

## **CARACTERIZACION GEOQUIMICA DE MAGMAS Y SU RELACION CON LA FORMACION DE YACIMIENTOS EN EL NORTE DEL PERU**

Henry Montano

Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Rímac.  
e-mail: henrymonti@hotmail.com

### **INTRODUCCIÓN**

El norte del Perú contiene depósitos metálicos con los mayores contenidos de oro en Sudamérica (124 Moz Au), lo que ha motivado a las compañías a realizar trabajos de exploración a diferentes escalas en dichas áreas, principalmente en intrusivos y secuencias volcánicas Miocénicas que hospedan grandes yacimientos epitermales (Yanacocha y Pierina). Los intrusivos se han emplazado y exhumado durante el Mioceno y están relacionados a yacimientos porfiríticos (La Granja, Minas Conga, Michiquillay y El Galeno), estos yacimientos están asociados plutónicos someros emplazados en arcos magmáticos de margen de placas convergentes, es así que hay estudios geofísicos y geoquímicos orientados al entendimiento de la formación de estos depósitos. Estos estudios han demostrado la influencia de los procesos magmáticos e hidrotermales así como la tectónica regional durante la formación de estos depósitos. Tosdal y Richards (2001) proponen que los procesos tectónicos y magmáticos pueden influenciar en el tamaño y ubicación de un sistema porfirítico. Así, en un ambiente compresivo se produce un acortamiento tectónico, que genera un engrosamiento cortical, produciendo un levantamiento, y posterior erosión, estos procesos formaran un ciclo que será registrada por la geoquímica de los magmas (Kay et al., 1999; Rabia, 2008; Mamani et al., 2010). En este estudio, se hace una revisión de la formación de magmas del norte del Perú en el arco magmático y su registro geoquímico a través del tiempo con el objetivo de caracterizarlos geoquímicamente, de tal manera que se puedan definir áreas a escala distrital y regional con señal de magma “fértil” para mineralización de depósitos de Au-Cu-Mo. El cambio de la geoquímica del magma es importante como indicador del momento crítico en que se produce la mineralización en los sistemas porfiríticos (Rabia, 2008). Procesos hidrotermales y magmáticos tardíos, que finalmente son los que podrían controlar la formación de depósitos porfiríticos, no son considerados en este estudio.

### **MARCO GEOLOGICO REGIONAL**

El área de estudio se encuentra ubicado en el norte del Perú entre los departamentos de Cajamarca, Lambayeque y Piura, morfológicamente pertenece a la Cordillera Occidental de los Andes Peruanos (Fig. 1). Litológicamente contiene un basamento Precambriano-Paleozoico, unidades volcano-sedimentarias del Triásico-Jurásico, sedimentarias del Cretáceo inferior y calcáreas del Cretáceo superior, seguido de unidades volcánicas terciarias (Llama, Porculla y Huambos); las unidades cretácicas y terciarias son cortadas por intrusivos terciarios. Al sur del área fallas y plegamientos NNO pasan a ONO en el distrito Yanacocha y luego casi NS en el norte, cortando a todas estas se encuentran estructuras transandinas ENE formando una zona conocida como corredor estructural Chicama-Yanacocha (Quiroz, 1997).

### **GEOQUIMICA, MAGMATISMO Y TECTONICA**

Las muestras fueron agrupadas de acuerdo a su composición, edad y ubicación geográfica, obteniendo seis grupos o unidades magmáticas: Batolito de la Costa (59-57 Ma), Llama (55-42 Ma), Pativilca (42-29 Ma), Porculla (29-19 Ma), Minas Conga (23-16 Ma) y Yanacocha (19-9 Ma). De esta manera se determino que estas unidades corresponden a un magmatismo calcoalcalino con contenido medio a alto en potasio. Rocas asociadas a etapas de mineralización de las unidades Yanacocha (9-13 Ma, Longo, 2005) y Minas Conga (16-23 Ma) son de composición más ácida y caen en el campo calcoalcalino con contenido medio de K en transición a calcoalcalino con alto K. El fuerte fraccionamiento debido al enriquecimiento en tierras raras livianas y empobrecimiento en tierras raras pesadas es característico de magmas que provienen de corteza continental sobretodo en las unidades Yanacocha y Minas Conga. Este empobrecimiento en estas dos unidades, revela la presencia de granate residual en la fuente. Hay un aumento en valores de Sr/Y y disminución de Y con el tiempo (Fig. 2A), con una evolución desde un campo de arco normal a un campo

