

EVOLUCIÓN PETROLÓGICA Y GEOQUÍMICA DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA (AREQUIPA)

Marco Rivera¹, Pablo Samaniego^{1,2,3}, Rosmery Delgado¹, Jersy Mariño¹,
Céline Liorzou⁴, François Nauret²

¹ INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Av. Dolores (Urb. Las Begonias B-3), J.L.B y Rivero, Arequipa, Perú; E-mail: mrivera@ingemmet.gob.pe

² Laboratoire Magmas et Volcans, Université Blaise Pascal, CNRS, IRD, 5, rue Kessler, F-63038 Clermont-Ferrand, Francia

³ IRD, Teruel 357, Miraflores, Lima 18, Perú

⁴ Laboratoire Domaines Océaniques, UBO, Brest, Francia

INTRODUCCIÓN

El complejo volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS) está localizado a 60 km al NO de la ciudad de Arequipa ((71° 49'–71° 54' W; 15° 46'–15° 52' S),) en la Cordillera Occidental de los Andes del Sur del Perú (Fig. 1), la cual forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (CVZ). El CVAS descansa sobre una altiplanicie lávica e ignimbrítica de edad Miocénica (Klinck et al., 1993), y está constituido por un volcán compuesto de edad Plesitocénica, el Ampato (6280 msnm); y un volcán eminentemente lávico, de edad Holocénica, construido en la parte NE del complejo, el volcán Nevado Sabancaya (5967 msnm.). Reportes históricos señalan que el Sabancaya ha experimentado importantes erupciones en el siglo XVIII, siendo su último período eruptivo el ocurrido recientemente, entre los años 1988 y 1997. El CVAS colinda con el extremo sur del volcán Hualca Hualca (6025 msnm.), un estratovolcán erosionado probablemente de edad Plio-Pleistocénica.

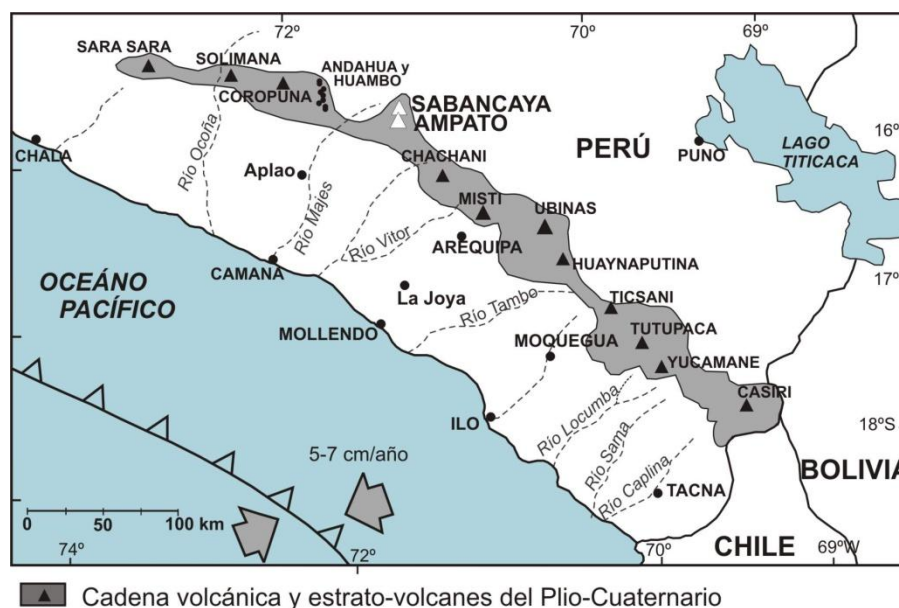


Fig. 1. Mapa de localización del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (Arequipa).

El presente estudio tiene por objeto caracterizar la composición geoquímica de las rocas de este complejo y de identificar los principales procesos petrogenéticos responsables de la diversidad geoquímica observada. Adicionalmente, se busca demostrar si los magmas emitidos por los volcanes Ampato y Sabancaya a través del tiempo corresponden o no a una misma serie magmática.

