



## Afinidad adakítica y sus implicancias en la evolución del magmatismo cenozoico y la tectónica en el sur del Perú

Cristina Cereceda, Luis Cerpa, Luis Muñoz, Diego Siesquen, y Rigoberto Aguilar

INGEMMET, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú ([ccereceda@ingemmet.gob.pe](mailto:ccereceda@ingemmet.gob.pe))

### 1. Introducción

En el sur del Perú afloran rocas volcánicas e intrusivos de composición variable, que se formaron desde el Jurásico hasta la actualidad en relación con arcos magmáticos sucesivos. Sus características fueron asociadas a varios factores, como el incremento del espesor de la corteza, los cambios en la tectónica de placas, o la interacción de los magmas con el basamento (Mamani et al., 2010). Se piensa que, en niveles corticales superiores, estos emplazamientos fueron influenciados por sistemas de fallas regionales NO-SE (Cerpa et al., 2012; Fig. 1).

Este trabajo presenta un estudio detallado de las rocas volcánicas emitidas por los arcos magmáticos Anta (45-30 Ma), Tacaza (30-24 Ma), Palca (24-18 Ma), y Sillapaca (18-10 Ma), con el fin de entender la influencia de la geometría de la placa subducida sobre el magmatismo.

### 2. Caracterización geoquímica

El estudio geoquímico se realizó a partir de 162 muestras, de las cuales 104 fueron compiladas de los siguientes trabajos: Lefèvre (1979), Bonhomme et al. (1985), Klinck et al. (1986), Wasteneys (1990), Vatin-Pérignon et al. (1996), Boudesseul et al. (2000), La Torre y Orós (2000), Cerpa y Meza (2001), Mamani et al. (2004, 2008, 2010), Carlier et al. (2005), Sáez (2008), Maher et al. (2010), y Cerpa et al. (2011).

Las 17 muestras restantes, que se presentan en este trabajo, fueron analizadas mediante los métodos ICP-AES/ICP-MS (con fusión de peróxido de sodio) y P-AES (con fusión de metaborato de litio).

#### 2.1. Arco magmático Anta (45-30 Ma)

Los gabros, dioritas y granodioritas del Batolito de Andahuaylas-Yauri contienen valores bajos y medios de  $K_2O$ . El  $Al_2O_3$  varía entre 15-20 wt. %, mientras que el  $MgO$  wt. % también disminuye con la diferenciación magmática. Los valores de Sr y Ni oscilan entre 400-1000 ppm y 0-50 ppm, respectivamente, mientras que el Cr es menor a 300 ppm (Fig. 2).

En tanto las rocas volcánicas se caracterizan por presentar concentraciones medias y altas de  $K_2O$ . El  $Al_2O_3$  varía entre 12 y 20 wt. %, y el  $MgO$  wt. % disminuye con la diferenciación. Los valores de Sr varían entre 1000 y 2000 ppm. Mientras que el Ni y Cr son menores a 200 y 150 ppm, respectivamente.

Las rocas del Batolito de Andahuaylas-Yauri, en un diagrama multielemental (Fig. 3), presentan anomalías positivas en Sr e Y, y anomalías negativas en Th, Nb, Ta, Eu, con empobrecimiento en elementos de tierras raras pesadas (HREE). En las rocas volcánicas se observan anomalías positivas en Sr e Y, anomalías negativas en Th, Nb, Ta, Zr, Hf, y también empobrecimiento en HREE.

En el diagrama de Sr/Y vs. Y (Fig. 4), las rocas del Batolito de Andahuaylas, y las lavas y diques de la Formación Anta, pertenecen al campo de las adakititas, pero existen rocas volcánicas que se encuentran fuera, correspondiendo a tefritas leucíticas, cuyos magmas primitivos han sufrido un alto grado de contaminación con rocas carbonatadas.

