

MARCO NEOTECTÓNICO DE LAS ÁREAS DE RECURSOS GEOTÉRMICOS DEL SUR DEL PERÚ

J. Macharé¹ & M. Coolbaugh²

¹ Exploandes SAC, ² University of Nevada, Reno

La energía geotérmica se presenta como una fuente alternativa de energía en el Perú. La identificación de las zonas con mayor potencial requiere de programas de exploración que se inician con la evaluación de las manifestaciones termales superficiales y pasan luego a un buen reconocimiento geológico y estructural, para seguir con prospección geofísica y la perforación de blancos seleccionados. Aquí se propone la influencia de las fracturas profundas y fallas activas regionales y distritales en la localización de zonas de interés en el extremo sur del Perú.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Varios estudios recientes han considerado la influencia de las estructuras tectónicas en la localización y desarrollo de áreas de recursos geotérmicos ARGs (Faulds et al., 2003; Coolbaugh et al., 2005; Faulds & Melosh, 2008, entre otros). Fracturas y fallas de distintos tamaños y en diversos arreglos espaciales constituyen canales de circulación de fluidos en la corteza, favoreciendo así la ubicación de yacimientos minerales hidrotermales asociados con sistemas geotermales fósiles y de recursos energéticos asociados con sistemas activos (McClay, 1987).

En el Perú, varios estudios realizados desde 1975 y que han involucrado instituciones nacionales como MINEROPERÚ, INIE, INGEMMET, ELECTROPERU, CENERGÍA, IPEN con cooperantes como Geothermal Energy Research (Japón), Aquater y CESEN (Italia), British Geological Survey (Reino Unido), Instituto de Investigaciones Eléctricas (México) y la Organización Internacional de Energía Atómica, han permitido reconocer 6 regiones geotermales: I - Cajamarca, II - Huaraz, III - Churín, IV - Central, V - Cadena de conos volcánicos y VI - Cuzco-Puno (Díaz, s/f). La zona meridional de la región V, que se extiende sobre la Cordillera Occidental entre Arequipa y Tacna, ha sido y es de particular interés, como lo muestran los estudios efectuados por el INGEMMET con la cooperación japonesa reportados en 2007.

Este estudio se hizo con el objetivo de establecer el contexto estructural en que se desarrollan las ARGs del Sur del Perú, así como comprender las relaciones entre el tamaño y potencial de las mencionadas áreas y las características de las estructuras a las que se asocian. Si bien un ARG está legalmente definida como “cualquier superficie en general, en la cual subyacen o se presume recursos geotérmicos” (Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos, Ley N° 26848, de 1997), técnicamente ese término se refiere a una zona que puede albergar un potencial de generación eléctrica, cuyo desarrollo resulte económico.

MÉTODOS Y COMPILACIÓN

Se han utilizado dos mapas publicados a fin de compilar adecuadamente la cartografía de las fallas con actividad reciente: el *Map of Active Faults of Peru* (Macharé et al. 2003) y el Mapa Neotectónico del Perú 2008 (Macharé et al., 2009). También fueron consultados los mapas y boletines de cartografía regional 1:100,000 publicados por el INGEMMET, así como los trabajos recientes de L. Audin, C. Benavente y asociados, publicados desde 2005. Adicionalmente, se efectuó la interpretación estructural de 3 franjas de imágenes Landsat a escala 1:250,000. Se usó la base de datos de Fuentes Termales del Perú (INGEMMET, 2008) que provee la información fundamental sobre localización, temperaturas y análisis químicos de las manifestaciones geotermales (aguas, lodos, geysers).

