

ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS MANIFESTACIONES GEOTERMALES EN LA ZONA DE TITIRE, MOQUEGUA

Vicentina Cruz 1, Koji Matsuda 2

¹INGEMMET, Av. Canadá N° 1470, San Borja Lima 41, Perú, Apartado 889 (vcruz@ingemmet.gob.pe, vcruz24@hotmail.com).

²West 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 Titire (ZGT) está ubicada en el altiplano de los Andes, al SO del poblado de Titire, distrito de San Cristobal, provincia de Mariscal Nieto, en el Departamento de Moquegua. La ZGT se encuentra a una altitud de 4 000 msnm en el valle del río Asuntuya, circundado por una cadena de montañas volcánicas. Está conformada por las manifestaciones termales de las zonas de Puente Bello, Pampa Vilaje y Quebrada Umajaeso (Fig.1).

Las manifestaciones termales de Puente Bello se localizan a 3Km al SO del centro poblado de Titire, considerada patrimonio cultural del país. Estas manifestaciones emergen en el curso del río Asuntuya con abundante vapor de agua que salen a presión, cuyas temperaturas superan los 80°C. En el sector SO se observa numerosas descargas, la más grande emerge en medio del río. Las rocas en la orilla están cubiertas por precipitados de sales de diferentes tonalidades. No hay presencia de vegetación, en el paisaje circundante existen aves (águilas, loros, gallinazo cabeza roja, tórtolas y vizcachas). Las temperaturas mínimas ambientales en la zona son inferiores a 0°C, mientras que las máximas registradas no superan los 13°C (SENAMHI, 2009, fuente: www.senamhi.gob.pe).

La zona de Pampa Vilaje cubre un área aproximada de 0.5 km² a 4420 msnm. Localizada a 4 km al SE del centro poblado de Titire y Puente Bello en la margen derecha de la quebrada del mismo nombre, se caracteriza por presentar numerosas fuentes termales, con capas delgadas de precipitados de sínter calcáreo de color blanquecino y de textura porosa, formando pequeños montículos de cerca de 20 m de largo, en forma de cresta y lineal de tendencia SE, con manifestaciones de agua caliente (Fig. 2).

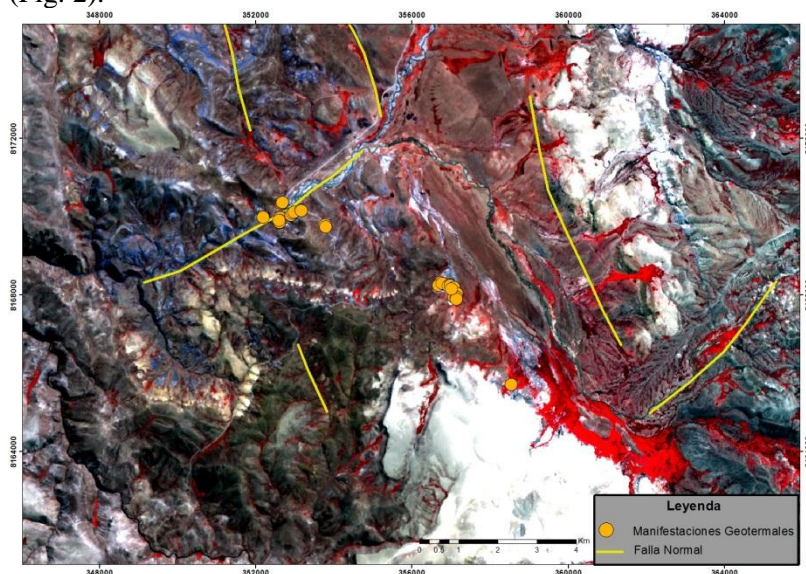


Fig. 1. Mapa de localización de fuentes termales y fallas en la ZGT.



Fig. 2. Puente Bello y Pampa Vilaje.

