

# CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LA ZONA GEOTERMAL DE CALACOA, MOQUEGUA

Vicentina Cruz<sup>1</sup>, Koji Matsuda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INGEMMET, Av. Canadá N° 1470, San Borja Lima 41, Perú, Apartado 889 (vcruz@ingemmet.gob.pe).

<sup>2</sup>West Japan Engineering Consultants, INC, Space cube Bldg., 2F, 7-11,1-Chome, Haruyoshi Chuo-ku, Fukuoka, Japan, 810-0003 (mazda@wjec.co.jp).

## INTRODUCCIÓN

La Zona Geotermal de Calacoa (ZGC) se localiza a unos 10 km al oeste del volcán Ticsani (5408 msnm), en la Cordillera Occidental de los Andes a una altitud de 2,950 - 4,200 msnm en la región Moquegua. La fuente de calor que se manifiesta en esta zona geotermal estaría relacionada a la actividad volcánica del Ticsani, cuyo sistema hidrotermal esta puesto de manifiesto por la existencia de pequeñas emanaciones de gases fumarólicos en el flanco SE del cráter, así como, por la presencia de fuentes termales alrededor del edificio volcánico (Fig. 1).

Las principales manifestaciones geotérmicas se encuentran en tres zonas: la primera llamada Secolaque a 3 km al NO del pueblo de Calacoa, la segunda conocido como Putina a 1.5 km al SO del mismo pueblo, y la tercera Soquesane ubicado a 6 km al sur del volcán Ticsani (Fig. 1). Las manifestaciones termales con temperaturas elevadas se encuentran en el río Putina y en algunas quebradas afluentes, con temperaturas que alcanzan hasta los 95 °C , mientras que las localizadas en la zona sur del volcán presentan temperaturas entre 25 a 50 °C.

