



## XVIII Congreso Peruano de Geología

# PROCESOS DE GENERACIÓN Y EVOLUCIÓN DE MAGMAS EMITIDOS POR EL COMPLEJO VOLCÁNICO YUCAMANE - CALIENTES (TACNA)

Marco Rivera<sup>1</sup>, Pablo Samaniego<sup>2</sup>, Céline Liorzou<sup>3</sup>, Jessica Vela<sup>1</sup>, François Nauret<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Barrio Magisterial B-16, Umacollo – Yanahuara, Arequipa, Perú; E-mail: [mrivera@ingemmet.gob.pe](mailto:mrivera@ingemmet.gob.pe)

<sup>2</sup> Laboratoire Magmas et Volcans, Université Blaise Pascal, CNRS, IRD, 6 Avenue Blaise Pascal, TSA 60026 – CS 60026, 63178 Aubière, Francia

<sup>3</sup> Laboratoire Domaines Océaniques, UBO, Brest, Francia

## 1. INTRODUCCIÓN

El complejo volcánico Yucamane-Calientes (CVYC) está localizado a 12 km al noroeste de la localidad de Candarave, en la zona altoandina de Tacna, sector occidental de la Cordillera de los Andes (Fig. 1). Este complejo consta de dos volcanes, en el extremo sur el volcán Yucamane (5495 msnm.) y en su extremo norte se localiza el volcán Calientes (4980 msnm.), de los cuales el Yucamane es uno de los siete volcanes activos del sur peruano. Estos volcanes colindan con el extremo sur del volcán Yucamane Chico (5025 msnm.) del Mioceno. Una muestra de roca obtenida de la base de dicho volcán datada por nuestro grupo arrojó una edad K/Ar de  $5.5 \pm 0.08$  Ma. El complejo Yucamane - Calientes pertenece a la zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) de De Silva y Francis (1991).

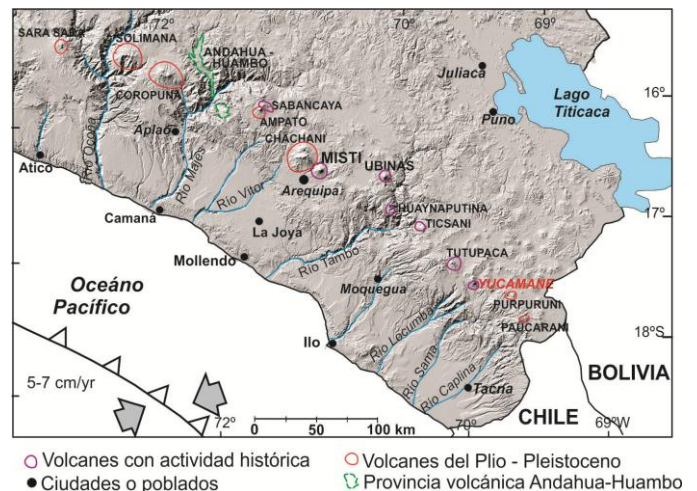


Fig. 1. Mapa de localización del complejo volcánico Yucamane-Calientes (Tacna).

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO DEL COMPLEJO YUCAMANE - CALIENTES

El *Calientes* es un estratovolcán emplazado durante el Pleistoceno superior (Rivera et al., 2014), construido en al menos cuatro etapas, durante las cuales presentó principalmente actividad efusiva que emitió flujos de lava. Al final de su construcción sufrió un colapso parcial que destruyó gran parte del cono quedando sólo el extremo noroccidental. Luego fue intruido por un complejo de domos dacíticos en su sector suroriental.

Por su parte, el volcán Yucamane es un cono compuesto, el cual presenta en su cima un cráter de ~120 m de profundidad y de 360 m de diámetro. Este volcán está conformado por variados flujos de lava cubiertos por depósitos de caída de cenizas emitidos durante el Holoceno. Una lava del cono inferior fue datada por nuestro grupo de trabajo en  $23 \pm 1$  ka y una lava del cono superior en  $3 \pm 2$  ka. Una de las últimas erupciones explosivas de tipo subpliniana presentadas por dicho volcán ocurrió hace ~3270 años AP (Rivera et al., 2014). Los registros geológicos de campo no muestran la ocurrencia de erupciones en la época histórica.

