacita, cercanos a la composición de la corteza terrestre. La Figura 3b) muestra que la magnetita tiene contenidos variables de vanadio, de hasta 2.000 ppm, los cuales superan en dos órdenes de magnitud a la concentración media en la corteza superior terrestre. Por otra parte, los datos de anfíbola documentados no tenían contenido alguno de REE ni de vanadio, por lo que no aparecen graficados en estas figuras.

El mineral identificado que tiene las mayores concentraciones de REE es la monacita, la cual aparece descrita en la bibliografía como inclusiones dentro del apatito. Por otra parte, las concentraciones de

vanadio en magnetita podrían llegar a ser significativas. Dado que el apatito y la magnetita son minerales comunes en este tipo de depósitos, es necesario evaluar si estos elementos podrían ser extraídos exitosamente como subproductos en la explotación de los yacimientos IOCG. Por ejemplo, actualmente existen métodos de separación selectiva para el apatito y REE. Éste consiste en una flotación primaria de apatito (proceso selectivo ya existente), una molienda más fina para el concentrado obtenido y una flotación específica final de REE [1].

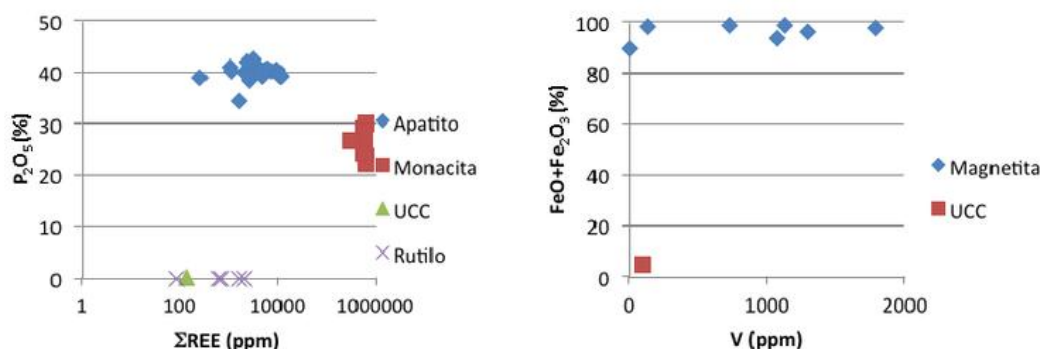


Figura 3: a) Suma de la concentración de REE ( $\Sigma REE$ ), en escala logarítmica, en muestras minerales de apatito, rutilo y monacita versus  $P_2O_5$ . b) Concentración de vanadio versus  $FeO+Fe_2O_3$ , en muestras minerales de magnetita. UCC corresponde al valor promedio de la corteza continental superior [4], [12], [7], [6], [10], [13].

## CONCLUSIONES

Las REE son elementos que están presentes en Chile en concentraciones superiores al promedio de la corteza terrestre, lo cual hace llamativa una exploración más exhaustiva. Todas las minas analizadas -Carmen de Fierro, Mantoverde, Cerro Negro Norte y Productora- tienen un contenido alto de cobre y hierro, particularmente, por lo que incluir un tercer elemento de explotación como las REE podría significar grandes ventajas económicas.

La mineralización de REE se produce en las etapas de alteración de fluidos hidrotermales, por lo que no se podrá encontrar concentraciones económicamente interesantes de estos elementos en las rocas extrusivas e intrusivas del arco magmático del Jurásico-Cretácico Inferior. En cambio, en las rocas hidrotermales (brechas y vetas) el proceso pudo estar acompañado de un enriquecimiento significativo.

De los minerales estudiados, el más interesante es el apatito, el cual puede contener, el cual puede contener inclusiones de monacita, uno de los principales minerales portadores de REE. Sin embargo, se documentaron apatitos sin REE, lo que sugiere que debe precisarse mejor las condiciones geológicas en las cuales ocurrió este proceso. La factibilidad de la explotación económica de REE en estos yacimientos dependerá directamente de la cantidad de apatito y de la concentración de monacita que estos puedan presentar. Actualmente, el apatito se trata como **estéril** en las explotaciones de hierro y cobre.

## PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Los minerales pueden tener estructura interna simple o compleja. En general, una complejidad mayor está dada por la capacidad de alguno de sus componentes básicos de ser reemplazado por iones de similar radio iónico, valencia y/o comportamiento químico. Este intercambio puede ocurrir en la naturaleza, simultáneamente, con uno o más elementos. Por esta razón, aunque un mineral tiene una fórmula química estándar, puede contener pequeñas cantidades de otros elementos en su red, denominados elementos trazas.

En este trabajo se evalúa la capacidad que poseen algunos minerales comunes de los yacimientos en estudio, para contener elementos trazas tales como REE (ejemplo:  $La^{3+}$ ,  $Ce^{3+4+}$ ,  $Nd^{3+}$ ) y  $V^{3+}$ . También se analiza la composición química de distintos tipos de rocas asociadas genéticamente a estos depósitos. Los minerales analizados son los siguientes [14]:

a) **Anfibola**. Corresponde a un silicato complejo cuya fórmula general es  $A_{0,1}B_2C_5T_8O_{22}(OH, F)_2$ . Su iones se distribuyen según las posiciones de A= (Na, K); B= (Na, Ca, Mg,  $Fe^{2+}$ ); C = (Mg,  $Fe^{2+}$ , Al,  $Fe^{3+}$ ); T: (Si, Al). En este caso, el Ca (posición B), a su vez, puede ser reemplazado por Ce, La, Y, Th.

b) **Apatito**. Corresponde a un fosfato cálcico con fórmula  $Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$ , donde el Ca puede ser reemplazado por Ce, La, Y, Th. Si esta sustitución ocurre en gran cantidad, puede llegar a convertirse en un nuevo mineral denominado **Monacita** cuya fórmula es  $(La, Ce, Nd, Th)PO_4$ .

c) **Magnetita**. Corresponde a un óxido de hierro cuya fórmula química es  $FeO \cdot Fe_2O_3$ . En este caso, el  $Fe^{3+}$  puede ser reemplazado por (Al, V, Cr), mientras que el  $Fe^{2+}$  puede ser reemplazado por (Ni, Co, Zn, Mg, Mn, Ca, Ti).

d) **Rutilo**. Corresponde a un óxido de titanio con fórmula  $TiO_2$ , en el cual el Ti puede ser reemplazado por La, Ce o Nd.

## GLOSARIO

**Alteración Hidrotermal:** proceso geológico que produce cambios físicos y químicos en la roca producto de la circulación de fluidos hidrotermales a alta temperatura.

**Ambiente Geológico:** condiciones y procesos geológicos que dieron origen al objeto geológico de interés. En este caso, un depósito mineral.

**Arco Magmático:** franja de actividad volcánica e intrusiva en un ambiente de subducción.

**Corteza Continental Superior:** parte superior de la corteza terrestre, la cual forma los continentes.

**Elemento Mayor:** elemento cuya concentración, dentro de una muestra, alcanza el orden de partes por ciento (%).

**Elemento Menor o Traza:** elemento cuya concentración, dentro de una muestra, es del orden de partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb).

**Estéril:** mineral sin valor económico que se extrae en una explotación minera.

**Lantánidos:** conjunto de elementos que forman parte del periodo 6 de la tabla periódica. Se caracterizan por estar llenando el orbital 4f, lo cual hace que tengan propiedades atómicas similares.

**Lineamiento:** estructura lineal de carácter morfológico y de escala regional, que puede ser identificado en un mapa geológico o imagen satelital.

**Mineral:** compuesto químico inorgánico natural ordenado, el cual tiene características físico-químicas propias que dependen de su estructura interna.

**Red Cristalina:** estructura que toman los minerales en su forma cristalina. Ésta se caracteriza por ser un patrón ordenado de elementos químicos.