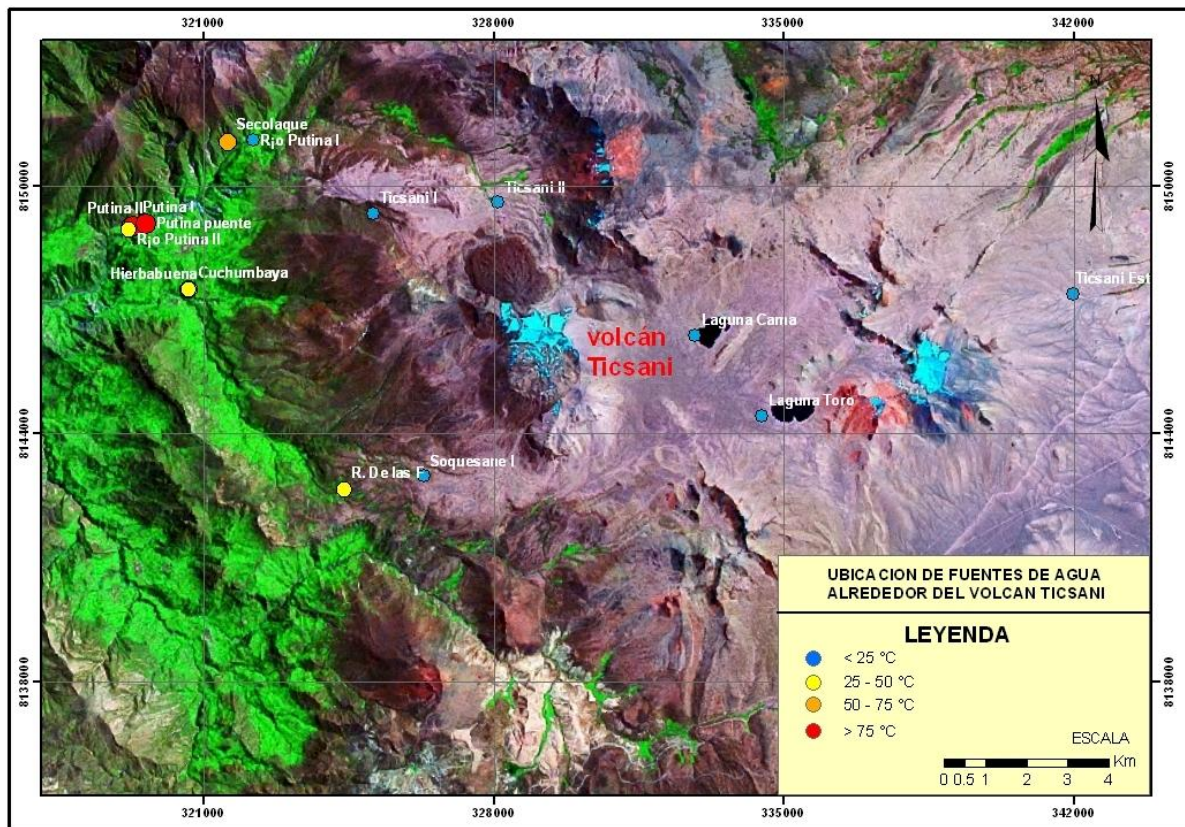


Fig. 1 Mapa de localización de las fuentes termales y frías en la ZGC - Moquegua.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

En Calacoa – Putina, se tienen afloramientos de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas. Las primeras afloran al oeste y al sur del pueblo de Calacoa, estas constituyen el basamento jurásico-cretáceo sobre el cual se han depositado las rocas volcánicas que afloran en la zona. Entre las rocas sedimentarias aflorantes tenemos las calizas de la Fm. Socosani (Jurásico medio) sobre éstas yace el Grupo Yura (Jurásico medio - Cretáceo inferior), donde en la parte inferior se tienen secuencias de areniscas intercaladas con lutitas y limoarcillitas ( $\pm$  750 m de espesor) y en la parte superior tenemos calizas intercaladas con areniscas cuarzosas y lutitas (> 400 m. de espesor) (Mariño et al., 2009).

Dentro de la zona las rocas volcánicas más antiguas tenemos a las andesitas y dacitas de la Fm. Matalaque, la cual junto con el Grupo Toquepala y los sedimentos clásticos continentales del Paleógeno (Fm. Pichu) e ignimbritas riolíticas del Mioceno medio (Fm. Huaylillas) (García y Guevara, 1998) constituyen el substrato sobre el cual se emplazaron las secuencias de flujos de lava y rocas piroclásticas del volcán Ticsani (Mariño & Thouret, 2003).

Regionalmente, asociados a los volcanes Ticsani y Huaynaputina se distinguen dos sistemas de fallas y fracturas regionales: sistema de dirección andina NO-SE, NNO-SSE y ONO-ESE, y sistema en dirección NNE-SSO y NE-SO; ambos afectan rocas del Oligoceno y Mioceno. Localmente, se observan fallas activas o recientes de dirección NE-SO; el emplazamiento de materiales volcánicos estarían relacionados a fracturas profundas de orientación ONO-ESE, algunas reconocidas en la zona de Calacoa y San Cristóbal (Mariño, 2002).

## RESULTADOS

En la ZGC se presentan manifestaciones geotermales en su mayoría en el cauce del río Putina desde la zona de Secolaque hasta el puente de San Cristóbal, entre alturas de 2900 a 3400 msnm a 10 km al NO y O del volcán Ticsani. Asimismo, se presentan manifestaciones termales al S y SO del edificio volcánico.

Las manifestaciones geotermales en Calacoa se caracterizan por presentar temperaturas entre 50 a 91°C, así como el pH varía entre 6 a 8 y la conductividad eléctrica desde 2.7 a 3.3 mS/cm respectivamente. Los resultados de campo y la composición química son presentados en la Tabla N° 1, realizando el cálculo del balance iónico de los resultados analíticos para estas fuentes termales, presentan entre +/-1 a 2%, los cuales son aceptables.

