

MODELO GEOTERMICO PRELIMINAR DE TRES ÁREAS DE INTERÉS EN LA CALDERA CUATERNARIA RESURGENTE DE CHACANA Y ESTIMACION TEÓRICA DE SU POTENCIAL GEOTERMOELÉCTRICO

Bernardo Beate(1), *Fabián Villares*(1), *Salvatore Inguaggiato*(2), *Silvana Hidalgo*(3), *Stalin Benitez*(4)

(1) Dto. de Geología, Escuela Politécnica Nacional, P.O. Box 17 01 2759, Quito, Ecuador,
bbeate@uio.satnet.net, fabmar18@hotmail.com

(2) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia -Palermo, via Ugo La Malfa 1590146, Palermo, Italy,
s.inguaggiato@pa.ingv.it

(3) Instituto Geofisico, Escuela Politecnica Nacional, Ladron de Guevara E11-253 y Andalucia, Quito, Ecuador, shidalgo@igepn.edu.ec

(4) Samanes 1ª. Etapa, Manzana 130, Villa 1, Guayaquil, Ecuador,
stalinbenitez@gmail.com

RESUMEN

La Caldera de Chacana constituye el complejo volcánico riolítico cuaternario más grande de los Andes del Norte. Esto favorece la presencia de magmas diferenciados emplazados a niveles someros de la corteza, induciendo una fuerte y consistente anomalía térmica, lo cual a su vez alimenta con calor los sistemas geotérmicos tanto de ámbito volcánico/hidrotermal convectivo como de roca caliente seca (HDR). En el interior de la caldera Chacana se encuentran unos 20 centros de emisión de magmas altamente diferenciados, mayormente dacitas y riolitas y en menor número andesitas intermedias a ácidas, en una faja de 30 km (NS) y 7 km (EO) y de edades menores a 450 ka; la última erupción ocurrió hace apenas 240 años. Además, fallas regionales activas de rumbos NE a NNE cruzan la estructura caldérica, favoreciendo el potencial para permeabilidad que permite la recarga hídrica natural y la circulación de fluidos hidrotermales profundos actuales. Las manifestaciones termales en superficie en Chacana constituyen manantiales de aguas alcalino-cloruradas-sulfatadas de alta salinidad y bajo pH, con temperaturas de hasta 65 °C. Las temperaturas catiónicas indican valores entre 200-250 °C para el reservorio geotérmico. Se estimó el Recurso Geotérmico Base Accesible (RGBA) y el potencial teórico siguiendo el método volumétrico y asumiendo el aprovechamiento del 10% del recurso por un período de 30 años en tres áreas de interés geotérmico dentro de la caldera Chacana: Cachiyacu, Jamanco y Oyacachi con 178, 141 y 104 MWe respectivamente. Si se considera la caldera total se tendría 1480 MWe de potencial hipotético. El país debe priorizar y aprovechar en un futuro cercano la energía geotérmica, la cual es un recurso energético renovable, local, seguro, competitivo y altamente favorable con el ambiente.

Palabras claves: caldera Chacana, domo riolítico, recurso geotérmico, anomalía térmica, centros de emisión intracaldera, reservorio geotérmico hipotético, fuentes termales.

ABSTRACT

The Chacana Caldera comprises the largest rhyolitic volcanic complex in the Quaternary of the Northern Andes. This favors the presence of highly differentiated magmas emplaced at shallow crustal levels, which induce strong and consistent thermal anomalies in order to feed geothermal systems of both types, volcanic/hydrothermal and hot dry rock (HDR). About 20 intracaldera volcanic vents of rock composition varying from acid andesites to dacites and to rhyolites are scattered in an area of 30 km (NS) and 7 km (EW) and have assumed ages of less than 450 ka; the last eruption occurred only 240 years ago. In addition, regional NE and NNE striking faults cut the caldera structure, favoring permeability for the circulation of hydrothermal fluids and recharge of cold meteoric waters. Surface manifestations comprise high salinity alkali – chloride - sulphate waters up to 62°C. Cationic geothermometers indicate deep temperatures in the range of 200-250°C. The Accessible Geothermal Resource Base (AGEB) and a theoretical potential, assuming 10% utilization of the resource for a period of 30 years in three areas of geothermal interest within the caldera Chacana: Cachiyacu, Jamanco and Oyacachi and the entire caldera as 178, 141, 104 and 1480 MWe, respectively. Ecuador has to prioritize and tap its geothermal resources in the near future, as it is a local, renewable, competitive and environmentally friendly type of energy.

Keywords: Chacana caldera, rhyolitic dome, geothermal resource, thermal anomaly, intracaldera volcanic vents, hypothetical geothermal reservoir, hot springs.

INTRODUCCIÓN.

A nivel global, muchos países ya aprovechan desde varias décadas la energía geotérmica para producir electricidad. En el Ecuador, la iniciativa geotérmica estuvo a cargo de INECEL (Instituto Ecuatoriano de Electrificación, ahora extinto), el cual a fines de los años 70 e inicio de los 80, llevó a cabo el reconocimiento e inventario de las áreas de interés geotérmico para la producción de energía eléctrica, con el objetivo de reducir el consumo de combustibles fósiles. En los últimos dos años, el Gobierno ha implementado nuevas políticas energéticas enfocadas al desarrollo de los recursos

energéticos renovables, sustentables y ambientalmente favorables, entre ellos la geotermia. Iniciativas al respecto constituyen los trabajos de CONELEC (Beate, 2008) y los estudios de prefactibilidad inicial en Chacana por ELECTROGUAYAS en 2009; el ente estatal a cargo de la iniciativa geotérmica es el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER).

El Ecuador es un país volcánico con alto potencial geo-termoeléctrico, dado el gran número de volcanes activos y potencialmente activos presentes en su territorio. La presencia de unos 40 volcanes activos representa un potencial (teórico) de 6500 MWe

(Stefanson, 2005); la capacidad instalada del Ecuador en el 2008 fue de 4557 MWe y la producción de electricidad fue de 18609 GWh/año según CONELEC (2009). La Caldera Chacana, a 60 km al E de Quito, es el centro volcánico riolítico Cuaternario más grande del país y constituye un fuerte candidato para albergar una anomalía de calor enorme y somera, y por ende es un objetivo focalizado para exploración de recursos geotérmicos aptos para la generación de energía eléctrica.

Por sus condiciones geológicas y su tipo de volcanismo riolítico, Chacana tiene a groso modo el más alto potencial a nivel de país para albergar sistemas geotérmicos someros (1 a 3 km de profundidad) de tipo hidrotermal convectivo, así como también sistemas geotérmicos profundos de tipo HDR (hot dry rock por sus siglas en inglés). Estos sistemas ahora se denominan EGS – Enhanced Geothermal Systems (MIT, 2006).

La Caldera Chacana se encuentra ubicada a 40 km al ESE de Quito en la cresta de la Cordillera Real (CR) entre los volcanes Antisana y Cayambe, en las provincias de Napo y Pichincha, en cotas que fluctúan entre 3200 y 4500 msnm (fig.1). Su borde topográfico presenta una forma irregular alargada de 35km (NS) x 10-15 km (EO) y constituye la parte central y somital del complejo volcánico Plio-Cuaternario Chacana, cuyas dimensiones son: 65 km (NS) x 25 km (EO).

Las características morfológicas iniciales de formación de la caldera son ahora casi irreconocibles en el terreno. En la parte N de la Caldera el borde topográfico es todavía reconocible (cotas 4000 – 4300 m); el resto es un gran conjunto de lomas, ríos, montes y valles, lagunas y pantanos, la mayoría a una altura entre 3300 y 4200 msnm.

En los márgenes de la caldera se han construido varios volcanes que representan los puntos más altos de la zona como son Chusalongo (4840m) y Plaza de Armas o Antisanilla (4620m) al S y el estratovolcán Antisana (5756 m), en el margen SE.

La carretera Interoceánica cruza la caldera Chacana en su parte central, desde Pifo a Papallacta. Otra vía de acceso sale de Cangahua para unir con Oyacachi y continuar hasta Papallacta; algunos ramales menores de ésta carretera dan acceso a las obras hidráulicas de la EMAAP-Q. Una tercera vía, conecta la población de Pintag con la parte sur de la caldera Chacana, en la zona de los volcanes Antisana y Chusalongo. El acceso al resto de la caldera es a lomo de mula o a pie. Las únicas poblaciones dentro de la caldera son Oyacachi al N, y Papallacta y el caserío de El Tambo en la parte central-E.

