



# Análisis y caracterización de las tierras raras en el yacimiento El Teniente

López, Angélica Belén<sup>1,\*</sup> Burgos, Ludovina<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología, Universidad de Chile

<sup>2</sup>Superintendencia de Geología, División el Teniente, Codelco

\* Mail: [belenlopezaraya@gmail.com](mailto:belenlopezaraya@gmail.com)

\*\* Mail: [LBurgos@codelco.cl](mailto:LBurgos@codelco.cl)

**Resumen.** El estudio del presente trabajo tiene por finalidad conocer la distribución de tierras raras y el contenido en cada una de las unidades litológicas representativas del yacimiento.

Las seis principales litologías presentes en el yacimiento El Teniente, tienen concentraciones similares dentro de las tierras raras livianas, siendo sus concentraciones mayores en las litologías del Complejo Máfico El Teniente y las Brechas de Anhidrita y Cuarzo en tierras raras pesadas. Las concentraciones de tierras raras dentro del yacimiento son menores a la formación Farellones, como es de esperarse, dada la circulación de fluidos hidrotermales. A través de Redes Neuronales Artificiales, se proponen dos subunidades al Complejo Máfico El Teniente, dentro del sector este y oeste del yacimiento. Se concluye que los elementos de tierras raras se comportan de forma errática dentro del yacimiento a nivel horizontal y vertical. El yacimiento presenta bajas concentraciones de estos elementos, con un promedio inferior a una decena de ppm, por tanto, su explotación no es viable.

**Palabras Claves:** Tierras raras, Redes Neuronales (RNA), LREE, HREE.

## 1 Introducción

Las tierras raras (REE: *rare earth elements*) comprenden un grupo de elementos químicos de la serie de los lantánidos, integrado por las tierras raras ligeras (LREE: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm y Eu) y las tierras raras pesadas (HREE: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, y Lu). Estos elementos tienen radios iónicos y comportamientos químicos semejantes.

El estudio de tierras raras es considerado esporádicamente en los yacimientos mineros, existiendo pocos antecedentes acerca de la presencia y potencial minero de estos elementos. En Chile, actualmente no existen yacimientos de tierras raras, pero dada la demanda mundial, se ha comenzado su investigación. El valor por kilogramo de REE varía desde una decena de dólares a miles de dólares, siendo China el país que domina el mercado. (USGS, 2012). Su extracción no es convencional, tiene un alto valor y es muy contaminante.

Este es el primer estudio global que analiza la química y distribución de elementos de tierras raras dentro del yacimiento El Teniente.

## 2 Geología del yacimiento

El Teniente es el yacimiento de Cobre-Molibdeno subterráneo más grande del planeta Tierra (Skewes *et al.*, 2002), ubicado en la Cordillera de los Andes de Chile Central, a 2.500 metros sobre el nivel del mar.

El distrito geológico es dominado por rocas volcánicas correspondientes a la Formación Farellones, localmente intruida por rocas ígneas de composición intermedia, además de brechas hidrotermales (Kay *et al.*, 1991). Las rocas presentan distintos grados de alteración, con una mineralización metálica del yacimiento principalmente de calcopirita, bornita y molibdenita, los que se encuentran en vetillas que forman un enrejado polidireccional o stockwork.

El Teniente ha sido denominado como un depósito de tipo "Pórfido Cuprífero" por los diferentes autores (Maksaev *et al.*, 2001; Cannell, 2004), aunque durante el último tiempo también lo han clasificado como un "Depósito de Brechas" (Skewes *et al.*, 2002).

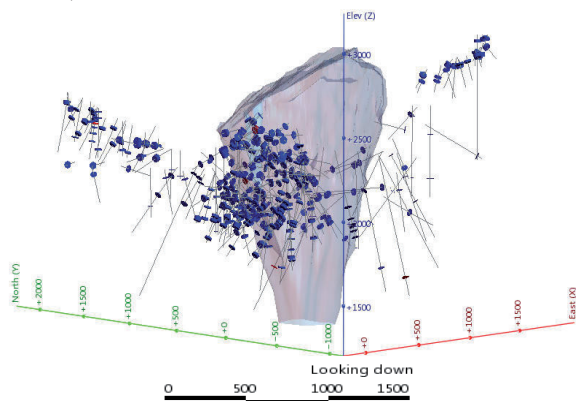
## 3 Metodología

Se definieron 6 unidades monolitológicas. Se escogieron los datos de muestras que tengan información geoquímica de las 14 tierras raras, siendo descartados los elementos Ytrio y Escandio en este estudio, por no disponer de una cantidad significativa de datos.

