

# MINERALIZACIÓN Y GEOQUÍMICA DE LOS DEPÓSITOS DE LA CORDILLERA ORIENTAL DEL SURESTE PERUANO

Michael VALENCIA, Raymond RIVERA, Deysi PAICO & Eder VILLARREAL.  
Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET

## RESUMEN

La zona de estudio se ubica entre la Cordillera Oriental y el Altiplano y comprende: una Cuenca Paleozoica inferior, un rifting Pérmico-Triásico, e intrusivos permotriásicos graníticos a los que se le superponen intrusiones oligo-miocénicas y la Orogenia Andina.

En la zona tenemos cuatro fajas de mineralización: una faja de oro en meta-sedimentarios ordovícico y siluro-devonianos, hospedados en el Paleozoico inferior; una de depósitos de Sn-Cu-W relacionados con intrusivos del Pérmico-Triásico; una de depósitos de Sn-Cu-W relacionados a intrusiones oligo-miocénicas; y una unidad volcánica (Formación Quenamari) relacionada mayormente a depósitos de uranio del Mio-plioceno.

Geoquímicamente, las REE (Tierras Raras) de estos depósitos muestran una tendencia general de empobrecimiento progresivo desde la roca inalterada, pasando por la roca alterada hasta las más empobrecidas menas. La mineralización estuvo controlada por la actividad tectónica y magmática de la zona, que originó una serie de depósitos de Cu, Mo, W, Au, Sn y U, mediante la superposición de eventos anatécnicos próximos y de subducción distales con removilizaciones y procesos supergénicos locales.

## INTRODUCCION

La zona de estudio se ubica entre la Cordillera de Oriental y el Altiplano, y comprende (Fig. 1) una Cuenca Paleozoica inferior, afectada por el evento Eohercínico del Devónico. Forma una extensa cuenca sedimentaria marina de retroarco de edad ordovícica-silúrica que evolucionó a una de antepaís y que recibió ingentes cantidades de sedimentos provenientes de los erosionados y peneplanizados terrenos precámbricos del Macizo de Arequipa desde el oeste, lo mismo que el Escudo Brasileño que aportó solamente sedimentos finos desde el este (Zappettini et al, 2001). El centro de esta Cuenca, se ubicaría en la actual Cordillera Oriental, con una pila sedimentaria predominantemente clástica-pelítica, como la Fm Sandia de areniscas cuarzosas y pizarras negras; y la Fm. Ananea predominantemente de pizarras negras.

El Paleozoico superior se emplaza más al suroeste y se conforma de secuencias continentales-marinas, como las areniscas del Gpo. Ambo y las calizas del Gpo. Copacabana.

En el Pérmico-Triásico, tenemos un rifting diacrónico continental (Kontak et al., 1985; Quispe et al, 2007), con basaltos traquíticos alcalinos (Gpo. Mitu) de tendencia toleítica que representan un *rift abortado* (Miskovic, 2009), asociado a una fase de extensión del *retroarco*. Seguidamente, se emplazaron intrusivos permotriásicos de granitos a granodioritas calcoalcalinas peraluminosas que involucran procesos anatécnicos, relacionados a un arco magmático que indicarían una subducción distal; mientras en el Jurásico, ocurre la intrusión de la Sienita peralcalina de Allinc Cápac (Macusani). Estos eventos se asociarían al inicio de ruptura del antiguo continente sudamericano en distensión tectónica, independiente de los procesos de subducción de estas épocas (Kontak et al, 1985)

En el Cenozoico tenemos a los intrusivos San Rafael y Quenamari (peraluminosos de tipo S), que conforman un cuerpo de monzogranito a sienogranito de edad oligo-miocénica (Kontak & Clark, 2002).

Finalmente la Orogenia Andina, se manifiesta en la zona, sobreimponiéndose a las estructuras anteriores.

Inicialmente en la zona se han definido una Franja de depósitos de Au en meta-sedimentarios ordovícicos y una de Sn-Cu-W relacionados a intrusivos del Oligoceno (Quispe et al, 2008), pero en un análisis detallado y por épocas de mineralización, se pueden diferenciar hasta 4 fajas de mineralización metalogénica.

