

# CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS MANIFESTACIONES GEOTERMALES EN EL VALLE DEL COLCA, CHIVAY, AREQUIPA

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

El presente trabajo muestra los resultados del estudio geoquímico de las manifestaciones geotermales del Valle de Colca – Chivay, Provincia de Caylloma, Región Arequipa, efectuados por el INGEMMET y West Japan Engineering Consultants, INC. Este valle tiene como escenario principal el Cañón del Colca donde a una profundidad de 1200 m discurre el río Colca con un recorrido de más de 129 km, en dirección SO-NE, en cuya margen izquierda se encuentra la cadena volcánica del Ampato, Sabancaya y Hualca Hualca, mientras que por la margen derecha se alinea la Cordillera Volcánica del Chila, que incluye al Mismi (5598 msnm).

En el curso del río Colca se han identificado numerosas surgencias de manifestaciones geotermales, desde Baños del Inca (en Callalli) hasta Paclla, a una altitud de 2100 - 3600 msnm (Fig. 1), así como en la zona de Pinchollo y Puyepuyé a una altitud de 4300 - 4600 msnm (Fig. 1). En este estudio se han inventariado alrededor de 20 manifestaciones, donde predominan tres tipos de manifestaciones geotermales: 1) fuentes de vapor, con predominancia en los sectores de Pinchollo y Paclla, donde existe un control estructural y, el vapor caliente asciende a la superficie a través de fallas profundas, el cual al entrar en contacto con el agua superficial, este incrementa su temperatura hasta el punto de ebullición y luego pasa al estado gaseoso, originando surgencias de vapor a alta presión; 2) pozas de lodo ácido localizados en la zona de Puye Puye; y 3) fuentes termales en Chivay que son las más comunes.

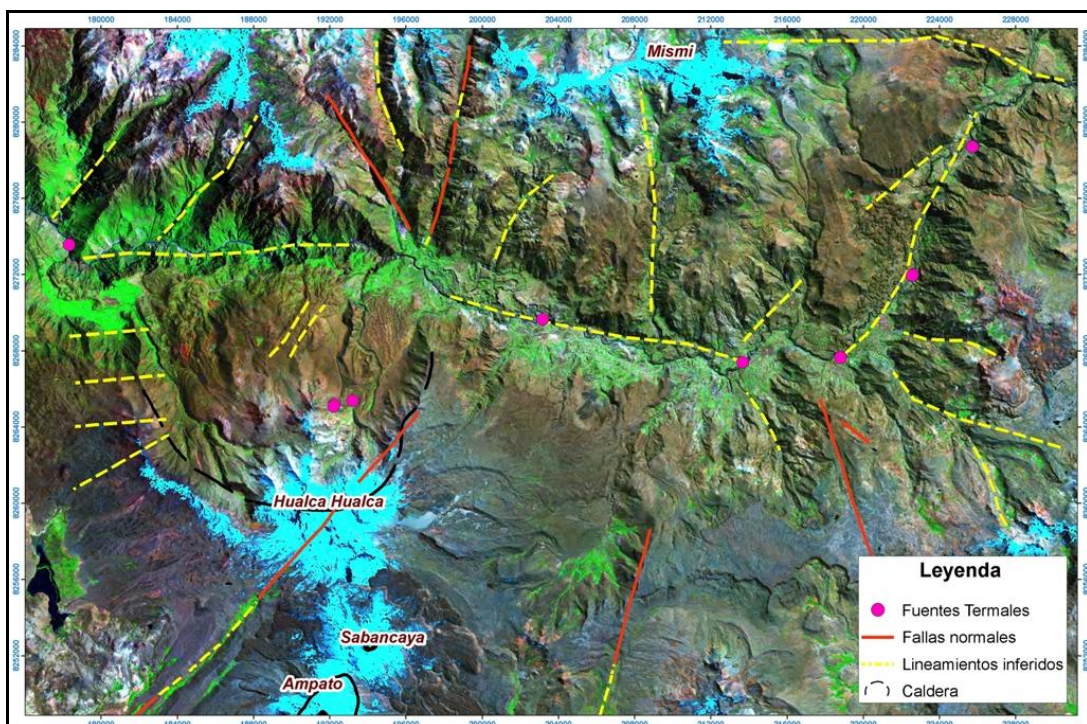


Fig. 1. Mapa de localización de fuentes termales con las principales fallas y lineamientos estructurales.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

En la zona de Chivay se tiene afloramientos de dos tipos de rocas predominantes, sedimentarias cretáceas y volcánicas neógenas. La erosión ocasionada por el río Colca, pone de manifiesto algunas secuencias puntuales del basamento cretáceo. En el sector del Cerro Latica se tienen depósitos de areniscas masivas de grano fino intercaladas con niveles de lutitas de la Fm. Puente. En el Cerro Ichicollo se observan afloramientos de areniscas en bancos delgados intercaladas con lutitas de la Fm. Labra. En Peña Blanca se han identificado areniscas cuarcíferas intercaladas como limonitas de la Fm. Hualhuani. Al SE del pueblo de Chivay se tienen afloramientos de la Fm. Murco constituida por alternancias de capas de limonitas rojas intercaladas con areniscas arcósicas (Quispesivana & Navarro, 2001).