A continuación se resume la geología de la caldera Chacana y se presenta el modelo geotérmico de los sistemas hidrotermales convectivos en Chacana; además se estima su potencial (hipotético) en MWe.

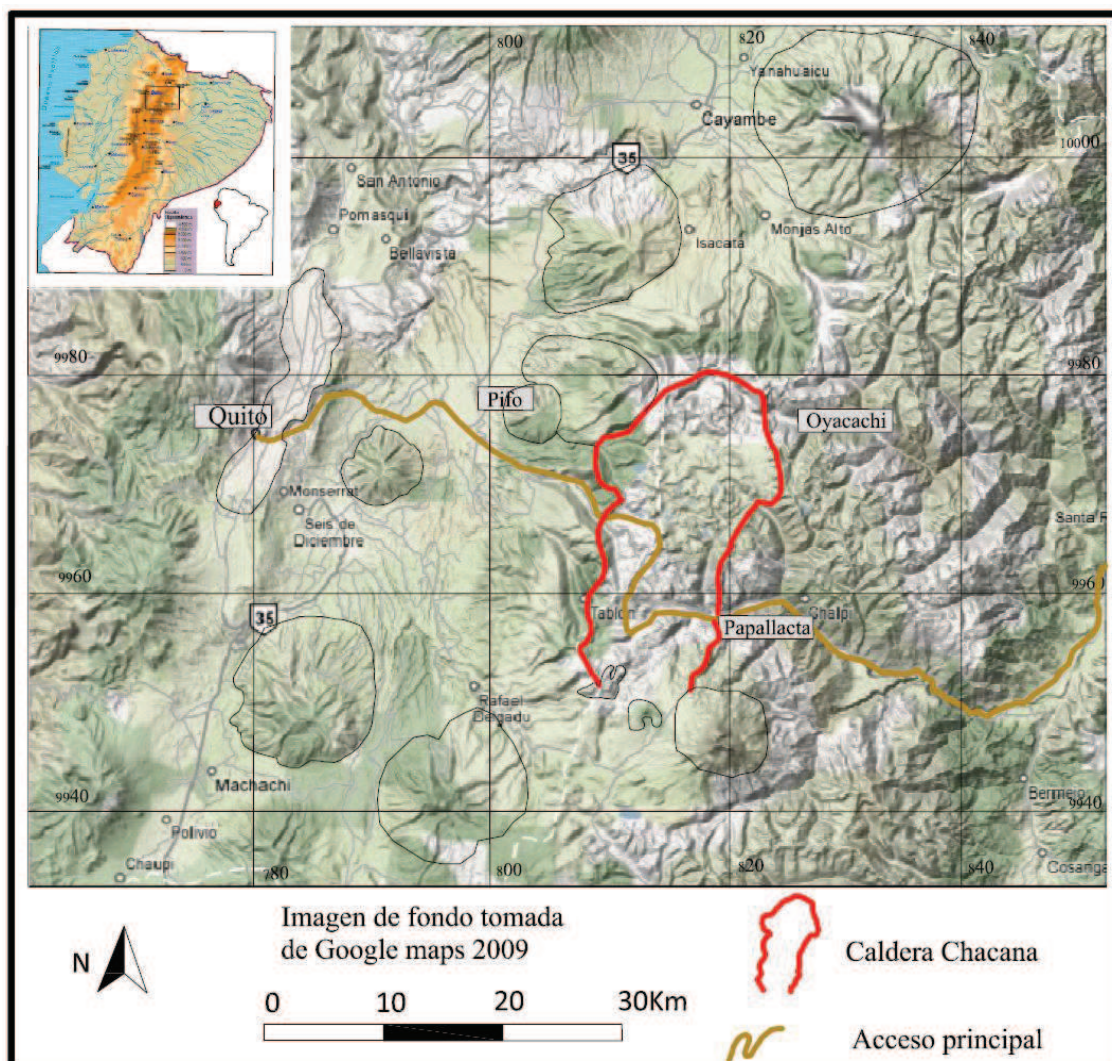


Figura 0. Ubicación de la Caldera Chacana.

RESUMEN DE LA GEOLOGÍA DE LA CALDERA CHACANA.

La Caldera Chacana está construida sobre un basamento metamórfico Pz-Mz en su zona central y este, mientras que el basamento de

los flancos occidentales serían rocas oceánicas no expuestas del terreno Pallatanga de edad Cretácica, acrecionado al continente hace aproximadamente 75 Ma. En la Cordillera Real, existe un gran hiato deposicional hasta aproximadamente 8 – 6 Ma cuando se depositó la Fm. Pisayambo,

las cuales son rocas volcánicas de composición esencialmente basáltica y andesítica. Posterior a estos depósitos se asume la presencia de un campo volcánico (grupo o “cluster” de volcanes) andesítico, como lo conceptualiza Lipman (2000), el cual representaría las fases iniciales y poco evolucionadas de numerosas cámaras magmáticas cercanas entre sí y que posteriormente darán lugar a la Caldera Chacana.

La caldera se construye sobre una zona estructuralmente controlada por fallas regionales aproximadamente N-S y NNE correspondientes a la Falla Peltetec al Oeste y a una prolongación de la falla Chingual al Este, las cuales presentan cizallamiento dextral y localmente generaran un ambiente extensional tipo pull-apart, el cual facilitaría la alimentación magmática a través de la corteza superior y la consecuente formación de la caldera por colapso.

Se estima que el complejo Chacana inició su actividad hace aproximadamente 2,7 Ma (Hall y Mothes, 2008) con la construcción de la serie Tablones, la misma que está constituida por al menos tres secuencias de andesitas, dacitas y riolitas, cuya formación terminó hace 0,8 Ma con el colapso y formación de la caldera y con la emisión de grandes volúmenes de magmas riolíticos que formaron las superficies actualmente conocidas como Tablones. Las secuencias volcánicas que forman el flanco exterior de la caldera se extienden hacia afuera de la zona de estudio

casi de manera radial tanto hacia el Oeste como al Norte; hacia el Este se la observa parcialmente como remanentes erosionados mientras que al Sur estas secuencias están cubiertas por volcánicos más recientes.

Varios diques anulares dacíticos se encuentran en la zona de Papallacta y en el Valle Carihuaycu; estos representarían las estructuras y fallas que limitan el hundimiento de la caldera, es decir el borde estructural.

El colapso de la caldera produjo una depresión que inicialmente fue rellenada por brechas y rodados de las paredes del borde topográfico y por ignimbritas syn-colapso. Posteriormente, la caldera fue rellenada por secuencias volcánicas de andesitas y dacitas negras, seguidas de un ambiente tranquilo con la depositación de sedimentos lacustres, los cuales tienen una disposición grano creciente indicando que el ambiente cambiaba con el tiempo de menos energético a más energético.

Aparentemente, una intrusión intracaldera somera de magma evolucionado con forma de sill y/o lacolito dio lugar a la resurgencia de la caldera, con el levantamiento de los depósitos sedimentarios de relleno en una altura aproximada de unos 500m. También debió servir de fuente para el emplazamiento de domos riolíticos tempranos (Domos de la Loma Baños y Cojanco). Este nuevo magma dio lugar también a la formación de la brecha freatomagmática Mogotes (Diatrema) en la parte central de la caldera y previa a los domos mencionados.