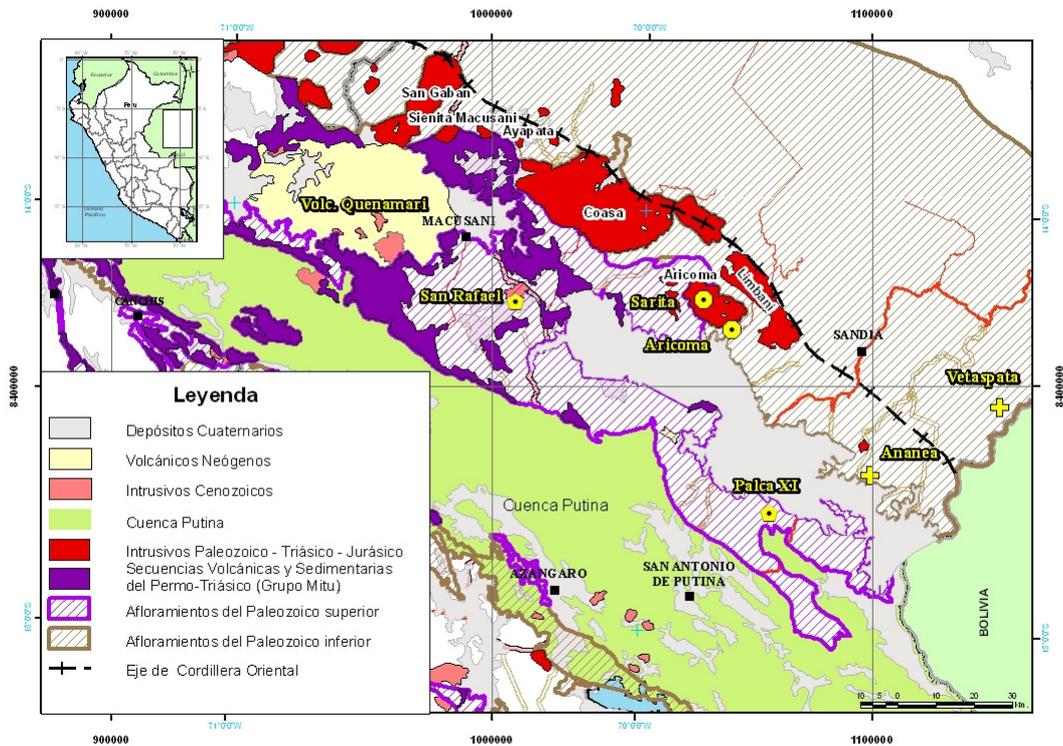


Fig 1.- Ubicación de los depósitos minerales estudiados y geología generalizada.

## DISTRIBUCIÓN DE LA MINERALIZACIÓN Y FAJAS METALOGENÉTICAS

La mineralización en la Cordillera Oriental de sureste peruano tiene una distribución temporal de depósitos que puede expresarse como sigue:

- 1) Una faja de oro en meta-sedimentarios ordovícico y siluro-devonianos, hospedados en el Paleozoico inferior con mineralización en vetillas y mantos de cuarzo-oro. Tenemos: Ananea y Vetaspata,

Ananea.- Ubicada en La Rinconada (Ananea, Puno). La mineralización es en mantos y vetas con pirita, argentita, pirita, calcopirita, arsenopirita y esfalerita con oro diseminado, hematita, sulfatos de Cu, así como oro asociado al óxido y los sulfuros. Se tiene fuerte silicificación y venillas de cuarzo. Se han reportado leyes de oro de 11 a 100 g/t Au. En general, los mantos tienen la ley más constante que las vetas. El promedio de ley es 18 a 5 g/t. Au y 44 g/t de Ag. Los diagramas spider (Fig. 2A) para comparación de la concentración de los elementos REE (Tierras Raras) muestran una correspondencia espectral subparalela progresiva entre los valores de rocas inalteradas, alteradas y menas, los que es indicativo de un proceso de mineralización sin aportes hipógenos de importancia.

Vetaspata.- Ubicada en Yanahuaya (Sandia, Puno). Tiene fuerte silicificación y argilitización, con una estructura al NO buzando suavemente al SO. El oro está diseminado en las areniscas. La explotación informal reporta hasta 2 g/t de Au. Al igual que en Ananea existe una correspondencia espectral entre los diversos tipos de muestras, así como la presencia de una anomalía negativa de Eu (indicativo de formación de plagioclasa magmática), la que sería una característica hereditaria desde su fuente primaria clástica ígnea, es decir pre-sedimentaria (Fig. 2B).