Los objetivos del presente estudio, son: (a) realizar una caracterización química e isotópica de las manifestaciones geotermiales superficiales de la zona de estudio; (b) identificar el origen del agua geotermal utilizando isótopos estables (oxígeno-18 y deuterio); y (c) realizar la estimación de la temperatura del reservorio.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La ZGT se encuentra circundada por una cadena de montañas, constituidas por rocas volcano-sedimentarias de la Formación Maure (Galdós & Ticona, 2000). En los alrededores de la zona de Puente Bello se pueden observar estos afloramientos, cuya facie sedimentaria esta constituida de limoarcillitas, areniscas, conglomerados (con clastos volcánicos redondeados a subangulosos) y calizas lacustrinas de color marrón. Las manifestaciones de Pampa Vilaje y Umajaeso emergen en zona de bofedal y depósitos aluviales, compuestos principalmente por una matriz arenolimososa, con clastos que van desde los subangulosos a subredondeados.

Asimismo, en el sector oeste aflora la facie volcánica del Grupo Maure (cerros de Llocollo, Jancocollopatata, Huilacollo), compuesto de niveles andesíticos porfiríticos y afaníticos (niveles de lava), con intercalaciones de niveles tobáceos de lapilli con cuarzo, biotita y pómez. Al norte de la ZGT, en la zona de Jayujayune, afloran areniscas cuarzosas de la Formación Hualhuani (Rodríguez, et al., 2000; Galdós & Ticona, 2000).

La ZGT se encuentra afectada por fallas de orientación NO-SE y pliegues que forman sinclinales y anticlinales que afectan a las rocas sedimentarias. Este control de rumbo andino (Fig. 2), es el principal responsable de la surgencia de aguas termales en la zona de Pampa Vilaje y Umajaeso, que se encuentran alineadas a lo largo de una estructura de dirección NO-SE. Las fuentes que surgen en depósitos aluviales y en algunas fracturas de lavas andesíticas del Grupo Maure. En Puente Bello las fuentes surgen a lo largo del río controlado por una falla de rumbo NE-SO.

La actividad hidrotermal que existe en la ZGT ha ocasionado la formación de sínter de silicio y calcáreo, originando diversas formas de surgencia. En algunos sectores se pueden observar surgencias a manera de torres. Estas formaciones se encuentran fuertemente fracturadas, que se derrumban formando pequeñas cavernas por las cuales discurre el río Usuntuya -Titire.

RESULTADOS

La composición química de las aguas termales de Puente Bello se caracterizan por presentar iones predominantes de cloruro (alrededor de 5400 mg/L) y sodio (alrededor de 3800 mg/L), con temperatura de 83°C, pH 7 y conductividad eléctrica (CE) 16.5 mS/cm (Tabla 01).

En la quebrada Pampa Vilaje las fuentes presentan temperaturas que varían entre 51 a 67.8 °C, con pH 7 y CE 30.6 mS/cm (Tabla 01). Con respecto a la composición química (Tabla 01) se observa elevada concentración en los iones cloruro (11360 mg/L) y sodio (7179 mg/L). Esta característica posiblemente esté asociada al bajo caudal del agua que concentra los iones en superficie por precipitación; debido a la evaporación natural o posiblemente asociado a un acuífero superficial, afectado por factores meteorológicos propios de la zona.

La fuente Umajaeso presenta una temperatura de 55 °C. El agua sube a una piscina natural con un caudal alrededor de 25 l/m. Este manantial térmico no tiene depósitos minerales asociados ni se observan depósitos con alteración hidrotermal. El balance iónico de los resultados analíticos varía entre 3 a 4 %, siendo aceptables.

Tabla 01. Resultados de la composición química de las fuentes termales de la ZGT.

Fuente	Código	Fecha	Temp °C	pH	Cond µS/cm	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	HCO ₃ mg/L	SiO ₂ mg/L	B mg/L	As mg/L	Sr mg/L	Mn mg/L	18O ‰	D ‰
Puente Bello	PUB	04/07/2010	83.6	6.97	16770	12	3712	207	288	56	5209	537	832	67	64	2	10	1.2		
Pampa Vilaje 4	PAV	02/09/2010	67.80	7	30600	30	7179	582	247	26	11360	559	686	142	161				-11	-115
Titire 6	TIT6	02/09/2010	82.90	7	16390	12	3928	200	273	56	5413	976	736	59	71				-15	-126

CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS TERMALES

Mediante el análisis de Cl , SO_4 y HCO_3 de las aguas termales se puede inferir el origen de los fluidos y los procesos que estos hayan intervenido durante su ascenso a la superficie. En el diagrama de Giggenbach (1988) las aguas de las fuentes termales caen en el campo de las aguas cloruradas alcalinas neutras (aguas maduras) (Figs. 3 y 4), que muestra que las aguas son el producto final del equilibrio entre agua y roca. El contenido relativo de Cl , SO_4 y HCO_3 y el diagrama de Langelier (Figs. 3 y 4) entregan una primera clasificación para las aguas termales de la ZGT y permite ubicarlas dentro de un sistema geotermal maduro, del tipo sulfato-clorurado alcalino.

El origen de los aniones Cl , SO_4 y HCO_3 se puede asociar a la presencia de HCl , SO_2 y CO_2 respectivamente. Componentes cuyo origen magmático permite inferir la evolución de aguas inmaduras, ácidas y oxidadas a aguas maduras y neutras (Giggenbach, 1997). Además, se puede indicar que en estas aguas profundas existe una reactividad casi nula de H_2S y CO_2 , lo que impide la formación de SO_4 y HCO_3 . La ausencia de bicarbonato y sulfato permite restringir a las aguas geotermales al vértice de Cl (Fig. 3), ya que durante la separación de fases, el S se incorpora a la fase vapor mientras que el Cl tiende a quedarse en el líquido. Esta separación de fases aumenta el pH de las aguas por lo que en el extremo más cercano al Cl del diagrama se encuentran aguas cloruradas neutras.

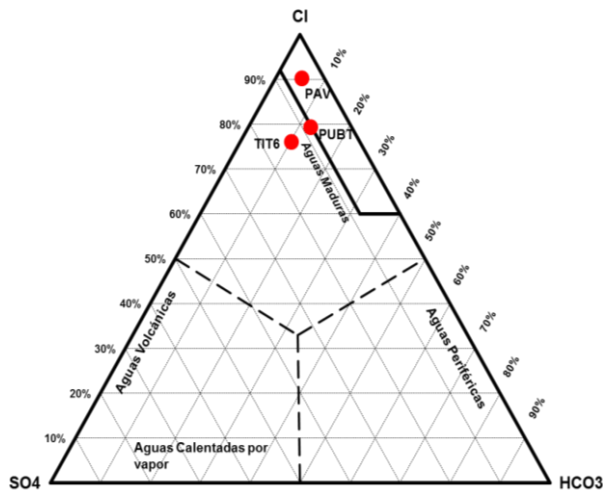


Fig. 3. Diagrama ternario (Giggenbach, 1988)

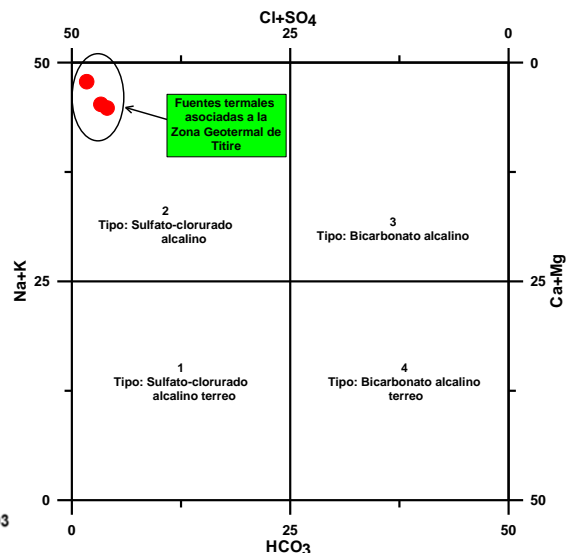


Fig. 4. Diagrama de Langelier-Ludwig

TRAZADORES QUÍMICOS

La composición relativa Cl-B-Li utilizada como trazador geoquímico, representada en la figura 5, señala un origen común para las aguas de la ZGT, con predominio de la especie clorurada, debido a la absorción de vapores magmáticos de baja proporción B/Cl , ya que los fluidos provendrían desde un sistema hidrotermal viejo y que estos migrarían desde la roca vieja del basamento.

