



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe) ISSN 0079-1091

## Cálculo del potencial geotérmico de la zona Paucarani Tacna, mediante el método volumétrico

Rosmary Flores Jacobo<sup>1</sup>, Diana Pajuelo Aparicio<sup>1</sup>, Gastón Ronald Yupa Paredes<sup>1</sup>,

INGEMMET<sup>1</sup>, Av., Canadá 1470 San Borja, Lima, Perú (rflores@ingemmet.gob.pe, dpajuelo@ingemmet.gob.pe, gyupa@ingemmet.gob.pe.)

### RESUMEN

El cálculo del potencial geotérmico se realizó utilizando el método volumétrico mediante la técnica de simulación de Montecarlo. Los parámetros para el cálculo se obtuvieron a partir de los estudios de geoquímica, hidrogeología, geología y geofísica. La información se procesó mediante distribución triangular constante utilizando el software Crystal Ball. Los cálculos se realizaron para un área mínima de 10km<sup>2</sup>, con un espesor de reservorio de 1000m y una temperatura mínima de 124°C. Los resultados obtenidos después de 10,000 iteraciones con el software, muestran una probabilidad de 62% para 72.03 MW eléctricos y las variables más sensibles considerados en la simulación son, la temperatura con 42.5% y el área geotermal considerada con 19.6%.

**PALABRAS CLAVE:** potencial geotérmico, Sistema geotérmico y modelo conceptual

### ABSTRACT

The calculation of the geothermal potential was made using the volumetric method through the Monte Carlo simulation technique. The parameters for the calculation were obtained from the geochemistry, hydrogeology, geology and geophysics studies. The information was processed by constant triangular distribution using the Crystal Ball software. The calculations were made for a minimum area of 10km<sup>2</sup>, with a reservoir thickness of 1000m and a minimum temperature of 124 ° C. The results obtained after 10,000 iter-

ations with the software, show a 62% probability for 72.03 MW and the most sensitive variables considered in the simulation are the temperature with 42.5% and the geothermal area considered with 19.6%.

### INTRODUCCIÓN

La región Tacna se encuentra dentro de la zona de volcanes activos en el sur del Perú, zona denominada como región geotermal 5 (Vargas & Cruz, 2010) catalogada como importante para exploración geotermal y de acuerdo a los estudios realizados (Plan Maestro, 2012) puede generar hasta 420MW de electricidad extraída sólo a partir recursos geotérmicos. Por lo tanto, se estima que la zona geotermal Paucarani, es de interés para la explotación geotermal. El sistema geotermal se encuentra en la cuenca del río Uchusuma al sur de Tacna (Figura 1) y los fluidos hidrotermales circulan por medio de rocas volcánicas del Mioceno al Holoceno (Grupo Maure, Formación Sencca, Formación Capillune, Grupo Barroso y volcanismo reciente) y descargan en superficie en forma de manantiales termales, suelos vaporizantes, fumarolas y pozas de lodo termal.

Los estudios geoquímicos estiman una temperatura en el reservorio promedio de 221°C de acuerdo a los geotermómetros y según los resultados de geofísica utilizando el método de magnetotelúrica, la roca reservorio podría estar representada por las rocas volcánicas del Grupo Maure estimando 1000 metros de espesor para el reservorio

geotérmico. Los resultados de los estudios en superficie son plasmados en un modelo conceptual (Figura 2) a partir de estos parámetros se procede al cálculo del potencial geotérmico, aplicando el método volumétrico mediante la técnica de simulación de Monte Carlo. El procedimiento de la metodología se realizó con el software Crystal Ball para estimar los megavatios que podría generar la zona geotermal Paucarani.