adakítico, con la unidad Yanacocha mostrando una fuerte señal adakítica. La figura 2B indica cambios de presión que implica cambios de espesor cortical y profundidad de asimilación. El incremento del cociente Sm/Yb en el tiempo se atribuye al incremento de presión, que causa un cambio de piroxeno a anfíbol, y de anfíbol a granate en el mineral residual que se encuentra en equilibrio con el magma (Kay et al., 1999). Entonces, se puede decir que hay un incremento en espesor cortical y profundidad de asimilación con el tiempo, en especial en Yanacocha, donde las profundidades de asimilación fueron distintas. En la variación de cocientes Sm/Yb y Sr/Y (Figura 3) en el tiempo, se nota el cambio de espesor de la corteza continental desde el Paleoceno al Mioceno Tardío. La geoquímica muestra que entre el Paleoceno y Eoceno Temprano, (unidades Llama y Batolito de la Costa), se tenía una corteza relativamente delgada (< 40 km); del Eoceno tardío al Oligoceno temprano correspondería un débil o incipiente engrosamiento, coincidente con el régimen de baja convergencia (Benavides, 1999); el fuerte incremento en el cociente Sm/Yb podría corresponder al primer episodio de engrosamiento cortical que puede haber ocurrido entre los 24-22 Ma, probablemente debido a la Fase Inca IV en un régimen compresivo con alta velocidad de convergencia (Figura 3) y posiblemente coetáneo con el primer levantamiento en esta zona. El segundo engrosamiento podría haber ocurrido en el Mioceno con el inicio de la Fase Quechua I (17-16 Ma) y relacionado al segundo levantamiento de los Andes del Norte (Noble et al., 1990). Ambos períodos de engrosamiento cortical son coincidentes con los periodos de emplazamiento de intrusivos (23 Ma en Minas Conga) y mineralización (17-15 Ma en El Galeno y Minas Conga) de los depósitos porfiríticos en el norte del Perú. Sin embargo, estudios geofísicos (Gutscher et al., 1999) indican que este segundo levantamiento podría haberse dado por la subducción de la “Dorsal Inca” debajo de la placa Sudamericana a los ~12 Ma. Según Rosenbaum et al. (2005), el arribo de esta anomalía topográfica en la zona de subducción estaría relacionado a la distribución espacial y temporal de los depósitos Miocénicos (10-15 Ma) del norte del Perú. También, se muestra la inactividad volcánica (26-31 Ma) en el norte del Perú, que podría relacionarse con una posible subducción plana durante la Fase Inca III. Además, según Somoza y Ghidella (2005) hay un fuerte cambio en la velocidad de convergencia de placas a los 26 Ma, con valores máximos entre los 26-11 Ma de entre 12-13 cm/año en la latitud 7°S. La velocidad de convergencia de las placas estaría relacionada a la formación de depósitos minerales Miocénicos, pues a mayor velocidad de convergencia, mayor volumen de fluidos liberados, y mayor volumen de magma generado (Rabia, 2008). Según el modelamiento de fusión parcial, la unidad Minas Conga muestra una fuente con dominio de anfíbol y menor granate, y la unidad Yanacocha muestra una fuente con mayor anfíbol y moderado granate. Una fuente dominada por clinopiroxeno con menor plagioclasa en la fuente indica una menor profundidad de asimilación de las rocas de las unidades Porculla, Pativilca y Llama.

### **Análisis espacial de los análisis geoquímicos**

Al tener los parámetros de cocientes de elementos traza para depósitos de alta sulfuración (distrito Yanacocha) y porfiríticos (Minas Conga, Michiquillay y El Galeno), se puede ver como varían espacialmente, de tal manera que se pueden sugerir áreas con señales petroquímicas similares a estos sistemas. Los rangos tomados están de acuerdo a los valores de los ratios de Sm/Yb (estabilidades de piroxeno, anfíbol y granate) y Sr/Y según la fig. 2B. Estos valores podrían ser tomados como indicadores de “fertilidad magmática” para caracterizar rocas asociadas a un depósito tipo alta sulfuración y tipo pórfido el norte del Perú. De esta manera se tienen seis áreas con rocas que muestran características petroquímicas similares a las unidades Yanacocha y Minas Conga, estos son Llama, Chongoyape, Sipán, Vista Alegre, Colpayoc y Cachachi, constituyendo áreas con fuerte potencial exploratorio a escala regional y distrital (Fig. 4).