CONTEXTO GEOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO DEL COMPLEJO AMPATO - SABANCAYA

El *Ampato* es un estratovolcán compuesto, construido de al menos 5 etapas de desarrollo que alternan fases eminentemente efusivas con fases altamente explosivas. Una muestra de lava correspondiente a

la base del complejo (“Ampato I”) fue datada por el método K-Ar y dió una edad de 170 ± 5 ka, mientras que otra muestra, correspondiente a la base del cono superior (“Ampato IV”) fue datada en 40 ± 3 ka. Por su parte, el volcán Nevado *Sabancaya* está constituido de dos conos superpuestos: al sur un domo y al norte un edificio lávico cubierto por material piroclástico, el cual presenta un cráter somital activo de 300 m de profundidad, con frecuente actividad fumarólica. Este volcán está conformado esencialmente por variados flujos de lava cubiertos por depósitos de caída de cenizas emitidos al menos durante los últimos 4000 años. La actividad histórica del volcán Sabancaya ocurrida los últimos 500 años estuvo caracterizada por erupciones de tipo vulcaniano, es decir erupciones violentas, pero de corta duración. Entre 1986 hasta 1996 el volcán Sabancaya presentó una actividad explosiva de tipo vulcaniano (Guillande et al., 1992). En esta oportunidad se temió que la actividad aumentara con posibles consecuencias trágicas para los más de 30,000 habitantes que viven en el valle de río Colca y Siguan (situados al N y NE del volcán), cuya principal actividad es la agricultura y ganadería.

PETROGRAFÍA DE LAS ROCAS DEL CVAS

Las rocas del CVAS presentan una gran homogeneidad mineralógica y petrográfica. En efecto, las rocas son en su gran mayoría de composición andesítica, con algunas dacitas y riolitas. Estas últimas solo están presentes en la serie del Ampato. Las andesitas están separadas en tres grupos: andesitas con dos piroxenos y biotita; andesitas con piroxenos, anfíbol y biotita; y andesitas con anfíbol y piroxenos. Las que predominan son las andesitas con anfíbol y biotita. En las andesitas y dacitas se distinguen grandes fenocristales de plagioclasa (a veces de hasta 1 cm), anfíbol, biotita, óxidos de Fe-Ti, ortopiroxeno, y ocasionalmente fenocristales de clinopiroxeno. Las andesitas y dacitas son principalmente de textura porfirítica con una pasta intersertal o microlítica. Cristales de olivinos están presentes únicamente en los productos menos diferenciados y en la mayoría de los casos con texturas de desequilibrio y/o bordes corroídos. Asimismo, algunos fenocristales de biotita en sus bordes presentan coronas de reacción constituidos por plagioclasa, piroxenos y óxidos de Fe-Ti. Las riolitas corresponden a pómez de caída pliniana y contienen fenocristales de plagioclasa, biotita y óxidos de Fe-Ti.

CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DE ROCAS DEL CVAS

Las rocas del volcán Ampato corresponden principalmente a andesitas (56.7-62.9 wt.% SiO_2), con algunas dacitas (63 -68.3 wt.% SiO_2) y riolitas (75.7-75.9 wt.% SiO_2), (Fig. 2). Por su parte, las rocas del volcán Sabancaya corresponden a andesitas (59.9-62.6 wt.% SiO_2) y algunas dacitas (63.4-67.1 wt.% SiO_2). Los basaltos y las andesitas básicas están ausentes de estas series magmáticas. Todas las muestras analizadas pertenecen a la serie calco-alcalina con alto contenido de K (2.3-3.7 wt.% K_2O para rocas del Sabancaya y 2.2-5.1 wt.% K_2O para rocas del Ampato), tal como es mostrado en el diagrama K_2O vs. SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976).

