



Trazadores litogeoquímicos de fertilidad del magmatismo vinculado a pórfidos de Cu (-Mo, -Au) en el sur del Perú, del Jurásico al Mioceno

Alonso Arturo Marchena Campos¹, William Martínez Valladares², Joel Otero Aguilar³

¹Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima (amarchena@ingemmet.gob.pe)

²Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima (wmartinez@ingemmet.gob.pe)

³Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima (jotero@ingemmet.gob.pe)

Resumen

En el sur del Perú se han definido diversos arcos magmáticos, en el tiempo (Martínez *et al.*, 2006; Mamani *et al.*, 2010). La litogeoquímica de elementos mayores distingue tendencias en la variación de los óxidos de elementos mayores, las series magmáticas, que ocurren en determinados contextos geotectónicos regionales (e. g. serie calcoalcalina asociada a contexto de subducción). Los pórfidos, dada su naturaleza local, son mejor caracterizados mediante la litogeoquímica de elementos traza, los cuales son más sensibles a determinados eventos petrogenéticos.

En los arcos Jurásico, Paleoceno y Oligo-Mioceno ocurren pórfidos de distintas características, los cuales presentan diferencias litogeoquímicas ($La_N/Yb_N > 20$, $Sr/Y > 40$, $Eu/Eu^* > 1$, $U/Th > 0.27$, $Nb_N/Ta_N > 0.7$). Estos parámetros pueden ser utilizados como guías de exploración, ya que son anomalías desde el punto de vista litogeoquímico y en caso no haya mineralización visible (depósitos ocultos), el empleo de estos trazadores en unidades ígneas (diques, cuerpos subvolcánicos e intrusivos) pueden señalar la probabilidad de encontrar depósitos en profundidad.

Abstract

In southern Peru, several magmatic arcs have been defined over time (Martínez *et al.*, 2006, Mamani *et al.*, 2010). Major elements lithochemistry distinguishes trends in the variation of the oxides of major elements, the

magmatic series, which occur in certain regional geotectonic settings (e.g., calc-alkaline series associated with the subduction context).

Porphyries, given their local nature, are better characterized by trace elements lithochemistry, which are more sensitive to certain petrogenetic events.

In the Jurassic, Paleocene and Oligo-Miocene arcs porphyries of different characteristics occur, which presents lithochemical differences ($La_N / Yb_N > 20$, $Sr / Y > 40$, $Eu / Eu^* > 1$, $U / Th > 0.27$, $Nb_N / Ta_N > 0.7$). These parameters can be used as exploration guides, since they are anomalies from the lithochemical point of view. This can help in cases where there is no visible mineralization (hidden deposits), the use of these tracers in igneous units (dykes, subvolcanic and intrusive bodies) could indicate the existence of deposits at depth.

Palabras clave: Anomalía litogeoquímica, magmas hidratados, cuerpos subvolcánicos, guía de exploración y depósitos ocultos.

1. Introducción

La litogeoquímica de elementos traza permite distinguir rocas relacionadas a sistemas fértiles. Se han caracterizado litogeoquímicamente diversos pórfidos del sur del Perú con el propósito de identificar los trazadores de fertilidad más conspicuos y así poder emplearlos como guía de exploración.

2. Metodología

Se empleó la base de datos litogeoquímica de recopilación histórica y proyectos del Ingemmet, tomándose las muestras de arcos magmáticos en Arequipa, Moquegua y Tacna, para su posterior caracterización. Etapa de muestreo de terreno para la obtención de muestras vinculadas a pórfidos (intrusivo parental, lavas coetáneas, pórfidos), las cuales se encontraban levemente alteradas. Las muestras fueron seleccionadas mediante un control de calidad, enviadas a laboratorio y con los resultados obtenidos se caracterizó las muestras vinculadas a pórfidos comparativamente con los arcos magmáticos regionales, se identificaron patrones marcadamente distintivos y se procedió a su interpretación.