### **DISCUSION**

Estudios de Kay et al. (1999), han caracterizado petroquímicamente rocas asociadas a franjas de depósitos porfiríticos (distritos El Teniente y Maricunga) y epitermales (Franja El Indio), determinando la liberación de fluidos a partir del quiebre de anfíbol a granate por engrosamiento cortical durante una fase compresiva, usando diagramas de cocientes La/Sm vs. Sm/Yb, llegando a concluir que existe un incremento de Sm/Yb mientras evoluciona el magma. Esto último también es observado en el presente estudio (Figs. 2 y 3), con un aumento en valores de cociente Sr/Y y disminución de Y con el tiempo, y evolución desde un campo de arco normal a uno adakítico, con una clara diferencia en valores de Sr/Y para rocas asociadas a pórfidos y epitermales de alta sulfuración (Fig. 2). En los Andes, los intrusivos asociados a mineralización de pórfidos

de Cu-(Mo) súper gigantes presentan características geoquímicas de adakita (bajas concentraciones de Y e Yb y cocientes altos de Sr/Y y La/Yb), aunque no todos los plutones adakiticos están mineralizados. Esta señal en los Andes, es una consecuencia del engrosamiento cortical (>45-50 km) de un arco debido a un acortamiento tectónico en un régimen fuertemente compresivo (Mamani et al., 2010). También es cierto que otros autores han diferenciado magmas “estériles” de “fértiles” a partir de diagramas Sr/Y vs. Y. De todo lo anterior, se definen rasgos magmáticos y tectónicos tales como la hidratación del magma, engrosamiento y composición cortical que asociados a la subducción son los que probablemente controlen la mineralización en estos tipos de depósitos del Neógeno.

## CONCLUSIONES

- Magmas de unidades Minas Conga y Yanacocha muestran una evolución en el tiempo desde un arco normal a un campo adakítico (diagrama Sr/Y vs. Y) y representa un cambio en profundidad de asimilación de magma, siendo mas somera para la primera respecto a la segunda. Diagrama Sm/Yb vs. Sr/Y muestra que la unidad Yanacocha pre-mineralización (13-19 Ma) está asociada a un magma formado a partir de una fuente rica en anfíbol (espesor cortical 35-45 km), mientras que rocas asociadas a fase de mineralización (9-13 Ma) están relacionadas a una fuente en transición de anfíbol a granate (espesor cortical 40-55 km), esto implica un engrosamiento cortical desde el Mioceno temprano al Mioceno tardío. Bajos valores de Sm/Yb para unidades del Paleoceno-Eoceno (Porculla, Pativilca y Llama) indican una corteza relativamente delgada (30-40 km).
- Hay una clara relación entre el cambio en el espesor de la corteza continental y las fases tectónicas, con engrosamiento en periodos de incremento de la velocidad de convergencia de placas, con dos periodos de engrosamiento cortical, a los 24 y 17 Ma, coincidentes también con el emplazamiento de intrusivos y las fases de mineralización-alteración de sistemas porfiríticos respectivamente.
- Rocas con firma geoquímica relacionada a mineralización de depósitos tipo porfirítico y epitermal se han encontrado en las áreas de Llama, Chongoyape, Sipán, Vista Alegre, Cachachi y Colpayoc.
- El estudio de caracterización geoquímica constituye una herramienta más para usarse como criterio para la selección y evaluación de áreas a escala regional y/o distrital.

