



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**ACTUALIZACIÓN DE LOS ANTECEDENTES GEOQUÍMICOS
Y GEOFÍSICOS DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE
PUCHULDIZA Y SU COMPARACIÓN CON EL ÁREA DE
EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA DE GUANACOTA, REGIÓN
DE TARAPACÁ**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

CÉSAR ALEJANDRO MONTENEGRO AMPUERO

**PROFESOR GUÍA:
KATJA DECKART**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALFREDO LAHSEN AZAR
MIGUEL PARADA REYES**

**SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2008**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEOLOGO
POR: CESAR MONTENEGRO A.
FECHA: 04/03/ 2009
PROF. GUIA: Sra. KATJA DECKART

“ACTUALIZACIÓN DE LOS ANTECEDENTES GEOQUÍMICOS Y GEOFÍSICOS DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE PUCHULDIZA Y SU COMPARACIÓN CON EL ÁREA DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA DE GUANACOTA, REGIÓN DE TARAPACÁ”

Después de casi treinta años, la geotermia en nuestro país vuelve a cobrar importancia. El objetivo del presente trabajo es la actualización y re-interpretación de las informaciones obtenidas en la década de los setenta en el campo geotermal de Puchuldiza. Además se entregan los resultados preliminares de la exploración geotérmica en el área de Guanacota ubicada inmediatamente al sur de este campo.

Ambas zonas de trabajo se enmarcan en las campañas exploratorias desarrolladas en la cordillera de la región de Tarapacá por Minera Copiapó durante el período 2006-2008.

Para el logro de los objetivos inicialmente se revisaron antecedentes geológicos, geoquímicos y geofísicos de Puchuldiza realizados en aquella época y se aportaron nuevos datos entregados por un levantamiento geofísico magnetoteléurico desarrollado en este estudio.

Por otro lado, dado que el área de exploración geotérmica de Guanacota no posee antecedentes significativos previos, se realizó un levantamiento geológico a escala 1:100.000 y se caracterizaron las fuentes termales que se encuentran en los bordes de la concesión.

Con los datos recogidos se concluyó respecto del modelo geotérmico de Puchuldiza y las posibilidades energéticas de Guanacota.

La principal conclusión para el sector de Puchuldiza es que se trata de un campo geotérmico cuya fuente de calor proviene de la intrusión de magmas ácidos del Plio-Pleistoceno sobre una posible caldera erodada. El calor proveniente de este cuerpo calienta las aguas meteóricas que se infiltran ya sea por la zona de Cerro Blanco o bien provendrían de sectores más lejanos como el salar de Coipasa localizado al este de este lugar. Un primer reservorio geotérmico más somero se trataría de tobas fracturadas junto a grandes espesores de areniscas argilizadas donde dominan los flujos horizontales, existiendo posiblemente un segundo y más profundo reservorio geotermal caracterizado por flujos de vapor de movimiento vertical ascendente.

Una característica importante de la geoquímica de aguas es que la fuente de calor podría encontrarse de manera somera o bien aportar significativamente a la química de las aguas por medio de la existencia de fallas normales profundas de orientación norte-sur que sirven de vía para la conexión con aguas magmáticas. Las temperaturas entregadas por los geotermómetros de cationes y sílice indican valores entre 240° C y 160°C, respectivamente para subsuperficie.

Por su parte, Guanacota no entrega indicios de sistemas geotermales de importancia por cuanto la geoquímica de sus aguas evidencia acuíferos en profundidad con alta dilución, representando tal vez un “outflow” de centros volcánicos de envergadura.

La geología de ambas zonas se correlaciona muy bien, encontrándose prácticamente la misma litología.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- EXPOSICIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2.- UBICACIÓN Y ACCESOS AL CAMPO GEOTERMAL.....	2
1.3.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	5
1.3.1.- Topografía.....	5
1.3.2.- Clima, fauna y vegetación.....	7
1.3.3.- Hidrografía.....	8
1.3.4.- Asentamientos humanos.....	9
1.4.- ANTECEDENTES GENERALES.....	9
1.4.1.- Modelo conceptual del campo geotérmico de Puchuldiza.....	9
1.4.2.- Antecedentes geotérmicos generales.....	10
1.5.- HIPÓTESIS.....	11
1.6.- OBJETIVOS.....	11
1.6.1.- Objetivo general.....	11
1.6.2.- Objetivos específicos.....	11
CAPÍTULO II: GEOLOGÍA DE PUCHULDIZA.....	13
2.1.- METODOLOGÍA.....	13
2.2.- MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	13
2.3.- GEOLOGÍA Y ACTUALIZACIÓN DE PUCHULDIZA.....	15
2.3.1.- Estratigrafía.....	15
2.3.2.- Centros volcánicos.....	20
2.3.3.- Actividad hidrotermal.....	21
2.3.4.- Estructuras.....	22
CAPÍTULO III: GEOQUÍMICA Y ALTERACIÓN TERMAL DE PUCHULDIZA.....	25
3.1.- METODOLOGÍA.....	25
3.2.- PRODUCTOS DE ALTERACIÓN EN ROCAS.....	25
3.3.- GEOQUÍMICA DE AGUAS.....	29
3.3.1.- Caracterización de las aguas.....	29
3.3.2.- Interpretaciones geoquímicas.....	31
3.3.3.- Geotermómetros.....	38
CAPÍTULO IV: GEOFÍSICA DE PUCHULDIZA.....	42
4.1.- METODOLOGÍA.....	42
4.2.- ANTECEDENTES GEOFÍSICOS.....	42
4.3.- LEVANTAMIENTO TEM y MT.....	44
4.3.1.- TEM.....	44
4.3.2.- MT.....	46
CAPÍTULO V: MODELO CONCEPTUAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO.....	48
5.1.- MODELO CONCEPTUAL PRELIMINAR.....	48
5.2.- UBICACIÓN DE POZOS DE EXPLORACIÓN.....	50
5.3.- POTENCIAL ESTIMADO.....	50

CAPÍTULO VI : RELACIÓN CON EL ÁREA DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA DE GUANACOTA.....	52
6.1.- METODOLOGÍA.....	52
6.2.- GEOLOGÍA DE GUANACOTA.....	52
6.2.1.- Estratigrafía	52
6.2.2.- Centros volcánicos	55
6.2.3.- Estructuras.....	56
6.2.4.- Alteración.....	57
6.3.- GEOQUÍMICA DE AGUAS	58
6.4.- CORRELACIONES	65
6.4.1.- Correlaciones estratigráficas	65
6.4.2.- Correlaciones geoquímicas	66
CAPÍTULO VII: DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
7.1.- DISCUSIONES	67
7.2.- CONCLUSIONES.....	73
7.3.- RECOMENDACIONES	76
REFERENCIAS.....	78

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de ubicación zona de estudio.....	4
Figura 1.2 Principales rasgos fisiográficos de Puchuldiza.....	6
Figura 1.3. Principales rasgos fisiográficos de Guanacota.....	7
Figura 2.1 DEM mostrando las unidades morfoestructurales de Chile	13
Figura 3.1 Ubicación de puntos de muestreo de aguas superficiales de Puchuldiza	29
Figura 3.2 Diagrama Piper con caracterización química de las aguas de Puchuldiza....	32
Figura 3.3 Diagrama ternario Cl-SO ₄ -HCO ₃ , para las aguas termales de Puchuldiza...	34
Figura 3.4 Gráfico de ploteo de isótopos de las aguas de Puchuldiza.....	37
Figura 3.5 Geotermómetro de cationes para las aguas de Puchuldiza.....	40
Figura 3.6 Geotermómetro de Sílice para las aguas de Puchuldiza.....	41
Figura 5.1 Esquema simplificado del modelo geotérmico de Puchuldiza.....	51
Figura 6.1 Imagen con la ubicación de muestras recolectadas en Guanacota.....	59
Figura 6.2 Diagrama de Piper para las muestras de Guanacota.....	61
Figura 6.3 Diagrama ternario de las aguas de Guanacota.....	62
Figura 6.4 Geotermómetro de cationes Na-K-Mg para las aguas de Guanacota.....	64
Figura 6.5 Correlación estratigráfica entre Puchuldiza y Guanacota.....	65
Figura 7.1 Comparación entre los geotermómetros de cationes para.....	68
Figura 7.2 Comparación de diagrama de piper para las muestras de Puchuldiza.....	70
Figura 7.3 Gráfico de comparación de razones molares Na-Li para Puchuldiza.....	71
Figura 7.4 Gráfico de comparación de razones Cl-F para Puchuldiza.....	71
Figura 7.5 Gráfico de comparación de las razones molares Cl/SO ₄ para Puchuldiza....	72
Figura 7.6a Modelo clásico del campo geotérmico de Puchuldiza.....	75
Figura 7.6b Modelo propuesto del campo geotérmico de Puchuldiza.....	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Resultado del análisis de ls muestras de agua de Puchuldiza.....	33
Tabla 3.2 Razones molares para las aguas termales de Puchuldiza.....	35
Tabla 6.1 Resultado del análisis de ls muestras de agua de Guanacota.....	60
Tabla 6.2 Razones molares para las aguas termales de Guanacota.....	60
Tabla 7.1 Resultado anteriores del análisis químico de las aguas de Puchuldiza.....	69
Tabla 7.2 Razones molares calculadas para muestreos anteriores de Puchuldiza.....	69

ANEXOS

Entrega digital en CD:

- ANEXO I. **MAPAS GEOLÓGICOS**
- ANEXO II. **FOTOGRAFÍAS**
- ANEXO III. **PLANTA Y PLANOS GEOFÍSICOS**

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1.- EXPOSICIÓN DEL PROBLEMA

La exploración geotérmica en Chile comenzó en 1968 como resultado de un proyecto suscrito por el gobierno chileno y el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (PNUD) (Lahsen, 1976). Dicho programa tuvo como objetivo la determinación de posibilidades de desarrollo de energía geotérmica en Los Andes de las regiones de Tarapacá y Antofagasta, cubriendo un área de 108.000 kilómetros cuadrados. Uno de aquellos prospectos denominado Puchuldiza fue objeto de una intensa exploración, junto al desarrollo de las investigaciones del sistema geotérmico El Tatio.

El proyecto Puchuldiza tuvo un auge tal que gracias a los estudios realizados se pudieron perforar cinco pozos de exploración, los cuales fueron sistemáticamente medidos, aportando con esto en el conocimiento del campo en sí. Un sexto pozo fue perforado en las campañas de investigación realizadas por la *Japanese International Cooperation Agency JICA* entre los años 1979 y 1981.

Desgraciadamente en 1981 el proyecto fue cerrado por las autoridades de la época quienes argumentaron problemas de financiamiento, quedando inconcluso todo el trabajo realizado.

Hoy, con la intención de dar un nuevo auge a la exploración y explotación geotérmica, el gobierno de Chile a través de la ley n° 19.657 sobre concesiones de exploración y explotación de energía geotérmica, decretada a inicios del 2000, ha promovido la inversión del sector privado en el negocio energético ingresando con ello capital que permitirá ampliar la matriz energética.

Es así como MINERA COPIAPÓ, una empresa de GRUPO ERRÁZURIZ, tras licitación efectuada en 2006, se adjudicó las concesiones de exploración geotérmica denominadas TUJA y TAIPICOLLO las cuales en conjunto son una parte del otrora proyecto Puchuldiza.

En este contexto, después de más de 27 años de cese se hace muy importante revalidar la geología, geoquímica y geofísica estudiadas en aquella época con el fin de actualizar los datos existentes transformando a este proyecto como un prospecto de interés para inversionistas, además de entregar nuevos aportes.

Por otro lado, distante 25 kilómetros al sur de Puchuldiza, se encuentra el área de exploración geotérmica denominada Guanacota también concedida a MINERA COPIAPÓ. Dicha zona de estudio se presenta como un terreno nuevo en cuanto a su investigación geológica y geotérmica.

Por ello, el presente trabajo de título busca ser un aporte en el conocimiento actual del campo geotérmico de Puchuldiza, a la vez que relacionar sus características geotermales con aquellas del sector de Guanacota.

1.2.- UBICACIÓN Y ACCESOS AL CAMPO GEOTERMAL

El campo geotérmico de Puchuldiza se encuentra en el altiplano chileno de la Región de Tarapacá, aproximadamente a 200 kilómetros al NE de la ciudad de Iquique, en una cuenca tectónica rodeada por cadenas de volcanes de edad plioleistocénica (Lahsen, 1978). Como se ha mencionado anteriormente el sector de Guanacota se ubica inmediatamente al sur de Puchuldiza.