3. Contexto geológico regional

Durante el Jurásico Inferior a Medio, esfuerzos tensionales originaron un ambiente de trasarco (extensión). Esto era negativo para la generación de un sistema porfirítico, ya que en este contexto los volátiles son disipados por el volcanismo, y son los volátiles, los que concentran los metales en yacimientos. Para el Jurásico Superior, en un contexto de convergencia oblicua, el sistema compresivo causa el cierre de la cuenca trasarco. Para el Cretácico Superior-Paleógeno, el arco magmático empieza a migrar hacia el noreste (Grupo Toquepala). En este sistema transpresivo N-S de subducción con velocidad constante, se dio estabilidad tectónica que permitió que el magmatismo madure por más de 35 Ma. Se emplaza la diorita regional superunidad Yarabamba, considerada metalotecto. En las últimas etapas de la evolución de este arco magmático, durante el Paleoceno, el volcanismo disminuyó, lo que puede interpretarse como el inicio de una subducción casi horizontal (por lo que el volumen suplido del magma de la cuña mantélica infrayacente disminuye). De este modo, se emplazan en *jogs* estructurales (zonas de baja presión) del sistema de fallas Cincha Lluta-Incapuquio, pórfidos tales como Los Calatos, Cuajone, Quellaveco, Toquepala. La migración del arco alcanzó 150 km al noreste hace 48 Ma (Perelló *et al.*, 2003) generando un volcanismo menos extenso, y se ensanchó entre 45 y 30 Ma. El arco magmático migró de regreso hacia el suroeste hace 30 Ma y produjo grandes volúmenes de ignimbritas (debido al engrosamiento de la cuña mantélica infrayacente) indicando aumento del ángulo de subducción. Por otro lado, en la misma faja Paleocena anterior, al sur en la serranía de Tacna, se emplazó en el

Mioceno el pórfido Chipispaya, en un contexto magmático asociado a cuerpos intrusivos diferenciados coetáneos con las secuencias de las unidades piroclásticas de Huaylillas-Tacaza.

4. Litogeoquímica

4.1 Jurásico

Baja pendiente La_N/Yb_N (2-8 para la superunidad Punta Coles y 2-12 para la Formación Guaneros) que sugiere poca diferenciación en un contexto de corteza delgada (en torno a 30 km).

4.2 Cretácico Superior-Paleoceno

Pendiente moderada La_N/Yb_N de 5-9 para la superunidad Yarabamba, mostrando mayor diferenciación que el Jurásico, y varía ampliamente para las formaciones del Grupo Toquepala. La superunidad Yarabamba presenta además una moderada anomalía negativa de Eu, sugiriendo diferenciación en reservorios de la corteza superior. El espesor cortical se incrementa hacia 35-40 km.

4.3 Oligo-Mioceno

Tenemos la superunidad Challaviento del Oligoceno la cual muestra un incremento de la pendiente La_N/Yb_N (8.5-16) indicando mayor diferenciación y un aumento del espesor cortical hacia 50 km. Durante el Mioceno se desarrolla el volcanismo Tacaza que muestra una pendiente La_N/Yb_N (8.5-16.5).

5. Trazadores litogeoquímicos de magmas fértiles

La fertilidad del magma está determinada por factores tales como: el contenido de agua, el estado de oxidación y las variaciones en el espesor cortical.

5.1 La/Yb y Eu/Eu^* como trazadores de magmas diferenciados, hidratados y oxidados

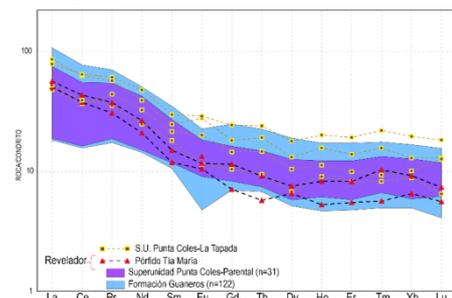


Figura 1. Diagrama REE normalizado al condrito para la superunidad Punta Coles y Formación Guaneros, comparando

con patrones obtenidos para Punta Coles en La Tapada y para el pórfido Tía María.