Los elementos mayores CaO, Fe_2O_3^* y MgO, y en menor medida el Al_2O_3 presentan una marcada correlación negativa con respecto a la SiO_2 (Fig. 2), mientras que las concentraciones de K_2O se correlacionan positivamente con la SiO_2 . En el diagrama Al_2O_3 vs. SiO_2 se observa que algunas dacitas conforman un grupo caracterizado por tener concentraciones altas en Al_2O_3 con respecto al contenido de sílice. Esta tendencia muestra claramente una compleja evolución magmática. Estas muestras corresponden a varios depósitos pumíticos (flujos piroclásticos y caídas de pómez) correspondientes a la etapa “Ampato III”. Por otro lado, los valores de algunos elementos trazas, como los metales de transición (e.g. Ni), así como el Sr decrecen a medida que la SiO_2 aumenta. Al contrario la concentración en elementos de gran radio iónico (LILE, e.g. Rb, Ba), así como los elementos de fuerte potencial iónico (HFSE, e.g. Nb) aumentan a medida que aumenta la concentración en SiO_2 , aunque una dispersión importante es observada en algunos casos. Con respecto a las tierras raras, se observa que los valores de las tierras raras ligeras (LREE, e.g. La) de algunas andesitas muestran una gran dispersión, estos elementos indican un comportamiento incompatible. Las tierras raras pesadas (HREE, e.g. Yb) muestran una estabilidad durante la diferenciación, a excepción del grupo constituido por los productos explosivos del Ampato III, que muestran claramente valores más altos en HREE e

Y. Finalmente, estos diagramas claramente muestran que globalmente no existen grandes variaciones en el comportamiento de elementos traza a lo largo del tiempo y que las muestras del Ampato y del Sabancaya recubren el campo de variación de los productos volcánicos del Sabancaya.