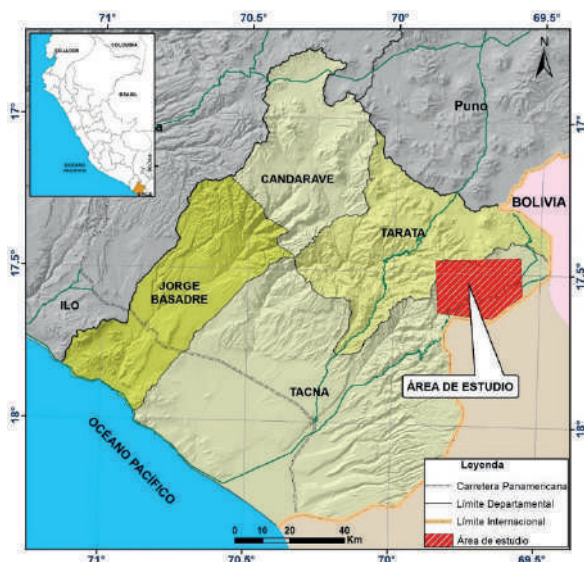


Figura 1. Ubicación de la zona Geotermal Paucarani - Tacna

## METODOLOGÍA

### Método Volumétrico

Es el primer método aplicado por la USGS en la evaluación de recursos en campos geotérmicos explotados en Estados Unidos (Muffler, 1978; Williams et al, 2008), es un modelo cuantitativo simple para evaluar reservas con mínima información del reservorio (Asturias, 2003) y consiste en el cálculo de la energía térmica almacenada en la roca que puede ser extraída de un reservorio geotermal y se estima la fracción que puede ser usada económicamente como energía útil por un periodo de tiempo, usualmente en décadas (Sarmiento et al., 2013). Además, este método se puede aplicar en cualquier entorno geológico, los parámetros requeridos pueden ser medidos o estimados. El cálculo de la energía térmica en la roca y fluido que puede ser extraído, se basa en un volumen definido: temperatura de reservorio y temperatura final, la cual consiste generalmente en la temperatura de abandono de los fluidos geotermales. El reservorio geotérmico puede presentarse como tipo líquido dominante, sin embargo

puede contener dos fases de vapor, agua o ambas, por lo cual es recomendable calcular las fases de forma separada (Ver más detalles en Sarmiento et al., 2013)

### Técnica de Simulación de Monte Carlo

Aplica una técnica de simulación probabilística de evaluación de reservas o recursos para medir los efectos de la incertidumbre, los parámetros reciben un rango de datos tomados al azar desde unos máximos a un mínimo, estos son seleccionados y calculados aleatoriamente. De acuerdo a la distribución de probabilidad, puede ser triangular o cuadrada (Asturias, 2003, Sarmiento et al., 2013) estos se resuelven a lo largo de muchas interacciones. Mediante la estimación de los parámetros se puede obtener el potencial de generación de energía eléctrica en MW. Cabe destacar que un recurso inferido o probable sin perforaciones exploratorias es subcomercial y presenta baja certeza, además se debe tener en cuenta que no toda la energía térmica será transformada en eléctrica los estudios superficiales se deben realizar bien detallados para afinar los objetivos de extracción del recurso geotérmico.

### Presentación de datos en la zona geotermal Paucarani

Luego de los resultados obtenidos a partir de los estudios superficiales fue posible definir la ubicación de la capa sello (Grupo Sencca) y delimitación de la zona de reservorio el cual se infirió como líquido dominante (Grupo Maure) del sistema geotermal Paucarani (Figura 2), la cual puede ser observada en una vista en planta mediante la identificación de la zona con mejor potencial geotérmico (Figura 3) de esta manera se pueden obtener los siguientes valores (Cuadro 1):

**Área:** Se estimó el área máxima en 20km<sup>2</sup>, y área mínima de 10km<sup>2</sup> fueron obtenidos a partir de los estudios de MT Figura 3.

**Espesor del reservorio:** Se calculó a partir de las resistividades del modelo conceptual geofísico considerando el techo del reservorio a 2400 msnm y la base a 1200 msnm, aproximadamente se estima 1000 m de espesor.