La secuencia volcánica en la zona de Chivay comienza con las andesitas del Grupo Tacaza que afloran en ambos márgenes del río Colca y sobreyacen diversos eventos volcánicos pertenecientes al Grupo Barroso. En la parte SE de la zona tenemos afloramientos de andesitas porfiríticas y piroclastos pertenecientes al complejo volcánico Huarancante del Plioceno Inferior; cubiertos por flujos de andesitas porfiríticas y domos de andesitas. Al sur de Pinchollo se tiene al complejo volcánico Hualca Hualca, Ampato y Sabancaya, con actividad desde el Pleistoceno (Quispesivana & Navarro, 2001).

En la margen derecha del río Colca, al norte, sobre los depósitos del Gpo. Tacaza tenemos afloramientos de dos eventos, el primero correspondiente a andesitas y tobas de cristales pertenecientes al complejo volcánico Mismi, el segundo corresponde a afloramientos restringidos de tobas de cristales provenientes de la Caldera Caylloma, ambos del Plioceno superior (Quispesivana & Navarro, 2001).

Por otro lado, podemos indicar que los fluidos geotérmicos en el valle del Colca están controlados por zonas permeables relacionadas a fallas. Estas fallas se encuentran en dirección E-O controlando el curso del río Colca y la surgencia de algunas fuentes termales, la falla con tendencia NE-SO, asociado a la ubicación de los volcanes Ampato, Sabancaya y Hualca Hualca. Otra falla normal de mayor antigüedad ubicada en la Qda. Sahuayto de dirección N-S, afecta a las andesitas del Grupo Tacaza y del Complejo Volcánico Mismi (Quispesivana & Navarro, 2001).

## RESULTADOS

Las aguas que surgen en el curso del río Colca, registran temperaturas entre los 30 a 93°C y pH de 6 a 7, mientras que las manifestaciones geotermales de la zona de Pinchollo situadas en la quebrada del Huayuray presentan temperaturas desde 77°C hasta los 100°C, con pH desde 4 a 6. Por otro lado en la zona de Puye Puye, se observa descarga de numerosos lugares de emisión de vapor, gas y pozas de lodo ácido, que surgen en un área de 0,5 ha de suelo alterado. Las temperaturas de los fluidos geotermales en esta zona van desde 86 hasta 88°C, con pH entre 3 y 4 (Tabla 1).

El balance iónico de los resultados analíticos de las aguas termales, con excepción de las aguas ácidas están en +/-1%, el cual es aceptable.

### Clasificación de las aguas termales

Las aguas de la Zona Geotermal de Chivay, basado sobre el contenido relativo de las concentraciones relativas de Cl, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub> (Giggenbach, 1988) se clasifican en tres tipos de aguas: 1) Clorurada, 2) Sulfatada, y 3) Clorurada-Bicarbonatada (Fig. 2).

El elevado contenido de Cl en las fuentes termales localizadas en el Cañón del Colca es un buen indicio de la cercanía a la zona de ascenso del fluido geotermal proveniente de un nivel profundo. En el caso de las aguas de las zonas de Puye Puye y Pinchollo muestran elevado contenido relativo de Ca y Mg con respecto al Na, el cual no es habitual en aguas termales que se encuentran en equilibrio agua-roca (Giggenbach et al., 1983b; Giggenbach, 1988; Giggenbach, 1991a). Esta anomalía podría indicar que estos elementos debieron ser lixiviados en niveles profundos durante el ascenso del fluido

geotermal, siendo estos lo suficientemente ácidos para lixiviar rápidamente el Ca y Mg de las rocas (Bache et al., 1984).

Asimismo, las aguas de Puye Puye y Pinchollo son aguas sulfatadas ácidas, posiblemente asociado al sistema hidrotermal del complejo volcánico de Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca. También podría darse que en ocasiones las fumarolas que se descargan a través del suelo saturado de agua, da lugar a la formación de pozas ácidas con lodo. Esto se debe a que parte del  $H_2S$  se disuelve en el agua y, mediante la acción catalizadora de bacterias, se oxida como  $H_2SO_4$  que es un ácido fuerte. Al reaccionar este fluido ácido con la roca, la altera y se obtiene caolinita y otras arcillas similares que dan la apariencia lodosa a estas charcas tal como se observa en la zona de Puyepuye y Pinchollo.