#### 2.2. Arco magmático Tacaza (30-24 Ma)

Las lavas, domos y diques de este periodo se caracterizan por presentar concentraciones medias y altas de  $K_2O$ . El  $Al_2O_3$  varía entre 15 y 22 wt.%, y el  $MgO$  es < 10 wt.%. El Sr varía entre 500 y 1700 ppm, y el Ni y Cr

son menores a 400 ppm. En las rocas volcánicas se observan anomalías positivas en Sr, anomalías negativas en Th, Nb, Ta, Zr, y también empobrecimiento en HREE. Según el diagrama de Sr/Y vs. Y, pertenecen al campo de

las adakititas, pero también existen rocas volcánicas calcoalcalinas (Fig. 3), que corresponden a las muestras ubicadas al suroeste del sistema de fallas Yauri.

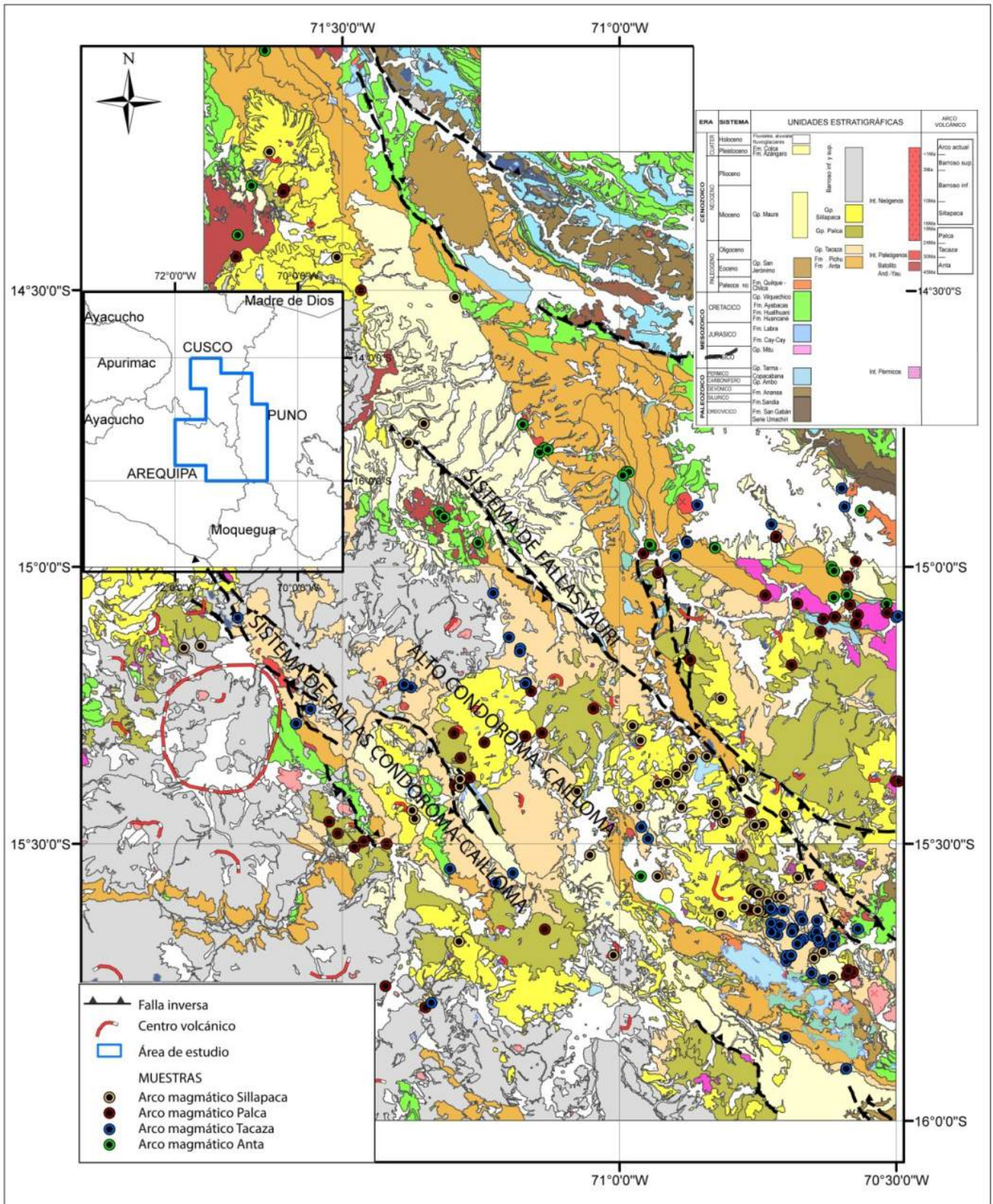


Figura 1. Mapa geológico de la zona de estudio, mostrando los principales sistemas de fallas NO-SE y la ubicación de las muestras.

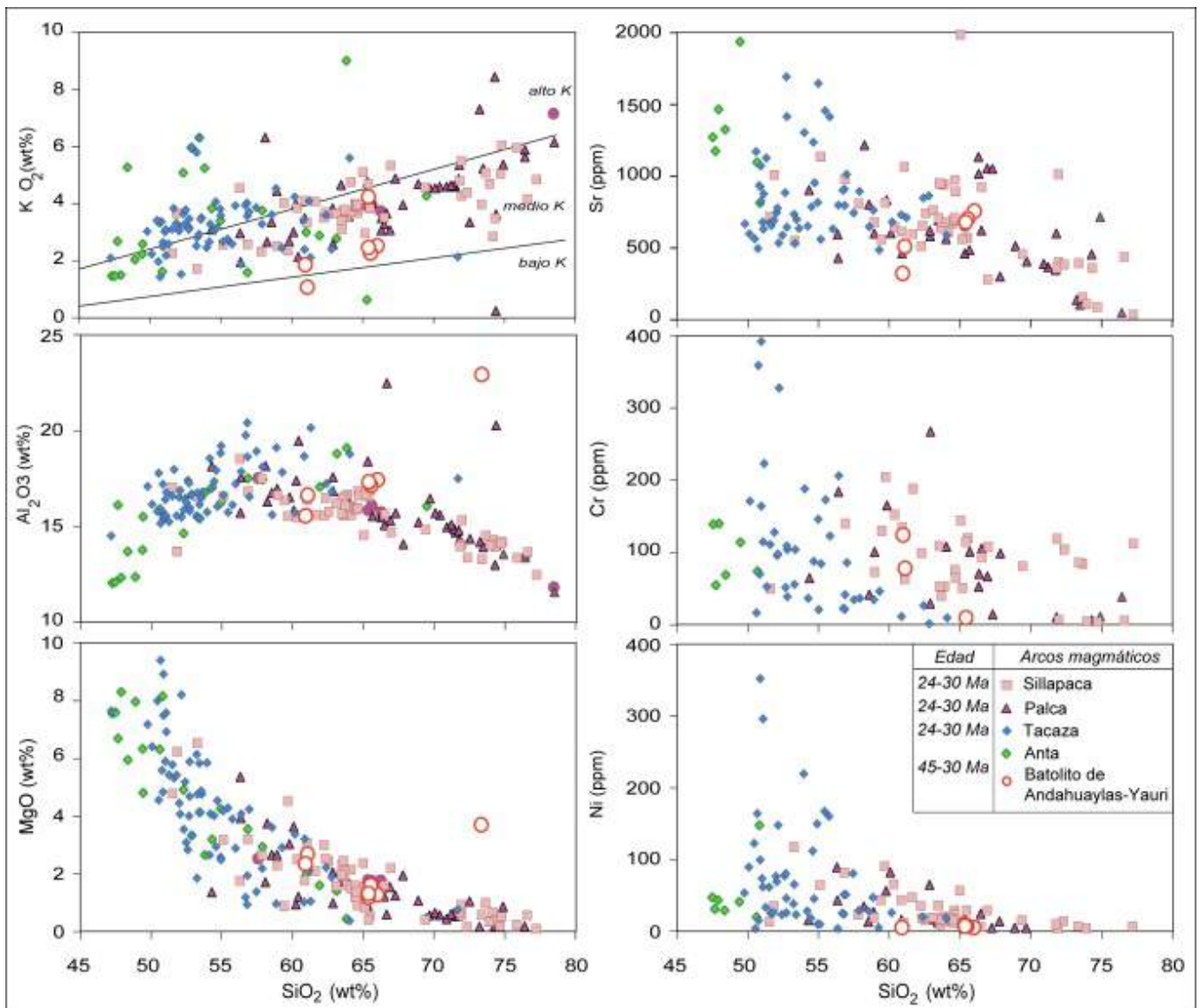
### 2.3. Arco magmático Palca (24-18 Ma)