MODELO GEOTERMICO PRELIMINAR DE TRES ÁREAS DE INTERÉS EN LA CALDERA CUATERNARIA RESURGENTE DE CHACANA Y ESTIMACION TEÓRICA DE SU POTENCIAL GEOTERMOELÉCTRICO

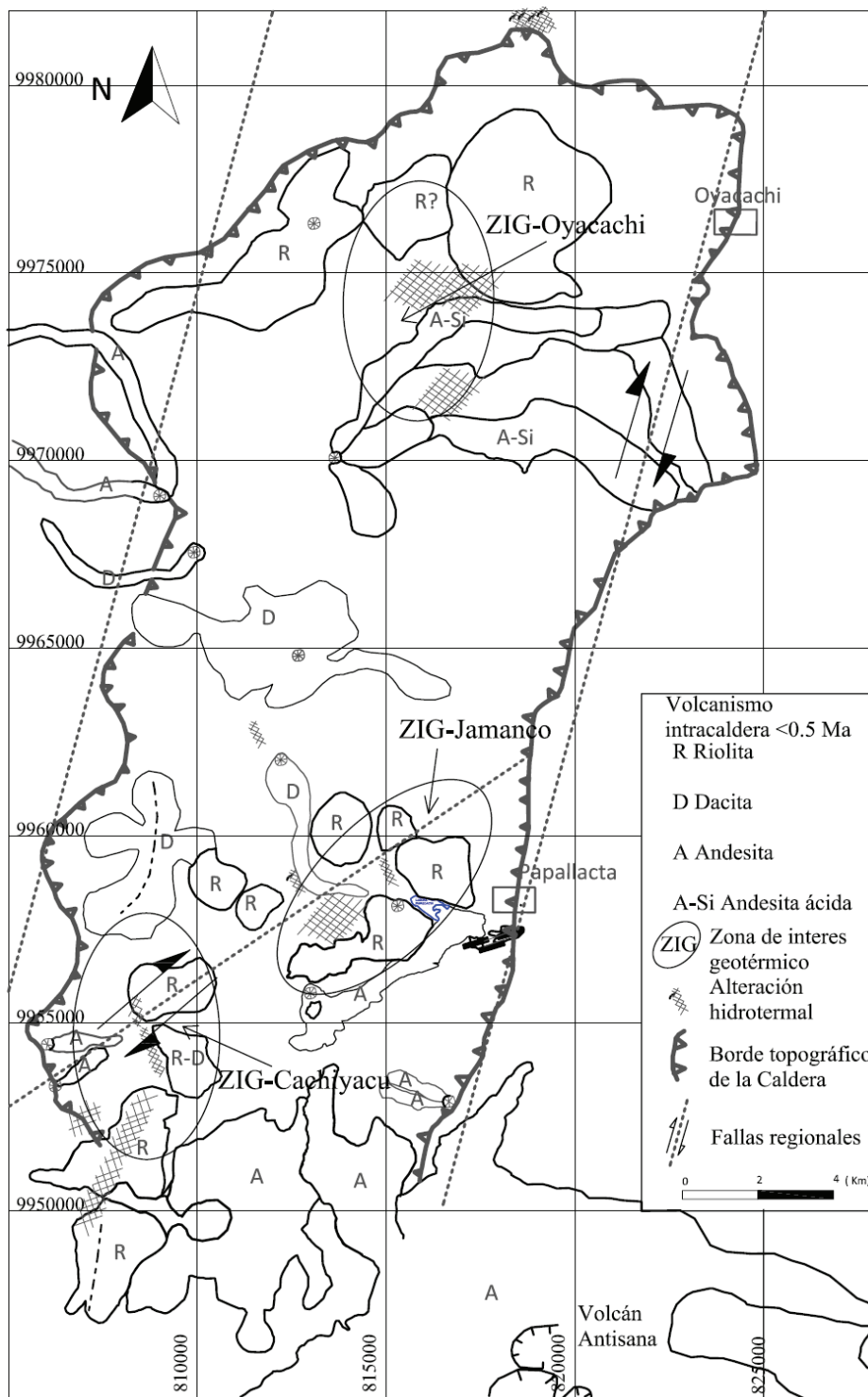


Figura 2. Volcanismo intracaldera <0.5 Ma y ubicación de las áreas de interés geotérmico (Cachiyacu, Jamanco, Oyacachi)

Existe un hiato deposicional hasta los 240 ka en donde inicia un período de intensa actividad con la construcción de varios edificios volcánicos (Plaza de Armas y Chusalongo) ubicados sobre las rocas del flanco exterior de la caldera. Se producen también pequeños flujos en el borde topográfico como los de Quincharrumi y Chimbauro; en el interior de la caldera en cambio ocurre el emplazamiento de domos, domo-coladas y flujos de lava de composición dacítica y riolítica ubicados a lo largo del borde estructural de la caldera p.e. Potrerillos. Además se producen erupciones explosivas plinianas (Pifo A y Pifo B) e ignimbritas (Burrochupa) y la extrusión del flujo de obsidiana de Yarangala (180 ka) en el borde NW. Esta etapa de actividad también incluye al gran flujo de lava del río Quijos al SE de la zona con 211 ka (Hall y Mothes, 2008) y al evento ignimbrítico Chalupas al S, contemporáneo con la formación de la caldera de colapso del mismo nombre (Hammersley, 2005).

Durante los siguientes 160 a 40 ka no se reporta actividad en la caldera, pero a partir de 40 ka ocurren varios flujos andesíticos y dacíticos tanto en el flanco y borde W, así como también en el interior de la caldera.

Los últimos eventos volcánicos de la Caldera Chacana corresponden a la emisión de dos flujos de lava históricos de composición andesita ácida, bastante parecidos entre sí y que son los flujos Pinantura y Papallacta depositados en 1728 y 1773 respectivamente (Hall y Mothes, 1991).

GEOQUÍMICA DE LOS FLUIDOS DEL SISTEMA GEOTÉRMICO CHACANA.

Los datos físico-químicos de las aguas muestreadas presentan un amplio rango de valores. En particular, la temperatura de descarga tiene valores entre 7.5 y 64.6 °C; el pH varía entre 5.99 y 7.95 y la conductividad eléctrica desde 100 hasta 7250 microSiemens/cm.

Estos valores sugieren procesos de interacción agua/roca y agua/gas significativos. De hecho, el pH más bajo indica una posible interacción con gases ácidos, mientras que la alta salinidad sería indicativa de procesos de disolución de la roca encajante en el acuífero (reservorio). Las composiciones isotópicas de δD y $\delta^{18}O$ en las muestras de agua destacan su origen meteórico (aguas de lluvia).

La composición química analizada para las aguas frías y termales, graficada en el diagrama de Langelier-Ludwig, muestra una distribución en tres familias principales (Fig. 3). La primera familia es alcalino-terrea-bicarbonatada; estas aguas son de río, caracterizadas por una salinidad muy baja y representan la recarga del sistema geotérmico de Chacana. La salinidad total disuelta de esta agua no excede 100 mg/litro.

La segunda familia está constituida por aguas alcalino-cloruro-sulfatadas ($Cl-SO_4$) (Jamanco, Cachiyacu), caracterizadas por una alta salinidad de hasta 5000 mg/litro. La tercera familia de aguas es alcalino

-bicarbonatada (Ilaló, Oyacachi, Antisana y Guachalá), caracterizada por un salinidad media a alta de hasta 4000 mg/litro.

Para estimar la temperatura del reservorio se utilizaron varios geotermómetros aplicables a líquidos (Na-Li, Na-K y Na-K-Ca). Se obtuvo una temperatura de equilibrio (parcial) en profundidad de alrededor de 200 °C para Jamanco y de 250°C para Cachiyacu.

Aplicando geotermómetros a gases se estimó una temperatura de 250 °C para Jamanco y 300 °C para Cachiyacu.

Finalmente, la composición isotópica de Helio y Carbono del CO₂ destaca un claro origen magmático para estos fluidos. Existen valores de alrededor de 7R/Ra corr. y -6 delta por mil vs. PDB respectivamente, para el Helio y el Carbono del CO₂.