Finalmente, se incluyeron nuevas informaciones estructurales y geotermales sobre la base de observaciones de campo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha confirmado que el Sistema de Fallas de Incapuquio (SFI), de azimut 130° y segmentos buzando tanto al noreste como al suroeste, absorbe la mayor parte de la deformación frágil-dúctil de la corteza en el extremo sur del Perú, desde el Cretáceo hasta la actualidad, tal como habían notado previamente otros autores (Jacay et al., 2006; Mamani, 2009). Este sistema separa la zona de Pampas costeras, al suroeste de Meseta de volcanes activos de la Cordillera Occidental, al noreste. Esto constituye un primer control, ya que tanto las fuentes termales como las áreas de mayor importancia geotérmica, se concentran en esta última zona. La zona de Pampas costeras, que tiene un basamento precámbrico y mesozoico, sin evidencias volcánicas recientes, está exento de manifestaciones geotermales actuales, mientras éstas son numerosas e intensas en la zona del arco volcánico actual.

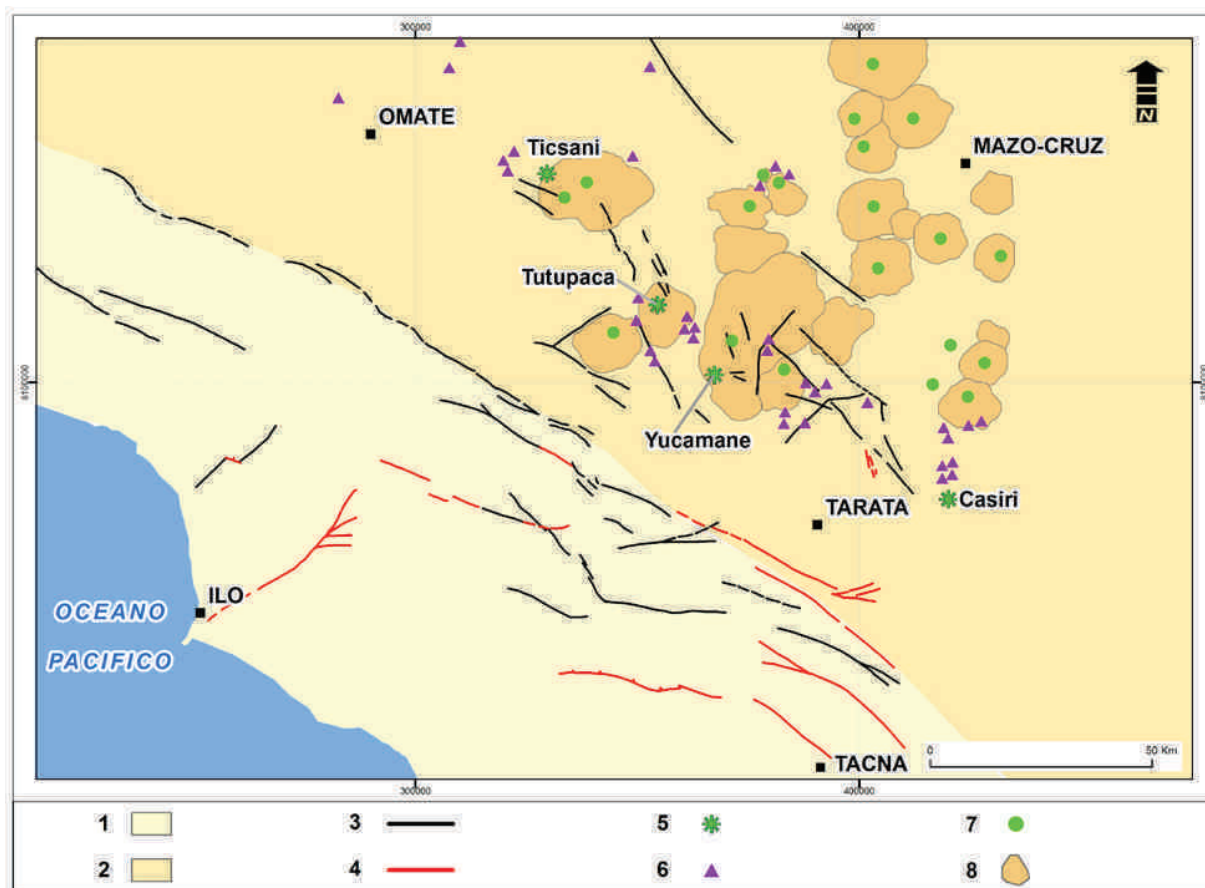


Figura 1. Croquis estructural del extremo sur del Perú.