Ananea y Vetaspata son depósitos orogénicos conteniendo oro primario, el que migró por conductos estructurales mediante fluidos que interactuaron con las rocas encajonantes y depositó el oro durante el metamorfismo regional que afectó la zona. Este oro singenético fue removilizado por los eventos tectónicos del Devónico inferior (Castillo et al, 2001) y por el metamorfismo subsiguiente, y que por lo visto en los diagramas spider no tendrían ninguna relación con un magmatismo.

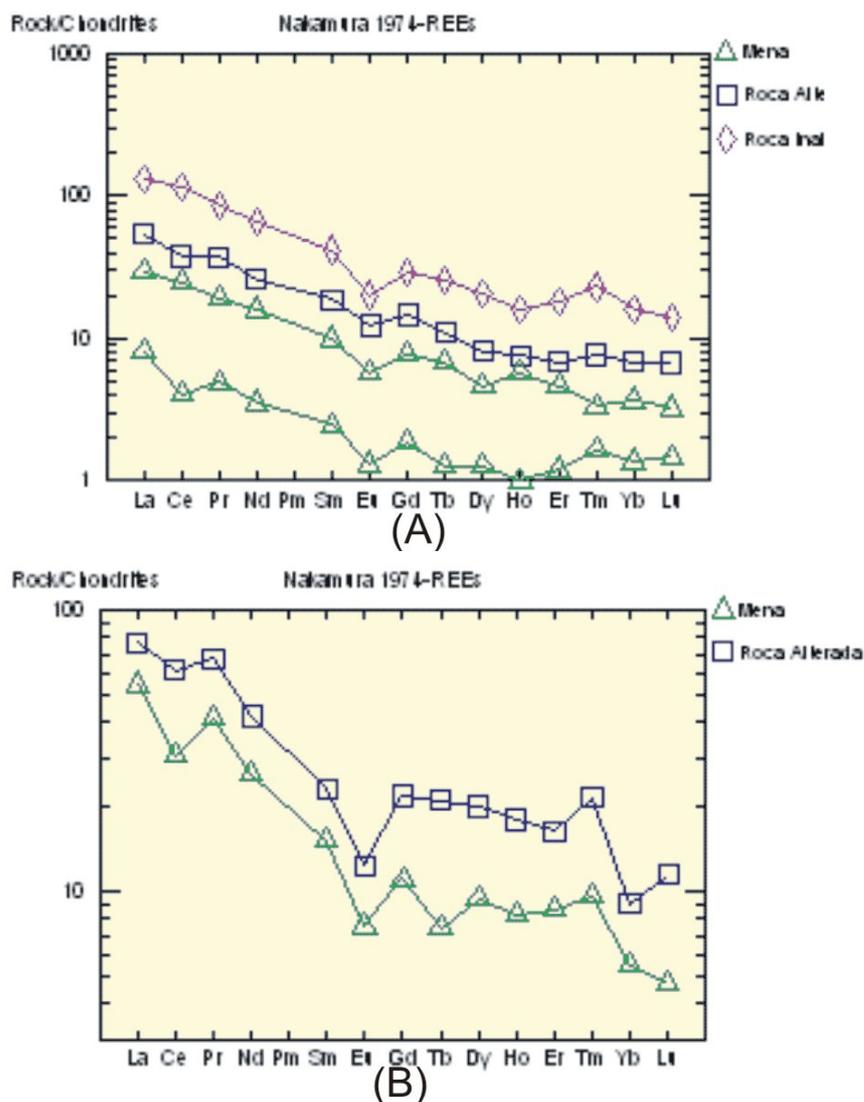


Fig. 2.- Geoquímica de REE mediante diagramas *Spider* para los depósitos minerales: (A) Ananea; (B) Vetaspata