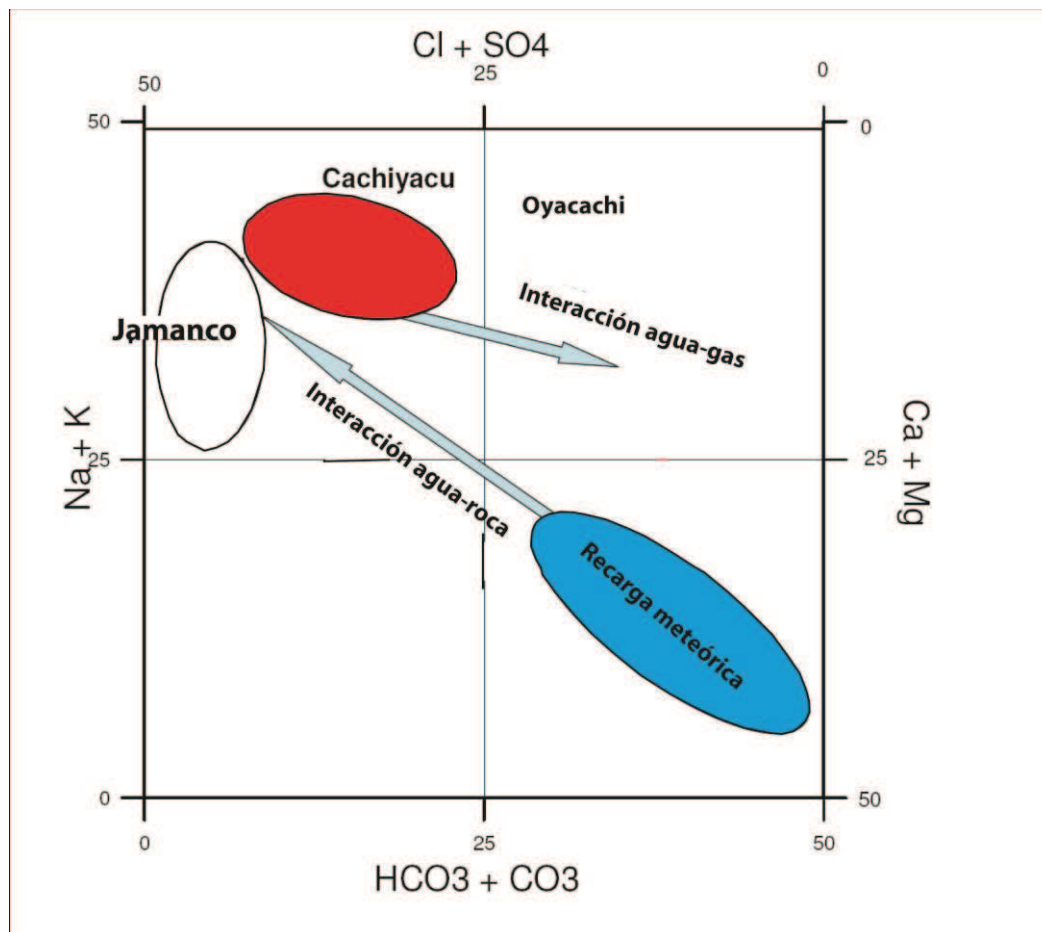


Figura 3. Diagrama de Langelier-Ludwig.

ALCANCE DEL MODELO GEOTÉRMICO PRELIMINAR Y DE LA ESTIMACIÓN TEÓRICA DEL POTENCIAL GEO- TERMOELÉCTRICO.

Tomando en cuenta las características geológicas así como la distribución de las zonas de alteración, fallas y manifestaciones termales en superficie, se consideran tres zonas de interés geotérmico, las cuales han sido denominadas Cachiyacu, Jamanca y Oyacachi (Fig. 2); una cuarta área de interés geotérmico constituye la caldera en su totalidad. Para cada una de ellas se discute el Modelo Geotérmico Preliminar a la luz de los datos actuales de superficie disponibles (Geología y Geoquímica), y por lo tanto tiene un alcance de nivel preliminar. Partiendo del modelo geotérmico, presentaremos la evaluación del potencial geotermoeléctrico, tomando como base la metodología propuesta por el USGS (1978) para sistemas hidrotermales convectivos relacionados con fuentes ígneas y con temperaturas mayores a 150 °C en el reservorio.

El método consiste en calcular la energía térmica contenida en el reservorio, es decir se cuantifica el Recurso Geotérmico Base Accesible en unidades de 10^{18} Joules.

La fig. 4 presenta el diagrama de McKelvey indicando los términos pertinentes. El Recurso Geotérmico Base Accesible es la energía térmica ubicada a profundidades suficientemente someras para ser alcanzadas por perforaciones profundas utilizando la

tecnología actual o la disponible en un futuro cercano. La “línea de profundidad” o base del RGBa representaba los 3 km en el año 1978, ahora la meta es una profundidad de 10 km (USGS, 1994, MIT, 2006).

La cantidad de energía térmica almacenada en el reservorio geotérmico se obtiene en base a la siguiente ecuación:

$$Q_r = R_c \times A \times D \times (T_r - T_{ref})$$

Dónde:

Q_r = es la energía térmica contenida el reservorio.

R_c = calor específico por volumen (de roca más agua) y es igual a $2.7 \text{ J/cm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$.

A = área del reservorio (proyección a superficie) en km^2 .

D = espesor del reservorio en km.

T_r = temperatura del reservorio en $^\circ\text{C}$.

T_{ref} = temperatura media anual $^\circ\text{C}$.

La cantidad de energía térmica almacenada en el reservorio geotérmico se obtiene en base a la siguiente ecuación:

$$Q_r = R_c \times A \times D \times (T_r - T_{ref})$$

Dónde:

Q_r = es la energía térmica contenida el reservorio.

R_c = calor específico por volumen (de roca más agua) y es igual a $2.7 \text{ J/cm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$.

A = área del reservorio (proyección a superficie) en km^2 .

D = espesor del reservorio en km.

T_r = temperatura del reservorio en $^\circ\text{C}$.

T_{ref} = temperatura media anual $^\circ\text{C}$.

MODELO GEOTERMICO PRELIMINAR DE TRES ÁREAS DE INTERÉS EN LA CALDERA CUATERNARIA RESURGENTE DE CHACANA Y ESTIMACION TEÓRICA DE SU POTENCIAL GEOTERMOELÉCTRICO

Datos fisico-químicos y geoquímicos de fuentes termales															
	T°C	pH	Cond.	Eh	Li	Na	K	Mg	Ca	Cl	Br	SO4	HCO3	d ¹⁸ O	dD
Jamanco	60,8	6,23	6820	-39	0,95	49,43	1,09	0,67	14,68	52,80	0,08	6,27	7,45	-11,4	-83
Cachiyacu	64,6	6,39	5560	-125	1,16	39,83	2,04	2,72	5,31	38,15	0,06	2,41	11,02	-11,1	-86
Oyacachi	46,5	6,53	4850	-105	0,37	42,56	0,85	4,53	4,94	18,43	0,01	1,77	33,00	-10,8	-85

Composición química e isotópica de gases burbujeantes												
Sample	O ₂ %Vol	N ₂ % Vol	CO ppmVol	CH ₄ ppmVol	CO ₂ %Vol	R/Ra	He/Ne	[He] corr	[Ne] corr	R/Rac	d ¹³ C(CO ₂)	
Jamanco	0,9	15,8	1,3	1446	84	7,1	59,4	136,5	2,3	7,1	-6,8	
Cahiyacu	4,2	16,8	4	3,2	77,9	3,9	4,3	0,5	0,1	4,1		
Oyacachi	14,8	59,5	1,1	18	25,8	2,3	1,5	0,6	0,4	2,6	-6,8	

O₂, N₂, CO₂ (%Vol); He, CO, Ne, CH₄ (ppmVol); composiciones isotópicas de He son expresadas en R/Ra corregidas para contaminación atmosférica (Ra= 1,6 E-06); composición isotópica de Carbón expresada en delta por mil vs PDV estandar.



Figura 4. Diagrama de McKelvey

También asumimos que el calor específico de la roca es $2.7 \text{ J/cm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$ y la porosidad es 15 %, como valores promedio. Por último asumimos que sólo el 13% de la energía térmica (MWt) del reservorio lo convertimos en electricidad (MWe), en un lapso de tiempo determinado, p.e. 30 años.

Este cálculo es una primera aproximación. El parámetro más incierto es la geometría del reservorio, a la cual hemos dado ahora dimensiones arbitrarias basadas en la bondad de los datos de superficie (geología y geoquímica). No se toma en cuenta la energía térmica presente en el basamento y en la capa sello.

PROSPECTOS GEOTÉRMICOS EN LA CALDERA CHACANA, MODELO GEOTÉRMICO Y ESTIMACIÓN DE SU POTENCIAL GEOTERMOELÉCTRICO.

El modelo geotérmico consiste de las siguientes partes: fuente de calor, reservorio, capa sello, manifestaciones de fuga y recarga. En base al modelo geotérmico preliminar se estima el potencial geotermoeléctrico de cada área.