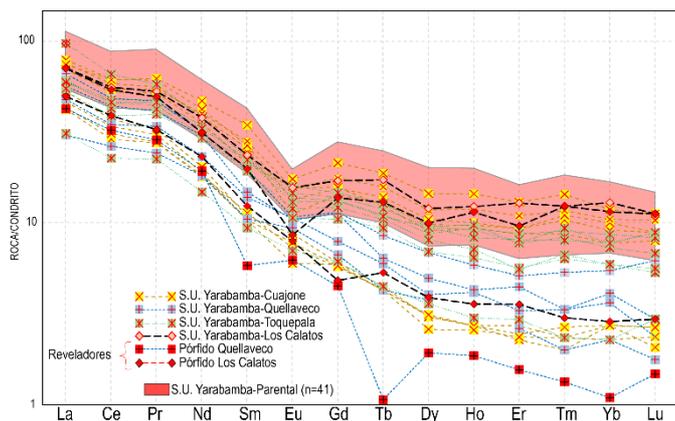


Figura 2. Diagrama REE normalizado al condrito para la superunidad Yarabamba, intrusivos precursores (parentales) en pórfidos Paleocenos, así como para los pórfidos reveladores.

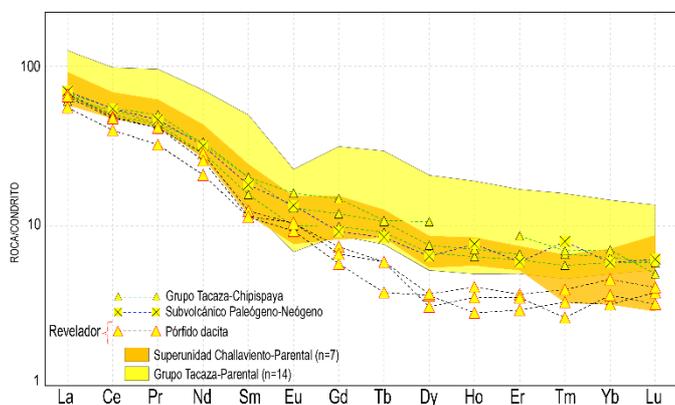


Figura 3. Diagrama REE normalizado al condrito para la superunidad Challaviento y el Grupo Tacaza, así como para cuerpos subvolcánicos y al pórfido Chipispaya.

De los diagramas de REE, tenemos que las muestras vinculadas a pórfidos (intrusivo parental, lavas coetáneas, pórfido) presentan empobrecimiento pronunciado en HREE, y un patrón más empinado de REE (mayor pendiente La/Yb), así como valores positivos de anomalía de Eu.

5.2 Nb/Ta como trazador de metasomatismo del manto

Anomalías negativas de Nb y Ta son indicativas de proceso de subducción, especialmente de la deshidratación del slab subductante. Ya que estos elementos son altamente inmóviles, resultan empobrecidos en los magmas provenientes de subducción. Estudios experimentales de Baier, Audetat y Keppler (2008) indican que, de lo poco de Nb y Ta que se removiliza hacia el fluido por la deshidratación del slab, la relación de Nb/Ta removilizados es de 5 a 1, aproximadamente, por

lo que un incremento del cociente Nb/Ta puede interpretarse como una intensa deshidratación del slab. Según estudios experimentales de Li, Xiong y Liu (2017), además, fraccionamiento de minerales de Ti (presentes en el slab subductante, zonas metasomatizadas del manto o en una raíz continental eclogítica) fraccionan el Nb y Ta entre ellos (consumiendo preferentemente al Ta), incrementando la relación Nb/Ta en el fundido residual. En contraste, fraccionamiento de anfíboles en la región fuente disminuyen el cociente Nb/Ta en los fundidos residuales en magmas evolucionados de arco. Por ello, este trazador puede ser también utilizado como un indicador del grado de evolución del sistema magmático (Figura 4).