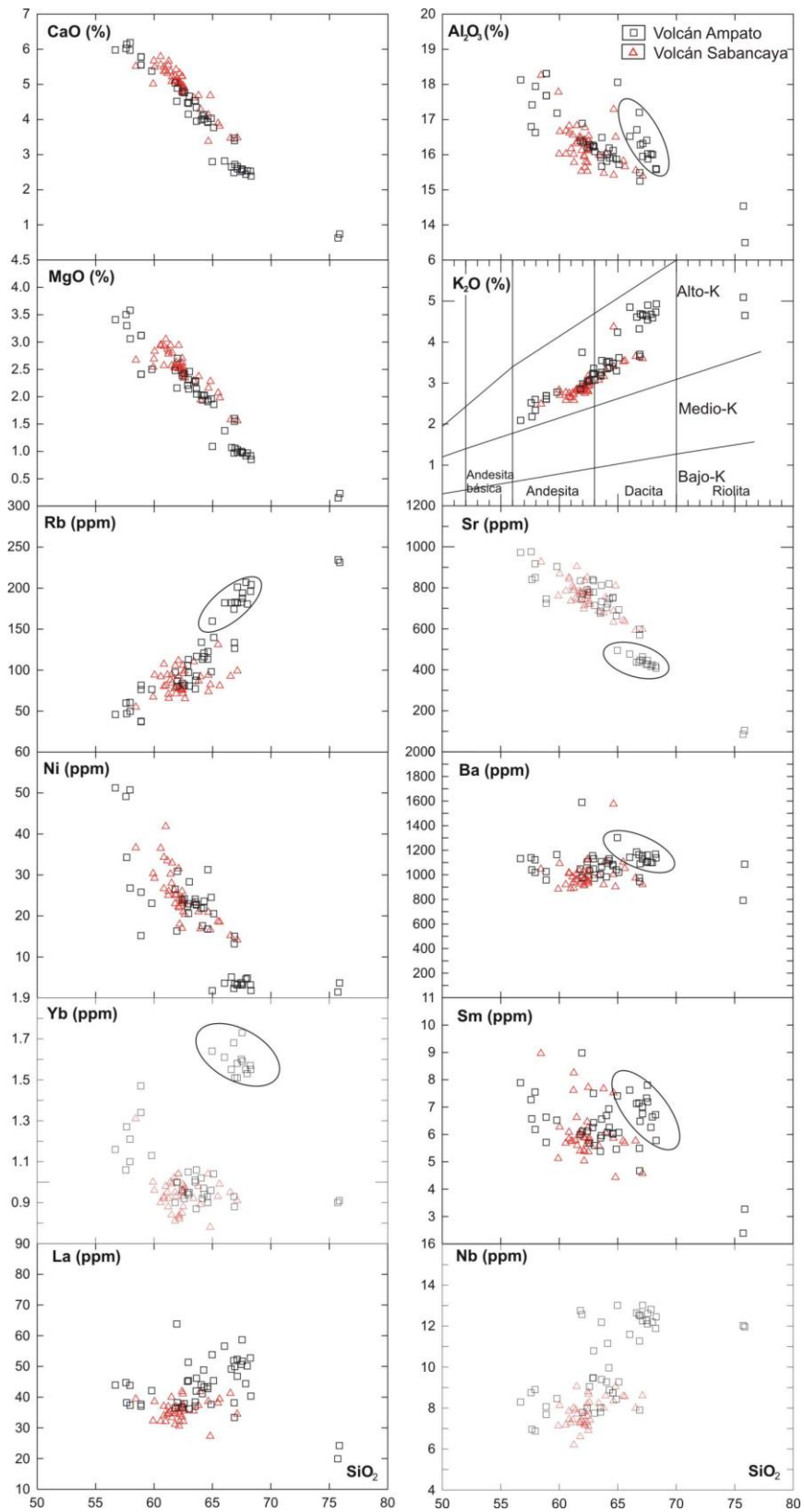


Fig. 2. Evolución de algunos elementos mayores y trazas de rocas del CVAS. Las muestras encerradas en el círculo corresponden a un flujo de pómez y ceniza, y un depósito de caída pliniana voluminosa.

Los espectros multielementos de los productos del CVAS normalizados con respecto al manto primitivo (Sun and McDonough, 1989; Fig. 3A), presentan las características inherentes a los magmas de arco: (1) un enriquecimiento en LILE (Rb, Ba, K), con relación a HFSE (Nb, Zr); y (2) una fuerte anomalía negativa de Nb y Ti. Este último es más marcado en las riolitas del Ampato. Estas particularidades son propias de magmas de arco generados por fusión de la cuña del manto metasomático por fluidos acuosos provenientes del "slab" (McCulloch and Gamble, 199; Davidson et al., 1991). También es necesario tener en cuenta que todas estas características no son específicas del CVAS, en realidad son típicas de todos los magmas de la CVZ (Davidson et al., 1991). El bajo enriquecimiento en Ti, Y, Yb relativo al manto primitivo está probable relacionado a la presencia de fases minerales (por ejemplo granate o anfíbol) que fracciona estos elementos compatibles.