Las coordenadas de las tres áreas concedidas para su exploración junto a sus respectivas superficies se presentan a continuación:

TUJA		1.800 Hectáreas	
VÉRTICE	ESTE [km]	NORTE [km]	
A	500	7.859	
B	506	7.859	
C	506	7.856	
D	500	7.856	

TAIPICOLLO		1.200 Hectáreas	
VÉRTICE	ESTE [km]	NORTE [km]	
A	502	7.862	
B	506	7.862	
C	506	7.859	
D	502	7.859	

GUANACOTA		54.600 Hectáreas	
VÉRTICE	ESTE [km]	NORTE [km]	
A	495	7.850	
B	521	7.850	
C	521	7.829	
D	495	7.829	

El acceso a las zonas de estudio se realiza a través de la ruta internacional A-55 que une la localidad de Huara con el poblado fronterizo de Colchane. Desde esta ruta se desprenden diversos caminos que conectan con las distintas localidades del interior, gracias a los cuales se puede llegar a la mayor parte de las áreas concedidas.

Los caminos son en general bastante transitables, a excepción de aquellos que se encuentran en las cercanías del campo geotermal de Puchuldiza, los cuales por efectos de las abundantes precipitaciones en el Invierno Altiplánico suelen quedar anualmente muy deteriorados.

Para efectos de los trabajos exploratorios del presente trabajo se realizaron reparaciones de los accesos al interior del campo geotérmico.

En la Figura 1.1 se muestra la ubicación de Puchuldiza en relación al territorio nacional, así como las principales rutas y localidades.

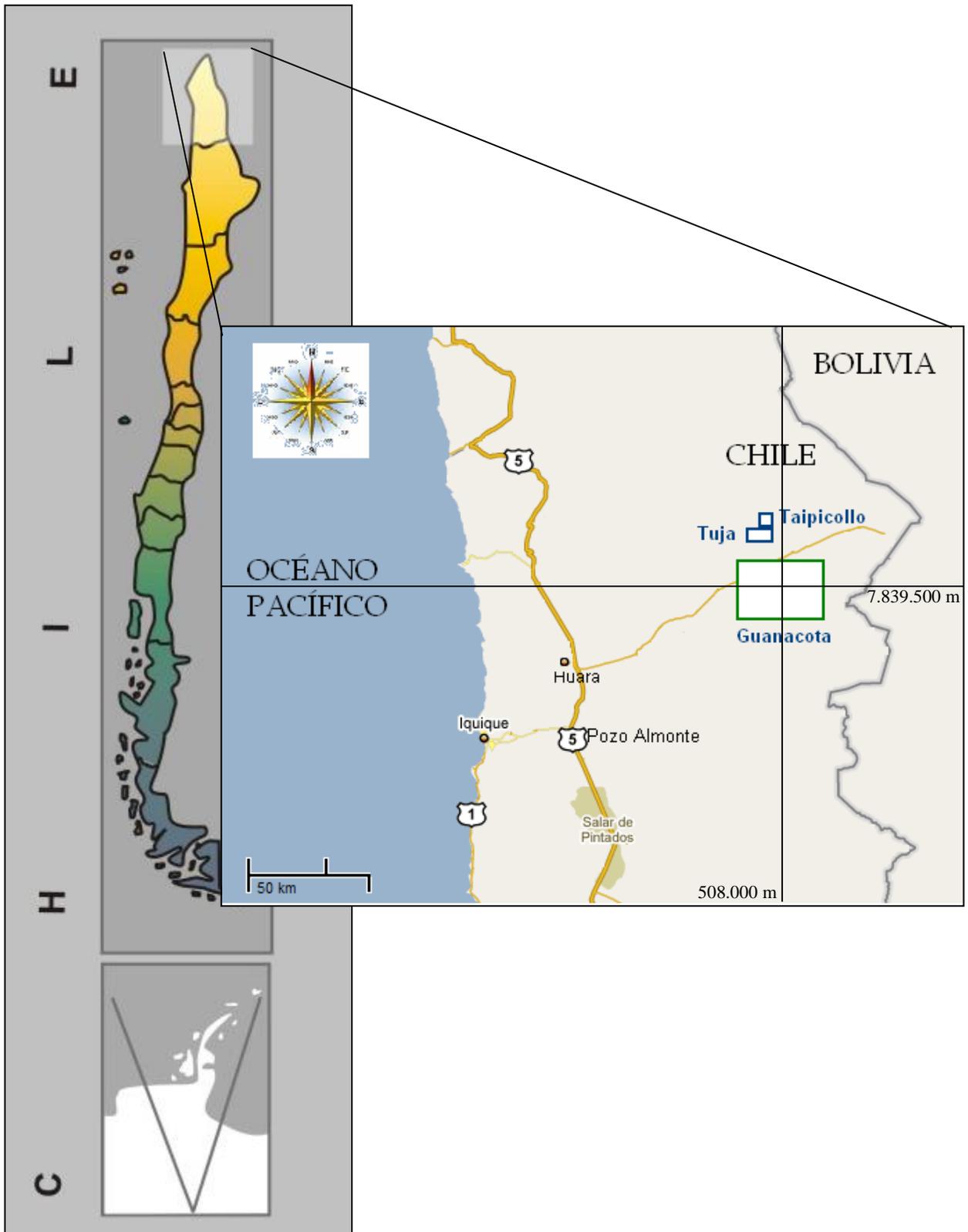


Figura 1.1. Mapa de ubicación de las zonas de estudio en relación al territorio nacional. Las dimensiones areales de las concesiones geotérmicas están exageradas con la finalidad de mostrar la relación entre ellas.

1.3.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.3.1.- Topografía

Como se señaló anteriormente, el campo geotérmico de Puchuldiza se ubica en una depresión cuya altura promedia los 4.150 m s.n.m. (Figura 1.2). Se encuentra circundada por cordones montañosos abruptos con elevaciones que en algunos casos superan los 5.000 m de altitud. Está topográficamente delimitado al N por la Serranía de Macurquima donde destaca el Volcán Cerro Blanco o Ancocollo que sobrepasa los 5.200 m de altura; al sur por la Serranía de Pesajere con el Volcán Queitani que alcanza los 5.161 m s.n.m. y al Este por el Cerro Condoriri de 4.894 m de altura (Lahsen, 1978).

En el interior de esta cuenca destaca el Cerro Taipicollo en cuyo borde SE desarrollan las manifestaciones principales del campo, y el Cerro Churicollo ubicado inmediatamente al sur del anterior. Ambos corresponden a relieves suaves, de fácil acceso a sus puntos de máxima altura.

Diferentes quebradas se observan en el área entre las que tiene especial importancia Quebrada Tuja, ubicada aproximadamente a 3,5 kilómetros al noroeste del sector de Cerro Taipicollo. Esta quebrada con orientación NNE y que comunica con los faldeos de la Serranía de Macurquima presenta manifestaciones termales cuyas investigaciones han resultado de particular interés. (Figura 1.2)

Por su parte, el área de exploración Guanacota posee muy similares condiciones topográficas. Las alturas importantes se corresponden con centros volcánicos por sobre los 4.500 metros. Entre estos se pueden mencionar al cerro Jachura, Volcán Huayna Potosi, Volcán Queitani y Cerro Tapa (Figura 1.3).

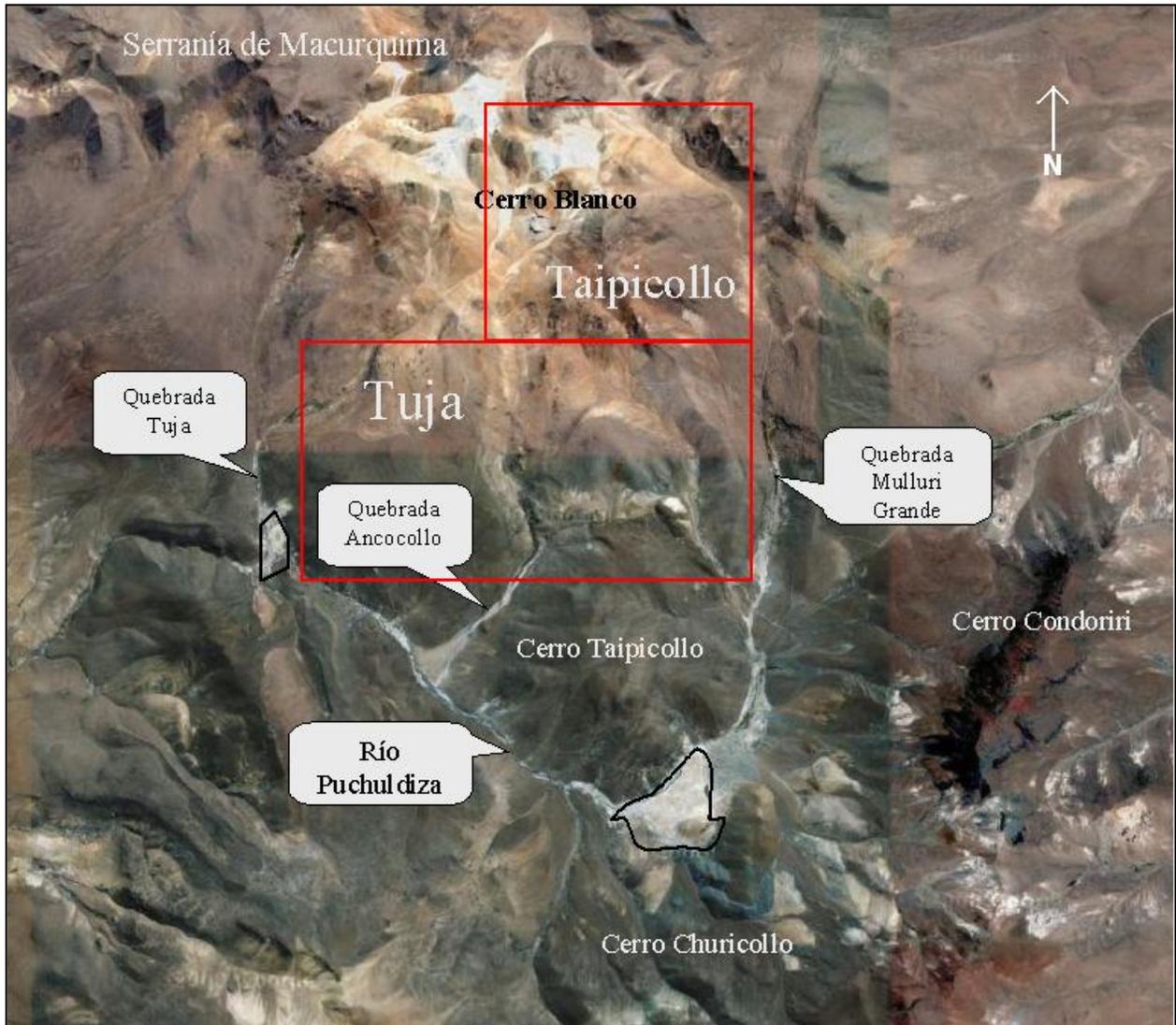


Figura 1.2. Principales rasgos fisiográficos del campo geotérmico de Puchuldiza. Se observan las manifestaciones termales encerradas en polígonos con bordes negros y los límites de las concesiones de exploración otorgadas en color rojo: Tuja y Taipicollo.