Se considera el análisis químico de 405 muestras de sondajes (Figura 1), siendo las siguientes: 43 datos del Complejo de Brechas Braden (CBB), 280 del Complejo Máfico El Teniente (CMET), 11 de Brechas de Cuarzo y Anhidrita (BXQZ-BXANH), 37 del Pórfido Dacítico (PDA), 21 del Pórfido Diorítico (PDI) y 13 de Tonalita (TO).

La mayoría de las muestras estudiadas pertenecen al área de Geometalurgia-División El Teniente, quien realizó los

análisis de espectrometría de masa por emisión de plasma (ICP/MS).

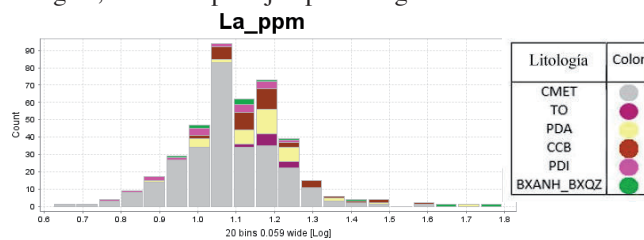


**Figura 1.** Isométrico con distribución espacial de la totalidad de los datos geoquímicos.

#### 4 Análisis de datos

La interdependencia entre las variables se estudió mediante una matriz de correlación, la cual muestra una estrecha relación entre tierras raras livianas, con una muy baja dependencia con las tierras raras pesadas.

Los histogramas muestran que la distribución de las tierras raras se asemeja a un lognormal en cada una de las litologías, así como por ejemplo la Figura 2.

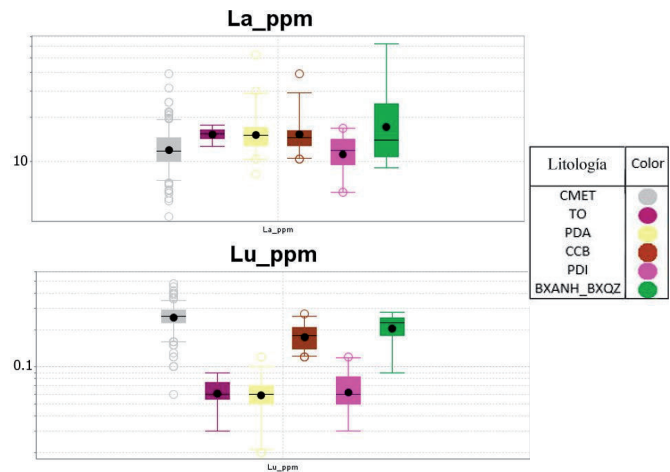


**Figura 2.** Histograma de lantano según litología.

Los diagramas de caja o *box-plot* (Figura 3), permiten observar la distribución estadística del conjunto de datos. Se observan concentraciones similares en Lantano, Cerio, Praseodimio y Neodimio, dentro de cada una de las unidades. Se destaca la importante dispersión de datos que presentan las Brechas de Anhidrita y de Cuarzo. Dentro de las litologías, la Tonalita es la más acotada en sus rangos de concentraciones de tierras raras livianas.

El Samario, Europio, Gadolinio, Terbio, Disprosio, Holmio, Erblio, Tulio, Yterbio y Lutecio muestran una gran dispersión de las concentraciones en las unidades litológicas de estudio, siendo CMET, BXANH\_QZ y CBB quienes presentan las mayores concentraciones de estos elementos, mientras que PDA, PDI y TO son las unidades que tienen las concentraciones más bajas. PDI tiene la mayor dispersión de datos dentro del primer y tercer cuartil. El Complejo Máfico presenta la menor dispersión de datos. Además, no se aprecia una destacada dispersión de las brechas de anhidrita en comparación con La, Ce, Pr y Nd.

CMET presenta en todos los elementos una alta dispersión, esto es esperable ya que esta unidad es la que presenta la mayor cantidad de datos y además, corresponde a un Complejo constituido por tres subunidades.

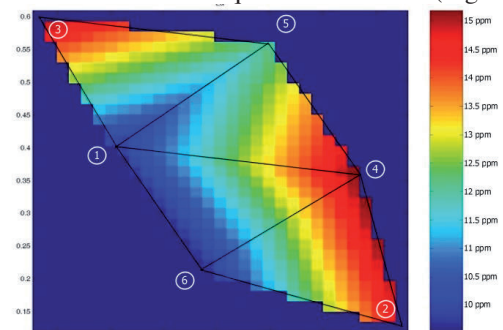


**Figura 3.** Box-plots, con eje logarítmico base 10 de lantano y lutecio por litología.

Los rangos de concentraciones entre máficos (CMET) y félsicos (PDA, PDI y TO) varían según LREE y HREE. Lantano, cerio, praseodimio y neodimio presentan concentraciones similares entre máficos y félsicos, mientras que samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, yterbio y lutecio presentan mayores concentraciones en máficos que félsicos, siendo en algunos casos cuatro veces mayor.