En este periodo los depósitos de flujos piroclásticos predominan sobre los depósitos de lava. Estas rocas se caracterizan por presentar generalmente concentraciones medias de  $K_2O$ . El  $Al_2O_3$  varía entre 15 y 20 wt. %, y el MgO es < 6wt. %. El Sr es < 1300 ppm, y el Ni y Cr son menores a 100 y 300 ppm, respectivamente (Fig. 2). Se observan fuertes anomalías negativas en Ba, Sr, Zr, Eu, y un empobrecimiento en HREE (Fig. 3). Según el diagrama de Sr/Y vs. Y, presentan afinidad adakítica y calcoalcalina (Fig. 4A), las primeras corresponden a las rocas ubicadas al suroeste y noreste de los sistemas de fallas Condoroma-Cailloma y Yauri, respectivamente, donde los magmas se emplazaron en algún momento de su historia entre 45 y 80 km de profundidad (Fig. 4B). En tanto los magmas calcoalcalinos se ubican en el corredor estructural formado por el Alto Condoroma-Cailloma, limitado por los dos sistemas de fallas mencionados (Fig. 1). En este corredor, los magmas se emplazaron inicialmente entre

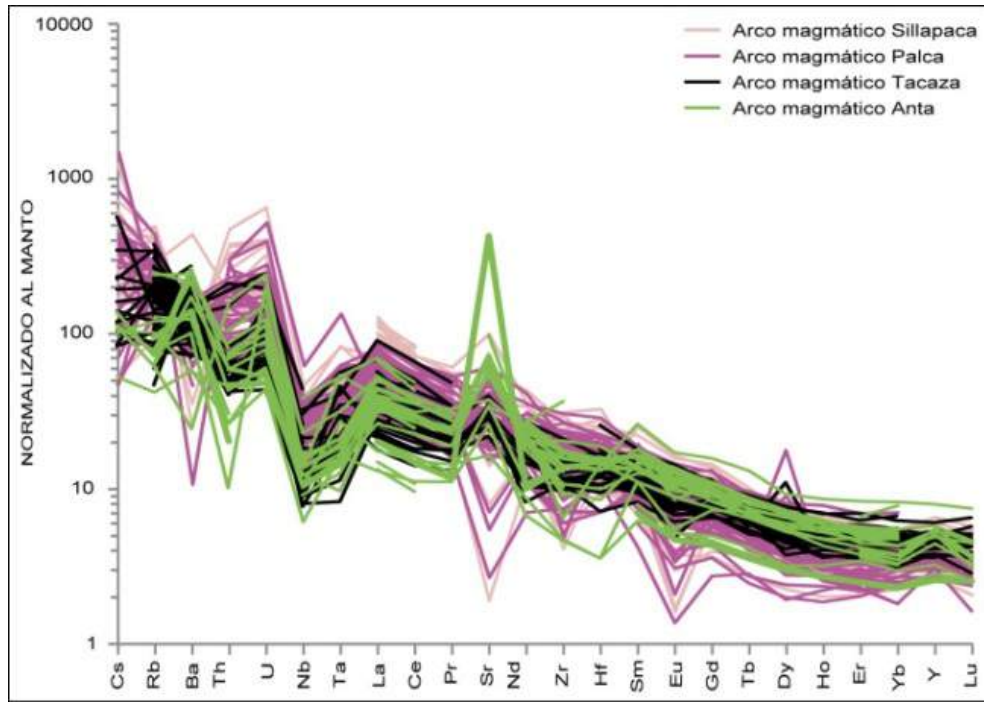
30 y 45 km de profundidad, es decir claramente más arriba que los anteriores.