Asimismo, la baja proporción de la razón B/Cl (0.04), indicaría que en etapas tempranas de calentamiento en el sistema, el B debido a la alta volatilidad (al igual que As , Sb y Hg) aun permanece en su forma volátil incluso a bajas temperaturas, siendo probablemente expelido durante los primeros estados de calentamiento del sistema. La figura 6 muestra que las aguas de la ZGT estarían reaccionando con rocas volcánicas del Neógeno y sedimentarias a niveles profundos, evidenciándose en la zona intercalaciones de rocas volcánicas del grupo Maure y sedimentarias de la Formación Hualhuani. Asimismo, durante el flujo lateral de los fluidos termales desde Pampa Vilaje hacia la zona de Puente Bello (Fig. 6), el B podría estar siendo absorbido por algún tipo de arcilla, lo que hace que la proporción B/Cl sea baja.

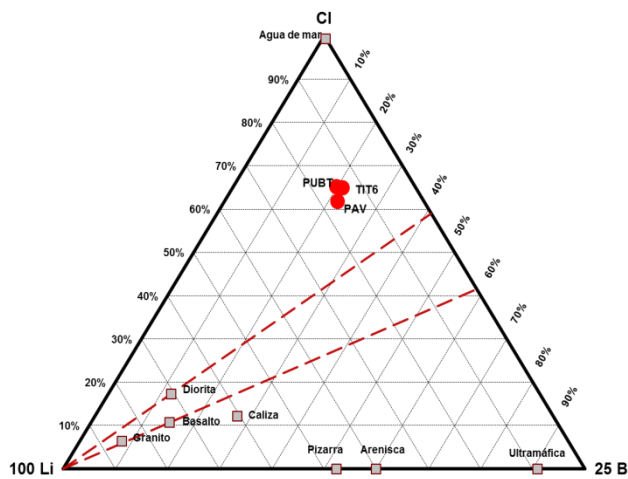


Fig. 5. Diagrama ternario Cl-Li-B.

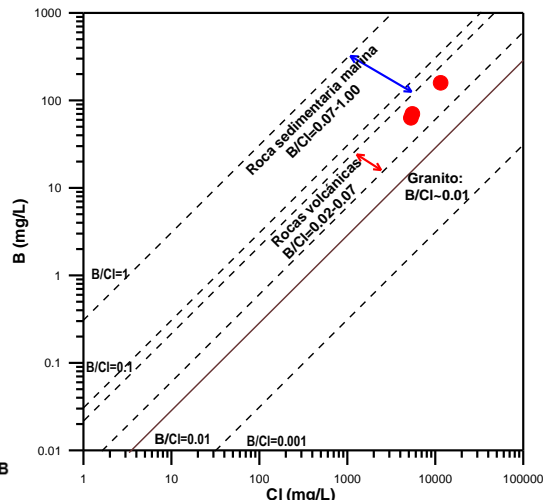


Fig. 6. Diagrama Boro vs Cloruro.

GEOINDICADOR DE NA-K- MG

Mediante el diagrama ternario Mg-Na-K de Giggenbach (1991a), (Fig. 7) se determinó el grado de equilibrio de los fluidos con la roca de caja para las aguas termales de la ZGT. En el diagrama se observa que las aguas termales en estudio logran alcanzar el equilibrio parcial con tendencia hacia el equilibrio total. Asimismo, el diagrama señala una tendencia lineal en dirección a la temperatura de equilibrio Na/K del reservorio ya sea por dilución o mezcla entre 180 a 220 °C.

El geoindicador Na-K/Mg-Ca (Fig. 8) muestra que las aguas de la ZGT presentan una tendencia a la línea de equilibrio. La de mayor tendencia son las aguas de la Pampa Vilaje. Haciendo una proyección vertical a la línea de equilibrio, el líquido está expuesto a temperaturas elevadas entre 200 y 220°C. Mientras que las aguas de Puente Bello presentan menor temperatura, entre 180-200°C, posiblemente por la mezcla con las aguas del río Asuntuya-Titire.