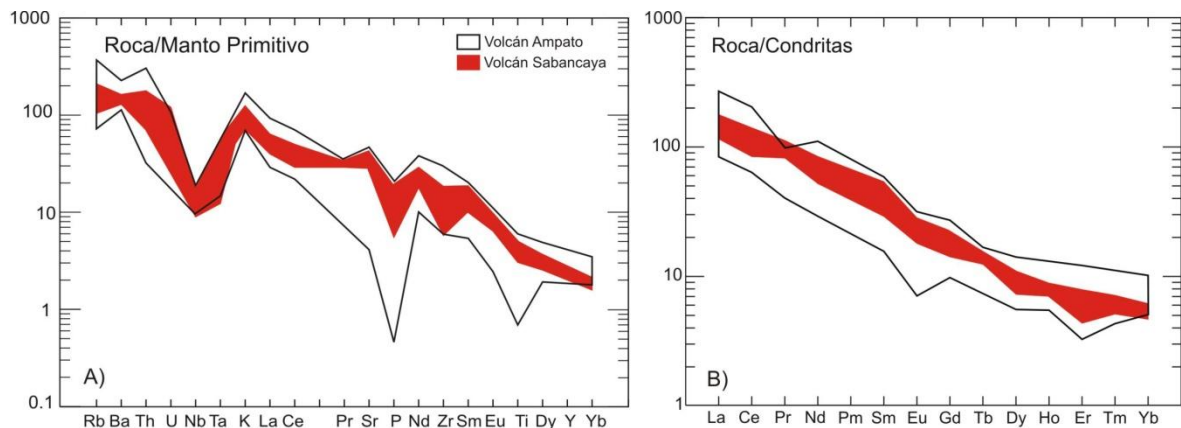


Fig. 3. A) Diagrama multielemental y B) Diagrama de tierra raras de rocas andesíticas, dacíticas y riolíticas del complejo volcánico Ampato-Sabancaya.

Los espectros de tierras raras (REE) de las rocas del CVAS, normalizadas con respecto a la composición de una condrita (Sun and McDonough, 1989. Fig. 3B), presentan un espectro de magmas de la CVZ. Los LREE (La, Ce) son elevados ($84.1 < La_N < 247.5$), mientras que las HREE, normalizadas a la condrita siempre son superiores a 5 ($6.5 < Yb_N < 10.8$); lo que resulta en un fraccionamiento moderado de los espectros con una razón $(La/Yb)_N$ que varía de 15 a 43.4. También es necesario mencionar que las lavas del CVAS son relativamente pobres en HREE comparado a los magmas calco-alcalinos "clásicos" de arco. Estas características apuntan a la intervención del anfíbol y eventualmente de granate durante la evolución cortical de estos magmas. Además, las rocas presentan una ligera anomalía en Eu en los espectros de REE normalizados a Condritas. Por otra parte, las rocas del volcán Ampato recubren el campo de las rocas del Sabancaya.

Con respecto a la composición isotópica, cuando se les compara con los magmas calco-alcalinos de arco, los productos del CVAS tienen razones isotópicas $^{87}Sr/^{86}Sr$ que varían entre 0.7063 - 0.7075, y las razones $^{143}Nd/^{144}Nd$ varían en un rango de 0.51229 - 0.51243. En el diagrama $^{143}Nd/^{144}Nd$ vs. $^{87}Sr/^{86}Sr$ todos los productos del CVAS (Fig. 4a) se sitúan en el campo definido por la ZVC (Davidson et al., 1991). Por otro lado, en el diagrama de la Fig. 4b las razones $^{87}Sr/^{86}Sr$ muestran correlaciones positivas con respecto a la SiO_2 , que sugieren la intervención de procesos de asimilación-cristalización fraccionada (AFC) durante la evolución de la serie.