En el diagrama ternario también se observa que la fuente termal de Baños del Inca se encuentra en la región de aguas cloruradas- bicarbonatadas. Posiblemente el fluido clorurado de estas aguas están siendo diluidas por aguas superficiales o bicarbonatada durante el flujo lateral, restringidos probablemente por las márgenes de zonas de mayor ascenso de fluido y a estructuras con flujo de salida de sistemas con elevada temperatura.

### Trazadores Químicos

Los trazadores (Cl, B, Li, Rb y Cs) debido a que son químicamente inertes, una vez que son agregados a la fase líquida permanecen sin cambios, por lo que permiten conocer el origen de las aguas en cuya composición contienen estos elementos. El diagrama ternario de Cl-Li-B (Fig. 3) (Giggenbach, 1991 a) señala el origen común para las aguas de Chivay, con predominio de la especie clorurada seguido de boro y relativamente bajo en Li. Estas aguas muestran una tendencia hacia la línea Cl-B y por el contenido relativo de estas especies, se podría indicar que las aguas están asociadas a sistemas volcánicos magmáticos. Entonces puede ser explicado 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 cercanas a las rocas de contacto de la corteza.

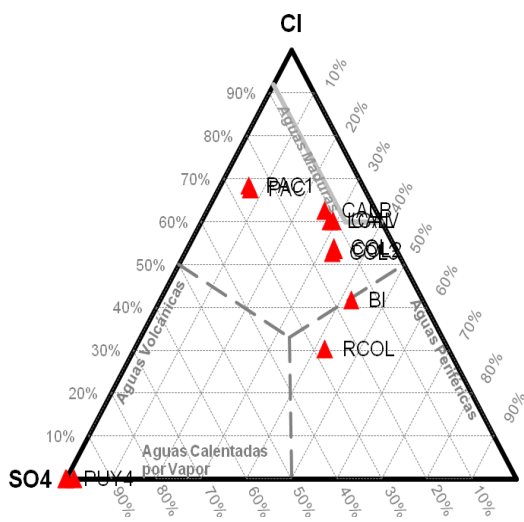


Fig. 2 Diagrama ternario (Giggenbach, 1988).

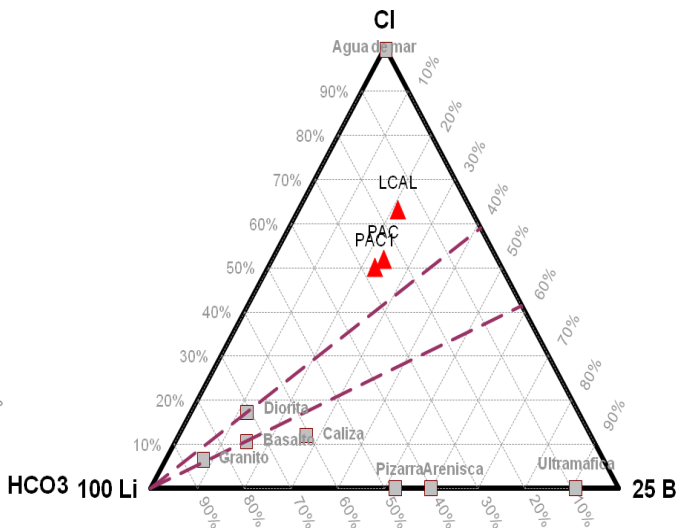


Fig. 3. Diagrama ternario Cl-Li-B.

Las aguas geotermales de Chivay presentan B en concentraciones desde 2 a 22 mg/L, así como la proporción atómica B/Cl es de 0.04 y 0.06. En la figura N° 4 podemos observar que las aguas de la zona de la Calera y Pacla estarían reaccionando en profundidad con rocas volcánicas y sedimentarias. Asimismo estas aguas posiblemente estarían atravesando en profundidad por rocas volcánicas del grupo Andagua, debido que en diferentes zonas del Cañón del Colca se observan afloramientos de este tipo de rocas (Quispesivana & Navarro, 2001).