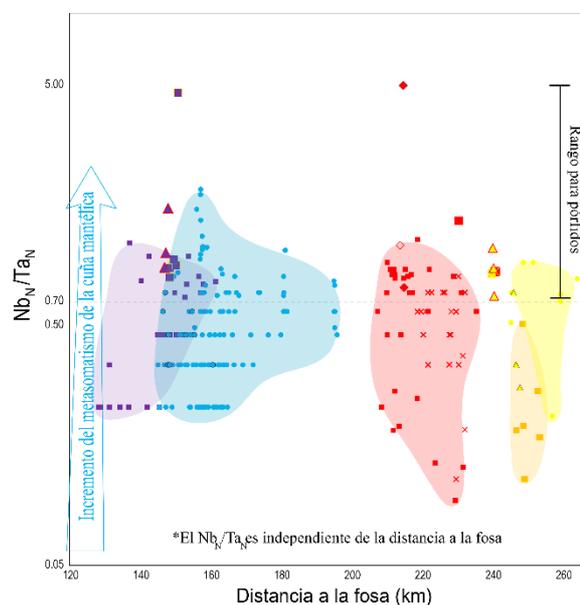


Figura 4. Diagrama Nb_N/Ta_N vs distancia a la fosa para todos los sistemas presentados en este estudio. Nótese que las muestras vinculadas a pórfidos se encuentran en los valores más altos (>0.7).

Se observa que para las rocas vinculadas a un sistema porfírico, los valores $(Nb/Ta)_N$ se encuentran entre los más altos, encontrándose casi todos ellos en torno a valores superiores a 0.7.

5.3 U/Th vs Th como trazador de contenido de volátiles y de contaminación con magmas primitivos

La relación U/Th tiende a permanecer constante con la diferenciación en caso no haya significativa mezcla y/o asimilación cortical. Ambos son altamente incompatibles durante la fusión parcial, e inmóviles en fluidos acuosos. Sin embargo, estudios experimentales de Keppler y Wyllie (1990) muestran que, en fluidos hidrotermales que

contengan Cl⁻ y CO₂, el U es móvil, ya que forma complejos con estos volátiles, mientras que el Th no.

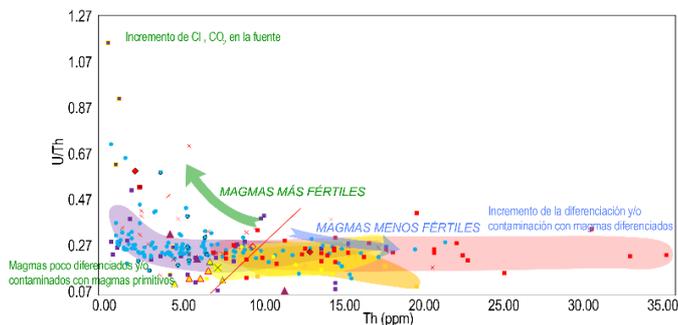


Figura 5. Diagrama U/Th vs Th para todos los sistemas presentados en este estudio. Nótese como las muestras vinculadas a pórfidos presentan bajos valores de Th y alta razón U/Th.

El parámetro U/Th permanece relativamente constante, siendo su incremento especialmente marcado para aquellas muestras relacionadas a pórfidos de Cu (-Mo, -Au). Esto puede interpretarse como un influjo de fluidos en profundidad que contengan Cl⁻ y CO₂ (o de magmas que contengan estos fluidos y/o volátiles). Un incremento en el cociente U/Th también puede ocurrir debido a un marcado descenso de Th por contaminación de magmas primitivos. La contaminación con magmas primitivos es incluso necesaria para el rejuvenecimiento termal del sistema porfirítico emplazado en niveles corticales superiores.

5.4 Ce/Y como trazador de espesor cortical

El cociente Ce/Y nos da un indicativo del espesor cortical aproximado, dada una correlación estadística observada por Mantle & Collins (2008).

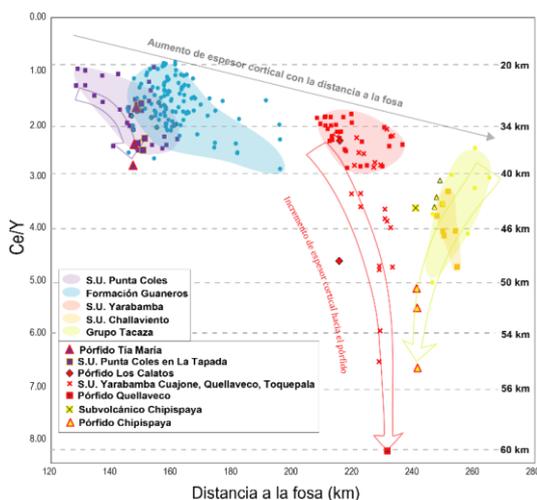


Figura 6. Diagrama Ce/Y vs distancia a la fosa. Nótese como las muestras vinculadas a pórfidos presentan el mayor espesor cortical de su respectivo sistema.