**Tabla 1. Composición química (mg/L) de las fuentes termales de la ZGC.**

Fuente	Temp °C	pH	CE $\mu$ S/cm	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Cl mg/L	F mg/L	SO <sub>4</sub> mg/L	HCO <sub>3</sub> mg/L	B mg/L	As mg/L	SiO <sub>2</sub> mg/L
Putina I	88.0	6.71	2700	3	552	51	71	7	635	2	366	197	18	3	179
Putina II	91.8	7.86	3320	3	658	55	64	5	730	2	423	181	21	3	178
Putina-1	90.20	8	3320	4	617	54	60	5	746		379	158	21		187
Putina-2	89.30	8	2970		536	49	72	12	649		328	198	18		182
Secolaque	67.40	7			304	36	50	5	439		130	93			
Cuchumbaya	51.60	7			640	54	140	24	746		482	219			

### Clasificación de las aguas termales

Según el diagrama ternario (Giggenbach, 1988), las aguas termales son divididas sobre la base de contenidos relativos de Cl, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub> (Fig. 2), donde ilustra que las fuentes termales se agrupan dentro del tipo de agua clorurada-sulfatada. Se asume que al empezar la ebullición por despresurización, el S se particiona a la fase vapor, a diferencia del Cl que tiende a quedarse en el líquido. Esta reacción de ebullición aumenta el pH generando aguas cloruradas-neutras, moviéndose por el eje SO<sub>4</sub>-Cl en dirección al Cl. A niveles muy profundos y presiones suficientemente elevadas, el

CO<sub>2</sub> originalmente magmático, se mantiene en solución en el fluido hidrotermal profundo como CO<sub>2</sub> (aq) (Giggenbach, 1997).

### Trazadores Químicos

El diagrama ternario de Cl-Li-B (Fig. 3) (Giggenbach, 1991 a) señala el origen común para las aguas de Calacoa, con predominio de la especie cloruro seguido de B y relativamente bajo en Li. Asimismo, estas aguas se localizan cerca a la línea Cl-B y por el contenido relativo de estas especies se podría indicar que las aguas están asociadas a sistemas volcánicos magmáticos, evidenciándose en la zona la presencia de actividad volcánica reciente, como el Ticsani el volcán más activo de la zona.

También, se puede explicar en términos de disolución de la roca por aguas formadas a través de la absorción de vapores magmáticos a elevada temperatura y presión en sistemas de circulación profunda de aguas subterráneas. Estos vapores pueden contener Cl y B en proporciones cercano a las rocas de contacto de la corteza.

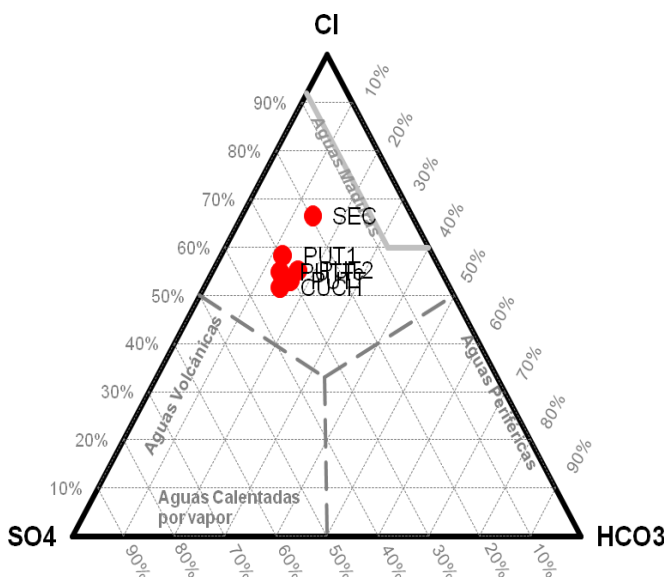


Fig. 2 Diagrama ternario (Giggenbach, 1988).