1. Zona de Pampas costeras, 2. Arco magmático cenozoico, 3. Fallas cuaternarias y lineamientos mayores, 4. Segmentos activos reconocidos, 5. Volcanes con actividad histórica y actual, 6. Fuentes termales, 7. Centros volcánicos cuaternarios, 8. Aparatos volcánicos cuaternarios. Nueva cartografía en el arco volcánico; información preexistente en la costa, de los mapas mencionados en el texto.

El arco volcánico se instaló constituyendo la Cordillera Occidental luego de la reorganización del Eoceno tardío (42 Ma) (Dalmaryrac et al, 1980). Desde entonces, se han sucedido etapas de tectonismo, orogenia, y volcanismo efusivo, extrusivo y explosivo, cuya expansión máxima ocurrió en el Mioceno, sobrepasando 150 km de ancho hasta el borde del Altiplano (Sébrier et al, 1991). Dentro del este arco, los grupos de fuentes termales con altas

temperaturas (70 - 100°C) se encuentran distribuidos en la parte suroccidental, en una franja de dirección N140° a N130°E y unos 60 km de ancho, que comprende los volcanes activos Ticsani, Tutupaca, Yucamane/San Pedro, y Casiri. Allí también se incluyen centros volcánicos cuaternarios, bastante afectados por erosión glacial y sin actividad posterior a la última glaciación.

Tanto en los dominios de volcanes activos como de aquellos extintos, el control estructural principal de las manifestaciones geotermales está constituido por una serie de fallas normales de dirección “andina” de la región (N130°E) a ligeramente oblicuas (N150°E) que forman grabens de entre 1 y 5 km de ancho, y fallas transversales (N40° a N50°). Estas estructuras, aunque su actividad no ha sido aún fechada, muestran geoformas frescas como escarpes no regularizados, alineamientos y quiebres de cursos de agua que tienden a indicar movimientos cuaternarios, quizás holocénicos. Su dirección y desplazamientos normales están más en concordancia con esfuerzos tensionales de dirección NE, distinta a aquella NS identificada y modelada para las fallas cuaternarias y activas del Sur del Perú, por Sébrier et al. (1985). En este caso, el análisis geométrico no permite discernir sobre el tema, y se requieren estudios enfocados en la cinemática real de estas fallas. Para ello son útiles los análisis de microestructuras, para los movimientos antiguos, y el análisis de mecanismos focales de sismos, para movimientos contemporáneos.

CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA

Las zonas con potencial geotérmico en el Perú se hayan distribuidas en gran parte del territorio, en particular sobre la Cordillera Occidental y el Altiplano Sur del país. Dichas zonas, definidas como “regiones geotermales” están asociadas con provincias geológicas particulares, que quedan por ser mejor determinadas y caracterizadas.

Las manifestaciones del extremo sur del Perú presentan mayores concentraciones, mayor extensión y más altas temperaturas que en las otras regiones. Por eso han atraído la atención de empresas y de programas de cooperación para el desarrollo (ej. JICA) interesados en evaluar el posible desarrollo de campos geotérmicos con fines de producción de energía eléctrica. Dichas manifestaciones aparecen relacionadas con campos volcánicos cuaternarios – algunos de ellos con centros activos hasta hoy – y con sistemas de fallas regionales y distritales que controlan su ubicación.

La energía geotérmica, como fuente de generación eléctrica, pertenece al grupo de energías renovables, por insumir fluidos hídricos que son reinyectados al ciclo hidrológico; al de energías limpias, por no emitir grandes volúmenes de efluentes potencialmente dañinos; y no interfiere con el suministro y aprovechamiento de las aguas superficiales ni las de napas subterráneas someras, pues emplea fluidos de gran profundidad (2,000 a 4,000 m), de los que extrae el calor. Los costos mayores corresponden a aquellos de instalación de las centrales de generación, por lo tanto, el precio de la energía es decreciente en el tiempo. Además, en el Perú existe ya un marco legal claro para la actividad. Por lo tanto, su desarrollo estará en función de políticas nacionales adecuadas, agilización de procesos de autorizaciones de exploración y una comunicación efectiva a las comunidades involucradas.