#### 4.1 Redes neuronales artificiales

Los datos geoquímicos seleccionados fueron analizados utilizando redes neuronales artificiales (RNA) no-supervisadas del tipo Growing Cell Structures (GCS; Fritzke, 1994). Como resultado de este análisis, se generó un mapa bi-dimensional o “mapa neuronal”, compuesto por 6 unidades o “nodos” interconectados. Cada uno de estos nodos representa un subconjunto de muestras del set de datos con características químicas similares (Figura 4)



**Figura 4.** Red Neuronal del Lantano. Cada vértice es un cluster de muestras con comportamiento químico similar. Los colores rojos corresponden a altas concentraciones del elemento, mientras que los colores azules a bajas.

La ubicación de cada nodo en el espacio fue graficada con un software de modelamiento implícito (Figura 5).

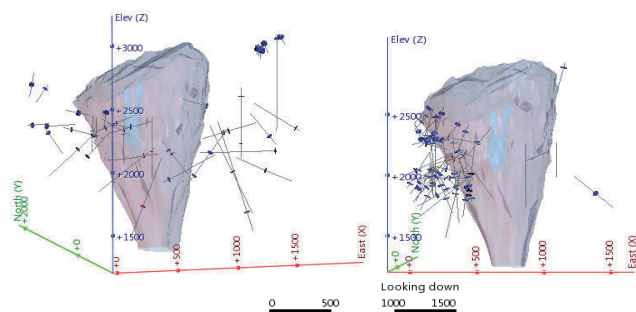


Figura 5. Distribución espacial del nodo 1 y 3 de la red neuronal.

A través de las RNA, los nodos 1, 3 y 5 son representados casi con un 98% por CMET. La, Ce, Pr y Nd sugiere una diferenciación en CMET, ya que sus concentraciones varían demasiado, aunque deberían ser similares, al ser parte de la misma litología. Para los nodos 3 y 5, la distribución espacial de sondajes es similar, ubicándose en el sector oeste de la Brecha Braden, mientras que el nodo 1 presenta sus sondajes en el sector oeste de la Brecha y en sector noroeste de esta.

### 4.2 Correlación de mineralogía con análisis químicos

Con la matriz de correlación se trabajó la mineralogía dada por MLA (*Mineral Liberation Analyzer*). Así los siguientes minerales presentan correlación media-alta con las tierras raras:

- Apatito: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu
- Biotita: Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu
- Plagioclasa: Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

Los análisis químicos de ICP tienen una altísima correlación de escandio e itrio con Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu. El óxido de titanio y el óxido de hierro presentan alta relación con HREE.

Las correlaciones de mineralogía y REE indican el aporte de apatito, biotita y plagioclasa para HREE, mientras que no se tienen relaciones altas de minerales que comprenden LREE. El apatito es utilizado como *huella fidedigna* de la roca, por ser de origen magmático e inalterable. Este mineral tiende a concentrar LREE, sin embargo, no se observa para este caso. El esfeno, al igual que el uranio no presenta correlaciones con LREE ni HREE. Finalmente, los REE no se vinculan directamente con los minerales de cobre.

### 4.3 Profundidad versus concentración

Se han graficado las concentraciones de cada litología con respecto a la profundidad correspondiente de cada muestra. (Figura 6).

Se presenta un comportamiento errático a la profundidad en cada litología. Entre los 2000 a 2700 metros se encuentran los *peaks* más importantes en concentración.

Las concentraciones de las tierras raras se correlacionan positivamente entre ellas (LHREE y HREE). Además, no se observa algún enriquecimiento secundario remarcable.

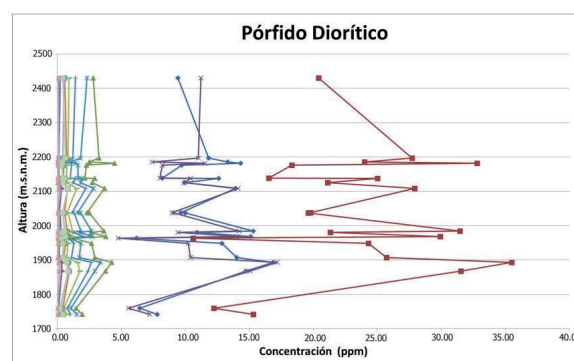


Figura 6 Concentración de las muestras del Pórfido Diorítico con respecto a profundidad.

### 4.4 Litologías adyacentes

A continuación se presenta la gráfica (Figura 7) del promedio de tierras raras del Complejo Máfico El Teniente dentro del yacimiento y el promedio de la composición máfica de la Formación Farellones, ambos normalizados a condrito. Las litologías del Teniente presentan menores concentraciones de tierras raras que la roca que hospeda el yacimiento.