### 2.4. Arco magmático Sillapaca (16-10 Ma)

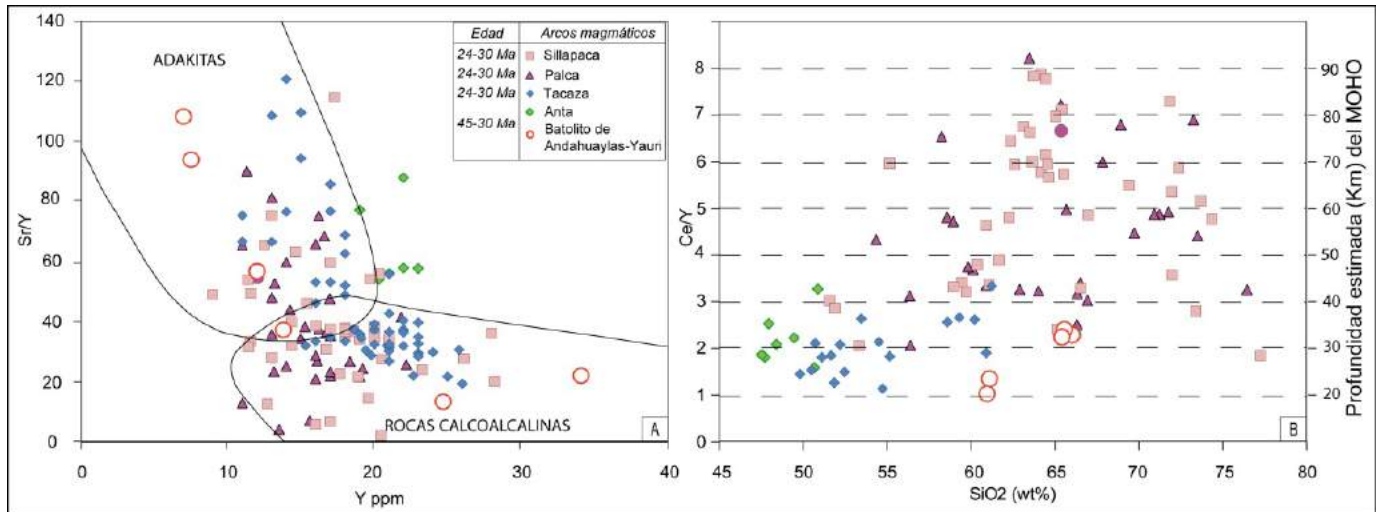
Sus lavas y domos se caracterizan por presentar generalmente concentraciones medias de  $K_2O$ . El  $Al_2O_3$  varía entre 12 y 18 wt. %; el MgO es < 7 wt. %; el Sr es < 1300 ppm; el Ni y Cr son menores a 130 y 200 ppm, respectivamente (Fig. 2). En un diagrama multielemental (Fig. 3), se observan anomalías positivas en Sr e Y, anomalías negativas en Ba, Nb, Ta, Sr, Zr, Eu, y un empobrecimiento en HREE (Fig. 3). En el diagrama de Sr/Y vs. Y (Fig. 4A), estas rocas pertenecen a los campos adakítico y calcoalcalino (Fig. 4A), donde los magmas adakíticos están asociados a magmas emplazados inicialmente entre 45 y 80 km de profundidad (Fig. 4B), mientras que los magmas calcoalcalinos se emplazaron inicialmente entre 30 y 50 km de profundidad (Fig. 4B).