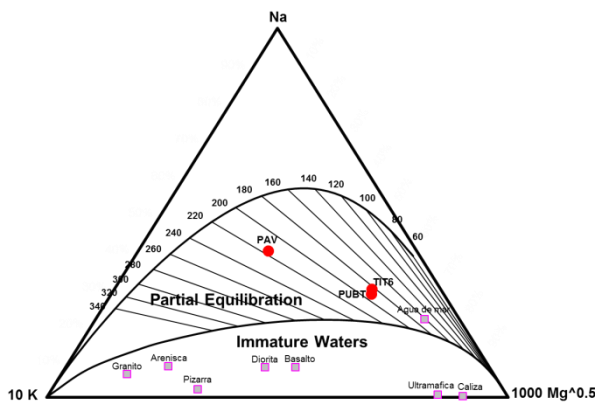


Fig.7. Diagrama ternario (Giggenbach, 1991a)

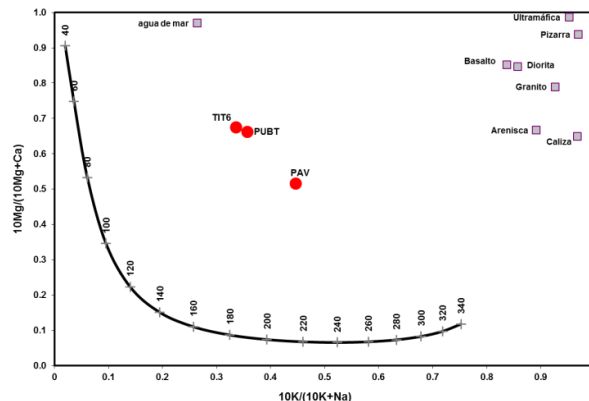


Fig. 8. Grafica Na-K-Ca-Mg (Giggenbach, 1988)

MODELO DE MEZCLA

El modelo de mezcla sílice-entalpia (Fournier, 1977; Fig. 9) muestra que las fuentes termales de la ZGT alcanzan temperaturas desde 106 a 225°C respectivamente. También podemos notar que las aguas termales de Puente Bello se ubican sobre la línea de solubilidad de cuarzo, y presentan menor entalpia. Sin embargo, en superficie estas aguas presentan mayor temperatura que las fuentes de Pampa Vilaje. Esto explicaría que los fluidos geotermales en la zona de Puente Bello se mezclan con aguas bastante frías en un acuífero formado a nivel superficial, tal vez influenciado por las aguas del río Asuntuya-Titire.

RESULTADO ISOTÓPICO

Los resultados del análisis isotópico de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de la ZGT han sido graficados en el diagrama $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 10), tomándose como referencia la Línea Meteorica Local (Cortecci et al., 2005). En el diagrama se observa que las aguas de la ZGT presentan una ligera tendencia lineal hacia las aguas con componentes andesíticos, por lo tanto podríamos indicar que las aguas del reservorio geotermal se originan de la mezcla agua magmática y agua meteorica, siendo este último el componente mayoritario.

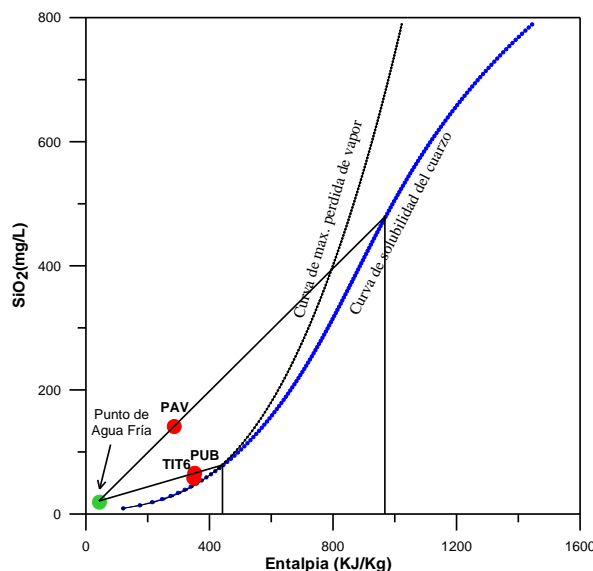


Fig. 9. SiO_2 vs. Entalpia.