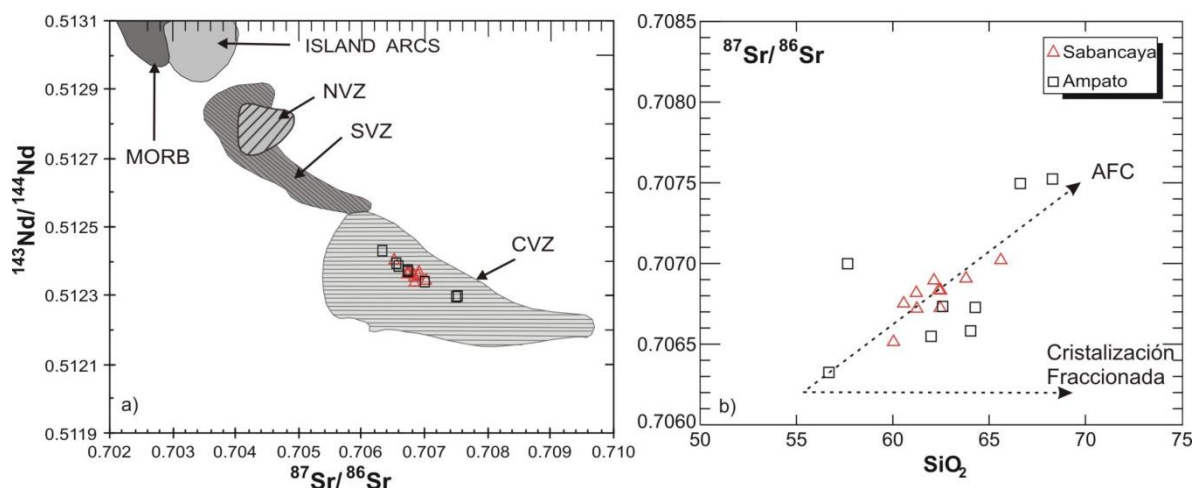


Fig. 4. a) Diagrama de composición isotópica de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las rocas del CVAS, comparado con rocas de la zona volcánica del sur (ZVS), central (ZVC) y Andes del norte (ZVN) (Davidson et al., 1991). b) Diagrama de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. SiO_2 .

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En base a sus características geoquímicas e isotópicas los productos del CVAS tienen propiedades inherentes de magmas de la ZVC, generados por procesos de subducción, las cuales fueron posteriormente afectados por procesos de contaminación y/o una asimilación de magmas (generados en la base de la corteza) durante su ascenso a la superficie por una corteza continental engrosada (~60 – 70 km de espesor) existente en el sur del Perú (Barazangi and Isack, 1976). Estos magmas evolucionaron a través de un proceso de asimilación – cristalización fraccionada (AFC) con la intervención de anfíbol y/o granate. Los productos de los volcanes Ampato y Sabancaya siguen una misma línea de diferenciación que sugiere que los productos tuvieron un mismo proceso de generación y diferenciación magmática. En conclusión en base al comportamiento de los elementos mayores, trazas e isótopos se confirma que principalmente los procesos de AFC participan en la diferenciación de la serie del CVAS. También se resalta que determinados productos volcánicos como los flujos piroclásticos y caídas de pómez de la etapa “Ampato III” tuvieron una evolución petrogenética distinta a toda la serie, donde el granate y/o anfíbol no tuvieron una participación importante.

BIBLIOGRAFÍA

- Barazangi, M., Isacks, B., 1976. Subduction of the Nazca plate beneath Peru: evidence from spatial distribution of earthquakes. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 57, 537–555.
- Davidson, J.P., Harmon, R.S., Wörner, G., 1991. The source of the Central Andes magmas; some considerations. *In Andean magmatism and its tectonic setting*. Geological Society of America –Special Paper, 265, 233–243.
- De Silva S.L., Francis P.W., 1991. *Volcanoes of the Central Andes*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 219 p.
- Gerbe, M.-C., Thouret, J.-C., 2004. Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya in south Peru. *Bulletin of Volcanology* 66, 541–561.
- Guillande R., Thouret J.C., Huaman D. et Le Guern F., 1992. L'activité éruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques: géologie, cartographie et imagerie satellitaire. (Ministère de l'Environnement et Centre National d'Etudes Spatiales), Paris, 120 p.
- Klinck B., Ellison R., Hawkins M., Palacios O., De la Cruz J., De la Cruz N., 1993. Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del lago Titicaca- Sur del Perú. *Boletín INGEMMET N° 42 Serie A*. 257 p.
- Peccerillo P., Taylor S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area. Northern Turkey. *Contrib Miner Petrol* 58, 63–81.
- McCulloch, M.T., Gamble, A.J., 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters* 102, 3–4, 358–374.
- Sun, S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the Ocean Basin*, Geological Society of America, Special Paper 42, 313–345.