Una eventual reactivación del volcán Yucamane puede ocasionar graves consecuencias para los más de 6000 habitantes que viven al pie de su flanco sur, cuya principal actividad es la agricultura y ganadería.

### 3. PETROGRAFÍA DE ROCAS DEL COMPLEJO YUCAMANE-CALIENTES

Las rocas en su conjunto presentan una gran homogeneidad mineralógica y petrográfica. En efecto, las rocas del cono del volcán Calientes son de composición andesítica y dacítica, mientras que los domos recientes asociados a dicho volcán son de composición dacítica. Las andesitas constan de dos grupos: andesitas con piroxenos, anfíbol y biotita; y andesitas con anfíbol y piroxenos. Las dacitas contienen fenocristales de plagioclasa ( $\leq 1$  cm), anfíbol, biotita, óxidos de Fe-Ti, y ocasionalmente ortopiroxeno y clinopiroxeno. Por su parte, las rocas del volcán Yucamane son de composición andesítica básica, andesita y dacita. Las andesitas básicas presentan fenocristales de plagioclasa (a veces de hasta 0.6 cm), ortopiroxeno, clinopiroxeno, anfíbol, óxidos de Fe-Ti y ocasionalmente olivinos. Las andesitas y dacitas son principalmente de textura porfirítica con una pasta intersertal o microlítica, que contienen fenocristales de plagioclasa ( $\leq 1$  cm), anfíbol, biotita, óxidos de Fe-Ti, ortopiroxeno, y ocasionalmente, clinopiroxeno. Por su parte, las rocas del volcán Yucamane Chico son principalmente de composición andesítica y constan de fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, anfíbol y óxidos de Fe-Ti.

### 4. CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DE ROCAS DEL CVYC

Las rocas del volcán Calientes corresponden principalmente a andesitas y dacitas (60.1-67.7 wt.%  $\text{SiO}_2$ ), mientras que las rocas del volcán Yucamane corresponden a andesitas básicas, andesitas y dacitas (53.4-66.9 wt.%  $\text{SiO}_2$ ), Fig. 2. Todas las muestras pertenecen a la serie calco-alcalina con alto contenido de K (2.7-3.4 wt.%  $\text{K}_2\text{O}$  para rocas del Calientes y 1.4-3.5 wt.%  $\text{K}_2\text{O}$  para rocas del Yucamane), tal como es mostrado en el diagrama  $\text{K}_2\text{O}$  vs.  $\text{SiO}_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976).

Los elementos mayores  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  (no presentado aquí) del conjunto de rocas, presentan una marcada correlación negativa con respecto a  $\text{SiO}_2$  (Fig. 2),

mientras que las concentraciones de  $\text{K}_2\text{O}$  se correlacionan positivamente con el  $\text{SiO}_2$ . Por otro lado, los valores de algunos elementos trazas, como los metales de transición (ej. Ni, V), así como el Sr decrecen a medida que el  $\text{SiO}_2$  aumenta; aunque una ligera dispersión es observada en rocas del volcán Yucamane Chico. La concentración en elementos de gran radio iónico (LILE, ej. Rb), así como los elementos de fuerte potencial iónico (HFSE, ej. Nb; no presentado aquí) aumentan a medida que aumenta la concentración en  $\text{SiO}_2$ , aunque una gran dispersión es observada en algunos casos. Con respecto a las tierras raras, se observa que los valores de las tierras raras ligeras (LREE, ej. La, Sm) muestran una gran dispersión, estos elementos indican un comportamiento incompatible. La concentración de las tierras raras pesadas (HREE, ej. Yb) de rocas de los volcanes Yucamane y Calientes, ligeramente disminuyen durante la diferenciación. Sin embargo, la concentración de las tierras raras pesadas (ej. Yb) de rocas del Yucamane Chico se mantienen más elevadas.

Estos diagramas muestran que existen ligeras variaciones en el comportamiento de elementos mayores y trazas a lo largo del tiempo, sobre todo de las rocas del "Yucamane III", las cuales recubren el campo de los productos volcánicos de las etapas "Yucamane I" y "Yucamane II" y de rocas de los volcanes Calientes y Yucamane Chico.