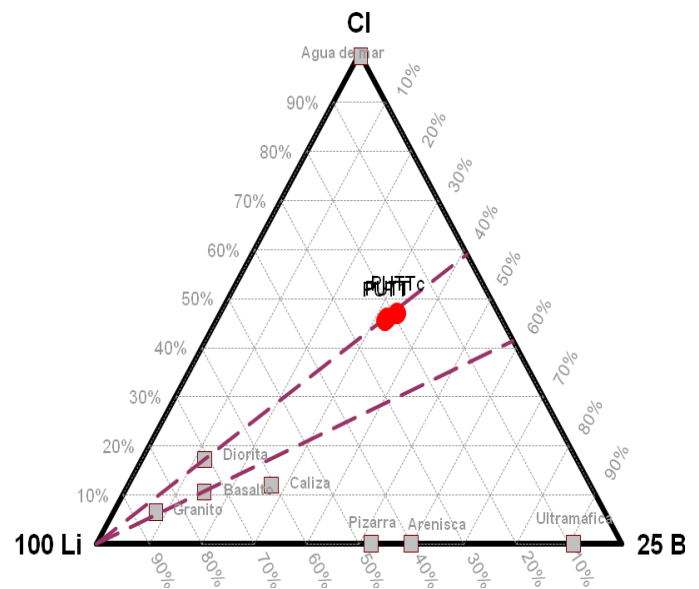


Fig. 3 Diagrama ternario Cl-Li-B.

La concentración de B en las aguas geotermales de la ZGC oscila entre 18 a 21mg/L, así como la proporción atómica B/Cl es de 0.09. En la Figura N° 4 podemos observar que las aguas de la zona geotermal de Calacoa se ubican dentro de la región de rocas sedimentarias, lo que indica que estas aguas estarían reaccionando con este tipo de rocas a niveles profundos, las cuales probablemente presentan alta porosidad y permeabilidad con abundantes fracturas (Shigeno, 1993; Shigeno and Abe 1983).

### Geoindicador de Na-K- Mg

En la Figura N° 5 se presentan el geoindicador de Na-K-Mg propuesto por Giggenbach, con la distribución de los datos de las fuentes termales de Calacoa, donde se observa que las aguas caen dentro de la región de aguas inmaduras pero con tendencia a la línea de equilibrio parcial, por lo que se puede indicar que las aguas está siendo mezcladas con las aguas del río Putina, ya que estas emergen en el cauce de este río.

Asimismo, el diagrama señala una tendencia lineal que apunta una temperatura de equilibrio Na/K del reservorio ya sea por dilución o mezcla de 220°C, pero por el alto contenido de Mg que presentan las muestras, este valor se vuelve incierto.

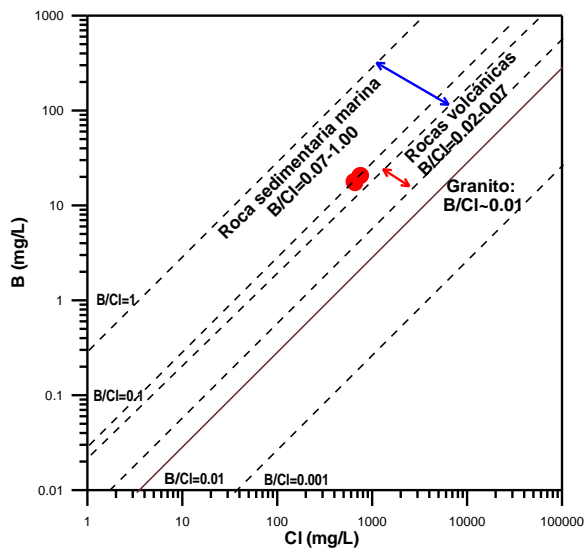


Fig. 4 Diagrama Boro vs Cloruro (Shigeno, 1993).