**Figura 2.** Diagramas de tipo Harker de elementos mayores y trazas. Los contenidos de óxidos están recalculados al 100 %, libres de bases volátiles y con todo el Fe como FeO total. Los campos en el diagrama  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  se modificaron de Peccerillo & Taylor (1976).



**Figura 3.** Perfiles de elementos trazas y elementos de tierras raras. Los valores están normalizados al manto primitivo (McDonough & Sun 1995).



**Figura 4.** A: Diagrama de discriminación de Sr/Y vs. Y para las rocas de los arcos volcánicos Anta, Tacaza, Palca y Sillapaca (modificado de Drummond & Defant, 1990). B: Diagrama de Ce/Y para estimar la profundidad de los magmas (Mantle & Collins, 2008).

**3. Conclusiones**

Las rocas del Batolito de Andahuaylas-Yauri, así como las lavas y diques producidos por el arco magmático Anta, al noreste del sistema de fallas Condoroma-Cailloma (Fig. 1) tienen un carácter adakítico, mientras que las al suroeste son calcoalcálinas. Asimismo, las lavas del arco magmático Tacaza que están restringidas al noreste del sistema de fallas Lagunillas tienen signatures de tipo adakitas y las que afloran al suroeste son calco-alcalinas. En base a esta variación espacial del carácter adakítico, el espesor cortical estuvo comprendido entre 20 y 40 km según las razones Ce/Y. Dado que una subducción plana se desarrolló en el Eoceno-Oligoceno (Perelló et al., 2003; Martinod et al., 2010), sugerimos que las adakitas de los

arcos magmáticos Anta y Tacaza derivan de los estadios inicial y final de una subducción plana, lo que se ajusta al modelo de fusión parcial de una losa oceánica antigua y fría en subducción plana planteado por Gutscher et al. (2000). Por otra parte el carácter adakítico de los magmas emitidos por los arcos magmáticos Palca y Sillapaca está asociado a un emplazamiento inicial de los magmas entre 50 y 80 km de profundidad (Ce/Y). Por lo tanto estos valores estarían relacionados a la fusión parcial de la base del arco por engrosamiento de la corteza, cuando se reestableció la subducción normal, ocasionando la migración del arco magmático hacia el oeste. Además, también se observa que el carácter calcoalcálinos de las

rocas emitidas por el arco magmático Palca está relacionado a una zona de fracturas corticales (Alto Condoroma-Cailloma; Carlotto et al., 2009), que permitió el ascenso de los magmas y su emplazamiento a niveles someros.