Los espectros multielementos de los productos del CVYC normalizados con respecto al manto primitivo (Sun and McDonough, 1989; Fig. 3A), presentan las siguientes características: (1) un mayor enriquecimiento en LILE (Rb, Ba, K), con relación a HFSE (Nb, Zr); y (2) una fuerte anomalía negativa de Nb y Ti. Estas particularidades son propias de magmas de arco generados por fusión de la cuña del manto metasomatizado por fluidos acuosos provenientes del "slab" (Davidson et al., 1991). El bajo enriquecimiento en Ti, Y e Yb relativo al manto primitivo está probablemente relacionado a la presencia de granate o anfíbol que fraccionan estos elementos compatibles.

Los espectros de tierras raras (REE) de las rocas fueron normalizadas con respecto a la composición de una condrita (Sun and McDonough, 1989. Fig. 3B). Los espectros resultantes son típicos de los magmas de la ZVC. Las concentraciones de tierras raras ligeras - LREE (La, Ce) son elevadas ( $106 < \text{La}_N < 150$ ), mientras que las tierras raras pesadas (HREE), normalizadas a la condrita siempre son superiores a 4 ( $3.9 < \text{Yb}_N < 9.9$ ); lo que resulta en un fraccionamiento moderado de los espectros con una razón  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  que varía de 13.8 a 25.5. También es necesario mencionar que las lavas del CVYC son relativamente pobres en HREE comparado a los magmas calco-alcalinos "clásicos" de arco. Estas características apuntan a la intervención del anfíbol y/o granate durante la evolución cortical de estos magmas. Por otra parte, las rocas del volcán Yucamane recubren el campo de las rocas del volcán Calientes.