REFERENCIAS

- Aguinaga J. (2006).- Situación de la Geotermia en el Perú. Presentación en Reunión Ministerio de Energía y Minas, Mayo 2006.
- Audin, L., David, C., Hall, S., Farber, D. and Hérial, G. (2006).- Geomorphic evidences of recent tectonic activity in the forearc, southern Peru. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* v.61 n.4
- Benavente C. (2008).- Estratigrafía y neotectónica de la zona del piedemonte en el antearco del sur Peruano – Tacna. Tesis Ing. geólogo, Univ. Nac. San Antonio Abad, Cusco, 146 p.
- Coolbaugh, Mark F., Arehart, Greg B., Faulds, James E., and Garside, Larry J., 2005, Geothermal systems in the Great Basin, western United States: Modern analogues to the roles of magmatism, structure, and regional tectonics in the formation of gold deposits, *in* Rhoden, H.N., Steininger, R.C., and Vikre, P.G., eds., Geological Society of Nevada Symposium 2005: Window to the World, Reno, Nevada, May 2005, p. 1063–1081.

- Dalmayrac, B., Laubacher, G. Marocco, R. (1980).- Géologie des Andes Péruviennes. Caractères généraux de l'évolution géologique des Andes péruviennes : *Travaux et Documents ORSTOM*. v.122, 501p.
- Díaz G. (s/f).- Geothermal resources in Peru. Unknown reference, 14 p.
- Díaz G. (1988).- Potential for developing small geothermal power stations in Peru. *Geothermics*, 17 (2-3), 381-390
- Faulds J.E. & Glenn Melosh G. (2008).- A Preliminary Structural Model for the Blue Mountain Geothermal Field, Humboldt County, Nevada. *Geothermal Research Council Transactions*, Vol. 32.
- Faulds J.E., Larry J. Garside L.J. & Oppliger G.L.(2003).- Structural Analysis of the Desert Peak-Brady Geothermal Fields, Northwestern Nevada: Implications for Understanding Linkages between Northeast-Trending Structures and Geothermal Reservoirs in the Humboldt Structural Zone. *Geothermal Resources. Council Transactions*, v. 27, pp. 859-864.
- Jacay, J., Semperé, T., Husson, L. & Pino, A. (2002).- Structural characteristics of the Incapuquio Fault System, southern Peru. Extended abstracts, 5° International Symposium on Andean Geodynamics 319-321, Toulouse.
- Macharé J., Fenton C.H., Machette M.N., Lavenu A., Costa C. & Richard L. Dart R.L. (2003).- Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Perú and its Offshore Region. *U.S. Geological Survey Open-File Report* 03-451, 74 p.
- Macharé J., Benavente C. & Audin L. (2009).- Síntesis descriptiva del Mapa Neotectónico del Perú 2008. *Bol. 40, Ser. C, INGEMMET*, 103 p.
- Mamani R. (2009).- El sistema de fallas Incapuquio: dinámica y relación con el magmatismo. Región Omate – Moquegua, sur del Perú. Tesis Ing. Univ. Nac. del Altiplano, Puno, 230 p.
- McClay K.R. (1987).- *The Mapping of Geological Structures*. Willey Pub. 168 p.
- Ministerio de Energía y Minas (2008).- Taller sobre resultados de los estudios de prefactibilidad de los campos geotérmicos de Calientes y Borateras, 15 enero 2008.
- Sebrier, M., Mercier, J.L., Mégard, F., Laubacher, G. and Carey-Gaihardis, E. (1985).- Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of south Peru: *Tectonics*, v. 7, pp. 739-780.
- Sebrier, M. and Soler, P., 1991, Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from Late Oligocene time to the present, in Harmon, R.S. and Rapela, C.W., eds, Andean magmatism and its tectonic setting, *Geological Society of America Special Paper*, v. 265, p. 259-276.