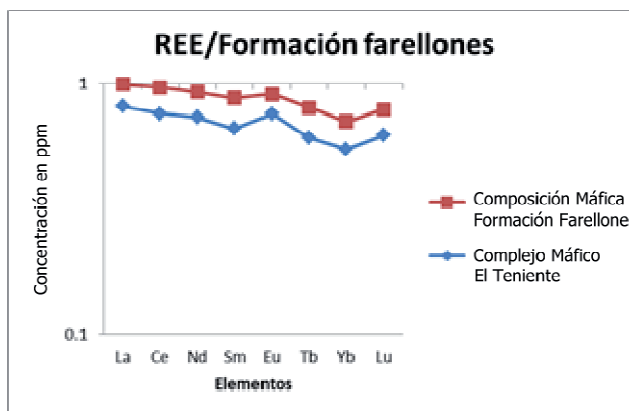


Figura 7. REE de CMET y Composición Máfica de la Formación Farellones.

Se relaciona la concentración de tierras raras de CMET, donde la roca ha sufrido alteración, con rocas máficas de la

formación Farellones, que no han sufrido alteración. Se tiene que las rocas alteradas presentan menores concentraciones de REE que la roca no alterada. Se manifiesta de este modo la presencia de fluidos magmáticos-hidrotermales que han empobrecido la presencia de minerales con REE. Este resultado concuerda con Schneider (1988), donde las rocas alteradas tienen menores concentraciones de tierras raras que la roca caja.

## 5 Conclusiones

Se presentan concentraciones acotadas y semejantes en La, Ce, Pr y Nd dentro de todas las litologías. Desde Dy a Lu, las poblaciones de datos son dispersas, siendo CMET la que presenta concentraciones más altas. Las concentraciones más elevadas de tierras raras las encontramos en La, Ce y Nd dentro de las 6 unidades definidas.

El Complejo Máfico El Teniente presenta subunidades en el sector oeste y este de la Brecha Braden. Este Complejo ha sido afectado por múltiples episodios de brechización e intrusión, lo que podría explicar la diferencia entre los nodos 1, 3 y 5.

Los principales minerales que aportan tierras raras pesadas son apatito, biotita y plagioclasa. Las REE no presentan relación con sulfuros de cobre.

Los análisis químicos presentan una muy alta correlación de HREE con itrio y escandio, y alta con los óxidos de titanio y hierro.

CMET presenta menores concentraciones de REE con respecto a las rocas de composición máfica de la Formación Farellones.

No hay tendencias entre la concentración de tierras raras con la profundidad en que se ha tomado la muestra.

En el depósito, no se presentan sectores con concentraciones anómalas de REE destacables dentro de las muestras estudiadas.

## Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo del Departamento de Geología de la División El Teniente, especialmente a los geólogos Alejandra Arévalo, Carolina Becerra y Marcelo Muñoz como al Superintendente Felipe Celhay. Finalmente, se agradece a Juan Pablo Lacassie por sus comentarios y sugerencias.

## Referencias

Cannell, J. 2004. El Teniente Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Central Chile. Ph.D. Thesis, University of Tasmania, 317 p.

Fritzke, B., 1994. Growing Ceil Structures - A Self-Organizing Network for Unsupervised and Supervised Learning. *Neural Networks*, y. 7, n° 9, 1441-1460.

Kay, S., Mpodozis, C., Ramos, V. y Munizaga, F. 1991. Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the Central Andes (28-33°S), in Harmon, R., Rapela, C., eds., *Andean magmatism and its tectonic setting: Geological Society of America Special Paper 265*, p. 113-137.

Maksaev, V., Munizaga, F., Mc Williams, M., Thiele, K., Arévalo, A., Zúñiga, P. y Floody, R. 2001. 40Ar/ 39Ar Geochronology of the El Teniente Porphyry Copper Deposit. III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Pucón, Chile. *Extended Abstracts (CD-ROM)* p. 496- 499.

Schneider, H. J., Özgür, N. y Palacios, C.M. 1988. Relationship between Alteration, Rare Earth Elements Distribution, and Mineralization of the Murgul Copper Deposit, Northeastern Turkey. *Economic Geology*. Vol. 83. Pp. 1238-1246.

Skewes, M., Arévalo, A., Floody, R., Zúñiga, P. y Stern, Ch. 2002. The Giant El Teniente Breccia Deposit: Hypogene Copper, Distribution and Emplacement. *Society of Economic Geologists. Special Publication N° 9. Capítulo 14: 299-332 pp.* Boulder.

U.S. Geological Survey, 2012. *Mineral Commodity Summaries*. Pág. 128-129