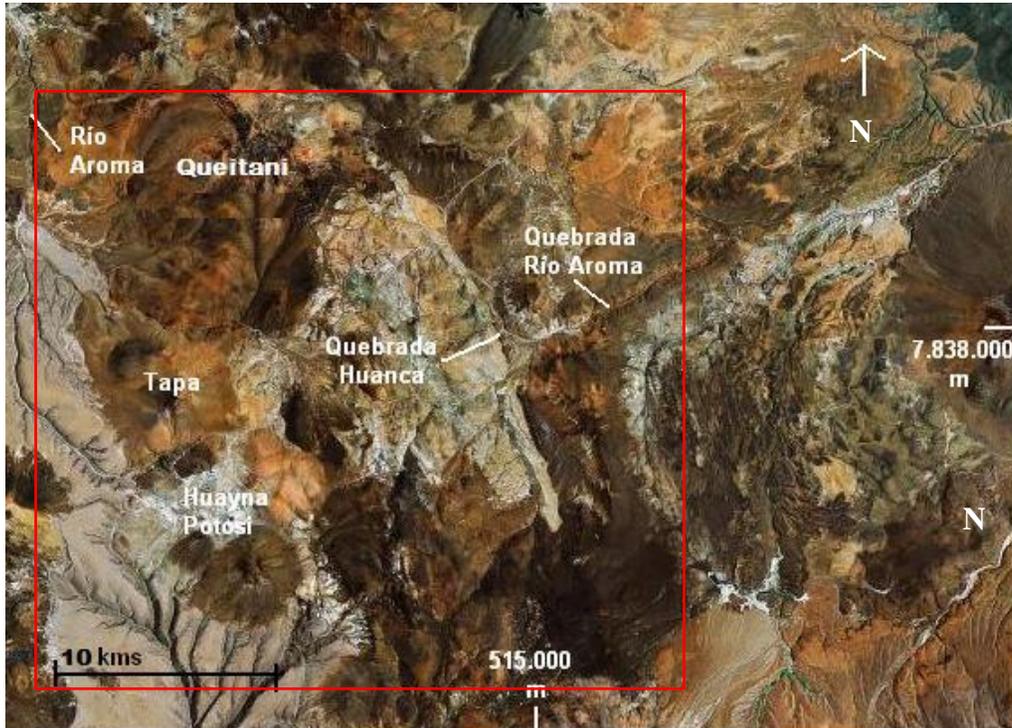


Figura 1.3. Principales rasgos fisiográficos del área de exploración geotérmica de Guanacota. En rojo se muestra el área que comprende esta zona de estudio.

1.3.2.- Clima, fauna y vegetación

El clima dominante en la zona es el de estepa de altura, el cual a esta latitud se presenta por sobre los 3.500 m de altitud, con temperaturas medias bajas no superando los 5 °C y gran amplitud térmica diaria, alrededor de 20° C. Las precipitaciones provienen de las masas de aire cargadas de humedad que ascienden convectivamente por la ladera oriental de la Cordillera de Los Andes cuyo origen se encuentra en la cuenca del Amazonas y del Atlántico. Dichas precipitaciones ocurren con gran abundancia principalmente en las tardes de verano, donde en algunos sectores superan incluso los 400 mm anuales (Dirección Meteorológica).

La fauna presente en este sector es aquella típica del clima anteriormente descrito. Se pueden observar plantas en cojines como el coirón y la llareta, además de tolas y bofedales, estos últimos asociados a humedales provenientes de escorrentías subterráneas aflorantes.

Entre la fauna reconocida se pueden mencionar zorros, burros silvestres y gran cantidad de ganado auquénido como llamas, vicuñas y alpacas, junto a roedores como la vizcacha, y aves como patos, cóndores, águilas, perdices y ñandúes.

1.3.3.- Hidrografía

El principal rasgo hidrográfico de la zona donde se encuentran las tres áreas concedidas es el Río Aroma. Este río tiene la particularidad de nacer cerca de los pies del Cerro Huayna Potosi, hacia el Sur de la zona de estudio, y desde ahí poseer dos ramas, una en dirección E-O aproximadamente; y la otra en dirección NS; ambas ramas con el mismo nombre (Figura 1.2).

Dicho río crece en caudal hacia el Norte, donde recibe las aguas de su principal tributario, el Río Puchuldiza, cuyas nacientes están ubicadas en las manifestaciones termales principales del campo geotérmico del mismo nombre, al SE del Cerro Taipicollo, por lo que la composición de sus aguas es la combinación de aguas someras y profundas.

El curso del Río Puchuldiza es de dirección aproximada NO y el caudal superficial que alcanza en sus inicios se ha calculado alrededor de 250 lts/seg de forma constante (Lahsen, 1978).

Destacan diversos bofedales que sirven para la reunión de la biodiversidad de la zona, los cuales son el resultado del afloramiento del nivel freático debido al fracturamiento y/o al hundimiento de la cobertura rocosa.

1.3.4.- Asentamientos humanos

El área correspondiente al presente estudio es una zona casi despoblada. Restos se observan de caseríos que en algunas ocasiones sirven de resguardo para el ganado de llamas y vicuñas, como ocurre en el caserío de Lupe, al final de la quebrada del mismo nombre, en el sector de Puchuldiza. También es posible observar posadas y pueblos que prácticamente poseen una población escasa, en ocasiones de no más de 10 habitantes. Tal es el caso de Mauque, ubicado alrededor de 10 kilómetros al este de Puchuldiza.

La población es principalmente de origen aymará y desarrollan como actividad principal la agricultura en aquellos sectores más húmedos, junto con la ganadería auquénida, como se ha mencionado.

1.4.- ANTECEDENTES GENERALES

1.4.1.- Modelo conceptual del campo geotérmico de Puchuldiza

La existencia de un campo geotérmico requiere de tres condiciones geológicas fundamentales (Trujillo, 1998) (Figura 1.4):

- La existencia de una fuente de calor somera (<5 km), que entregue energía constantemente al sistema.
- Capas con buen grado de permeabilidad (primaria o secundaria), que permitan el paso de los fluidos de manera activa. Estas capas deben además estar confinadas entre capas impermeables de tal manera que se restrinja la circulación de fluidos.
- La existencia de una zona de recarga hídrica que entregue flujos naturales de agua al sistema.

1.4.2.- Antecedentes geotérmicos generales

Variada es la información con que cuenta el campo geotérmico de Puchuldiza. Cabe señalar que durante el tiempo que este proyecto estuvo desarrollándose en la década de los setenta, se realizaron levantamientos geológicos, mediciones geofísicas, muestreos y análisis geoquímicos de sus aguas, y hasta la perforación de seis pozos de exploración como se indicó previamente.

La geología del área fue desarrollada por A. Lahsen (1975 y 1978), junto al catastro de las manifestaciones termales del área realizada completamente por P. Trujillo en 1970 (cf Cusicanqui, 1975). Ambos fueron los precursores de este proyecto.

La geoquímica de las aguas termales fue estudiada inicialmente por el geólogo H. Cusicanqui (1975 y 1978) y posteriormente por la geóloga M. Letelier (1981). En sus resultados se deja claramente establecida la alta entalpía de este sistema, así como otras características importantes como el tipo de reservorio, la permanencia del agua en el sistema y la posible fuente de recarga del mismo.

La geofísica se basó en mediciones de resistividad, gravimetría y magnetometría a diferentes profundidades. Entre los antecedentes revisados se encuentran aquellos realizados por Marinovic (1975) y JICA (1979).

Finalmente como se mencionó al inicio del presente trabajo, la perforación de los primeros cinco pozos de exploración geotérmica cuyas profundidades no superan los 1.000 metros fue realizado por cuenta de CORFO. Mientras, el sexto pozo fue obra de JICA y su profundidad es de 1.157 m.

Muy diferente es la situación del área de exploración geotérmica Guanacota donde no se han realizado estudios significativos de su potencial geotérmico.

Por tanto, es importante señalar que el presente trabajo pretende por una parte actualizar datos geoquímicos y geofísicos del sector de Puchuldiza, después de casi 30 años, proponiendo a través de estas zonas de interés para la perforación de nuevos pozos de exploración profunda; y por otro lado, generar el primer acercamiento con la comprensión del área de exploración geotérmica de Guanacota mediante desarrollos geológicos y geoquímicos, comparando y relacionando entre sí ambas áreas de investigación.

1.5.- HIPÓTESIS

Las características geotérmicas del área de Puchuldiza tienen semejanzas con aquellas del área de exploración de Guanacota.

1.6.- OBJETIVOS

1.6.1.- Objetivo general

Actualizar la información obtenida de las investigaciones geotérmicas realizadas en el campo geotermal de Puchuldiza, aportando nuevos datos para la recomendación de un pozo exploratorio.

Comparar las características geológicas y geoquímicas entre el campo geotérmico de Puchuldiza y la zona de exploración Guanacota.

1.6.2.- Objetivos específicos

Para actualizar los datos correspondientes al área de Puchuldiza, se han dispuesto los siguientes objetivos específicos:

- Revisar en terreno la geología desarrollada anteriormente y aportes en sector Quebrada Tuja.

- Actualizar las características geoquímicas del reservorio geotermal a través del análisis de sus aguas termales y reinterpretar las condiciones en subsuperficie.
- Revisar los estudios geofísicos anteriormente desarrollados junto con el nuevo aporte entregado por estudios magnetotelúricos realizados en el presente trabajo.
- Finalmente, proponer zona(s) de interés para la perforación de nuevos pozos exploratorios, con base en los antecedentes expuestos.

Para concretar la comparación entre el sector de Puchuldiza y el área de exploración Guanacota, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un levantamiento geológico del área de exploración geotérmica Guanacota a escala 1:100.000.
- Muestrear y analizar aguas, al interior de la misma y en sus bordes.
- Realizar correlaciones estratigráficas y geoquímicas entre ambas zonas de estudio.

CAPÍTULO II: GEOLOGÍA DE PUCHULDIZA

2.1.- METODOLOGÍA

Se recopiló información y antecedentes sobre la geología del altiplano así como la desarrollada en el sector de Puchuldiza. Una vez hecha la revisión correspondiente de estos antecedentes, se definieron los objetivos de interés a visitar en el trabajo de terreno, el cual se desarrolló con una duración de 3 meses en total, separados en visitas de 15 días cada una aproximadamente. Los datos fueron traspasados al plano topográfico, el cual fue digitalizado y trabajado con el programa ARCGIS para generar el mapa final.

2.2.- MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Tanto la zona de Puchuldiza como Guanacota se ubican dentro de la unidad morfoestructural denominada Cordillera Occidental, la cual corresponde al borde Oeste del plateau altiplánico. Este rasgo fisiográfico se caracteriza por ser el actual arco volcánico de los Andes (Figura 2.1).

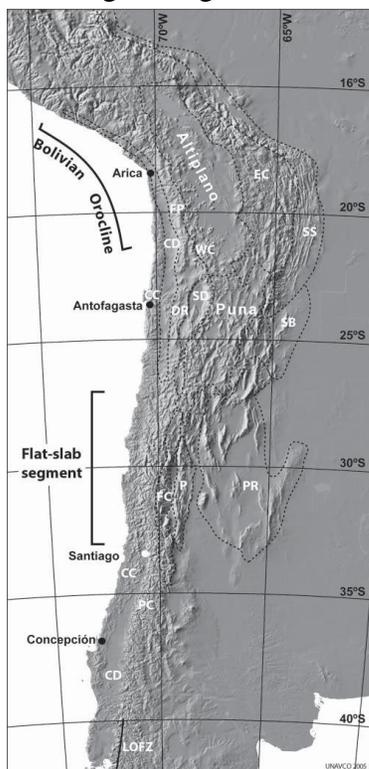


Figura 2.1

DEM mostrando las unidades morfoestructurales de Chile, entre las que destacan para el presente estudio aquellas correspondientes al sector del Altiplano.

CC, Cordillera de la Costa; CD, Depresión Central; FP, Cordillera frontal o Precordillera; WC, Cordillera Occidental; EC, Cordillera Oriental; SS, Sierras Subandinas. Tomado de Charrier et al, 2007.

La evolución geológica de la zona en su contexto regional es aquella que generó la actual geología del altiplano chileno, la cual se conoce gracias a diversos afloramientos a lo largo de las dos regiones más septentrionales de Chile; afloramientos que van desde el Paleozoico Temprano al Plio-Pleistoceno.

La geología del altiplano comprende una sucesión alternada de depósitos sedimentarios fluvio-lacustres, volcánicos y volcano-clásticos que tiene sus orígenes a fines del Triásico Superior con el desarrollo del arco volcánico de La Negra en la actual Cordillera de La Costa y que culmina con los depósitos Plio-Pleistocenos de Formación Lauca y los depósitos evaporíticos que dan origen a los salares.

Esta secuencia es el resultado de procesos tectónicos compresivos y extensionales junto a eventos magmáticos ácidos que generaron extensos mantos de ignimbritas. El plateau altiplánico posee una estructura de pop-up, en cuyos bordes oriental y occidental se desarrollan fallas inversas de vergencias divergentes que permiten el cabalgamiento de rocas mesozoicas sobre rocas cenozoicas.