**Calor Específico de la roca:** No se tiene pozos perforados, por lo tanto, se ha estimado en base a otros estudios como Torres & Urquiza, 2013, un valor de 0.9 kJ/kg°C, este parámetro puede ser comparado con estudios futuros de perforación.

**Calor específico del fluido:** Se estimó para las temperaturas máximas y mínima, en las tablas de vapor, considerando el líquido una presión constante. Los valores: 4.2 KJ/kg°C y 4.8 KJ/kg°C.

**Porosidad:** Se estima un valor promedio del 10%, que es característico de yacimientos geotérmicos (Torres & Urquiza, 2013).

**Temperatura del Reservorio:** Se obtuvo a partir de los estudios de geoquímica una temperatura máxima por medio de los geotermómetros de sílice de aguas termales de 221°C, temperatura media de 180°C y temperatura mínima de 124°C.

**Temperatura de Abandono:** La temperatura de salida se asume 90°C, considerando aprovechar hasta en usos directos.

**Densidad de la Roca:** Se consideró como promedio 2300 kg/m<sup>3</sup> a partir de tablas de la UBC, teniendo en cuenta que la roca reservorio son volcánicos.

**Densidad del Fluido:** Se estimó para la temperatura media el valor de 926 kg/m<sup>3</sup> utilizando tablas (M, J, Moran, H, N, Shaphiro) y considerando el fluido en estado líquido a una presión constante.

**Factor de Recuperación:** Nathenson y Muffler (1975) proponen que el valor de Rf sea 0.25 (25%), para una porosidad del 10%.

**Eficiencia de Conversión:** Según Grant et al 1982, el calor que se encuentra por encima de los 150-200°C puede ser convertido con eficiencias del 10 al 20% (Grant et al 1982). Este cálculo se comprueba con la conversión de energía en función de la temperatura según Nathenson (USGS) y Bodvarsson (1974) que nos da un promedio de 10%.

**Vida económica:** El tiempo se estima en un periodo de vida de 25 años.

**Factor de Planta:** Se asume una disponibilidad de la planta durante todo el año del 90%.

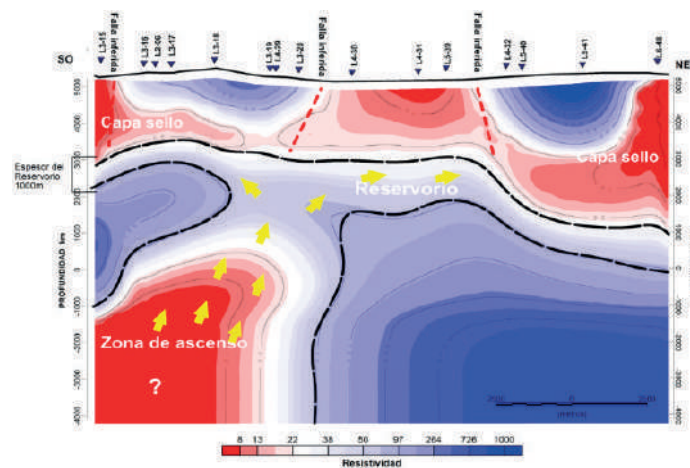


Figura 2. Modelo geofísico integrado donde se muestra la capa sello, el reservorio y la zona de ascenso del sistema geotermal Paucarani. Además, el espesor promedio del reservorio es de 1000m.