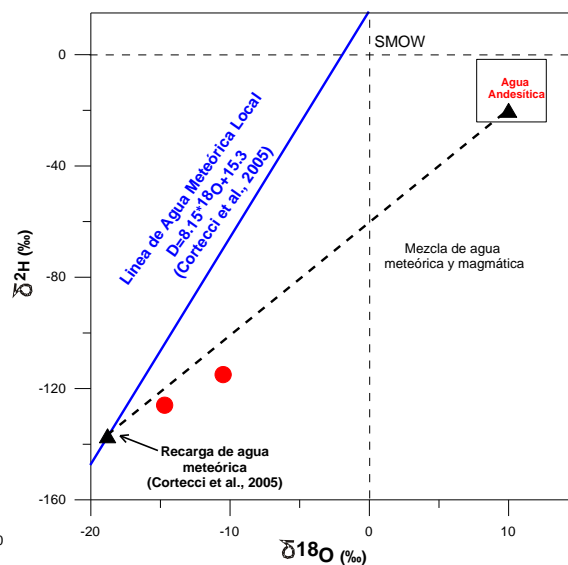


Fig. 10. $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$.

CONCLUSIONES

Según nuestros resultados las aguas termales de la ZGT son del tipo clorurada- alcalina. La geotermometría química en fase líquida estima la temperatura en profundidad mayor a 180°C . 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 meteorica y magmatica, siendo el principal componente mayoritario el agua meteorica. Por lo tanto, el recurso que se presenta en la ZGT puede ser utilizado para generación de energía geotérmica, en una planta de ciclo combinado y para usos directos como la balneología, calefacción, acuicultura, etc.

REFERENCIAS

1. Cortecci, 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.
2. Fournier, R.O. (1977) - Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5(1-4): 41-50.
3. Giggenbach, W. F., (1988).- Geothermal solute equilibria; derivation of Na-K-Ma-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2749-2765.
4. Galdos, J. & Ticona, P. (2000) - Mapa Geológico del Cuadrángulo de Huaitire, escala 1:50,000. Lima. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 4 mapas.
5. Giggenbach, W.F., (1991a).- Chemical techniques in geothermal exploration. En: D'Amore, F. (Ed.), *Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*. UNITAR/UNDP, CSER, Rome, Italy, pp 119-144.
6. Giggenbach, W. (1997) - The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. En: Barnes, H.L. (ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, (3rd ed.) New York: Wiley, pp. 737-790.
7. Rodríguez, R.; Palomino, F. & Cuellar, E. (2000) - Mapa geológico del Cuadrángulo de Pichacani, escala 1:50,000. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 4 mapas.

Estudios Geoquímicos de las Manifestaciones Geotermales en la Zona de Titre, Moquegua

Vicentina CRUZ¹, Koji MATSUDA²



¹Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Av. Canadá 1470, San Borja, Lima (Perú), vcruz@ingemmet.gob.pe
²West Japan Engineering, INC Space Cube Bldg 2F, 7-11, 1-Chome, Nanyoshi Chuo-Ku, Fukuoka, Japan 816-0003, Matda@wjec.co.jp

INTRODUCCIÓN

La Zona Geotermal de Titre (ZGT) está ubicada en el altiplano de los Andes, al SO-SE del poblado de Titre, distrito de San Cristóbal, provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua a una altitud de 4 000 msnm en el valle del río Asuntuya-Titre. Está conformada por las manifestaciones termales de las zonas de Puente Bello, Pampa Viaje y Quebrada Umajaezo (Fig. 1).

Las manifestaciones termales de Puente Bello son consideradas patrimonio cultural del país, estas emergen en el curso del río Titre con abundante vapor de agua que salen a presión, cuyas temperaturas superan los 80°C. Mientras que en la zona de Pampa Viaje (aprox. de 0.5 km²) las manifestaciones termales emergen con temperaturas entre 51 a 67.8°C y en la quebrada Umajaezo la única fuente presenta temperatura de 55°C.

RASGOS GEOLÓGICOS

La ZGT se encuentra circundada por una cadena de montañas, constituidas por rocas volcánicas sedimentarias del Grupo Maure, donde su facie sedimentaria está constituida de limarcillitas, areniscas, conglomerados y calizas lacustrinas de color marrón (Fig. 2). Además, se encuentra afectada por fallas de orientación NO-SE y NE-SO. Este control de rumbo andino (Fig. 3), es el principal responsable de la surgencia de aguas termales en la zona de Pampa Viaje y Umajaezo, que se encuentran alineadas a lo largo de una de estas estructuras.