- 2) Una faja de depósitos de Sn-Cu-W relacionados con intrusivos del Pérmico-Triásico emplazados en las rocas paleozoicas y el mismo intrusivo. Entre estos tenemos Sarita, Aricoma
- Sarita.- Ubicada en Usicayos (Carabaya, Puno), se emplaza en el intrusivo de Aricoma que en este sector ha sufrido una fuerte alteración metasomática alcalina, de tipo sódico y potásico, que generaron la albitización y los cuerpos de greisen con biotita y microclina, cuyo emplazamiento fue facilitado por las estructuras preexistentes (Candiotti, 1983). En estos cuerpos tenemos disseminaciones de calcopirita, malaquita con impregnaciones de azurita, crisocola con más de 10 % de Cu y 30.8 a 47.6 g/t de Ag., y poco de wolframio (0.96%), molibdeno y estaño (0.20%). Los diques cloritizados, tienen pirita, venillas de cuarzo y hasta 15 % de titanio (rutilo y esfena). La secuencia paragenética es: magnetita, ilmenita, esfalerita, molibdenita, bornita, calcopirita, cuarzo, pirrotita, pirita. Los diagramas *spider* muestran una correspondencia espectral subparalela entre los valores de rocas inalteradas, alteradas y menas, destacando el enriquecimiento en una de las muestras de mena, lo que nos indicaría la presencia de un evento hidrotermal posterior (Fig. 3A).
- Aricoma.- Se ubica en el NE de Crucero (Carabaya, Puno), y se emplaza en el intrusivo Aricoma. Presenta diques cortantes de rumbo NO-SE y buzamientos fuertes al NE se encuentran argilizados y epidotizados. Muestran valores de 167 ppm de Cu, 9 ppm de Mo, 466 ppm de As, así como 2454 ppm Pb y 6181 ppm de Zn. Aunque los diagramas *spider* son parecidos a los de Sarita, existe una diferencia en las MREE (Tierras Raras

de peso medio), donde la roca alterada muestra mayor enriquecimiento, sin anomalía de Eu, debido probablemente a una alteración hidrotermal posterior (Fig. 3B).

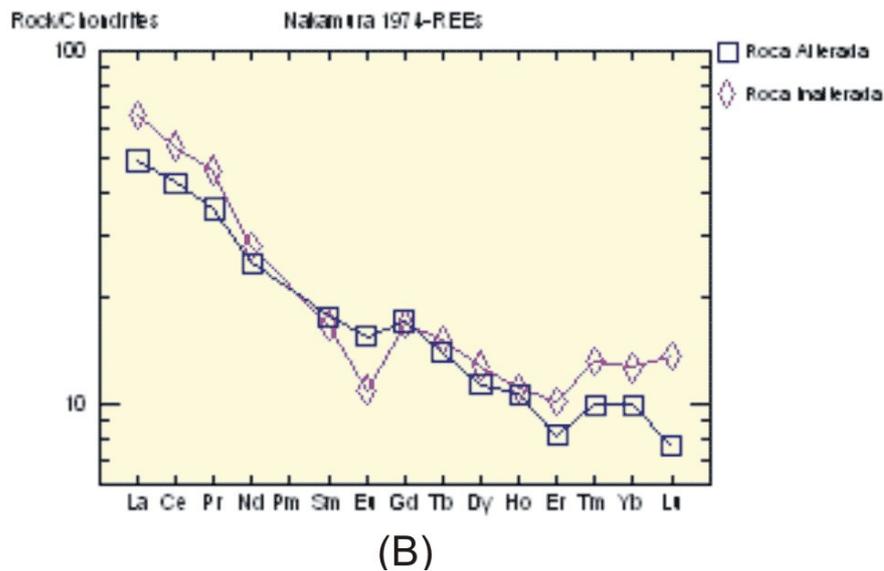
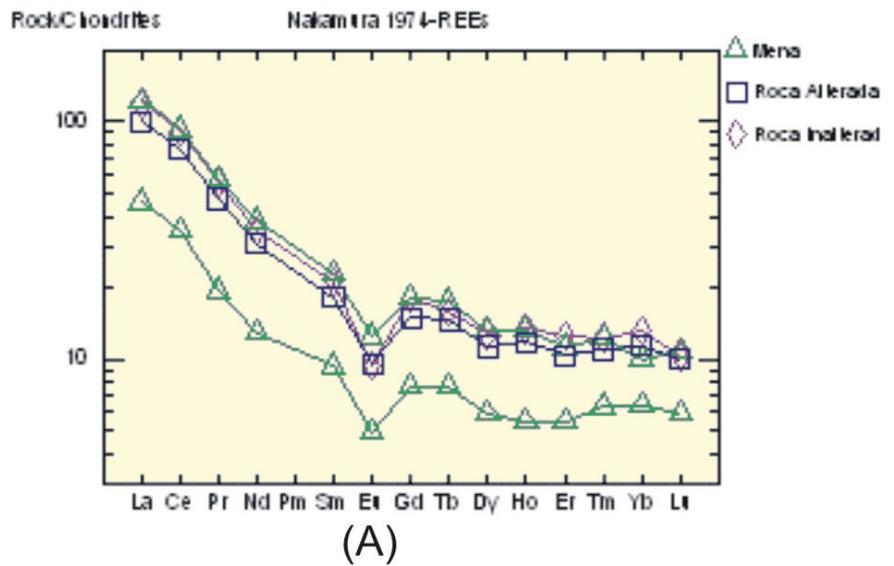
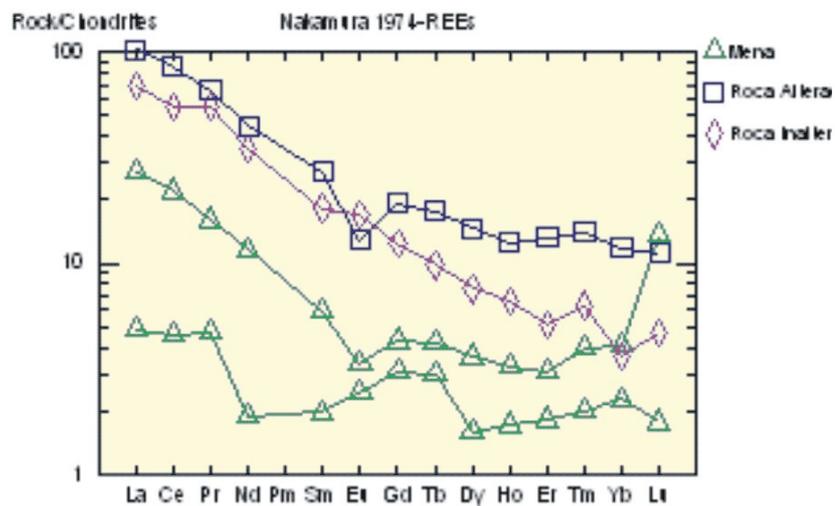