Según Charrier y Muñoz (1996) la base de la estratigrafía altiplánica se registra en los depósitos sedimentarios de la extensa cuenca marina de trasarco de Perú-Chile, entre los que destacan aquellos que corresponden a los sedimentos clásticos arenosos de la Formación Livilcar (Muñoz et al., 1988) y los espesores conglomerádicos de la Formación Chusmiza (Harambour, 1990), ambas del Cretácico Inferior.

Sobre estos depósitos se ubican los productos del volcanismo ácido del Cretácico Superior de la Formación Panjuacha (Harambour, 1990), que se correlacionan con el volcanismo de similares características de las cercanías de Calama y Antofagasta (arco de Quebrada Mala) (Muñoz et al., 1989), los que subyacen a las efusiones de magmatismo básico de la Formación Quebrada Honda (Harambour, 1990) del Jurásico Superior.

Hacia el techo de la estratigrafía altiplánica se ubican los afloramientos de la Formación Chucal (Muñoz, 1991) del Terciario Inferior, la cual es un depósito de sedimentos fluvio-lacustres con abundante contenido orgánico, como lo atestiguan las rocas expuestas hacia el sector de Surire. Intruyendo a esta Formación se desarrolla una intensa actividad volcánica ácida en el Mioceno, que originó extensos mantos ignimbríticos que cubren una superficie de más de 20.000 kilómetros cuadrados (Formación Oxaya, Formación Altos de Pica; Charrier y Muñoz, 1996).

En el techo de esta secuencia se encuentran los sedimentos fluvio-lacustres de la Formación Lupica (Muñoz, 1991) y el volcanismo más reciente que es fuente de los campos geotérmicos en esta región del país, así como azufreras y posibles auríferas. Finalmente, sobreyacen a todo el conjunto los depósitos Plio-Pleistocenos de la Formación Lauca.

2.3.- GEOLOGÍA Y ACTUALIZACIÓN DE PUCHULDIZA

El mapa geológico del área de Puchuldiza modificado y actualizado de Lahsen (1976), J.I.C.A. (1979) y Argandoña (1984), se entrega en ANEXO I: MAPAS GEOLÓGICOS.

La geología de este campo geotérmico es objeto de estudio desde inicios de los años setenta, gracias a las investigaciones realizadas en esa oportunidad por los geólogos A. Lahsen y P. Trujillo. Una comisión japonesa de J.I.C.A. realizó posteriores actualizaciones y aportes entre 1979 y 1982. Finalmente Argandoña (1984) estudió la geología del sector noroeste del campo, específicamente en el área de manifestaciones termales de Quitariri, la cual no es parte de este trabajo.

2.3.1.- Estratigrafía

La secuencia estratigráfica expuesta, de base a techo, se describe a continuación. En ANEXO II se encuentran las fotografías mencionadas en este capítulo. La Foto 2.1 muestra la estratigrafía observada en Cerro Condoriri.

La **Formación Churicollo** se establece como la unidad más antigua reconocida en el sector cuyas relaciones estratigráficas y estructurales inducen a atribuirle una edad Cretácico Medio a Superior. Está compuesta por una secuencia de rocas sedimentarias continentales de origen fluvio-lacustre, de color gris azulado, que se intercala con niveles conglomerádicos brechosos cuyos clastos están constituidos por andesitas (Lahsen, 1978). Se distribuyen en el sector sureste de Cerro Taipicollo, específicamente al sur de las manifestaciones termales principales de la zona. Notorio es observar el característico color azulado de sus afloramientos.

Su matriz arcillosa y la fuerte compactación de los sedimentos la hacen prácticamente impermeable, por lo que la posibilidad de albergar reservorios en profundidad es escasa. Por ello se considera a esta formación como el basamento del sistema geotermal de Puchuldiza (Lahsen, 1978).

Para Argandeña (1984), se correlaciona con las intercalaciones de niveles sedimentarios clásticos del miembro superior de la Formación Cerro Empexa (Galli, 1957), de edad Cretácica, ubicada aproximadamente a 100 km al sur del área de este estudio, que además se caracteriza por la cloritización y epidotización de su matriz.

Subyace discordantemente a las formaciones volcánicas y sedimentarias que van desde el Mioceno hasta el Plio-Pleistoceno.

La **Formación Utayane** se distribuye a los pies del faldeo de Cerro Condoriri (Foto 2.1) y corresponde a un conjunto de tobas blanquecinas densamente soldadas y parcialmente vítreas, de espesor aproximado de 160 metros, y que según Lahsen (1978) posee niveles de fracturamiento y lixiviación que permiten inferir una buena capacidad para albergar niveles de acuíferos en profundidad.

Es por medio de la acción del fallamiento normal de dirección NS de Falla Condoriri que es posible apreciar los afloramientos de esta formación. También se verificó en terreno que es a

través de estas tobas por donde emergen las manifestaciones termales de Cerro Taipicollo, por lo que no es fácil en ciertos sectores realizar la distinción entre depósitos de sínter compuestos exclusivamente de sílice y roca argilizada, donde la litología en esta última ha sido completamente obliterada.

Para Argandoña (1984), esta unidad es correlacionable litológicamente con las rocas piroclásticas del Miembro Superior de la Formación Cerro Empexa.

Según Lahsen (1978), la **Formación Chojña Chaya** se aprecia como una secuencia de 60 a 80 metros de areniscas verdes bien estratificadas con delgadas intercalaciones de conglomerados finos, que se encuentran sobreyaciendo a Formación Utayane. Esta secuencia aflora también en los faldeos de Cerro Condoriri (Foto 2.2).

Para este autor, las areniscas y conglomerados poseen elementos depositados en condiciones lacustres a sub-aéreas por acción eólica y sus características petrográficas la señalan como moderadamente permeables.

En terreno se observó tal secuencia, cuyos grados de alteración hacen que su color sea verdoso a blanco, y donde la matriz está en parte argilizada. En otros sectores del presente estudio, la Formación Chojña Chaya se extiende ampliamente, manteniendo su marcado manteo entre 20° y 30° al E.

Sobreyaciendo a la secuencia sedimentaria anterior, se ubica discordantemente la **Formación Condoriri** que según la geología desarrollada por Lahsen (1978) está compuesta por aproximadamente 200 metros de tobas soldadas, blancas, grisáceas y rosadas, en parte brechosas debido al alto contenido en lapilli de pómez y fragmentos andesíticos.

Su mayor exposición se observa en el cerro del mismo nombre y hacia el Este, así como en vastas zonas al sur de este campo geotérmico. Es distinguible por desarrollar paredes muy

verticales y de un marcado tono claro, sobre las cuales se ubican niveles de rocas más oscuras correspondientes a la Formación Puchuldiza (Foto 2.3).

Esta formación presentaría según Lahsen (1978) buenos niveles de permeabilidad con capacidad para alojar acuíferos en profundidad, principalmente debido a la permeabilidad ocasionada por tectonismo o enfriamiento de los flujos de tobas. La edad asignada a esta Formación es Mioceno Medio a Superior.

Para Argandoña (1984), la Formación Condoriri mantiene las mismas relaciones de contacto y estratigráficas que los Estratos de Quitariri, en el sector occidental del área de Puchuldiza, por lo que este autor le asigna una edad tentativa Mioceno Inferior a Medio. Estos últimos están constituidos por diferentes niveles de tobas vítreas soldadas de color gris violáceas a gris oscuro.

Inicialmente la Formación Condoriri se describió como compuesta por dos miembros, siendo el Miembro Superior ubicado por Lahsen (1978) dentro de lo que actualmente se conoce como Formación Puchuldiza, como resultado de la estratigrafía encontrada en la perforación de pozos de exploración geotérmica de ese mismo año.

La **Formación Puchuldiza** definida por Lahsen (1973) posee un miembro inferior compuesto por un primer nivel de areniscas grises oscuras correspondientes a cenizas volcánicas seguido superiormente por un paquete de dacitas negras vítreas y andesitas porfíricas de textura gruesa, en parte silicificadas y cloritizadas, de espesor variable entre 20 y 150 metros que constituyen la cima de la Serranía de Condoriri; y un miembro superior consistente en tobas soldadas de color rosado a pardo violáceo con abundantes fiamme (Foto 2.4). Argandoña (1984) la señala con una edad Mioceno Media.

Se puede observar que la extensión de la Formación Puchuldiza es amplia, apareciendo por lo menos 10 a 20 kilómetros al sur de Puchuldiza, donde también sobreyace a depósitos ignimbríticos asociados a la Formación Condoriri. Dentro del campo geotérmico, es posible

apreciarla principalmente en el Cerro Taipicollo y a lo largo del río Puchuldiza, en su ladera norte.

En el sector más occidental del área de estudio aparece en la ladera oeste de Quebrada Tuja, donde es posible observarla bajo depósitos morrénicos (Foto 2.5). Es en este sector donde las andesitas del Miembro Inferior son cubiertas por las lavas de las erupciones Plio-Pleistocenas de los complejos volcánicos más recientes.

La **Formación Lupe** se dispone mediante discordancia de erosión sobre la Formación Puchuldiza, encontrándose sus afloramientos hacia el sector SSO del área geotermal de Puchuldiza. Según la estratigrafía entregada por Lahsen (1976), se trata de una serie de sedimentos clásticos continentales y piroclásticos que se dividen en una parte inferior integrada por areniscas, brechas y conglomerados, secuencia que posee abundante material proveniente de la formación infrayacente; y una parte superior que incluye sedimentos piroclásticos y tobas (Foto 2.6). El mismo autor le asigna una edad posterior al Mioceno Superior.

La mayor exposición de los afloramientos de esta formación puede observarse al oeste de Puchuldiza, en el sector estudiado por Argandoña (1984), a través de los cuales emergen las aguas calientes de Pingallure las que no son parte del análisis del presente trabajo.

Finalmente este último autor, cuyo trabajo se desarrolló al interior del actual Parque Nacional Isluga, estableciendo secuencias correlacionables con la estratigrafía descrita para Puchuldiza, definió a la **Ignimbrita Guailleane** como una formación compuesta de tobas vítreas fuertemente soldadas, tobas sin soldamiento y brechas piroclásticas que en general tienen colores claros. Debido a que en la parte superior de esta formación se encuentran tobas soldadas vítreas las cuales poseen mayor resistencia a la erosión, se ha originado una superficie sub-horizontal característica de este conjunto.

Es posible apreciarla en toda la extensión de Quebrada Aroma, desarrollándose incluso hasta el sur de Cerro Jachura, como un paquete grueso entre 10 y 50 metros de espesor, y donde la acción eólica ha moldeado una variedad amplia de formas. Se disponen discordantemente sobre la Formación Puchuldiza e infrayacentemente a las lavas del volcán Guailleane.

Dada la posición estratigráfica sobreyacente a Formación Puchuldiza a la cual se le ha asignado tentativamente al Mioceno Medio, y a las dataciones realizadas por Lahsen y Munizaga (1979) a tobas soldadas de la parte superior por medio de K-Ar en roca total, las cuales arrojaron un valor de $12,7 \pm 0,1$ Ma, se puede considerar a esta formación de edad Mioceno Medio-Superior.

Esta ignimbrita junto con las lavas de composición andesítica que se encuentran en el Volcán Guailleane, son definidas en el presente estudio como **Formación Guailleane**.

2.3.2.- Centros volcánicos

Sobreyaciendo a las unidades descritas anteriormente, se ha desarrollado una importante actividad volcánica Pliocena expresada como un conjunto de estratovolcanes andesíticos que conforman la Serranía de Macurquima (Lahsen, 1976). La composición de este volcanismo consiste principalmente de flujos de lava andesítica, dacítica y riódacítica (Trujillo, 1970).

Argandoña (1984) definió a este conjunto volcánico como Grupo Latarani-Macurquima (ver ANEXO I, MAPAS GEOLÓGICOS). Según el autor, no se observan cráteres sino solamente circos y valles glaciales. La importancia de este volcanismo reciente radica en que estos serían la fuente de calor que alimenta el sistema geotermal de Puchuldiza.

En las inspecciones realizadas en las cercanías de Cerro Blanco y Cerro Macurquima (ver ANEXO I, MAPAS GEOLÓGICOS), es posible distinguir dos tipos litológicos diferentes. Uno de ellos, observable a lo largo de la ladera este de Quebrada Tuja, se define como una dacita violácea con abundantes ojos de cuarzo la cual se ubica sobre las andesitas de la Formación

Puchuldiza y atribuidas como productos volcánicos derivados de los centros asociados a Cerro Blanco.