## REFERENCIAS

- Benavides-Cáceres, V. (1999). Orogenic Evolution of The Peruvian Andes: The Andean Cycle. *Special Publication N° 7, Society of Economic Geologist, Chap. 3, pp. 61-107.*
- Gutscher, M. -A., Olivet, J. -L., Aslanian, D., Eissen, J. -P., Maury, R. (1999). The “lost Inca Plateau”: cause of flat subduction beneath Peru? *Earth and Planetary Science Letters, 171(3): pp. 335-341.*
- Kay, R., Mpodozis, C., Coira, B. (1999). Neogene Magmatism, Tectonic and Mineral Deposits of the Central Andes (22° to 33°S Latitude). *Special Publication N° 7, Society of Economic Geologist, Chap. 2, pp. 27-59.*
- Longo, A. (2005). Evolution of Volcanism and Hydrothermal Activity in the Yanacocha Mining District, Northern Peru. *Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Geology.*
- Mamani, M. (2010). Geoquímica de rocas ígneas. Curso teórico-práctico de geología regional y SIG aplicado a la exploración de yacimientos magmático-hidrotermales. *CAFAE.*
- Noble, D., McKee, E., Mourier, T., Megard, F. (1990). Cenozoic stratigraphy, magmatic activity, compressive deformation and uplift in northern Peru. *Boletín de la Geological Society of America, Vol. 102, pp. 1105-1113.*
- Quiroz, A. (1997). El corredor estructural Chicama-Yanacocha y su importancia en la metalogénesis del norte del Perú. *Sociedad Geológica del Perú, IX Congreso de Geología, Volumen Resúmenes Extendidos, pp. 149-154.*
- Rabia, O. (2008). *Programa Internacional de Perfeccionamiento en Metalogénesis, BS Grupo, 262 p.*
- Rosenbaum, G., Giles, D., Saxon, M., Betts, P. G., Weinberg, R., Duboz, C. (2005). Subduction of the Nazca Ridge and the Inca Plateau: Insights into the formation of ore deposits in Peru. *EPSL, 239, pp. 18-32.*
- Somoza, R., Ghidella, M (2005). Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk. *Rev. Asoc. Geol. Arg. 60 (4): pp.797-809.*
- Tosdal, R. M., Richards, J. P. (2001). Magmatic and Structural Controls on the Development of Porphyry Cu±Mo±Au Deposits. *Society of Economic Geology, Reviews, Vol. 14, pp. 157-181.*

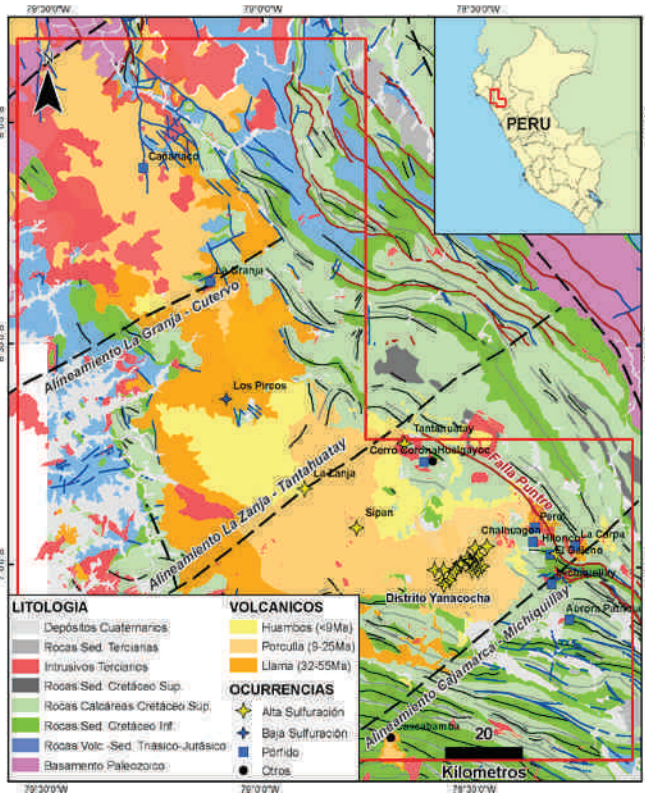


Figura 1. Mapa geológico del norte del Perú mostrando la ubicación del área de estudio y principales depósitos minerales.