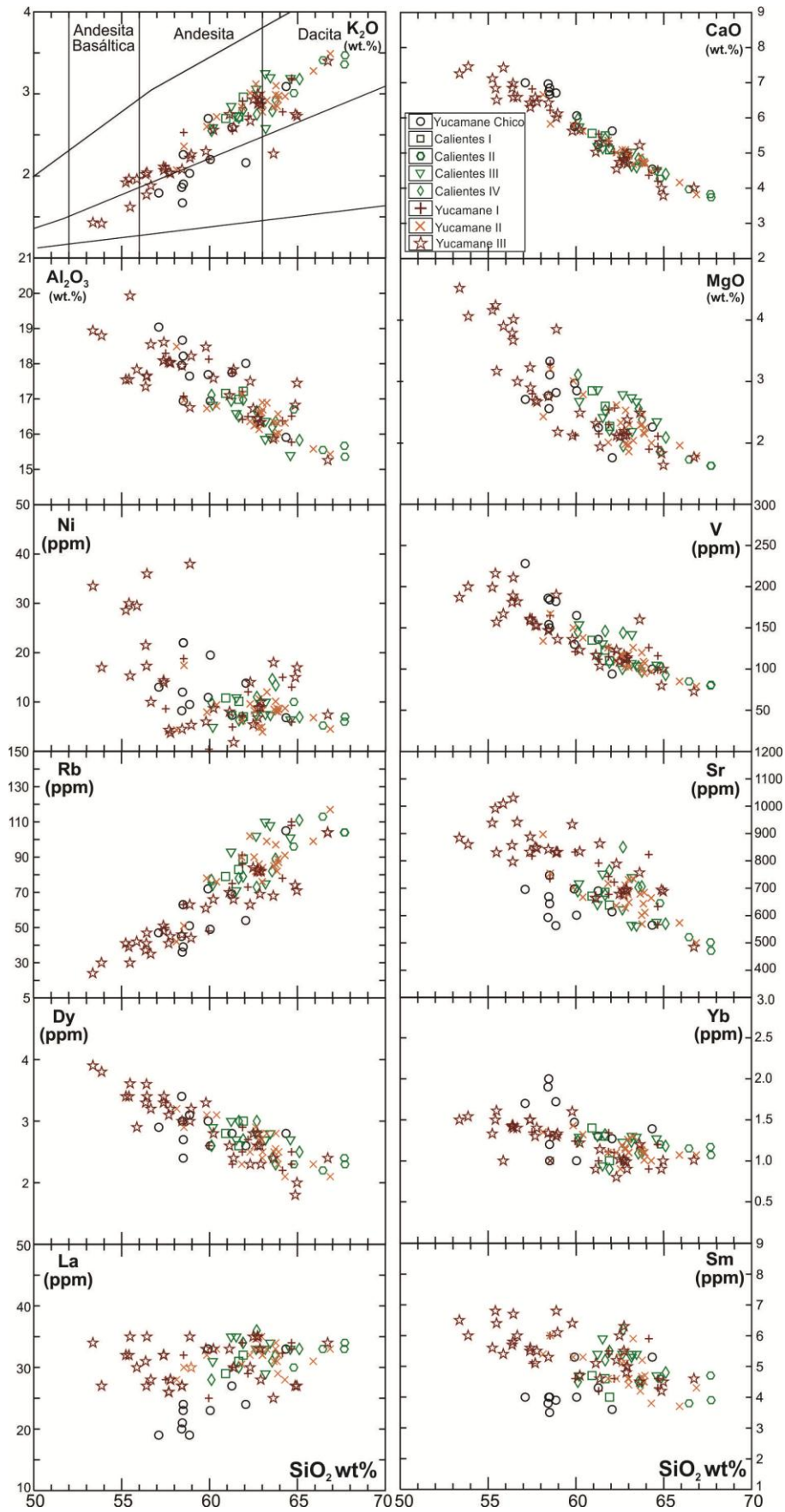


Fig. 2. Comportamiento de algunos elementos mayores y trazas de rocas del CVYC.

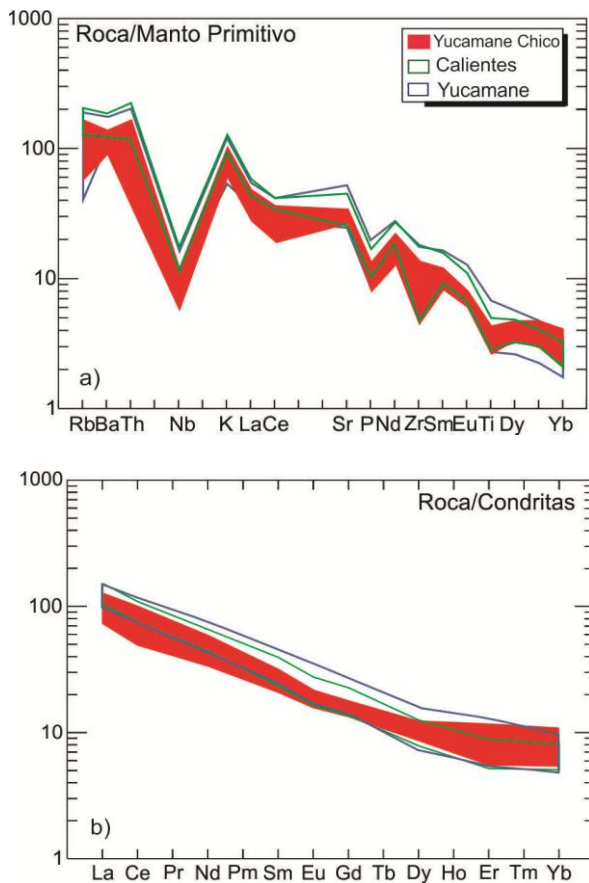


Fig. 3. A) Diagrama multielemental y B) Diagrama de tierra raras de rocas andesíticas, dacíticas y riolíticas del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

Con respecto a la composición isotópica, los productos del CVYC tienen razones isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  que varían entre 0.70643 - 0.70710, y las razones  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  varían en un rango de 0.51221 - 0.51237. En el diagrama  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  todos los productos del CVYC (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  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  muestran correlaciones positivas con respecto a el  $\text{SiO}_2$ , que sugieren la intervención de procesos de asimilación-cristalización fraccionada (AFC) durante la evolución de la serie.