Prospecto Geotérmico CHACANA-CACHIYACU

Está ubicado entre 3700 y 4100 msnm en el interior de la Caldera Chacana a aproximadamente 4 Km al SW de la Comunidad El Tambo en el extremo S del piso de la caldera Chacana.

El área de interés mide aproximadamente 2000 ha, comprende un terreno plano y pantanoso limitado hacia el W y S por el borde caldérico (Fig. 2 y 5) y hacia el E y N por domos riolíticos intracaldera. La zona es drenada por los ríos Tambo y Tumiguina, los cuales vierten sus aguas al río Quijos.

La fuente de calor son los cuerpos someros de magma ubicados a 4 – 8 km debajo de Cachiyacu y que han alimentado en los últimos 0,5 Ma a los centros volcánicos en y alrededor del área, como son Chusalongo (andesitas), Plaza de Armas (riolitas, dacitas y obsidiana), San Clemente-Yanaurco-

Chaupiurco (riolitas) y los flujos de lava de Papallacta (1773) y Pinantura (1721). El calor de las cámaras magmáticas es transferido por conducción a través de las rocas del basamento hacia el reservorio. El nivel de emplazamiento sería entre 4 y 8 km de profundidad, aunque estas cifras deben ser establecidas por estudios magneto-telúricos posteriores.

El reservorio geotérmico son rocas permeables en donde se almacena el agua y en la cual la transferencia de calor generalmente se da por convección. Constituye el objetivo principal de la exploración geotérmica para el aprovechamiento del recurso. En la zona Cachiyacu, parte del reservorio estaría constituido por las rocas volcánicas como son aglomerados, brechas, tobas y lavas de la formación Pisayambo y por las secuencias volcánicas pre-caldera que forman los flancos del Chacana así como también por las brechas y tobas syn-colapso, con un espesor que puede alcanzar fácilmente a los 1000 m. En una primera aproximación, el área del reservorio puede estar definida por la distribución de las zonas de alteración y las fallas presentes en la zona. Las zonas de alteración se ubican preferencialmente a lo largo del borde S y SE de la caldera, y a lo largo de los domos San Clemente y Yanaurco, definiendo una superficie de unos 20 km². El reservorio es de agua- dominante y tiene una temperatura geotermométrica catiónica de 250 °C. La permeabilidad en el reservorio estaría dada primariamente por lavas fracturadas y brechas, y por la afectación a la roca por

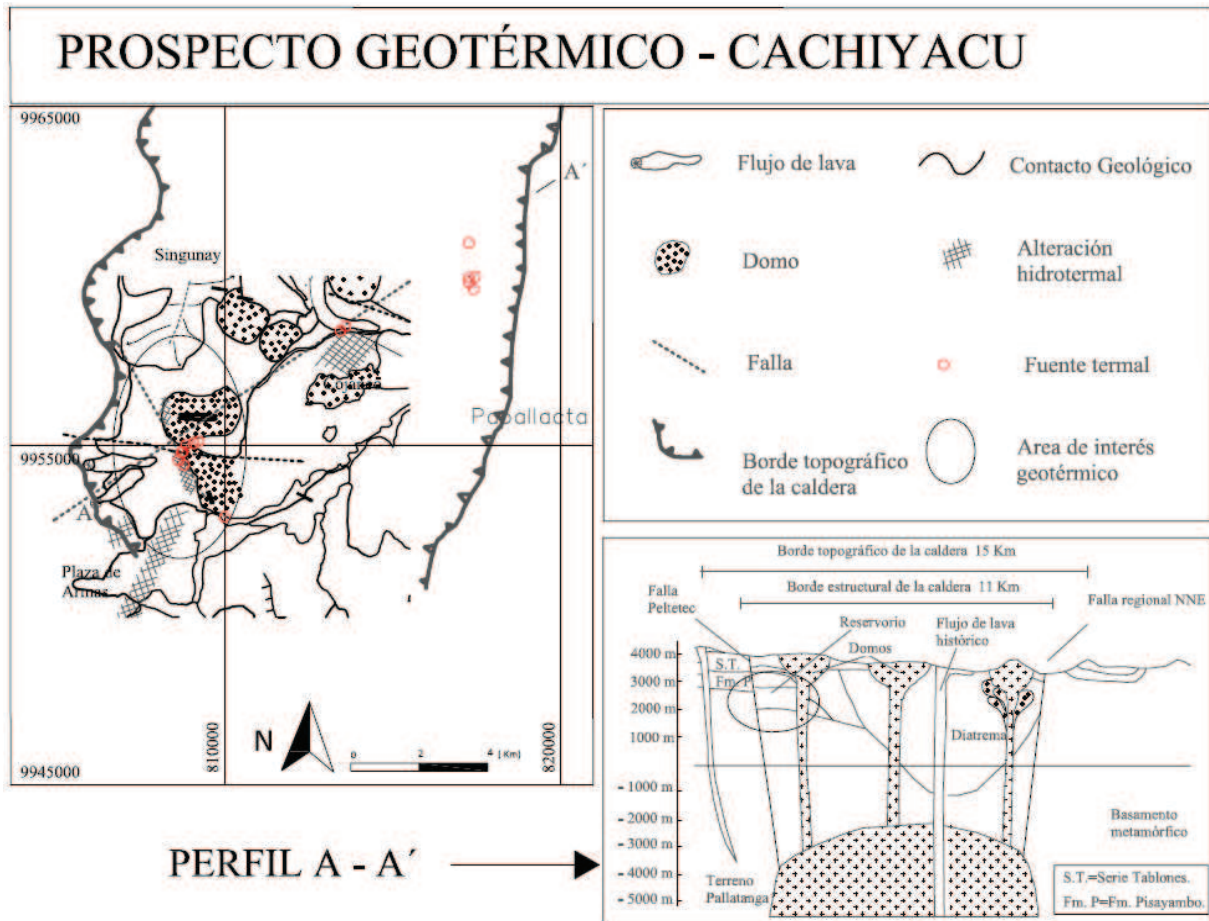


Figura 5. Geología del prospecto Cachiycu y perfil A – A’.

medio de fallas activas NE, E-W y NO que cruzan la estructura caldérica; y secundariamente, por fracturación hidráulica inducida por el mismo sistema, como lo evidencian las brechas de explosión hidrotermal que afloran en el sector de las fuentes termales más calientes. El tope del reservorio estaría entre 1000 y 1500 m y aparentemente se ha auto-sellado, a juzgar por falta de manifestaciones termales en las zonas con alteración hidrotermal.

La alineación de las fuentes termales en el cauce del río Tambo con una dirección NE, hace sospechar una falla activa con ése rumbo; esta falla sería responsable de la salida lateral de fluidos hacia el río Lisco (SO) y hacia el NE. Otra estructura importante al parecer conecta Cachiycu con Tolontag, con dirección NO. La falla Antisana con rumbo NO, al S de Cachiycu, marca un límite hidrológico al sistema.

La capa sello está constituida por rocas poco permeables o impermeabilizadas que evitan la descarga del calor almacenado. En Cachiyacu, la capa sello estaría constituida por tobas impermeables del relleno syn-colapso de la caldera y posiblemente por las lavas andesíticas – dacíticas negras y que luego fueron intruidos por los domos intracaldera Yanaurco y San Clemente. La impermeabilidad está dada por la alteración argílica producida por fluidos de circulación pervasiva que desvitrificaron la roca y la enriquecieron en arcillas tipo esmectita, las cuales son altamente conductivas (5-10-ohmios metro) y enmascaran la prospección geoelectrica de fluidos geotérmicos económicos. Su espesor podría llegar a los 1000.

Las manifestaciones de fuga de fluidos geotérmicos del reservorio llegan hasta la superficie en forma de fumarolas y/o fuentes termales. En el cauce del río Tambo, que corre entre los domos San Clemente y Yanaurco, a lo largo del pie o del domo San Clemente y en la unión con el pie S del domo Yanaurco, existen más de dos docenas de fuentes termales de aguas con alta salinidad y temperaturas que oscilan entre 35 y 65 °C, y con caudales que alcanzan hasta 2.31 lts/s. Las fuentes termales presentes depositan actualmente travertino. Junto a las fuentes existen amplias terrazas de travertino. La salida de las fuentes termales ha ido migrando ya que estas sufren un autosellamiento debido a la depositación de carbonatos. Las aguas son saladas, de allí su nombre Cachiyacu, que

en idioma quechua significa agua sal o agua salada.