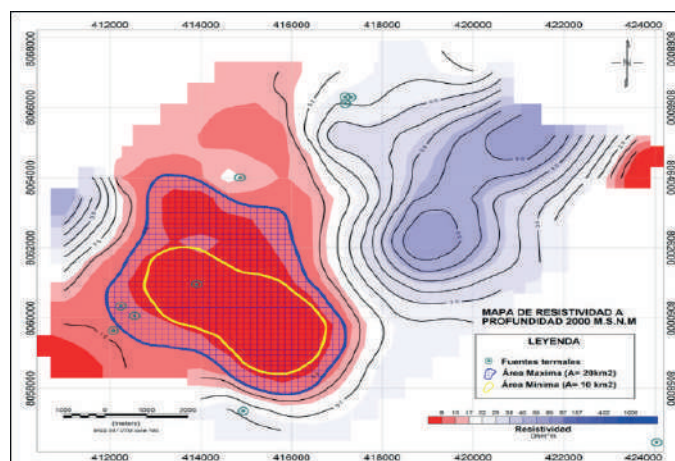


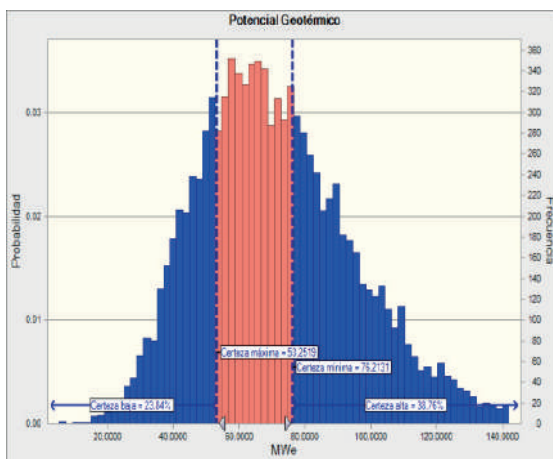
Figura 3. Principales áreas de interés geotérmico de la zona geotermal Paucarani, el área mínima con 10 km<sup>2</sup> es el de mayor interés a partir de la resistividad.

**Cuadro 1.** Valores utilizados para la estimación del potencial geotérmico de Paucarani.

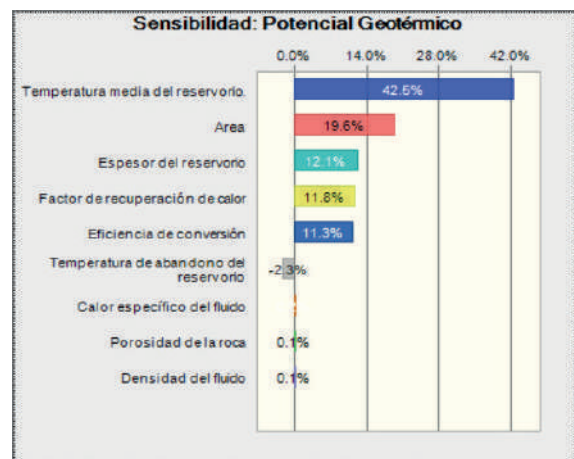
Parámetros	Simb.	Min		Max	Unidades
Área	A	10	18	20	km <sup>2</sup>
Espesor de Reservorio	h	800	1000	1200	m
Calor Específico de la Roca	Cr	0.9	0.9	0.9	kJ/kg deg(C)
Calor Específico del Fluido	Cf	4.2	4.2	4.8	kJ/kg deg(C)
Porosidad de la Roca	phi	0.1	0.1	0.1	
Temperatura Media del Reservorio	Ti	124	180	221	deg(C)
Temperatura de Abandono del Reservorio	Tf		90		deg(C)
Densidad de la Roca	rhorr	2200	2300	2400	kg/m <sup>3</sup>
Densidad del Fluido	rhof		926		kg/m <sup>3</sup>
Factor de Recuperación del Cal	Rf	0.1	0.15	0.1	adim
Eficiencia de Conversión	Ce	0.1	0.1	0.15	adim
Factor de Planta	P <sub>f</sub>	0.9	0.95	0.9	adim
Tiempo	t	25	25	25	años

## RESULTADOS

Los datos obtenidos fueron calculados en el software Crystal Ball, ejecutando 10,000 iteraciones, para determinar valores probabilísticos que puede tener el potencial del recurso, respecto al área definido. Los valores estimados por combinaciones aleatorias de parámetros están dados en función de la confiabilidad de combinación aleatoria. La grafica de probabilidad (figura 4), muestra el potencial mínimo de 53.2 y máximo de 76.2 MW eléctricos. La figura de sensibilidad (figura 5), muestra los parámetros con mayor sensibilidad probabilística. Asimismo, en el Cuadro 2 se observa los resultados estadísticos obtenidos para la zona geotermal Paucarani.