## Geoindicador de Na-K- Mg

El geoindicador de Na-K-Mg propuesto por Giggenbach (Figura 5) muestra la distribución de los datos de las aguas termales de Chivay, los cuales caen dentro del equilibrio parcial. La fuente de Paclla se ubica en el límite de las aguas inmaduras y el equilibrio parcial, lo que indicaría que estas aguas están siendo mezcladas con el agua del río Colca, pero conservan su característica química de agua madura. Además el diagrama señala temperaturas de equilibrio Na/K ya sea por dilución o mezcla, para las zonas de Baños del Inca de 140°C, Calera y Colca Lodge entre 220 a 240°C y para Paclla de 250°C.

El resultado de la estimación de temperatura en profundidad mediante la geotermometría química en fase líquida se muestra en la Figura N° 6. El geotermómetro de Na/K indica temperaturas menores a 100 y mayores a 200°C.

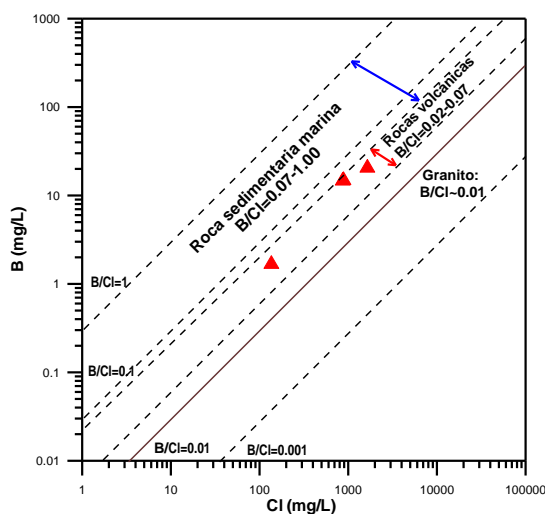


Fig. 4 Diagrama Boro vs Cloruro (Shigeno, 1993).

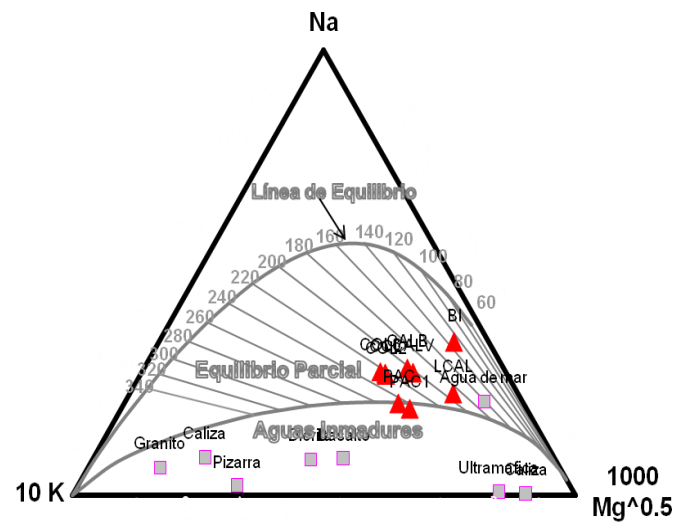


Fig.5 Diagrama ternario (Giggenbach, 1991a)

## Resultado isotópico

La relación entre  $\delta^{18}\text{O}$  en los límites -4.1 a -13.1‰ y  $\delta^2\text{H}$  en los límites -68 a -104‰ (Fig.7) muestran que la fuente termal de Paclla se localizan cerca de la Línea Meteorica Local (Cortecci et al., 2005), lo que indicaría que esta agua se origina de la mezcla de agua meteórica y magmática, siendo este ultimo el de menor cantidad. Mientras que el agua de Puyepuye y Pinchollo se aleja de la LML, cuyos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  tienden hacia el lado positivo, indican que esta agua tiene mayor contribución de fluido magmático. Por lo tanto, el origen del agua de las fuentes termales de Puye Puye y Pinchollo es producto de la mezcla de agua meteórica y agua magmática, donde los fluidos magmáticos posiblemente están asociados al complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualcahualca.

## CONCLUSIÓN

La caracterización geoquímica de las aguas termales del Valle del Colca, indican que son de tipo clorurada alcalina, sulfatada alcalina terrea y clorurada bicarbonatada alcalina. Por otro lado, la geotermometría química en fase líquida estima la temperatura en profundidad desde menores a 100°C de baja entalpia y mayores a 200°C de alta entalpia. Finalmente los isotopos estables  $\delta^{18}\text{O}$  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 y en el caso de la zona de Puye Puye y Pinchollo presenta mayor contribución de fluido magmático.