Existen otras fuentes hacia el E en la Qda. Sunfohuaicu con temperaturas mayores a 40 °C, que no han sido muestreadas todavía. Las fuentes termales presentes en el Río Lisco hacia el S, en la zona de Tolontag y junto al Ilaló hacia el W son salidas laterales relacionadas a la zona de Cachiyacu, estos manantiales presentan temperaturas entre 27,2- 42,1 °C.

En Cachiyacu las manifestaciones termales son fugas de agua del sistema geotérmico profundo de agua-dominante, no hay fumarolas. Aparentemente, su salida a superficie está controlada por fallas, principalmente de dirección NE y NO.

Las aguas meteóricas que descienden al reservorio por infiltración a lo largo de fallas y/o rocas permeables aflorantes, constituyen la recarga natural al sistema, y así reemplazan a los fluidos geotérmicos que son descargados en superficie. En la zona de Papallacta, a 12 km al NE de Cachiyacu, ocurre una precipitación media anual de 1090 mm, y existen años en los cuales éste valor ha aumentado. La zona de Cachiyacu en donde no hay datos es mucho más húmeda y con seguridad éste valor llega a duplicarse.

La evaluación del potencial que se presenta es una estimación del Recurso Geotérmico Base Accesible según se definió anteriormente. Los resultados son basados en datos geológicos

y geoquímicos adquiridos en el campo; los valores asumidos para la geometría del reservorio, como profundidad, espesor y extensión del mismo, son arbitrarios, dada la falta total de datos del subsuelo. Los valores del potencial geotérmico son, por lo tanto, una primera aproximación, y deben sujetarse a las limitaciones marcadas por las estimaciones establecidas.

Para Cachiyacu se ha asumido que existe un reservorio geotérmico de tipo hidrotermal convectivo, de agua – dominante (la fase que controla la presión en el reservorio es el agua que circula por los poros y fracturas de la roca; Ellis y Mahon, 1977), con las siguientes características:

Tope del reservorio = 1.5 km

Base del reservorio = 2.5 km

Espesor = 1 km

Tr = 250 °C

Trf (media anual) = 10 °C.

Área de reservorio = 20 km², 2000 ha.

Con éstos valores calculamos la energía térmica almacenada en el reservorio, la cual es igual a 12.96×10^{18} Joules. Si consideramos que se puede aprovechar el 10 % del recurso en un horizonte de 30 años y tomando en cuenta que la conversión de energía térmica a eléctrica es 13%, obtenemos un potencial geotermoeléctrico estimado de 178 MWe (megavatios de energía eléctrica). Si consideramos un 20% de uso del recurso bajo los mismos valores, tenemos un potencial de 356 MWe.

Prospecto Geotérmico JAMANCO

Esta área de interés geotérmico está ubicada en la parte central-sur de la caldera, en cotas que oscilan entre 3300 y 3600 msnm. Su límite E corresponde al borde estructural de la Caldera mientras que hacia el Norte se prolonga hasta la Comuna Jamanco y hacia el Sur hasta el Cerro Cojanco; el límite W corresponde a la Comunidad El Tambo. Ocupa una parte del corredor que utilizan los oleoductos (OCP y SOTE) y el acueducto de EMAAP-Q; tiene acceso directo por carretera asfaltada y lastrada, y está parcialmente incluida en zonas de reserva ecológica (Antisana y Cayambe-Coca).

Las cámaras magmáticas que produjeron los domos y criptodomas riolíticos (domos de Baños y del cañón del río Tambo) que intruyen la brecha Mogotes y la dacita negra (domo Cojanco), y que se relacionan con el período de resurgencia, representan la fuente de calor para esta zona. El flujo de lava de Papallacta (1773) está a sólo 3 – 4 km al S de las fuentes termales más calientes.

El reservorio geotérmico está constituido por los conductos, diques y criptodomas intruídos en la brecha Mogotes y por lavas del relleno inicial de la caldera, que fueron menos afectadas por la formación de la brecha (ahora impermeable).

Fallas regionales ayudan a conectar éstas rocas en profundidad. Asumimos que el

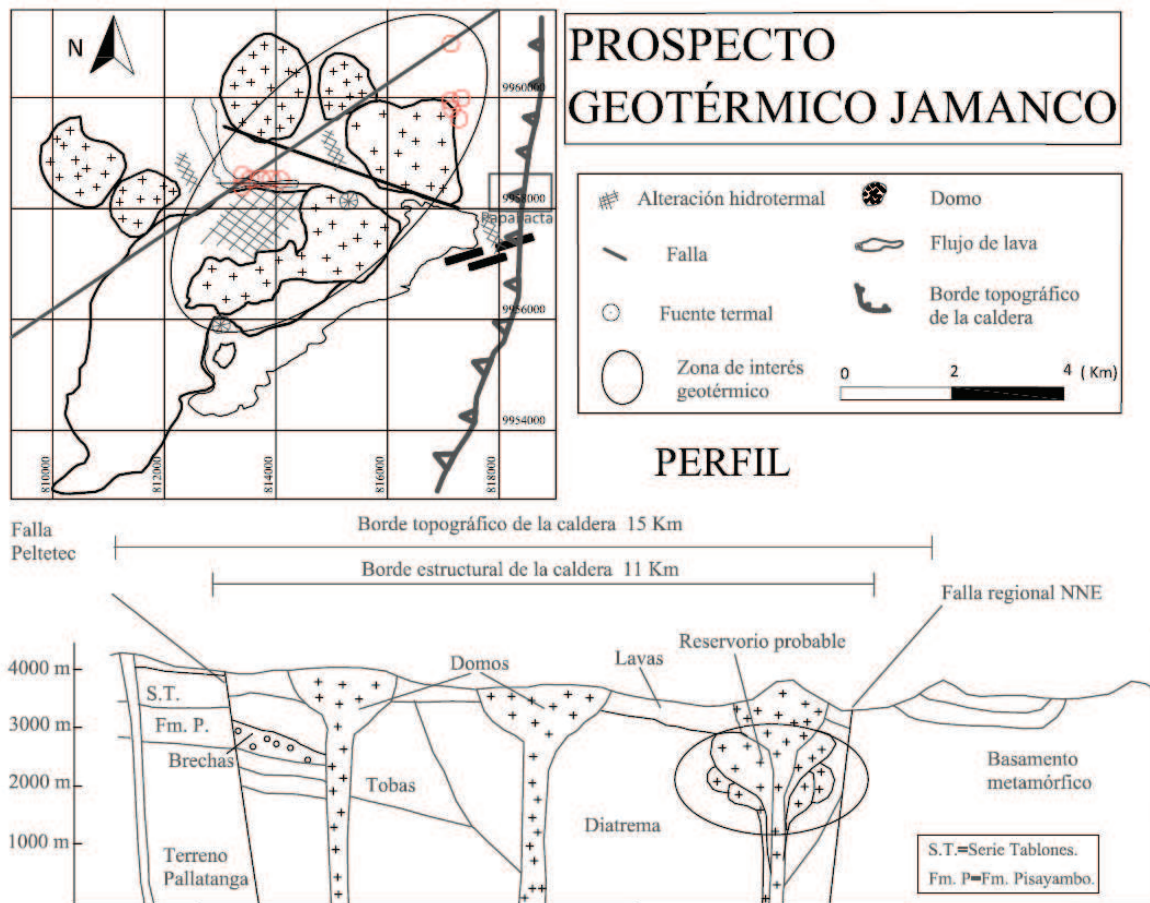


Figura 6. Geología de la zona de Jamanca y ubicación del reservorio geotérmico.

tope del reservorio está a unos 1500m y que éste tiene un espesor global de 1 km, aunque al parecer es irregular en su geometría. La temperatura profunda obtenida con los geotermómetros catiónicos es de 200 °C.

La capa sello está conformada por la brecha de diatrema, la cual cubriría al reservorio lateralmente. Las partes antes más permeables

sobre el reservorio, como los domos y sus conductos, han sufrido auto sellamiento debido a la actividad hidrotermal persistente.

En esta área de interés existen manantiales de aguas calientes a lo largo del cauce del Río Tambo hacia el NE de la comunidad El Tambo. Existen también un grupo de fuentes termales al pie E del domo de la Loma Baños.