Fig. 3.- Geoquímica de REE mediante diagramas *Spider* para los depósitos minerales: (A) Sarita; (B) Aricoma.

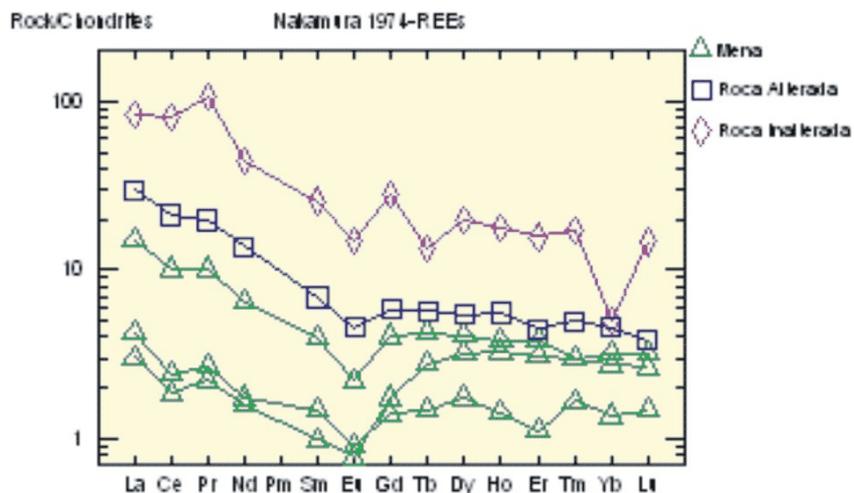
- 3) Una faja de depósitos de Sn-Cu-W relacionados a intrusiones oligo-miocénicas, relacionados con stocks peraluminosos graníticos “tipo S”. Entre estas destacan: Palca XI y San Rafael. Estos depósitos Sn-Cu-W se relacionan a los de la Faja Estañífera de Bolivia (Arce-Burgoao & Goldfarb, 2009; Arce-Burgoao, 2007) de pórfido subvolcánicos de tipo S, con su composición dacítica con temperaturas de formación de 350 °C a más de 600°C. Destacan los yacimientos de San Rafael y Palca XI:  
 San Rafael.- Ubicada al sur de Macusani (Carabaya, Puno) en la clásica Fm. Sandia intruida por los stocks San Rafael y Quenamari, que originaron un metamorfismo en la zona. Presenta vetas de relleno y de reemplazamiento en la zona de cizallamiento frágil cortante al intrusivo de San Rafael, y tienen una depositación mineral modelada por un protometasomatismo (greisen) de rocas hospedantes. Su origen se relaciona a la interacción de salmueras magmáticas de fluidos ricos con Sn-Cu de baja temperatura y bajo pH, que se mezclaron con aguas meteóricas, precipitando casiterita y calcopirita en la cizalla de estructuras generadas en el evento Quechua. El magmatismo asociado es de tipo anatóxico, causado por máficos fusionados, provenientes del manto litosférico interactuando en una zona de engrosamiento cortical (Kontak & Clark, 2002). Sus vetas