La actividad hidrotermal que existe en la ZGT ha ocasionado la formación de sinte de sílice y calcáreo, originando diversas formas de surgencia. En algunos sectores se pueden observar surgencias a manera de torres. Estas formaciones se encuentran fuertemente fracturadas, que se demuestran formando pequeñas cavemas por las cuales discurre el río Titre (Fig. 4).

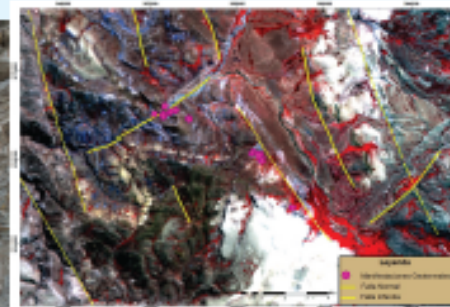


Fig. 2: Alcance de areniscas del Grupo Maure, en la zona del C° Pacifico

Fig. 3: Mapa de localización de fuentes termales y sistema de fallas en la ZGT.

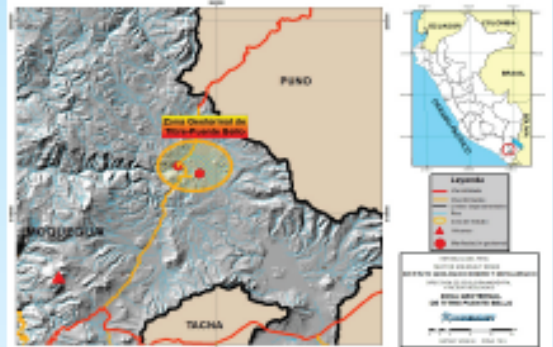


Fig. 1: Mapa de localización de fuentes termales y fallas en la ZGT.



Fig. 4: Surgencia de torres termales en la ZGT.

Geoindicadores: Mediante los geoindicadores Mg-Na-K de Giggenbach (1991a) y Na-K/Mg-Ca (Figs. 8 y 9) se determinaron que el grado de equilibrio de los fluidos con la roca es parcial. Asimismo, los diagramas señalan una tendencia lineal en dirección a la temperatura de equilibrio Na/K del reservorio y a sea por dilución o mezcla entre 180 a 220 °C (Fig. 10).

RESULTADOS

Clasificación: En el diagrama de Giggenbach (1988) y de Langelier (Fig. 5), las aguas de las fuentes termales caen en el campo de las aguas cloruradas alcalinas neutras (aguas maduras), que muestra que son el producto final del equilibrio entre agua y roca asociado a un sistema geotermal maduro.

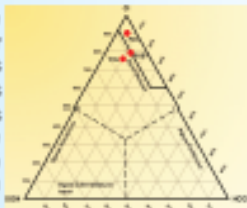


Fig. 5: Diagrama ternario (Giggenbach, 1988)

Trazadores Químicos: La composición relativa Cl-B-Li (Fig. 6), señala un origen común para las aguas de la ZGT, con predominio de la especie clorurada, debido a la absorción de vapores magmáticos de baja proporción B/Cl, cuyo origen de los fluidos corresponderían a un sistema hidrotermal viejo. Así como, estarían reaccionando con rocas volcánicas del Neógeno y sedimentarias a niveles profundos.

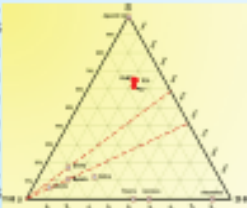


Fig. 6: Diagrama Cl-B-Li

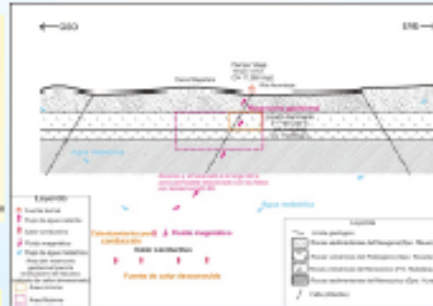


Fig. 7: Modelo conceptual de circulación de fluidos en la Zona Geotermal de Titre-Puente Bello.