En toda el área afloran más de una docena de fuentes termales con temperaturas que varían entre 47 a 65 °C. La alteración hidrotermal es intensa hacia los bordes del valle del río Tambo afectando a las andesitas-dacitas negras; en el cañón del río Tambo, se observa riolita hidrotermalizada. En ésta zona se encuentran varias piscinas de aguas termales que hacen uso directo del recurso geotérmico principalmente en El Tambo, en el balneario de Jamanco, y en el sector de Las Termas en el valle glaciar del río Papallacta.

La recarga corresponde a aguas lluvia locales, y como en el caso de Cachiyacu, son abundantes. Se infiltran en las partes altas asociadas al borde estructural de la caldera.

Para la estimación del potencial geotérmico de la zona de Jamanco se ha asumido que:

Espesor del reservorio = 1 km

$T_r = 200 \text{ °C}$

$T_{ref}(\text{media anual}) = 10 \text{ °C}$.

Área de reservorio = 20 km², 2000 ha.

Estos valores nos dan una energía térmica de 10.26×10^{18} Joules almacenada en el reservorio. Asumiendo un aprovechamiento del 10% de éste valor, o sea $1,026 \times 10^{18}$ J y considerando una eficiencia de 13% para transformar calor en electricidad, obtenemos un potencial de 141 MWe para Jamanco para un horizonte de 30 años. Si consideramos utilizar la quinta parte del recurso base, o sea 20 % del mismo, tendremos un potencial de 282 MWe.

Prospecto Geotérmico OYACACHI.

Está ubicado en la esquina NNW de la caldera Chacana, a unos 8 km al W de la población de Oyacachi, en cotas que bordean los 4000 msnm. El acceso al área se lo realiza por la carretera lastrada Cangahua-Oyacachi-Presa de Salvefaccha (EMAAP-Q). El área de interés tiene una superficie de más de 2000 ha y la laguna artificial de Salvefaccha cubre una buena porción de su parte S; la totalidad del área de interés geotérmico se encuentra dentro de la Reserva Ecológica Cayambe-Coca. La superficie de 2000 hectáreas ha sido delimitada por los afloramientos de rocas con alteración hidrotermal y por la distribución de las fuentes termales.

La fuente de calor está relacionada a la cámara magmática que emitió los productos ácidos altamente diferenciados como las riolitas de los domos y la obsidiana de Yarangala, que tendría una edad de 180 ka y estaría relacionada con la gran caída pliniana de pómez, denomina Pifo A; ésta última es de composición riolítica y su volumen estimado es de 70 km³.

El reservorio estaría conformado por tobas y brechas volcánicas asociados al colapso, con las lavas iniciales del relleno de la caldera y con las subyacentes rocas de la Fm. Pisayambo.

La capa sello serían los depósitos de tobas asociadas al colapso y otros materiales de relleno, como las dacitas negras autoselladas.

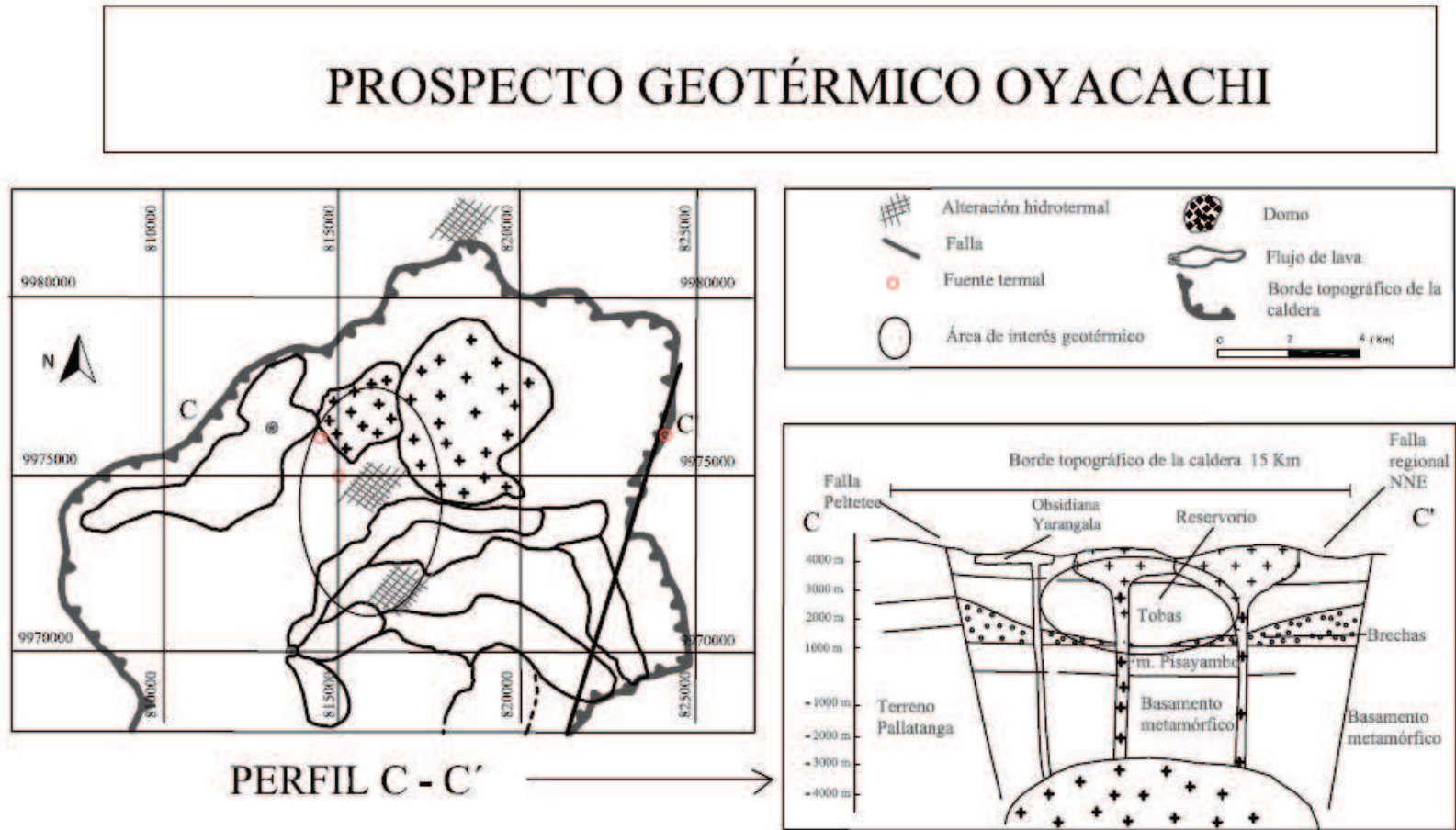


Figura 7. Geología del prospecto geotérmico Oyacachi y perfil C – C’.

Varias fuentes termales afloran en la zona, aunque la mayoría ha sido inundada y tapada por el reservorio de agua de Salvefaccha; algunas fuentes de agua y gas afloran al pie del domo de Oyacachi. La fuente termal en Oyacachi tiene una temperatura de 46.5 °C; los geotermómetros líquidos aplicados a ésta fuente indican temperaturas de fondo de 150 °C; sin embargo es posible que las fuentes más cercanas a la fuente de calor den valores de temperatura más altos.

La recarga corresponde a aguas lluvia locales y, como en el caso de Cachiyacu, son abundantes y se infiltran por el borde estructural de la caldera, así como por los domos intracaldera y a lo largo de fallas.

Para la estimación del potencial geotérmico de la zona de Oyacachi se ha asumido que:

Tope del reservorio = 1.5 km

Base del reservorio = 2.5 km

Espesor = 1 km

Tr = 150 °C

Tref (media anual) = 10 °C.

Área de reservorio = 20 km², 2000 ha.

La energía calórica almacenada en el reservorio geotérmico del prospecto es de 7.56×10^{18} Joules. Considerando el 10 % de ésta energía y asumiendo una eficiencia del 13 %, obtenemos un potencial geotermoeléctrico de 104 MWe. Si consideramos el uso del 20 % del total de la energía térmica del reservorio (Recurso Base

Accesible), tendríamos un potencial de 208 MWe.

Prospecto Geotérmico Caldera CHACANA (toda la caldera).