Por su parte, en la ladera oeste de Quebrada Tuja, las andesitas e ignimbritas de Formación Puchuldiza son atribuidas en el presente estudio a la actividad volcánica de Cerro Macurquima y los volcanes que le rodean (Foto 2.7).

Por ello, se infiere que la actividad volcánica Plio-Pleistocena produjo derrames de lava que actualmente cubren a la Formación Puchuldiza en la mayor parte del sector norte de Cerro Taipicollo, y que se encuentran limitados por la Falla de Tuja hacia el sector oeste.

2.3.3.- Actividad hidrotermal

La actividad hidrotermal superficial tiene sus principales representantes en las manifestaciones termales ubicadas al sureste de Cerro Taipicollo y al inicio de Quebrada Tuja, esta última localizada cerca de 3,5 kilómetros al noroeste de las manifestaciones principales (Figura 1.2). Tales manifestaciones se componen de surgencia de aguas calientes a través de vertientes y pozones, una menor proporción de pozas de barro hirvientes, geysers y fumarolas.

Trujillo (1970) catastró cerca de 170 fuentes termales en el campo geotérmico, cuyas temperaturas bordean los 86 °C, temperatura de ebullición para una altura de 4.100 m s.n.m. Las manifestaciones termales señaladas emergen gracias al fracturamiento producido por las fallas principales que cruzan la zona de estudio: Falla Puchuldiza, Falla Condoriri y Falla Tuja.

Además de las fuentes termales del área, se presentan sectores de fuerte alteración hidrotermal a lo largo de las trazas de las fallas de Puchuldiza y Queñiza (ver ANEXO I, MAPAS GEOLÓGICOS), donde las andesitas e ignimbritas de la Formación Puchuldiza se encuentran casi completamente silicificadas, cloritizadas y argilizadas, lo que hace prácticamente imposible reconocer la litología original de la roca (Lahsen, 1976).

Por otro lado, es notoria la depositación de sínteres silíceos y evaporitas debido al alto contenido salino de las aguas.

Hacia el sector de Quebrada Tuja es particularmente visible la intensa alteración hidrotermal de sus laderas, las que corresponden a una completa argilización de la roca, con minerales como caolinita, jarosita, alunita y sericita (Foto 2.10).

Este tipo de alteración se asocia a depósitos epitermales de alta sulfidización, lo que ha llevado a algunas empresas a realizar sondajes para la exploración de yacimientos de oro y plata, especialmente en el sector de Cerro Blanco donde existe una extensa e intensa zona de alteración argílica avanzada junto con azufreras, tal como se ha mencionado.

2.3.4.- Estructuras

Las diferencias en el estilo estructural de las rocas de Puchuldiza permitieron a Argandoña (1984) diferenciarlas en tres fases estructurales que a continuación se describen:

- **Fase Estructural Inferior:**

A este piso pertenecen las formaciones cretácicas, en este caso Formación Churicollo. La característica principal es el fuerte plegamiento de las capas de esta Formación; sus pliegues son apretados, de amplitud menor a 1 km, levemente volcados al oeste, con ejes orientados NNO a NS y con fuerte buzamiento al sur (Lahsen, 1976). Argandoña (1984) también identifica a la Formación Utayane dentro de este piso, argumentando que su edad no está completamente definida y que es probable asignarle una edad pre-miocénica dada por la alteración que presenta, la cual no existe en rocas miocénicas.

- **Fase Estructural Intermedia:**

Corresponden a las unidades asignadas al lapso Mioceno inferior-Mioceno medio que están representadas por la Formación Condoriri y Formación Puchuldiza, de gran desarrollo areal. Se disponen monoclinas y suavemente plegadas, sobreyaciendo a las formaciones cretácicas, y cuyo estilo se diferencia notablemente con las formaciones subyacentes. Argandoña (1984) establece como pertenecientes a esta fase las fallas NO-SE, entre las que destaca la Falla Puchuldiza (ANEXO II: MAPA GEOLÓGICO DE PUCHULDIZA); y las fallas NS (Falla Condoriri, Falla Tuja), las cuales son verticales y que desaparecen cubiertas por los flujos de lavas de los centros volcánicos Pleistocenos. En este sentido, Lahsen (1976) señala que dichos sistemas de fallas se produjeron por una fase tectónica distensiva la cual se desarrolló durante el Plioceno-Cuaternario.

- **Fase Estructural Superior:**

Pertenecen a esta clasificación la Formación Lupe y los Centros Volcánicos Plio-Pleistocenos. La característica de estos es según Argandoña (1984) el control estructural en la depositación de las Formaciones, observándose fuertes cambios de manto hacia los límites de las unidades. El lapso de tiempo asignado para esta fase es de Mioceno Superior-Pleistoceno.

El fallamiento antes descrito es el responsable de la depresión volcano-tectónica en la que se encuentra este campo geotérmico, siendo el graben del conjunto el Cerro Taipicollo y el horst correspondiente el Cerro Condoriri.

Para Argandoña (1984), la deformación que afectó a la zona de estudio puede ser diferenciada en los siguientes episodios tectónicos:

- Un evento compresivo que afectó a las unidades de la Fase Estructural Inferior y que es la responsable de la discordancia angular y de erosión entre las formaciones de este piso estructural y el siguiente. Argandoña (1984) también propone que este evento pueda ser atribuido a la fase

orogénica Subhercínica, a la fase tectónica Larámica o bien a la fase Incaica, o al efecto combinado de todas en conjunto.

- Un evento compresivo de fines del Mioceno Medio y atribuido a la fase Quechua que generó las fallas regionales de dirección NO-SE.

- Un evento deformativo en el Mioceno superior que produjo la activación del juego de fallas NS.

- Finalmente un evento distensivo de edad Pleistoceno que afecta a todas las unidades descritas del sector.

En el presente estudio, el reconocimiento de la zona permite inferir no solo el fallamiento en Quebrada Tuja dado principalmente por la diferencia litológica a ambos lados de la traza de la falla, si no también los aparentes basculamientos producidos por la acción de fallas NE-SO como la Falla Charaque sobre la quebrada del mismo nombre, observados en terreno (Fotos 2.8 y 2.9).

La importancia de estos movimientos radica en las investigaciones futuras acerca de la geología estructural más detallada, la cual puede entregar resultados de interés en cuanto al movimiento de las formaciones susceptibles de albergar reservorios geotérmicos en profundidad.

CAPÍTULO III: GEOQUÍMICA Y ALTERACIÓN TERMAL DE PUCHULDIZA

3.1.- METODOLOGÍA

Se recopiló información sobre la geoquímica de rocas y aguas del área. Posteriormente se definió una campaña de reconocimiento de alteración en rocas y de muestreo de aguas en las manifestaciones termales del sureste del Cerro Taipicollo y Quebrada Tuja.

Las muestras de agua fueron analizadas en dos laboratorios diferentes: SERNAGEOMIN e HIDROLAB. El trabajo con los datos se realizó con el software AQUACHEM, con los cuales se plotearon los datos y se calcularon los geotermómetros correspondientes.

Finalmente se re-interpretaron los resultados obtenidos en las campañas exploratorias de la década de los setenta, a la luz de los nuevos antecedentes recogidos.

3.2.- PRODUCTOS DE ALTERACIÓN EN ROCAS

El principal objetivo del estudio de la mineralogía de alteración en rocas, es el establecimiento de las condiciones geoquímicas y termodinámicas de los fluidos en profundidad, entendiendo que los minerales de alteración secundarios son el resultado de la constante interacción agua – roca (Fotos 3.1 – 3.4).

Como se ha señalado en capítulo II, el campo geotérmico de Puchuldiza posee zonas de intensa alteración hidrotermal tal como puede apreciarse en las rocas de superficie y de los testigos de subsuperficie tomados de los pozos exploratorios realizados.

J.I.C.A. (1979) realizó difracción de rayos X (DRX) a muestras de roca superficial y de los testigos de los pozos exploratorios. El análisis de las rocas de superficie mostró la existencia de

cuarzo α , tridimita, montmorillonita, clorita, sericita, minerales del grupo de la kaolinita, entrecrecimiento de clorita-montmorillonita y alunita. Esta última sólo encontrada en las zonas alteradas de Quebrada Tuja, lo que indicaría una actividad intensa de sulfatos en el pasado en este sector.

En general, J.I.C.A. (1979) establece una zonación en la alteración, ubicándose una zona dominada por sílice rodeada por una zona argilizada.

Respecto a los *cuttings* y testigos de los pozos, el DRX entregó como resultados la ocurrencia de los mismos minerales de alteración antes mencionados unidos a la presencia de zeolitas como la mordenita y minerales carbonatados.

Por su parte, Argandoña (1984) expuso los resultados obtenidos del DRX realizado al relleno de las fracturas en 38 muestras de los testigos del pozo n° 6, el cual es el más profundo llegando a los 1.157 metros de profundidad. En base a esto distinguió cuatro zonas de alteración con sus minerales característicos:

- Zona A: va desde los 0 a los 650 metros. Se caracteriza por la presencia de montmorillonita.
- Zona B: entre 650 y 920 metros. Domina la existencia de cuarzo y montmorillonita.
- Zona C: entre 920 y 1.130 metros. Caracterizada por clorita y cuarzo.
- Zona D: hasta los 1.157 metros. Domina la presencia de zeolitas (leonardita-laumontita) y cuarzo.

Argandoña (1984) relaciona las zonas A, B y C con la interacción de la roca con aguas neutras a débilmente ácidas, mientras que la asociación mineralógica leonardita-laumontita propia de la zona D se corresponde con aguas neutras a levemente alcalinas.

Las conclusiones a las que llega Argandoña (1984) en relación a los resultados de la mineralogía de alteración en este pozo son las siguientes:

- a) La permeabilidad de las rocas controla en parte el tipo de alteración en las rocas. Mientras las rocas porosas de la Formación Condoriri presentan una intensa alteración a montmorillonita en la matriz, la matriz de las tobas soldadas de la Formación Utayane se encuentra silicificada.
- b) Se encuentra una concordancia entre las fases mineralógicas establecidas en la clasificación por zonas y las temperaturas medidas directamente en el pozo. De hecho, el cambio de tridimita a cristobalita ocurre a los 100° C, lo que se evidencia a los 650 metros de profundidad. Siguiendo de esta manera, las asociaciones correspondientes a las zonas B y C se desarrollan a temperaturas de 100°-200° C y 150°-250° C respectivamente. Por otra parte, el entrecrecimiento de sericita-montmorillonita existe hasta los 220° C, temperatura sobre la cual desaparece la montmorillonita y se hace estable la clorita. Este hecho ocurre en el pozo 6 a los 920 metros por lo que se infiere una temperatura de 220° C para este punto en el pasado, donde la actividad geotermal tuvo máxima actividad.

Por su parte, Urzúa (1999), de sus estudios en rocas superficiales y de la mineralogía de los pozos 1 y 2, aporta entre otras cosas, acerca de la calcita y los sulfuros.

La calcita depende fuertemente del contenido de CO₂, lo que para este autor es de notoria diferencia entre ambos pozos estudiados, pues mientras el pozo 1 presenta un alto contenido en esta especie, la cantidad de esta en el pozo 2 es bajo, lo que efectivamente se concuerda con la mayor depositación de calcita en el primero y la nula en el segundo.

Además, Urzúa (1999) también explica que la solubilidad de la calcita decrece con el aumento de la temperatura. Por ello la existencia de este mineral hacia el fondo de los pozos, a diferencia de lo que ocurre en la superficie dominado por sales de otro tipo. Como corolario de lo anterior, la cantidad de las especies Ca y HCO₃⁻ en el fluido se utiliza como indicador de las temperaturas de subsuperficie.

Por último la presencia en menor cantidad de sulfuros se debe principalmente a la rápida oxidación de estos en un ambiente de pH neutro. Así, la pirita que pueda existir, al oxidarse genera el Fe^{3+} que se necesita para la creación de abundante cantidad de óxidos de este metal.

A modo de resumen sobre lo expuesto anteriormente, se puede indicar que en Puchuldiza la alteración hidrotermal asociada a la actividad volcánica que da energía al sistema geotérmico, tiene su correlato con las asociaciones mineralógicas y especies depositadas en subsuperficie y superficie respectivamente.

Se pueden establecer zonaciones de alteración donde es posible a través de las fases mineralógicas presentes, determinar condiciones termodinámicas de los fluidos en el pasado. Es así que resulta coherente la presencia de arcillas de menor temperatura como montmorillonitas hacia la superficie, y cloritas en el fondo de los pozos.