Tenemos que las muestra relacionadas espacialmente a sistemas porfiríticos (intrusivo parental, lavas coetáneas, pórfido) representan un espesor cortical mayor que el resto del sistema al momento de su generación, siendo este espesor cortical alcanzado en mayor grado para los pórfidos del Paleoceno, seguido del pórfido del Mioceno Chipispaya y en menor grado para los pórfidos jurásicos. La variación en el espesor cortical es importante, ya que esta controla la mineralogía de la base de la corteza, que es quien interacciona con el manto (la fuente de los metales y fluidos acuosos).

6. Conclusiones

Existen determinados elementos de traza especialmente sensibles a determinados eventos petrogenéticos que son favorables para la generación de un sistema fértil.

Trazadores de estos eventos pueden ser encontrados en altos valores La_N/Yb_N, Eu/Eu*, Nb_N/Ta_N, U/Th y Ce/Y, así como valores bajos de Th, que pueden indicar estado de oxidación e hidratación del magma, contenido de volátiles y contaminación con magmas primitivos y espesor cortical, que son variables que favorecen a la generación de sistemas fértiles.

El sistema Jurásico presenta los valores más altos en cuanto a trazadores de magmas hidratados y de contenido de volátiles y/o contaminación con magmas primitivos, pero los más bajos en cuanto a espesor cortical, siendo el valor más alto para el Paleoceno.

Agradecimientos

Se agradece el aporte geológico de los Ing. Julio Rojas, Germán Valenzuela y Berthing Herrera por su colaboración en la recolección de muestras. De la misma manera, al Ing. Víctor Valdivia, por su colaboración en la recolección de muestras del proyecto Quellaveco y por las facilidades brindadas para la recolección de muestras del proyecto Chipispaya.

Referencias

- Baier, J., Audetat, A. y Keppler, H. 2008. Origin of the negative niobium tantalum anomaly in subduction zone magmas. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 267(1-2), 290-300.
- Keppler, H. y Wyllie, P. J. 1990. Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes. *Nature*. Vol.348, 531-533.
- Li, L., Xiong, X. L. y Liu, X. C. 2017. Nb/Ta Fractionation by Amphibole in Hydrous Basaltic

- Systems: Implications for Arc Magma Evolution and Continental Crust Formation. *Journal of Petrology*. Vol. 58(1), 3-28.
- Mantle, G. y Collins, W. 2008. Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: correlations between arc basalt composition and Moho depth. *Geology*, Vol 36. p. 162-182.
- Martinez, W., Cervantes J., Romero, D. 2006. *El Arco Magmatico Jurásico-Paleógeno, nuevas contribuciones Estratigráficas, Petrográficas y Geoquímicas. Arequipa-Tacna, Sur de Perú*. Informe interno Ingemmet, Proyecto GR-1, Dirección de Geología Regional.
- Mamani, M.; Navarro, P.; Carlotto, V.; Acosta, H.; Rodríguez, J.; Jaimes, F.; Santos, A.; Rodríguez, R.; Chávez, L.; Cueva, E. & Cereceda, C. 2010. Arcos Magmáticos Meso-Cenozoicos del Perú. *XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos*. Sociedad Geológica del Perú. Pub. Esp. N° 9 (2010), Cusco p. 563-570.
- Perelló, J.; Carlotto, V.; Zárate, A., Ramos, P.; Posso, H.; Neyra, C.; Caballero, A.; Fuster, N. y Muhr, R. 2003. Porphyry-style alteration and mineralization of the Middle Eocene to early Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru: *economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, v. 98, p. 1575-1605.
- Richards, J. y Kerrich, R. 2007. Special paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis. *Economic Geology*. Vol 102. p. 537-576.