En este caso consideramos al Complejo Caldérico Chacana como un gran prospecto geotérmico de tipo hidrotermal convectivo y del cual forman parte integral las tres áreas anteriormente descritas. Esta consideración se justifica porque el edificio Chacana presenta una actividad magmato-volcánica persistente durante los últimos 3 Ma, que ha producido volúmenes extruídos de magmas en exceso a los 1000 km³ a lo largo de una compleja evolución. Esta ha generado una gran caldera de colapso, con posterior resurgencia y relleno con abundante emisión de productos volcánicos diferenciados. Sólo el interior de la caldera alberga entre 25 a 30 centros de emisión de edad menor a 0.5 Ma, y de composición riolítica, dacítica y de andesita ácida. Este hecho evidencia la presencia en profundidad (4 a 8 km) de cámaras magmáticas compuestas someras de grandes dimensiones y capaces de causar una anomalía térmica consistente y abundante, apta para alimentar con calor a sistemas hidrotermales convectivos, alojados en rocas volcánicas tanto intracaldera como de los bordes.

Si consideramos que los centros de emisión intra-caldera se concentran en un área de 30 km de largo (NS) y de 7 km de ancho (EO), y que la correspondiente superficie de 210 km²

refleja en primera aproximación, la superficie del sistema geotérmico en el interior de la caldera, y asumimos que:

Tope del reservorio = 2 km

Base del reservorio = 3 km

Espesor = 1 km

Tr = 200 °C

Tref (media anual) = 10 °C.

Área de reservorio = 210 km², 21000 ha.

El total de energía térmica alojada en ése reservorio sería de 107.7×10^{18} Joules.

Considerando que sólo explotáramos el 10 % del total de la energía del reservorio y tomando en cuenta un 13 % de eficiencia para transformar calor en electricidad, en un lapso de 30 años, tendríamos un potencial de energía eléctrica de 1480 MWe.

Para comparación, citamos algunos ejemplos de calderas riolíticas/silíceas grandes donde se ha evaluado el potencial (USGS, 1978): Caldera Valles en USA-NM: 2700 MWe; Caldera de Long Valley (USA-CA): 2100 MWe; Clear Lake (campo volcánico) USA: 900 MWe.

EL RECURSO GEOTÉRMICO PROFUNDO (HDR) EN CHACANA.

La Caldera Chacana en particular y la Provincia Riolítica del Ecuador en general, son sitios altamente prospectivos para ser considerados, en primera instancia, candidatos a estudios exploratorios para

sistemas geotérmicos tipo HDR (Roca Caliente Seca), es decir la extracción de energía térmica de cámaras magmáticas en proceso de enfriamiento, emplazadas entre 4 y 10 km de profundidad (Tamanyu, 1995). La tecnología ya ha sido desarrollada en principio y se denomina EGS (Enhanced Geothermal Systems) o Sistemas Geotérmicos Potenciados, y constituye la frontera geotérmica del momento (MIT, 2006; Duffield & Sass, 2003); en Australia perforan granitos del Pérmico para extraer el calor radiogénico desde 4 - 6 km y en los Geysers-California van a perforar la costra de aplita que cubre el batolito de granito-granodiorita de 80 km².

La situación geológica es favorable para geotermia en Chacana y el potencial es enorme. El País debe considerar seriamente el tomar en cuenta ésta gigantesca fuente de energía renovable y ambientalmente favorable para cubrir la futura demanda energética. Sin embargo, son necesarios estudios geofísicos detallados y perforaciones profundas sistemáticas para verificar y luego definir la factibilidad del recurso.

CONCLUSIONES.

El complejo volcánico Chacana inició su actividad eruptiva hace 3 Ma. En ése período construyó un complejo de edificios volcánicos de 60 km x 30 km y de aprox. 700 km³; éste colapsó en su parte central hace unos 0.8 Ma para formar una caldera elíptica de 35 km x 15 km, de orientación NNE, ubicada en la

cresta de la Cordillera Real. La presencia en Chacana de centros eruptivos (volcanes) evolucionados de edad joven con la última erupción hace apenas 240 años, indican la presencia de una anomalía de calor importante y persistente a niveles someros de la corteza.

Las manifestaciones termales de superficie en Chacana consisten de fuentes termales de alta salinidad y bajo pH, con temperaturas de hasta 65 °C y temperaturas geotermométricas catiónicas de 250 °C.

Se propone tres áreas de interés geotérmico albergadas en la caldera Chacana con sus respectivos potenciales teóricos (hipotéticos). Cachiyacu 178 MMe, Jamanco 141 MWe y Oyacachi 104 MWe. Si consideramos la caldera Chacana en su totalidad el potencial se estima en 1480 MWe.

El área de Chacana es de alto interés geotérmico, por lo que el país debe considerar seriamente su aprovechamiento en un futuro cercano, con el objetivo de reducir el uso de combustibles fósiles en la generación eléctrica y evitar la puesta en la atmósfera de grandes cantidades de CO₂.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al CONELEC por visualizar y apoyar la iniciativa geotérmica ya en 2008 tanto para Chalupas como para Chacana; también agradecemos a ELECTROGUAYAS por encarar y financiar

los estudios geológicos y geoquímicos de prefactibilidad inicial para Chacana en 2009, lo cual incluyó el el financiamiento de la Tesis de Grado de F.V.; por último queremos expresar nuestro agradecimiento al Dpto. de Geología de la EPN por facilitar a F.V. el espacio físico para la elaboración de su tesis, lo cual hizo posible las constructivas discusiones técnicas con nuestros colegas geólogos, en especial con Pete Hall, sin cuya ayuda estaríamos todavía bastante verdes en entender Chacana.

REFERENCIAS.

- [1] BEATE, B. & SALGADO, R., 2005, Geothermal Country update for Ecuador, 2000 – 2005. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya – Turkey.
- [2] BEATE, B., 2008. Perfil de Proyecto Geotérmico Chalupas y resumen de otras áreas geotérmicas en el Ecuador. Informe Técnico inédito para CONELEC. 76 p. y anexos.
- [3] DUFFIELD, W., SASS J., 2003. Geothermal Energy-Clean Power From the Earth's Heat. USGS-Circular 1249.
- [4] ELLIS A.J. & MAHON W.A.J., (1977), Chemistry and Geothermal Systems. Academic Press, N.Y., 379 p.
- [5] HAMMERSLEY, L., DE PAOLO, D., BEATE, B. AND DEINO, A., (2005),

Quantitative model for andesite and rhyolite generation in a continental margin: the Chalupas Caldera, Ecuador. Submitted to G3.

[6] HALL, M. Y MOTHEs, P., 2001. La Caldera de Chacana, el Centro Riolítico más grande de los Andes Septentrionales. Cuartas Jornadas en Ciencias de la Tierra, EPN, Quito.

[7] HALL M. & MOTHEs, P., 2008. The Chacana Caldera Complex - Ecuador. 2nd. Workshop on Collapse Calderas, Queretaro, Mexico. Abstract, Poster.

[8] LIPMAN, P., 1984. The roots of ash flow calderas in Western North America: windows into the top of granitic batholiths. Journal of Geophysical Research, vol.89, No. B10: 8801 – 8841.

[9] LIPMAN, P., 1997. Subsidence of as-flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry. Bull. Volcanol. 59 : pp.198 – 218.

[10] LIPMAN, P., 2000. Calderas. In Enciclopedia of Volcanoes. Academic Press.

[11] MIT, 2006. The Future of Geothermal Energy; the impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the USA in the 21st century. 372 p.

[12] MOTHEs, P. & HALL M., 1991. El Paisaje Interandino y su formación por eventos volcánicos de gran magnitud. En

Estudios de Geografía, Volumen 4, Corp. Edit. Nacional. Quito.

[13] TAMANYU, S., 1995. An Important role of Neo-Granites as the deep – seated Geothermal Reservoirs and their heat sources. Proceedings World Geothermal Congress (1995), Florence–Italy. Vol.2, pp.663–665.

[14] USGS, 1978. Assessment of Geothermal Resources of the United States-1978. Muffler, L.J.P., Editor. Geological Survey Circular 790, 163 p.

[15] VILLARES, F., 2010. Estudio geovolcanológico de la zona sur de la caldera Chacana, Provincias de Napo-Pichincha. Tesis de Grado – Escuela Politécnica Nacional.