son sinextrales y se ha distinguido alteraciones de turmalina-clorita, feldespato alcalino, y sericita. Mineralógicamente, tenemos esfalerita, galena y sulfosales de Ag y además ankerita, siderita, calcita, piritita y pirrotita. Se han determinado leyes de 2.63 % hasta 5.6 % Sn. Además hay trazas de sheelita y wolframita. Sus diagramas *spider* (Fig. 4A) muestran una correspondencia no tan paralela, que indican presencia de procesos de mineralización progresivos de influencia hipógena, tales como diferenciación, cristalización fraccionado y metasomatismo.

Palca XI.- Ubicada en Quilcapunco (Putina, Puno) en las areniscas cuarzosas carboníferas (Gpo. Ambo) del paleozoico superior. Se ha generado como “relleno de fisura” de un fallamiento paralelo a un anticlinal con vetas en ramificaciones al norte y sur. Se han descrito ferberita (Wolframita) y sulfuros (Alayo, 1992) con elementos asociados al W, Cu y Zn, detectándose Sn de 1 a 3%, además de calcopirita y esfalerita con hematita. Se tienen valores de 1 % de Cu y reportes de hasta 150 g/t Ag. Sus *spider* diagramas muestran las mismas relaciones que en San Rafael, pero con una distribución progresivamente más acentuada (Fig. 4B).



(A)



(B)

Fig.4.- Geoquímica de REE mediante diagramas *Spider* para los depósitos minerales: (A) San Rafael; (B) Palca XI.

- 4) Una unidad volcánica (Formación Quenamari) relacionada mayormente a depósitos de uranio, con algunas pequeñas ocurrencias de antimonio hacia los bordes del campo volcánico. Está relacionada a un magmatismo Mio-Plioceno que originó estructuras volcánicas circulares en tobas de flujo de cenizas enriquecidas en uranio (25 a 40 ppm). El principal mineral es la autunita y meta-autunita (mineral de uranio secundario), productos de la desvitrificación de las inclusiones sólidas en la obsidiana de las tobas. Los datos isotópicos de las rocas ígneas relacionadas con la mineralización de uranio, indican anatexia; mientras los isótopos de plomo indican una fuente de corteza superior. Los isótopos de oxígeno reafirman el origen sedimentario; mientras las relaciones isotópicas de  $\delta^{15}\text{N}$  y  $\epsilon\text{Nd}$  indican un origen pelítico continental. Los fluidos transportadores del uranio fueron fríos y de origen supergénico, como las lluvias que lixiviaron el uranio de la matriz de las rocas piroclástica porosas, relleno de las fracturas y formando lentes mineralizados en las facies porosas de las rocas piroclásticas, originando una concentración de la mineralización de arriba hacia abajo, por lo que los niveles superiores de la unidad son los económicamente más importantes (Miembro Yapamayo). Está clasificado como depósito de uranio supergénico relleno de fracturas y diseminado en lentes (*Structure bound* y *Strata bound*).

## CONCLUSIONES

En la Cordillera Oriental del sur se habría emplazado una faja de depósitos orogénicos de oro, debido a la removilización de mineralizaciones anteriores, ocasionadas por la sobreimposición de eventos tectónicos que generaron metamorfismo regional, y en donde no habría intervenido actividad ígnea significativa.

Los intrusivos permotriásicos originaron una serie de depósitos de Cu, Mo y W en las rocas paleozoicas, asociadas a un rift (Pirajno, 2009), y a la que se le superponen eventos anatóxicos próximos, así como de subducción distales con metasomatismo localizado. Los depósitos relacionados con los intrusivos del Oligo-Mioceno presentan también características de anatexia y metasomatismo de tipo alcalino.

La mineralización de uranio en los volcánicos Quenamari fue producida por un magmatismo de anatexia de un posible protolito pelítico, a la que se le sobreimpusieron procesos supergénicos y de mineralización, con una lixiviación de la roca caja enriquecida en uranio.