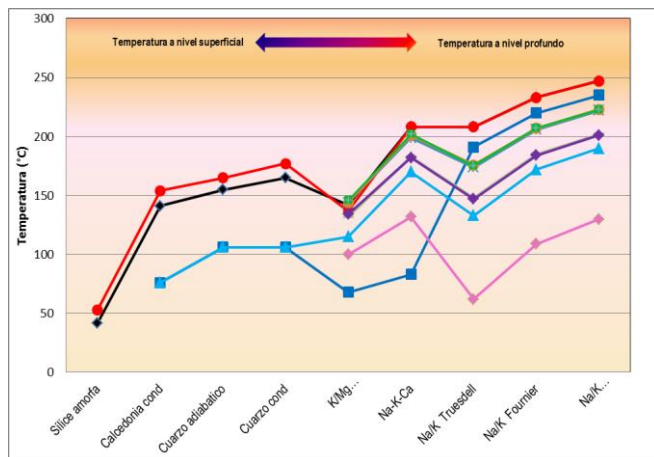


Fig. 6 Temperaturas de geotermometría química.

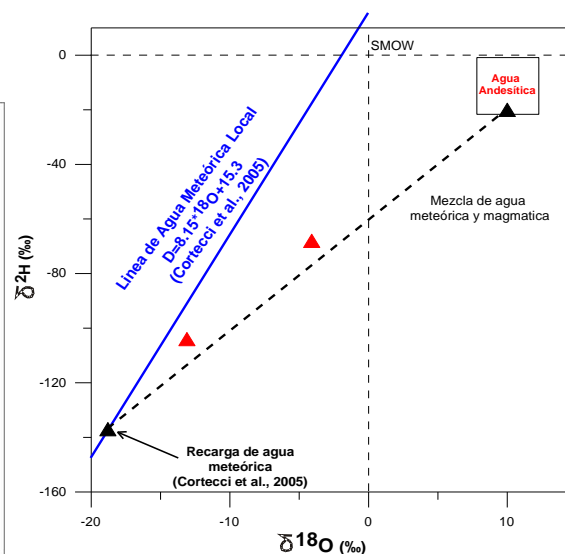


Fig. 7  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$

Tabla 1. Composición química (mg/L) de las manifestaciones geotermales en el Valle de Colca.

Fuente	Temp °C	pH	CE $\mu\text{S/cm}$	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
Puye Puye	75.5	3.14	1066	-	10	4	36	3	-	-	147	1	-	-	111
Pinchollo II	82.4	4.45	2520	-	15	3	89	26	-	-	408	7	-	-	84
Paclla	92.9	6.95	3450	4	610	73	46	3	856	6	320	91	16	1	158
La Calera	68.3	6.23	6070	4	1288	72	116	13	1623	2	304	768	22	1	54
Río Colca	14.2	7.65	999	-	106	11	47	11	134	1	121	187	2	-	54
Puye Puye-4	88.20	3	2090	-	26	12	40	8	-	-	592	-	-	-	208
Paclla-1	93.30	8	3510	5	645	77	47	4	872	-	321	80	16	-	189
Colca Lodge	80.50	7	-	3	1048	92	51	3	1172	2	296	702	-	-	-
Colca Lodge2	65.50	7	-	3	1102	98	50	4	1207	2	307	743	-	-	-
Colca Lodge3	76.60	7	-	3	1078	96	41	3	1172	2	323	726	-	-	-
Baños del Inca	46.10	7	-	1	1520	30	41	7	1243	2	474	1261	-	-	-
Calera Verde	60.90	6	-	2	1370	92	90	7	1669	3	294	810	-	-	-
Calera Blanca	67.80	6	-	2	1315	87	81	6	1598	3	289	664	-	-	-

## REFERENCIAS

- Bache, B.W., Rosenqvist, I.Th., Goldsmith, P., Fowler, D., Ogden, J.G., Brown, K.A., (1984).- Soil-Water Interactions and Discussion. Philosophical Transaction of the Royal Society (305): 393-407. doi: 0.1098/rstb.1984.0066.
- Corceci, G., Boschetti, T., Mussi, M., Lameli, C. H., Mucchino, C. & Barbieri, M. (2005).- New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochemical Journal* 39: 547-571.
- Giggenbach W. F., Gofiantini R., Jangi B. L.y Truesdell A. H., (1983b).- Isotopic and chemical composition of Parbati Valley geothermal discharges, NW-Himalaya, India. *Geothermics* (12): 199- 222.
- Giggenbach, W. F., (1988).- Geothermal solute equilibria; derivation of Na-K-Ma-Ca geoindicators. *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.
- Shigeno, H. & ABE, K. (1983) - B-C1 geochemistry applied to geothermal fluids in Japan, especially as an indicator for deep-rooted hydrothermal systems. En *International Symposium on Water-Rock Interaction*, 4<sup>o</sup>, Misasa 1983. Extended Abstr. 437-440.