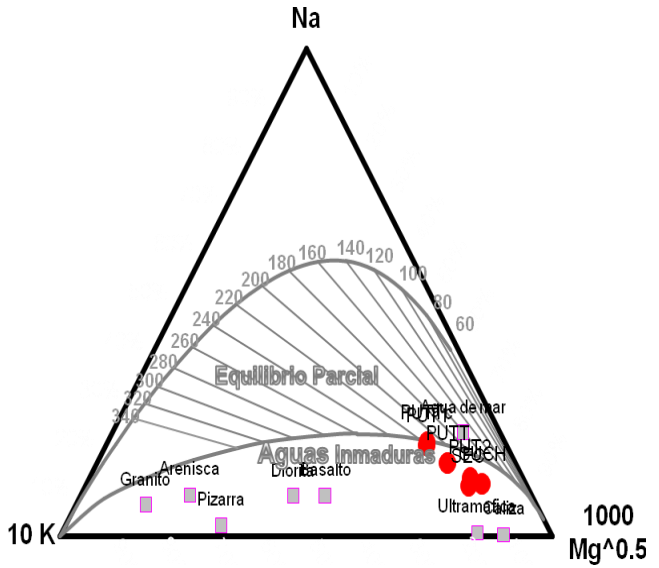


Fig. 5 Diagrama ternario (Giggenbach, 1991a)

La geotermometría química en fase líquida permitió estimar la temperatura a profundidad del recurso geotérmico de la ZGC. El geotermómetro de Na/K indica temperaturas entre 170 a 246°C. Entonces podemos indicar que la temperatura estimada del recurso geotérmico a profundidad puede ser mayor a los 200°C (Fig. 7).

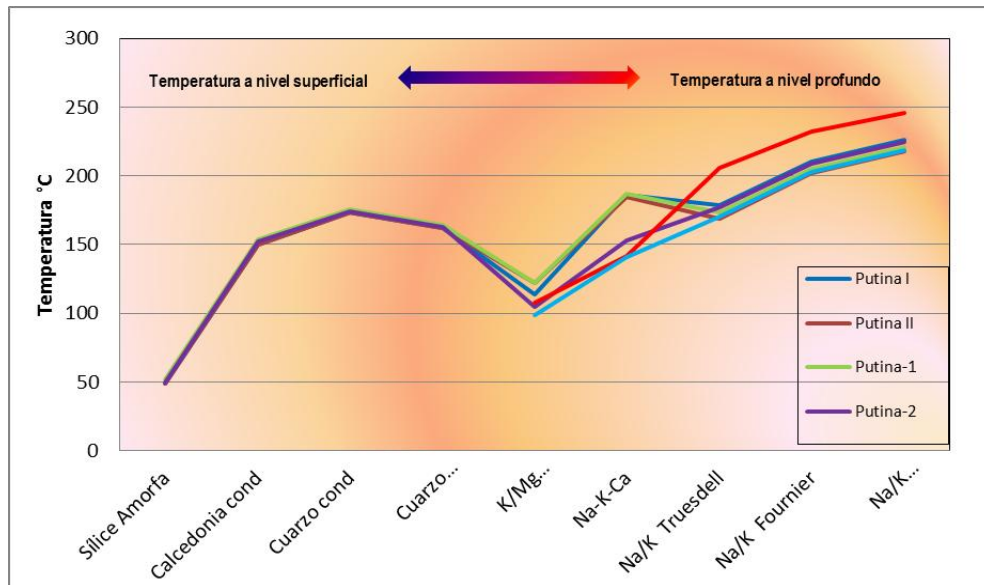


Fig. N° 6. Temperaturas de geotermometría química para la ZGC.

### Resultado isotópico

La figura 8 muestra la relación entre  $\delta^{18}\text{O}$  en los límites  $-9.73$  a  $-14.87\text{‰}$  y  $\delta^2\text{H}$  en los límites  $-66.5$  a  $-113.6\text{‰}$ . Se observa que la fuente de agua fría se localizan cerca de la Línea Meteorica Local-LML (Cortecci et al., 2005) lo que indicaría que estas aguas están siendo diluidas principalmente por agua meteórica. Asimismo, notamos que las fuentes termales localizadas al S-SO se encuentran sobre la LML, mientras que la fuente termal que se localiza al NO y O se alejan relativamente de la LML, lo

que muestra claramente que estas aguas se originan de la mezcla entre el agua meteórica y magmática, siendo el principal componente el agua meteórica proveniente de la superficie alrededor del 85%.