Un hecho importante de destacar es que las fases estudiadas por Urzúa (1999) muestran menor temperatura asociada en profundidad que aquellas estudiadas por Argandoña (1984). El primero realizó sus estudios en los pozos 1 y 2, ubicados en las manifestaciones del sureste de Cerro Taipicollo, mientras que el segundo lo hizo en el pozo 6 ubicado en las cercanías de Quebrada Tuja. Si a esto se le agrega la existencia exclusiva de alunita en las muestras analizadas por J.I.C.A. (1979) en Quebrada Tuja lo que indicaría mayor sulfatación de los fluidos en el pasado, se puede proponer a este último lugar como más cercano a la fuente de calor de este sistema. Lo anterior debido a que a mayor presencia de SO_2 en el ambiente, mayor aporte de H_2S debe darse, por tanto más cerca se debe estar de la fuente magmática.

3.3.- GEOQUÍMICA DE AGUAS

3.3.1.- Caracterización de las aguas

En el presente estudio se tomaron un total de 21 muestras en el sector de Puchuldiza y Quebrada Tuja, de las cuales se escogieron 10 para el correspondiente análisis las que corresponden a las manifestaciones termales de mayor temperatura. Estas muestras se recolectaron en botellas de polietileno de alta densidad, parte de las cuales se acidularon para los análisis de cationes, y otra parte sin acidular para los análisis de aniones e isótopos correspondientes (Foto 3.5).

La ubicación de tales muestras se muestra en la figura 3.1.

La Tabla 3.1 entrega el resultado de los análisis realizados a las 10 muestras expuestas, junto con la temperatura y pH registrado in situ al momento del muestreo.



Figura 3.1. Ubicación de puntos de muestreo de aguas superficiales en el campo geotérmico de Puchuldiza. En rojo se indican las muestras recolectadas el SE de Cerro Taipicollo, y en verde aquellas de Quebrada Tuja.

Los resultados obtenidos se graficaron en un diagrama de Piper, el que nos entrega la naturaleza química de las aguas en función a sus componentes catiónicos y aniónicos. Además en relación a los aniones mayores cloro, sulfato y bicarbonato, se plotean los valores en un diagrama ternario para observar el posible origen de esta aguas (Sepúlveda, 2005) (Figuras 3.2 y 3.3).

Del diagrama Piper obtenido se aprecia que la caracterización de las aguas muestreadas corresponde al tipo sódico-cloruradas mayoritariamente, lo que concuerda bastante bien con lo esperado, donde las aguas de Puchuldiza presentan una fuerte depositación salina en sus afluentes.

Por otra parte, del gráfico ternario Cl-SO₄-HCO₃ se puede notar que la tendencia de las aguas es pertenecer al campo de las aguas volcánicas con cercanía a las aguas maduras. Es decir, se trata de aguas con fuerte adición de componentes magmáticos por estar cerca de la fuente, que poseen composiciones fuertemente cloruradas neutras y con asociaciones minerales del tipo adularia-sericita y propilítica, tal como lo señala Sepúlveda (2005). Es importante señalar en este punto que se hace mención a aguas maduras a aquellas aguas cuya composición es del tipo clorurado neutro debido a la prolongada interacción agua-roca la que produce un equilibrio químico entre las soluciones termales y las rocas. Por su parte, las aguas volcánicas poseen fuerte componente magmática lo que implica una menor cantidad de bicarbonatos ya que CO₃²⁻ pierde solubilidad con el aumento de temperatura. Finalmente, las aguas vapor calentadas son aquellas aguas calientes que son parte de un acuífero superficial por lo que el tiempo de permanencia de tales aguas en el sistema es menor que en el caso de aguas maduras, y por tanto la cantidad de Cl es reducido.

Este mismo autor indica que los sistemas geotérmicos maduros se caracterizan además por poseer altas concentraciones de Cl (Cl>1.000 mg/l) y estar asociados a estratovolcanes de cámaras magmáticas someras (>5 km), lo que se corresponde con el campo geotérmico de Puchuldiza.

3.3.2.- Interpretaciones geoquímicas

Para poder integrar mejor los resultados obtenidos, se entrega las razones molares calculadas para los datos analizados (Tabla 3.2).

Las razones Na/Li, Cl/B y Cl/SO₄ permiten estimar un reservorio u origen común de las aguas, como lo señala Cusicanqui (1975, 1978). En este sentido, este autor señala que las aguas termales de Cerro Taipicollo y aquellas de Quebrada Tuja al poseer similares razones molares, pertenecerían a un mismo proceso geotérmico, pero posiblemente a acuíferos distintos debido a pequeñas variaciones en las razones y extensión entre una zona de descarga y otra.

En el presente estudio se observa cercanía en las razones de Na/Li, Cl/B y Cl/SO₄ para las muestras tomadas en Tuja y Taipicollo. Por tanto se puede interpretar lo anterior como un mismo sistema geotérmico actuando en ambas áreas, pero con pequeñas diferencias que podrían deberse efectivamente a diferentes litologías actuando como reservorio, debido principalmente a que la concentración de los elementos Li y B dependen exclusivamente de su cantidad original en las rocas. El estudio de la geología de Puchuldiza indica que efectivamente hacia el sector de Quebrada Tuja se encuentran afloramientos correspondientes a Formación Lupe y Formación Guailleane junto con Formación Puchuldiza, siendo a la fecha desconocida la relación en profundidad entre estas unidades. Hacia el sector sureste de Cerro Taipicollo no se encuentran tales formaciones.

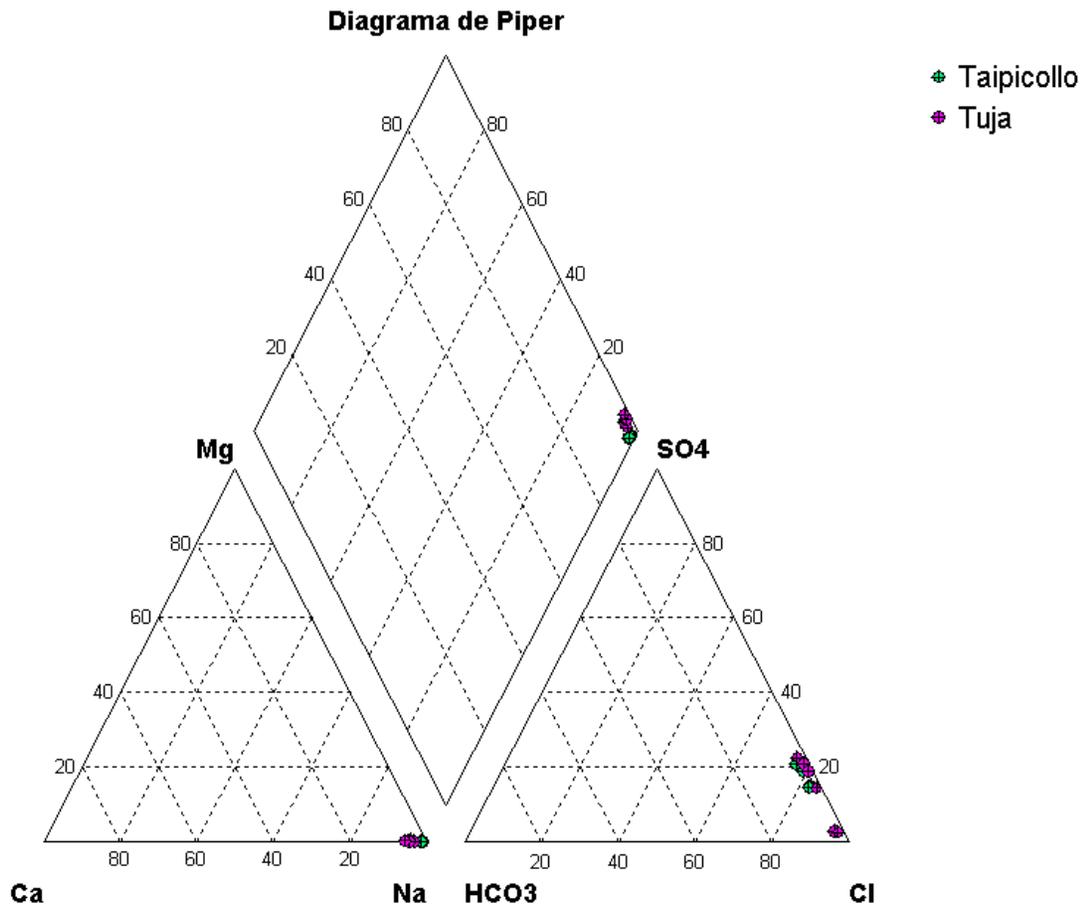


Figura 3.2. Diagrama Piper indicando la caracterización química de las aguas de Puchuldiza. Se observa claramente que las aguas muestreadas caen en el tipo sódico cloruradas, con leve tendencia a la sulfatación que probablemente haya sido condición anterior en las cercanías de quebrada Tuja.

Tabla 3.1. Resultado del análisis de 10 muestras de aguas calientes del campo geotérmico de Puchuldiza. Valores medidos en mg/l.

Muestra	PH	Temp. °C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	B ³⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NH ₃	CaCO ₃	F ⁻	SiO ₂	δ ² H (‰)	δ ¹⁸ O (‰)
TUJA-1	6,6	81,3	78,3	0,6	1800	154	12,8	-	117	111	2828	-	-	2,43	-	-90,2	-9,9
TUJA-2	6,3	79,1	78,3	0,6	1800	150	12,8	-	71,9	98,3	2730	-	-	2,73	-	-91	-9,71
TUJA-3	6,6	79	64,7	<1,0	2197	265	30,5	100	185	1548	3799	<0,1	0	4,17	142	-	-
TUJA-4	6,7	83,2	68,3	3,83	1795	171	24,9	88,4	97,6	1157	3199	<0,1	0	2,88	105	-	-
TUJA-5	6,5	84,8	79,3	<1,0	1922	195	25,5	95,6	80,5	794	3424	<0,1	0	3,03	108	-	-
TUJA-6	6,6	72,8	77,3	2,42	1520	121	19,6	74,3	57,3	741	2324	<0,1	0	2,17	2,32	-	-
TAI-1	6,7	69,6	17,5	<1,0	1617	275	25,3	74,3	149	761	3049	<0,1	0	4,44	107	-	-
TAI-2	6,7	83,8	20,6	<1,0	1638	278	26,5	61,1	187	947	2537	<0,1	0	3,83	119	-	-
TAI-3	6,6	84,4	22,7	<1,0	1585	269	26,7	64,4	168	1037	3199	<0,1	50	3,44	122	-	-
TAI-4	6,7	82,4	20,2	<1,0	1649	278	27,1	79,6	205	778	3224	<0,1	0	1,72	121	-	-

Para Cusicanqui (1975, 1978), la abundancia en la cantidad de SO_4 tiene su explicación debido a que el SO_2 presente intensamente en las aguas del sistema se une con el O_2 que se encuentra en las aguas más superficiales para generar las concentraciones de sulfatos que se observan de los análisis. Es decir, una cantidad elevada de SO_4 implica un proceso de gran aporte de O_2 , proceso que se da al haber mayor dilución de las aguas profundas con aquellas superficiales.