Finalmente, los diagramas *spider* muestran en los depósitos, un empobrecimiento progresivo desde la roca inalterada, roca alterada hasta las menas, con una variación en el grado de fraccionamiento (razón entre los más extremos LREE: Tierras Raras Ligeras y HREE Tierras Raras Pesadas) de las Tierras Raras, debido a que el fraccionamiento, se incrementa con el aumento de mineralización, entre otros factores porque muchas LREE se empobrecen en relación a los MREE (Tierras Raras de Peso Medio) y HREE, debido a la precipitación mineral, causando el enriquecimiento de MREE en los fluidos residuales y su posterior precipitación (Samson & Wood, 2004). Este patrón geoquímico en las muestras de los depósitos minerales puede utilizarse como una herramienta para diferenciar la sobreimposición de procesos hipógenos, como es el caso de los hidrotermales.

## REFERENCIAS

- ALAYO, E. (1992).- Estudio geológico del yacimiento Palca XI: aspectos operacionales y programa de exploración. Tesis para Ingeniero Geólogo. UNMSM.
- ARCE-BURGOA, O & GOLDFARB, R. (2009).- Metallogeny of Bolivia. SEG Newsletter N°79.
- ARCE-BURGOA, O. (2007).- Guía a los Yacimientos metalíferos de Bolivia. EMUSA. La Paz. Bolivia.
- CANDIOTTI, H. & GUERRERO, T. (1983).- Ocurrencia de un yacimiento tipo Albita-Greisen de Cu, W, Sn y Mo – Carabaya, Puno. Bol. Soc. Geo. del Perú. N° 71. Set. 1983. p. 69-78.
- CASTILLO, N.; INCHE, H. & RIVERA, A. (2001).- Geología preliminar de las propiedades mineras de corporación minera Ananea-Departamento de Puno. Informe interno.

- MISKOVIC A. (2009).- Magmatic evolution of the Peruvian Eastern Cordilleran Intrusive Belt: Insights into the Growth of Continental Crust and Tectonism along the Proto-Andean Western Gondwana. Tesis Doctoral. Universidad de Geneve (Suiza). Terre & Environment Vol. 85.
- KONTAK D. & STONG D. (1985).- The rift-associated permo-triassic magmatism of the Eastern Cordillera: a precursor to the andean orogeny. En: Magmatism at a plate edge (1985)
- KONTAK, D. & CLARK, A. (2002).- Genesis of the Giant, Bonanza San Rafael Lode Tin Deposit, Peru: Origin and Significance of Pervasive Alteration. Economic Geology. Vol. 97.
- PIRAJNO, F (2009).- Hydrothermal processes and Mineral Systems. Geological survey of Western Australia. Springer.
- QUISPE, J, CARLOTTO, V; RODRÍGUEZ, R. & HUANACUNI, D. (2007).- Informe sobre la Metalogenia del Perú Central-Norte. DRME del Ingemmet. Informe Interno.
- QUISPE, J; CARLOTTO, V; ACOSTA, J; MACHARE, J; CHIRIF, H; RIVERA, R; ROMERO, D; HUANACUNI, D. & RODRÍGUEZ, R. (2008).- Mapa Metalogenético del Perú 2008: Herramienta esencial para las exploraciones Mineras. XIV Congreso Peruano de Geología.
- SAMSON, I. & WOOD, S. (2004).- The Rare Earth Elements: Behaviour in Hydrothermal Fluids and Concentration in Hydrothermal Mineral Deposits, exclusive of Alkaline settings. En: Rare Element: Geochemistry and Mineral Deposits. Geological Association of Canada. Vol. 17.
- ZAPPETTINI, E.; GODEAS, M.; SEGGIARO, R.; KORZENIEWSKI, L.; RUBIOLO, D.; MIRANDA-ANGLES, V.; URIBE-ZEBALLOS, H.; HEUSCHMIDT, B.; RODRÍGUEZ, C.; VIVALLO, W.; GARDEWEG, M.; MPODOZIS, C.; PALACIOS, O.; PAZ, M.; BOULANGER, E.; CARPIO, M. & COCKING, R. (2001).- Mapa metalogénico de la región fronteriza entre Argentina, Bolivia, Chile y Perú (14°S-28°S). Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). Publicación Geológica Multinacional N°2. 222 p.