Modelo conceptual: La fuente de calor en la ZGT estaría relacionado al calor conductivo asociado a materiales magmáticos situados a nivel profundo de la corteza o posiblemente al calor conductivo de las rocas de intrusión (Fig. 7).

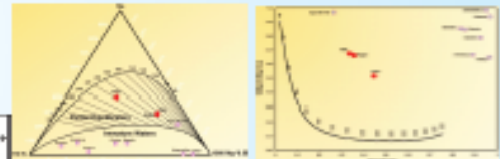


Fig. 8: Diagrama ternario (Giggenbach, 1991a)

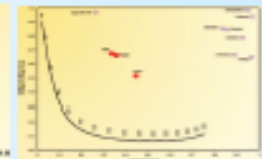


Fig. 9: Gráfica Na-K/Mg (Giggenbach, 1991a)

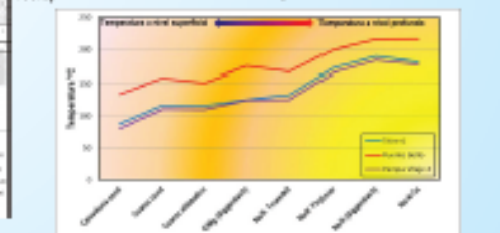


Fig. 10: Temperaturas geotermicas de aguas termales de la ZGT (Poussif, 1974; Fournier, 1972; Giggenbach, 1988).

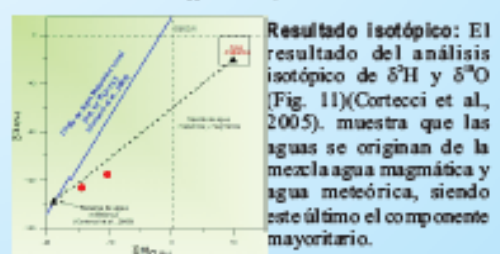


Fig. 11: δD vs δ¹⁸O.

Resultado isotópico: El resultado del análisis isotópico de δ²H y δ¹⁸O (Fig. 11) (Cortecci et al., 2005), muestra que las aguas se originan de la mezcla agua magmática y agua meteórica, siendo este último el componente mayoritario.

CONCLUSIONES

Los resultados de la caracterización geoquímica de las aguas termales de la ZGT, son del tipo clorurada- alcalina. La geoquímica química en fase líquida estima la temperatura en profundidad mayor a 180°C. Finalmente, los isótopos estables δ¹⁸O y δ²H, indican que las aguas termales se originan por la mezcla entre agua meteórica y magmática, siendo el principal componente mayoritario el agua meteórica. Por lo tanto, el recurso que se presenta en la ZGT puede ser utilizado para generación de energía geotérmica, en una planta de ciclo combinado y para usos directos como la balneología, calefacción, acuicultura, etc.

REFERENCIAS

- Cortecci, F., Bevilacqua, T., Manti, M., Lazzari, C., H. M. Uchiro, C. S. Bellini (2005) - New chemical and mineralogical data on water from the Titre geothermal field, southern Chile. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 2749-2758.
- Fournier, R. O. (1977) - Chemical geothermometry: a review. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41, 131-148.
- Giggenbach, W. F. (1988) - Geothermometry: a review. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, 2749-2758.
- Giggenbach, W. F. (1991a) - Mapa Geológico del Cuadro Geológico Huelmo, escala 1:50,000. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Iquitos.
- Giggenbach, W. F. (1991b) - Chemical techniques in geothermal exploration. In: Choussif, F. (Ed.), *Applications of Geothermal Energy to the Environment*. Elsevier, Amsterdam, 109-144.
- Giggenbach, W. F. (1997) - The geochemistry of fluid inclusions in hydrothermal systems. In: Barnes, H. L. (ed.), *Handbook of Strontium Isotope Geochemistry*, 2nd ed., New York: Wiley, pp. 727-756.
- Poussif, F., Fournier, R. O. (1974) - Mapa geológico del Cuadro Geológico de Pichacani, escala 1:50,000. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Iquitos.