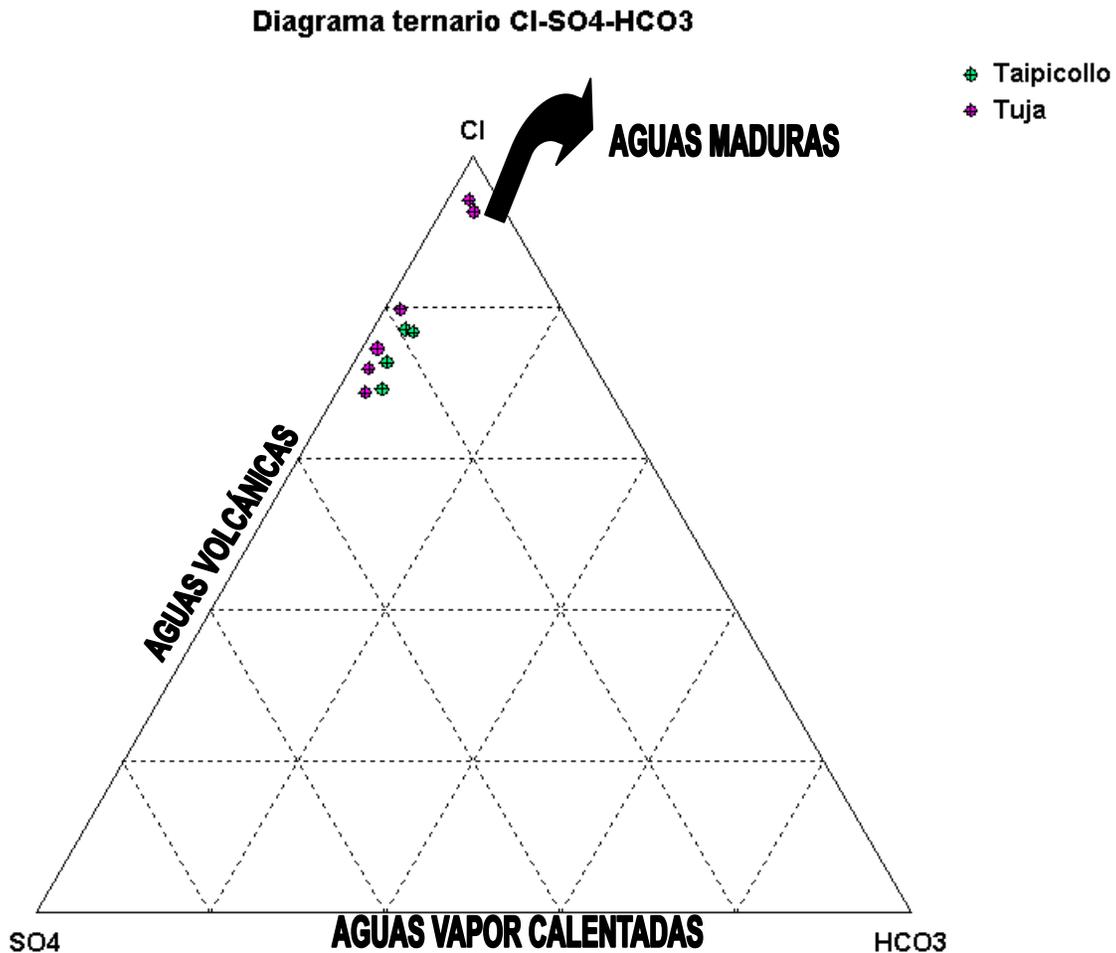


Figura 3.3. Diagrama ternario Cl-SO₄-HCO₃, indicando el probable origen de las aguas termales. Las aguas de recolectadas en el presente estudio en el sector de Puchuldiza caen principalmente en los campos de las aguas maduras a volcánicas, lo que indica claramente la naturaleza magmática de este sistema geotérmico. Gráfico tomado de Sepúlveda, 2006.

Tabla 3.2.

Razones molares calculadas para los datos obtenidos de las muestras del campo geotermal de Puchuldiza. Lo interesante de estos valores radica en la comparación que se establece entre las muestras más que en el valor en sí.

Muestra	Na/K	Na/Li	Cl/B	Cl/F	Cl/SO ₄
TUJA-1	19,88	42,46	-	557,93	69,03
TUJA-2	20,41	42,46	-	479,41	75,25
TUJA-3	14,10	21,75	11,58	436,75	6,65
TUJA-4	17,85	21,76	11,04	532,51	7,49
TUJA-5	16,76	22,76	10,92	541,75	11,68
TUJA-6	21,36	23,41	9,54	513,43	8,50
TAI-1	10,00	19,30	12,51	329,21	10,86
TAI-2	10,02	18,66	12,66	317,56	7,26
TAI-3	10,02	17,92	15,15	445,82	8,36
TAI-4	10,09	18,37	12,35	898,61	11,23

Del análisis de nuestros datos se encuentra nuevamente que las muestras de Tuja y Taipicollo poseen mayores cantidades de esta especie.

Según Lahsen (1978), un bajo contenido en Mg y altas razones Cl/F y Cl/SO₄ se corresponden con una mayor temperatura del sistema. Lo anterior producto de la menor solubilidad del Mg y del F a medida que aumenta la temperatura. En este sentido, el calcio y los bicarbonatos (o carbonatos) siguen la misma tendencia. Montmorillonita, clorita y en algunos casos dolomita, son algunos ejemplos de minerales de magnesio que se forman a altas temperaturas (> 200° C).

Para el presente estudio, el Mg es casi nulo en las muestras colectas, mientras que las razones molares indicadas efectivamente son altas. La razón Cl/SO₄ calculada para las muestras es claramente menor que aquellas obtenidas en las exploraciones realizadas en la década de los setenta, donde esta razón varía entre 41 y 80.

Lo anterior puede ser indicio de una intensa dilución por aguas someras a través de los más de 30 años que han pasado desde dichos análisis.

Por otro lado, el elemento cloro juega un rol muy importante en la determinación cualitativa de la cercanía con la fuente y la permeabilidad de la roca.

El cloro en las aguas es el resultado de la condensación de los gases en un sistema magmático, condensación que se transforma en una columna convectiva de agua clorurada con pH cercanamente neutro. Por ello, cuanto mayor es la cantidad de cloro en el agua, menor proporción de agua superficial circulante se tiene en el sistema debido a que estas ayudan en la dilución de este elemento. Por tanto, a menor agua circulando en el sistema, menor es la permeabilidad de la roca.

En este estudio los resultados obtenidos para este elemento son elevados como era de esperar, con valores que varían entre 2324 y 3799 mg/l.

Comparando las muestras para Tuja y Taipicollo, se observan valores levemente menores para este último sector, lo que puede indicar o bien una cercanía mayor con la fuente para el sector de Tuja, o menor contacto con aguas superficiales, lo que se condice con la diferencia entre las razones molares Cl/F, Cl/SO₄ y Na/Li que como se ha mencionado puede ser indicativo de la participación de diferentes acuíferos. La razón Cl/F para Tuja promedia sobre los 500 en tanto para Taipicollo no supera los 370, despreciando el valor de TAI-4 dado su fuerte diferencia con el resto. Donde también es notoria esta diferencia es en la razón Na/Li. Para Tuja el promedio es de 29,1 en tanto para Taipicollo es 18,6.

Nota aparte merece la escasa cantidad de amoníaco (ver Tabla 3.1) presente en las muestras, lo que a juicio de Cusicanqui (1975) señala que el sistema no se asocia a rocas sedimentarias.

En relación a lo anterior, Urzúa (1999) menciona que el campo geotérmico de Tokaanu en Nueva Zelandia posee razones molares Cl/B del orden de 10, razones que se mantienen dentro del rango en el presente estudio. Dado que el reservorio de este campo geotérmico ha sido

encontrado en rocas andesíticas, es que a Puchuldiza se le asocia este tipo de litología como roca confinante de los fluidos más calientes.

Finalmente, en relación a los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, estos son indicadores de la naturaleza de las aguas (meteóricas o magmáticas). La Figura 3.4 muestra la ubicación de los puntos analizados para el sector de Quebrada Tuja en el gráfico $\delta^2\text{H}$ v/s $\delta^{18}\text{O}$ respecto a la Línea Meteórica Global (GWML). La recta que define esta tendencia en las aguas meteóricas se define como $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$.

Se puede notar que las muestras estudiadas aparecen muy alejadas de la línea de tendencia indicada lo que permite inferir una estadía moderadamente larga de las aguas en el sistema, entendiendo que el contacto de las aguas meteóricas con las rocas produce un intercambio entre el ^{18}O de estas últimas con el ^{16}O de las aguas. Así, a mayor permanencia de las aguas en el sistema, mayor es el enriquecimiento en este isótopo pesado y más alejado se hace de la línea de tendencia estándar.

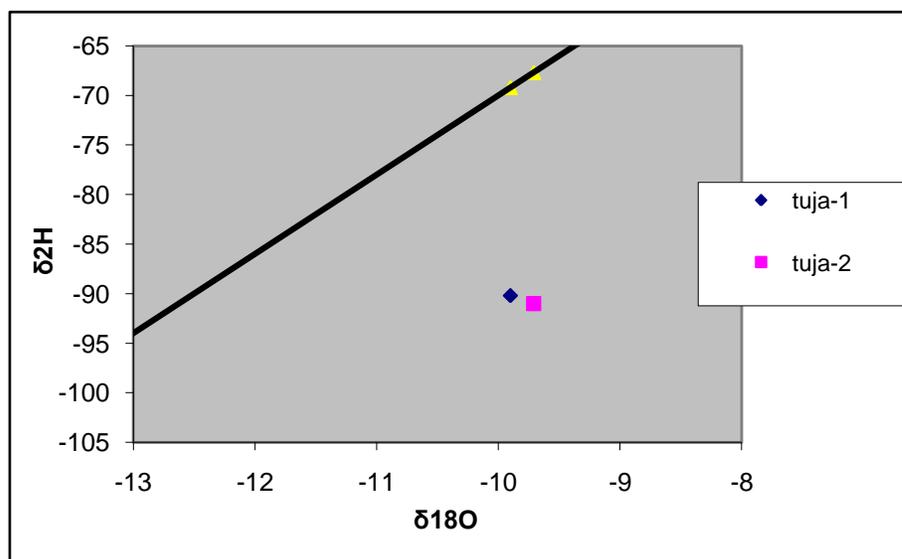


Figura 3.4. Gráfico de ploteo de las muestras del sector de Quebrada Tuja con respecto a sus contenidos de isótopos estables, en relación a la Línea Meteórica Global (GWML). Los triángulos amarillos que se muestran al interior del gráfico son sólo referenciales para la recta.

En este sentido, Letelier (1981) no está completamente de acuerdo con esta inferencia, por cuanto señala que las lluvias del invierno altiplánico pueden ser ricas en isótopos pesados, y por tanto al recargar al sistema con sus precipitaciones, aumenta la cantidad de este isótopo en las aguas de los acuíferos.

3.3.3.- Geotermómetros

La solubilidad del SiO_2 depende directamente de la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, la sílice es más soluble en los fluidos con pH moderadamente ácidos (<4). Por otro lado, las reacciones de equilibrio de los feldespatos también siguen una dependencia con la temperatura.

Es así como tenemos dos tipos de geotermómetros muy usados en la geoquímica de aguas termales: sílice y de cationes Na-K-Mg

Los geotermómetros de sílice son fuertemente dependientes de la cantidad de cloruros de las aguas y varían en sus ecuaciones dependiendo de la temperatura a la que el sistema se desarrolla. Además, este último entrega una temperatura mínima del sistema debido a que en su paso hacia la superficie, los fluidos geotermales van depositando su carga de sílice al disminuir la temperatura. Este geotermómetro, por tanto, nos entregaría la cota mínima de la temperatura de sub-superficie.

La Figura 3.5 y 3.6 dan cuenta de los geotermómetros encontrados para las muestras tomadas en el presente estudio.

Las muestras correspondientes a Taipicollo no aparecen ubicadas en el gráfico debido a que este gráfico ocupa Mg como una de las variables, y este elemento no se encuentra presente en las muestras recolectadas y analizadas en el presente estudio.

Se observa que los datos entregados se alinean según una tendencia por sobre los 200° C, valor que es corroborado por los estudios realizados anteriormente y que arrojan estimaciones de 220° C para las manifestaciones de Quebrada Tuja.

Para el geotermómetro de sílice obtenido, debe indicarse que de Fournier (1985; cf Sepúlveda 2005) se tomó la ecuación que relaciona la temperatura con la cantidad de sílice para un sistema agua dominante sin pérdida de vapor. Esta ecuación es:

$$T(^{\circ}C) = \frac{1309}{(5,19 - \log(SiO_2))} - 273,15$$

donde los valores constantes son el resultado de las constantes de integración que se obtienen en el modelamiento exponencial de la solubilidad de la sílice en función de la temperatura.

El mayor valor obtenido al ingresar la concentración más alta de sílice para las muestras analizadas es de 157,8 °C (Figura 3.5), que correspondería al valor inferior posible de sub-superficie. Este valor difiere de los encontrados por las investigaciones realizadas en la década de los setenta, donde el geotermómetro de sílice entrega valores mínimos de 205° C (Lahsen, 1978).