## Referencias

- Bonhomme, M., Audebaud, E., Vivier, G. 1985. K-Ar ages of Hercynian and Neogene rocks along an east-west cross section in southern Peru. *Comunicaciones (Universidad de Chile)*, v. 35, p. 27-30.
- Boudesseul, N., Fornari, M., Sempere, T., Carlier, G., Mamani, M., Ibarra, I., Meza, P., Cerpa, L. 2000. Un importante evento volcánico de edad Mioceno inferior en la zona de Descanso-Ayaviri-Condoroma-Santa Lucía (Dptos. de Cusco, Puno y Arequipa). *Resúmenes extendidos, X Congreso Peruano de Geología*, v. 1, p. 48-57.
- Carlier, G., Lorand, J.-P., Liégeois, J.-P., Fornari, M., Soler, P., Carlotto, V., Cárdenas, J. 2005. Potassic-ultrapotassic mafic rocks delineate two lithospheric mantle blocks beneath the southern Peruvian Altiplano. *Geology*, v. 33, p. 601-604.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, K., Lu, S., Cueva, E. 2009. Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 103, p. 1-89.
- Cerpa, L., Cereceda, C., Torres, D., Muñoz, L., Aguilar, R., Rodríguez, F. 2011. *Geología del cuadrángulo de Condoroma (hoja 31-t)*. Boletín del INGEMMET, Serie A, Carta Geológica Nacional, v. 143, 96 p.
- Cerpa, L., Meza, P. 2001. Las cuencas neógenas del sur del Perú: la cuenca Descanso-Yauri (Mioceno) – evolución sedimentológica y tectónica. Tesis Ing. Univ. San Antonio Abad. Cusco, 130 p.
- Gutscher, M., Spakman, W., Bijwaard, H., Engdahl, E. 2000. Geodynamic of flat subduction: Seismicity and tomographic constraints from the Andean margin. *Tectonics*, v. 19, p. 814-833.
- Klinck, B.A., Ellison, R.A., Hawkins, M.P. 1986. The geology of the Cordillera Occidental and Altiplano west of Lake Titicaca, southern Peru. Preliminary report, INGEMMET, 353 p.
- Latorre, O., Orós, Y. 2000. Evolución sedimentológica y tectónica terciaria entre la laguna Langui-Layo y Llalli (borde NE de la Cordillera Occidental). Tesis Ing. Univ. San Antonio Abad del Cusco, 89 p.
- Lefèvre, C. 1979. Un exemple de volcanisme de marge active dans les Andes du Pérou (Sud) du Miocène a l'actuel: zonation et pétrogénese des andésites et shoshonites. *Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier*, 555 p.
- Maher, C. 2010. Skarn alteration and mineralization at Coroccohuayco, Tintaya District, Peru. *Economic Geology*, v. 105, p. 263-283.
- Mamani, M., Ibarra, I., Carlier, G., Fornari, M. 2004. Petrología y geoquímica del magmatismo alcalino de la zona noroeste del Altiplano peruano (departamento de Puno): In: J. Jacay & T. Sempere (eds.), *Nuevas contribuciones del IRD y sus contrapartes al conocimiento geológico del sur del Perú*, Sociedad Geológica del Perú, Publicación Especial n° 5, p. 157-174.
- Mamani, M., Wörner, G., Sempere, T. 2010. Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin*, v. 122, p. 162-182.
- Mantle, G., Collins, W. 2008. Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: Correlation between arc basalt composition and Moho depth. *Geological Society of America Bulletin*, v. 36, p. 87-90.
- Martinod, J., Husson, L., Roperch, P., Guillaume, B., Espurt, N. 2010. Horizontal subduction zones, convergence velocity and the building of the Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 299, p. 299-309.
- McDonough, W., Sun, S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, v. 120, p. 223-254.
- Mungall, J.E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, v. 30, p. 915-918.
- Peccerillo, R., Taylor, S. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 58, p. 63-81.
- Perelló, J., Carlotto, V., Zárate, A., Ramos, P., Posso, H., Neyra, C., Caballero, A., Fuster, N., Muhr, R. 2003. Porphyry-style alteration and mineralization of the middle Eocene to early Oligocene Andahuaylas-Yauri belt, Cuzco region, Peru. *Economic Geology*, v. 98, p. 1575-1605.
- Saez, J. 1996. Skarn and ore parageneses in the Cu (-Fe) Tintaya deposit, southern Peru. *Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen*, v. 86, 205 p.
- Sáez, F. 2008. Señal adakítica en el cinturón Andahuaylas-Yauri., *Resúmenes extendidos, XIV Congreso Peruano de Geología*, 6 p.
- Vatin-Pérignon, N., Poupeau, G., Oliver, R., Lavenu, A., Labrin, E., Keller, F., Bellot-Gurlet, L. 1996. Trace and rare-earth element characteristics of acidic tuffs from southern Peru and northern Bolivia and a fission-track age for the Sillar of Arequipa. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 9, p. 91-109.
- Wasteneys, H., Clark, A., Farrar, E., Langridge, R.J. 1995. Grenvillian granulite facies metamorphism in the Arequipa massif, Perú: A Laurentia-Gondwana link. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 132, p. 63-73.