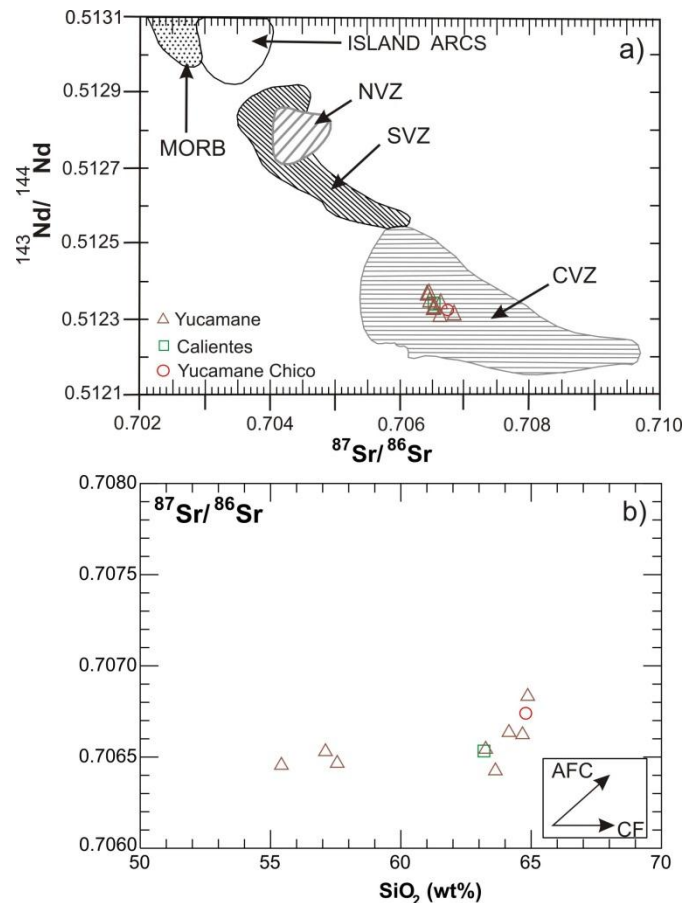


Fig. 4. a) Diagrama de composición isotópica de  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de las rocas del CVYC, comparado con rocas de la zona volcánica del sur (ZVS), central (ZVC) y Andes del norte (ZVN) (Davidson et al., 1991). b) Diagrama de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $\text{SiO}_2$ . En la parte inferior se presenta las tendencias teóricas de los procesos de AFC, Asimilación-Cristalización Fraccionada; y CF, Cristalización Fraccionada.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En base a sus características geoquímicas e isotópicas, las rocas del complejo Yucamane-Calientes tienen características propias de magmas de la ZVC, generados en el manto por procesos de subducción, las cuales fueron posteriormente afectados por procesos de contaminación y/o una asimilación de magmas en la base de la corteza continental (Davidson et al., 1991; Delacour et al., 2007).

Posteriormente, los magmas ascendieron a través de la corteza, que en este sector de los Andes es mayor a 70 km de espesor (Barazangi and Isacks, 1976), y se almacenaron en una cámara magmática superficial en donde evolucionaron principalmente a través de un proceso de asimilación - cristalización fraccionada (AFC); y posteriormente fueron emitidos a la superficie. Este proceso de generación y evolución de magmas del complejo Yucamane-Calientes es similar a otros volcanes de la ZVC, localizados en el sur peruano (Gerbe and Thouret, 2004; Delacour et al., 2007).

Por otro lado, las rocas del volcán Yucamane Chico son restringidos a un campo limitado en  $\text{SiO}_2$  y menos

enriquecidos en La, Sm y Sr que las rocas de los volcanes Yucamane y Calientes. A su vez son ligeramente más enriquecidos en Yb. En base a estas características, se asume que las rocas de dicho volcán siguieron un proceso de evolución y diferenciación magmática diferente a las rocas del complejo Yucamane-Calientes. Lo que sugiere que dichas rocas no pertenecen al mismo sistema magmático del Yucamane-Calientes. Asimismo, su origen y evolución ocurrió probablemente antes o/y durante el engrosamiento de la corteza continental en este sector de los Andes centrales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barazangi, M. & Isacks, B.L., 1976. Subduction of the Nazca plate beneath Peru: evidence from spatial distribution of earthquakes. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 57(3): 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.
- Delacour, A., Gerbe, M.-C. Thouret, J.-C., Wörner, G. & Paquereau, P., 2007. Magma evolution of Quaternary minor volcanic centres in southern Peru, Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, 69(6): 581-608
- De Silva S.L., Francis P.W., 1991. *Volcanoes of the Central Andes*. Springer - Verlag, 219 p.
- Gerbe, M.-C. & Thouret, J.-C., 2004. Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6): 541-561.
- 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.
- Rivera M., Samaniego P., Liorzou C., Guillou H., Vela J., 2014. Geología y evolución del complejo volcánico Yucamane - Calientes (Tacna). Resumen de XVII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.
- 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.