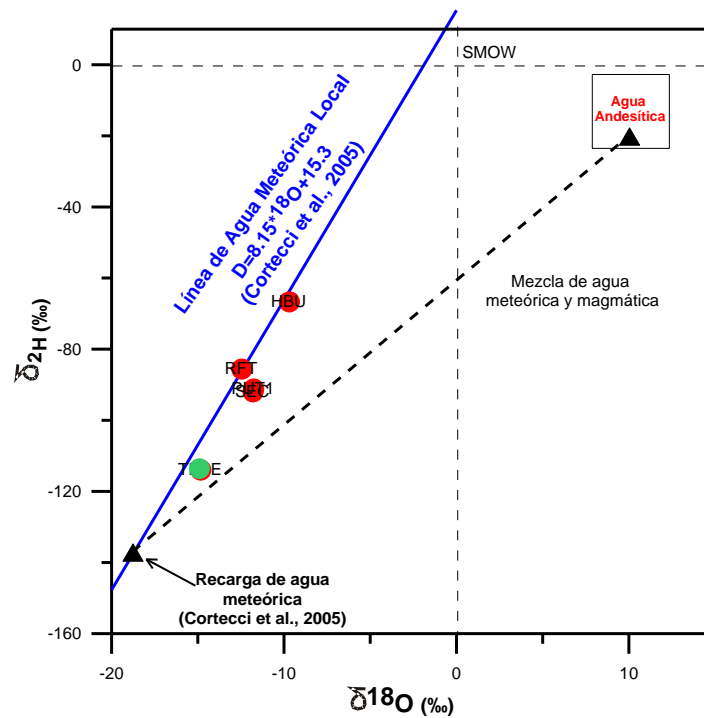


Fig. 8  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$

## CONCLUSIÓN

La caracterización geoquímica de las aguas termales de la ZGC en Moquegua, son de tipo clorurada-sulfatada alcalina. Por otro lado, la geotermometría química en fase líquida estima que la temperatura a profundidad del recurso geotérmico de la ZGC posiblemente sea superior a los 200°C. Finalmente, los isotopos estables  $^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , indican que las aguas termales se originan por la mezcla entre agua meteórica y magmática, siendo el principal componente el agua meteórica.

## REFERENCIAS

- Cortecci, G., Boschetti, T., Mussi, M., Lameli, C. H., Muchino, C. & Barbieri, M. (2005).- New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochemical Journal* 39: 547-571.
- García, W. y Guevara, C. (1998) (en español). *Geología del Cuadrángulo de Huaytire*. INGEMMET. Lima.
- Giggenbach, W. F., (1988) - Geothermal solute equilibria; derivation of Na-K-Ma-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2749-2765.
- Giggenbach, W.F., (1991a).- Chemical techniques in geothermal exploration. En: D'Amore, F. (Ed.), *Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*. UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Rome, Italy, pp 119-144.
- Giggenbach, W.F. (1997) Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries. *Econ. Geol.*, 87, 1927-1944.
- Mariño J., (2002) - Estudio Geológico Vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (Sur del Perú). Tesis profesional, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Mariño, J. y Thouret, J-C, C. (2003) (en español). *Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú)*. Lima: Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. p. 7-16.
- Mariño, J., Cacya, L., Rivera, M., Thouret, J.-C., 2009. Mapa Geológico del Volcán Ticsani. INGEMMET Arequipa.
- Quispesivana, L., y Zapata, A. 2000. Geología del cuadrángulo de Omate. Mapas actualizados de la Carta Geológica Nacional.
- Shigeno, H. (1993) - Reservoir Environment of the Onuma Geothermal Power Plant, Northeast Japan, Estimated By Forward Analysis of Long-Term Artificial Tracer Concentration Change, Using Single-box-Model Simulator, Workshop on Geothermal Reservoir engineering, Stanford University California.
- Shigeno, H. & Abe, K. (1983).- B-Cl geochemistry applied to geothermal fluids in Japan, especially as an indicator for deep-rooted hydrothermal systems. *Extended Abstr. 4th Internat. Symp. On Water-Rock Interaction, Misasa 1983*, p. 437-440.