**Roca:** agregado natural coherente de minerales.

**Roca Extrusiva:** roca ígnea formada por el enfriamiento rápido de magma en superficie. Ejemplo: andesita y toba.

**Rocas Hidrotermales:** rocas formadas por la interacción de una roca in-situ con fluidos hidrotermales. Suelen estar mineralizadas, es decir, contener minerales con elementos económicamente rentables. Ejemplo: brecha y veta hidrotermal.

**Roca Intrusiva:** roca ígnea formada por el enfriamiento lento de magma bajo la superficie. Ejemplo: granodiorita y diorita.

**Tabla Geoquímica:** tabla que contiene la concentración de los elementos químicos identificables en la muestra (roca o mineral). Esta concentración se obtiene mediante algún método químico de medición.

**Zona de Falla Atacama:** zona de falla geológica, de más de 1.000 km de largo, asociada a lineamientos de rumbo preferencial norte-sur, que se localiza en la Cordillera de la Costa entre Iquique y La Serena.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al proyecto de colaboración DICTUC-Minería Activa S.A "Naturaleza y potencial de exploración de las Tierras Raras en yacimientos de óxidos de Fe-Cu-Au andinos" por su contribución en la selección de los depósitos representativos para este estudio.

## REFERENCIAS

1. BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. Rare Earth Elements Profile [En Línea]. Nottingham: Noviembre 2011. Disponible en Web: <http://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1638>.
2. ESTURILLO, J. Esas escasas y cotizadas Tierras Raras. Revista Qué Pasa Minería, pp. 70-76. Edición 9 de abril de 2012. Santiago, 2012.
3. SILLITOE, R. H. Iron oxide-copper-gold deposits: An andean view. *Mineralium Deposita*, 38, pp. 787-812, 2003.
4. BONSON, C. Fracturing, Fluid processes and mineralization in the cretaceous continental magmatic arc of northern Chile (25°15'-27°15'S). Ph. D. Thesis, no publicada, Kingston University, Londres, 1998.
5. SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. Mapa Geológico de Chile. Escala 1:1.000.000, 2002.
6. TAYLOR, S. R.; MCLENNAN, S. M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell (Oxford), pp. 312, 1985.
7. RAAB, A. Geology of Cerro Negro Norte Fe-Oxide (Cu-Au) District, Coastal Cordillera, Northern Chile. Thesis, Oregon State University, Junio, 2002.
8. RAY, G. E., DICK, L.A. The Productora prospect in north-central Chile: And example of an intrusion-related, candelaria type Fe-Cu-Au hydrothermal system. Porter T.M. (Ed.) *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, Volume 2; PGC Publishing, Adelaide, pp. 131-151, 2002.

9. RIEGER, A., MARSCHIK, R., DÍAZ, M., HOLZL, S., CHIARADIA, M., AKKER, B., SPANGENBERG, J. The Hypogene Iron Oxide Copper-Gold Mineralization in the Mantoverde District, Northern Chile. *Economic Geology*, v. 105, pp. 1271-1299, 2010.
10. TREOLAR, P.J., COLLEY, H. Variations in F and Cl contents in apatites from magnetite-apatite ores in northern Chile, and their ore-genetic implications, *Mineralogical Magazine*, Vol. 60, pp. 285-301, April, 1996.
11. VIVALLO, W., ESPINOZA, S., HENRÍQUEZ, F. Metasomatismo y alteración hidrotermal en el depósito ferrífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol 2, No 1, pp. 75-88, 7 Figs, Julio, 1995.
12. HENRÍQUEZ, F., DOBBS, M., NYSTROM, J.O. Caracterización geoquímica de Magnetita, Apatita y Anfíbola del yacimiento de Hierro Carmen, Región de Atacama, Chile. *Actas 6° Congreso Geológico Chileno, Viña del Mar*, pp. 5-9, 1991.
13. VELASCO, F., TORNOS, F. Origen de las pegmatitas de magnetita-apatito de la mina Carmen del Fierro (Atacama, Chile). *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, macla N° 11, 2009.
14. DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. 2da Edición. Londres: Longman, 1992.

## EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Daniel Werner  
2 Rodrigo Gomila  
3 Profesora Gloria Arancibia