**Figura 4.** Curva de probabilidades de potencial eléctrico máximo y mínimo estimado para el sistema geotérmico Paucarani



**Figura 5.** Resultados de sensibilidad para el sistema geotérmico de Paucarani.

**Cuadro 2.** valores estadísticos obtenidos a partir de la simulación de Montecarlo.

Resultados Obtenidos	
Pruebas	10,000
Caso base	73.0116
Media	72.0314
Mediana	68.9501
Modo	--
Desviación estándar	25.0293
Varianza	626.4666
Sesgo	0.7435
Curtosis	3.95
Coefficiente de variación	0.3475
Mínimo	5.2832
Máximo	212.3652
Error estándar medio	0.2503

## CONCLUSIÓN

Los resultados indican para un área mínima de 10km<sup>2</sup> dentro del sistema geotérmico Paucarani, existe la probabilidad del 62% de aprovechar un potencial geotérmico de 72 MW eléctricos.

Las variables más sensibles son, la temperatura del reservorio con 42.5% y el área con 19.6%.

El método volumétrico mediante la simulación Monte Carlo es usado para evaluaciones del potencial sin estudios de perforación con baja certeza.

## REFERENCIAS

Arkan, S. & Parlaktuna, M. (2005). Resource Assessment of Balçova Geothermal Field. 10Pp. In: Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.

Asturias, F. (2003) - Reservoir Assessment of Zunil I & II Geothermal Fields, Guatemala. Geothermal Training Programme. Orkustofnun, Grensásvegur 9, Number 3, IS-108 Reykjavík, Iceland.

Grant, M., Donaldson, I. & Bixley, P. (1982) Geothermal Reservoir Engineering. Academic Press, New York, 369p.

Morán, M. & Shaphiro, H. Fundamentos de Termodinámica Técnica, 3p.

Muffler, P. (1978) - Assessment of Geothermal Resources of the United States - 1978. Geological Survey Circular, 790.

Nathenson, M. & Muffler, L. (1975) Geothermal resources in hydrothermal convection systems and conduction – dominated areas: In white, D, and Williams, D, Assessment of Geothermal Resources of the United States – 1975, U.S. Geol. Survey Circ., p. 104 – 121.

Quijano, L. (2007). Manual de geotermia. México: Asociación Geotérmica Mexicana, 109 p.

Sarmiento, Z. (2013) Steingrímsson, B.; Axelson, G. - Volumetric Resource Assessment. “Short Course V on Conceptual Modelling of Geothermal Systems”, organized by UNU-GTP and La-Geo, in Santa Tecla, El Salvador.

Torres, L.; & Urquiza, M. (2013) Evaluación del Estudio de Prefactibilidad Inicial Proyecto Geotérmico de Chachimbiro – Ecuador. Univer-

sidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Unidad de Postgrados. El Salvador: Universidad de El Salvador, 109 p.

Vargas, V. & Cruz, V. (2010) - Geothermal map of Perú. Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, 7 pp.

West Japan Engineering Consultants (2012) – The master plan for development of geothermal Energy in Peru, final report. [s.l.]: Japan International Cooperation Agency and West Japan Engineering Consultants, 138 p.

Williams, C.; Reed, M. & Mariner, R. (2008) - A Review of Methods Applied by the U.S. Geological Survey in the Assessment of Identified Geothermal Resources. USGS. Open file report 2008-1296.