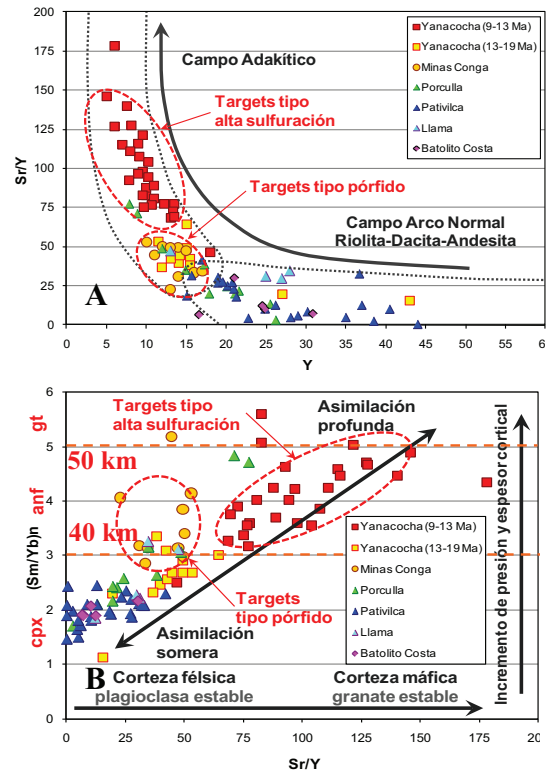


Figura 2. (A) Diagrama de Sr/Y vs. Y, mostrando la evolución en el tiempo de las rocas desde un arco normal hacia un campo adakítico. (B) Sm/Yb normalizado al condrito vs. Sr/Y, con minerales residuales, espesor y composición cortical, y profundidad de asimilación aproximados.

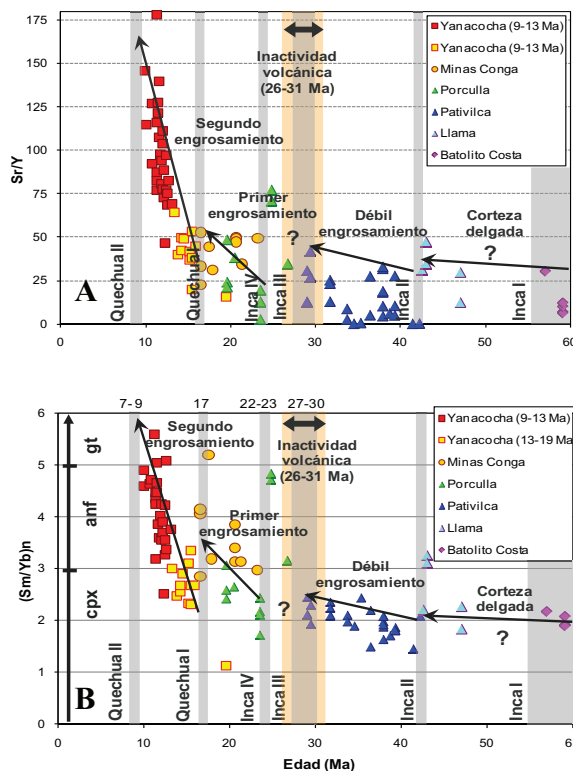


Figura 3. Diagramas de cocientes (A) Sr/Y y (B) Sm/Yb versus edad de las rocas y su relación con las fases tectónicas (franja vertical gris) y engrosamiento de la corteza en el tiempo. Las flechas negras indican los diferentes episodios de engrosamiento cortical (Mamani, 2010).

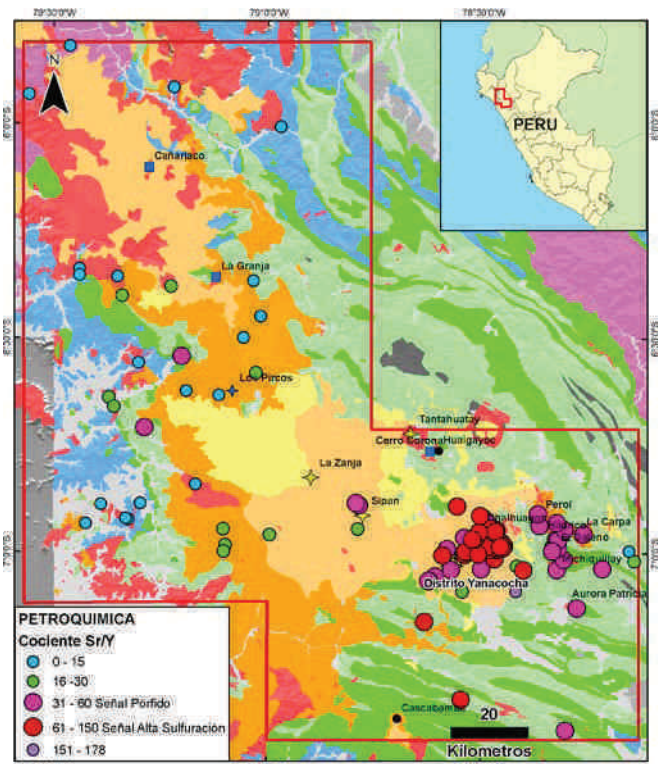


Figura 4. Variación espacial de cocientes Sr/Y diferenciando señal petroquímica de rocas asociadas a depósitos porfíricos y de alta sulfuración.