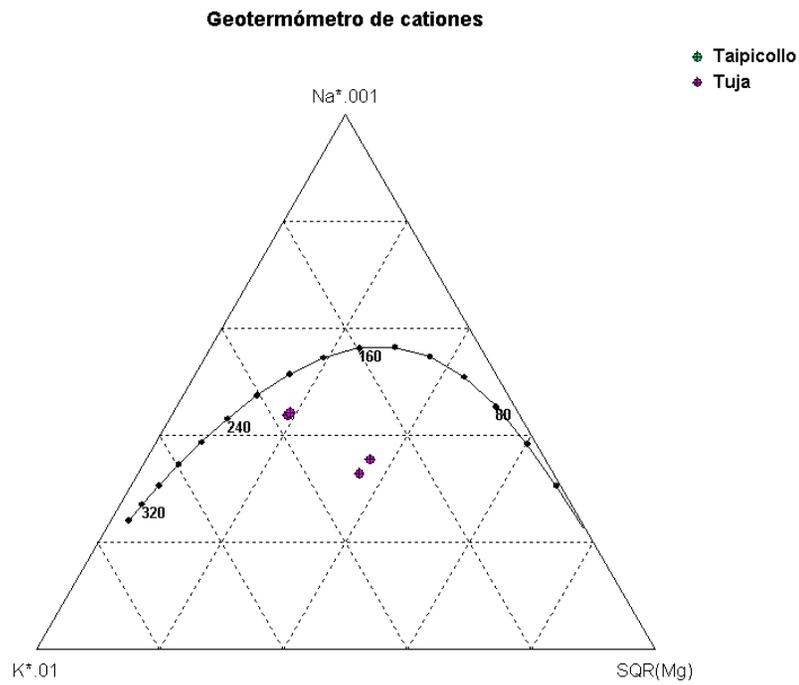


Figura 3.5. Geotermómetro de cationes Na-K-Mg, para las muestras analizadas en el presente estudio. Se observa una clara tendencia de las muestras alineándose según una recta con origen en el vértice correspondiente a Mg y que corta a la línea geotérmica en valores superiores a los 200° C.

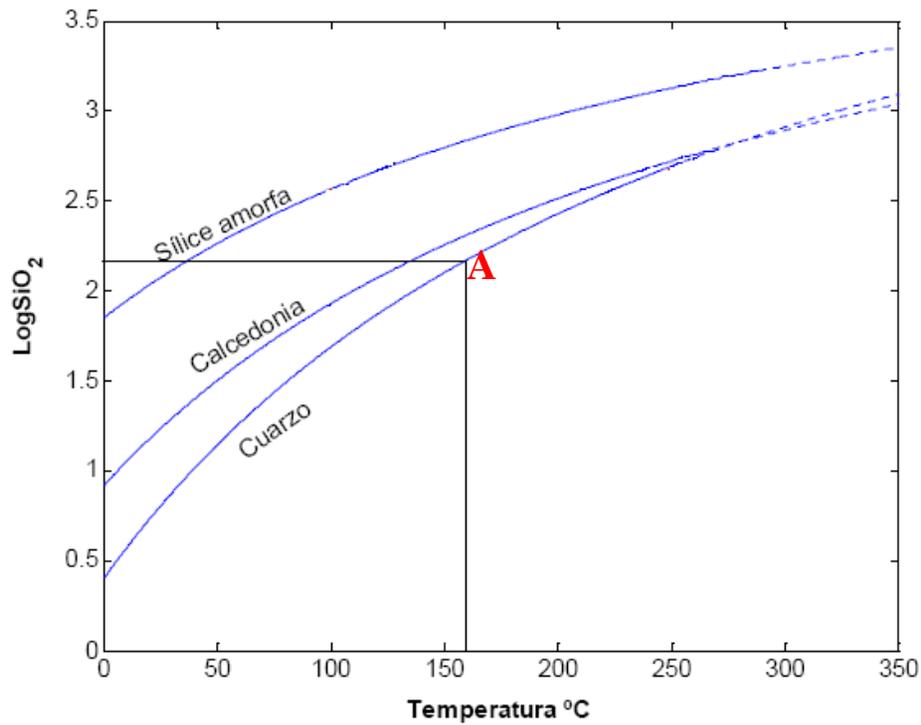


Figura 3.6. Geotermómetro de Sílice. La solubilidad del Sílice dependerá de la temperatura y de la fase sólida que controla dicha solubilidad. En la figura se muestra en el punto A, la temperatura máxima alcanzada para los resultados obtenidos en Puchuldiza. Tomado de Fournier (1985; cf Sepúlveda 2005).

CAPÍTULO IV: GEOFÍSICA DE PUCHULDIZA

4.1.- METODOLOGÍA

Se desarrolla la recopilación y revisión de los principales antecedentes geofísicos obtenidos en la década de los setenta, los cuales permiten definir áreas de interés para la prospección a través de magnetotelúrica (MT) y transiente electromagnético (TEM). Posteriormente se desarrollan estos últimos estudios en una campaña de 30 días de terreno.

4.2.- ANTECEDENTES GEOFÍSICOS

Las investigaciones geofísicas en Puchuldiza se remontan a inicios de los setenta. En aquel momento, Hochstein (1971) señalaba, principalmente debido a trabajos de resistividad, que los fluidos termales de las manifestaciones de Puchuldiza provenían de una fuente ubicada cerca de 6 kilómetros al Norte. Lo anterior con el argumento que el levantamiento resistivo disminuía conforme se avanzaba en esa dirección sumado a la alteración hidrotermal notoria en ese sector.

Para este autor, las aguas calientes del sector de Tuja podrían ser parte de un sistema geotérmico diferente -asociado a otra fuente de calor- que podría estar relacionado con las manifestaciones de Pingallure y alrededores, ubicadas hacia el sector occidental del presente estudio.

Marinovic et al (1975) realizó un levantamiento de resistividades de configuraciones Schlumberger AB/2 250, 500 y 1.000 metros. Estos trabajos arrojaron como resultados las siguientes conclusiones, que particularmente se aprecian en la última de las configuraciones señaladas:

- a) En el campo geotérmico de Puchuldiza, la zona de anomalías de resistividad (valores menores a 10 Ohm-m) se extiende aproximadamente 28 kilómetros cuadrados, la cual sería la extensión completa del campo y por tanto de su reservorio.

- b) Con las configuraciones AB/2 250 y 500, es posible apreciar zonas con isoresistividades menores incluso a 10 Ohm-m, las cuales indujeron a pensar en la existencia en más de un campo en la misma zona (sectores de Taipicollo y Tuja). El levantamiento a profundidad de 1.000 metros indica que se trata de un mismo campo.
- c) Los límites de la gran zona anómala en el campo geotérmico de Puchuldiza se correlacionan muy bien con las fallas de orientación NS de Mulluri Grande o Condoriri y Tuja, junto con la falla noroeste de Puchuldiza. Dichas fallas son las zonas que surten mayor cantidad de manifestaciones del área.
- d) Los levantamientos de 250 y 500 metros de profundidad, muestran la existencia de zonas anómalas de menor extensión, controladas por fallas de dirección noreste y noroeste. Por tanto, las fallas de Tuja, Puchuldiza y Condoriri serían las fallas de mayor profundidad del sistema.

Por su parte, J.I.C.A. (1979) desarrolló una campaña completa de levantamientos geofísicos de gravedad, resistividad y magnetismo, cuyos resultados se sintetizan a continuación:

1.- **Gravimetría.** Se desarrolló en un área de 15 kilómetros EO y 10 kilómetros según NS, cubriendo las manifestaciones de Tuja y Taipicollo, con un total de 517 estaciones. La anomalía de Bouguer presenta valores negativos fuertes lo que se corresponde con lo esperado para estos macizos andinos. Sin embargo, las anomalías relativas muestran la existencia de una cuenca de baja gravedad en medio del área de levantamiento, entre cerro Taipicollo y Tuja, limitada por sistemas de fallas NS y NO-SE. En esta cuenca existe una gruesa capa de tobas depositadas bajo una cubierta de flujos andesíticos.

2.- **Resistividad.** A través de dos líneas de 6 kilómetros cada una, el levantamiento geoelectrico arrojó como resultados un conjunto de anomalías que fueron divididas en tres grupos. Un grupo de alta resistividad que corresponde a lava andesítica compacta; otro grupo de resistividad media correspondiente a toba ácida porosa; y un grupo de resistividades bajas relacionadas a tobas basales. Especialmente de interés resultaron las mediciones al NE de

cerro Taipicollo, donde se detectaron valores de resistividad incluso del orden de 2,5 a 3 Ohm-m al igual que en la zona inmediatamente al este de Tuja. Se debe notar que valores menores a 10 Ohm-m son considerados de baja resistividad lo que implica un fluido de alta temperatura con sales o bien zonas de alteración intensa que son buenas conductoras de la electricidad.

3.- **Magnetometría.** Como resultado de este levantamiento, una anomalía baja es localizada principalmente en la parte norte y suroeste debido a la presencia de andesita –el contenido alto en minerales férricos con alta susceptibilidad magnética en este tipo de rocas entrega bajos valores en los levantamientos magnéticos-.La existencia de fuentes de calor en profundidad es inferida principalmente por el descenso brusco de la susceptibilidad magnética respecto de la profundidad, a medida que la alteración geotermal de los fluidos demagnetiza las rocas. Aún más, en los sectores de Tuja y Taipicollo se observan peaks anómalos bajos que se correlacionan muy bien con las zonas de surgencia de fluidos geotérmicos y de alta demagnetización. Finalmente este estudio señala que la zona de interés inferida es la que se encuentra al este de Quebrada Tuja y al oeste de Quebrada Ancocollo donde se distinguen cuerpos anómalos en dirección EO

4.3.- LEVANTAMIENTO TEM y MT.

La ubicación en planta de los perfiles desarrollados para el análisis por Transiente Electromagnético (TEM) y por Magnetotelúrica (MT) se muestra en la Figura 1 del ANEXO II: PLANTA Y PERFILES GEOFÍSICOS. A continuación se presentan las conclusiones e interpretaciones que ambos métodos arrojaron en el sector, las cuales fueron tomadas de Geodatos (2008) en sus aspectos más generales y correlacionadas con la estratigrafía y geología estructural del campo geotérmico.

4.3.1.- TEM

Este método consiste en un arreglo rectangular -loop- por el cual se hace pasar corriente eléctrica la que genera un campo magnético asociado, el que a su vez induce un campo

eléctrico en la tierra. Cuando esta corriente eléctrica es detenida, sólo actúa el campo magnético decayendo a través del tiempo con la consecuente caída del campo eléctrico de la tierra. La medición de la resistencia al paso de la corriente eléctrica del campo inducido en función del tiempo y de la profundidad permite generar perfiles de transiente, los cuales ayudan en la interpretación de los perfiles magnetotelúricos. Este método generalmente es bueno a profundidades menores a 500 metros.

De los resultados obtenidos se puede notar una zona superficial con resistividad relativamente alta que correspondería a las unidades de lava de los estratovolcanes Plio-Pleistocenos, junto a los productos volcánicos de Formación Puchuldiza, estos últimos presentando alteración leve. Esta unidad resistiva muestra un mayor espesor hacia el sur del área de estudio (Figuras PERFIL TEM L1 a PERFIL TEM L7 en ANEXO II: PLANTA Y PERFILES GEOFÍSICOS).

En todos los perfiles TEM se aprecia una disminución de la resistividad a medida que aumenta la profundidad, lo que Geodatos (2008) ha asociado al aumento de la temperatura o a la presencia de alteración en rocas.

En términos generales Geodatos (2008) propone tres unidades claramente diferenciables en función de sus resistividades las cuales crecen con la profundidad:

Unidad superficial medianamente resistiva. Se trataría de rocas volcánicas con alteración leve y no saturadas, que se presentan de manera diferente al norte y sur del perfil L-4. Hacia el norte de este último, esta unidad se muestra con mayores valores de resistividad y espesor, llegando a medidas de hasta 800 Ohm-m y 20 metros respectivamente. Por tanto se infiere que al norte de este perfil se estaría mostrando un paquete de lavas no alteradas, lo que se relaciona bien con la unidad de centros volcánicos Plio-Pleistocenos sobre esta línea.

Unidad sub-superficial medianamente conductora. Subyace a la anterior y presenta valores de resistividad menores, los cuales varían entre 15 y 30 Ohm-m como ocurre para los perfiles L-1, L-2 y L-3. Por su parte para los perfiles L-4, L-5 y L-6, las resistividades son aún

mayores, por lo que se ha interpretado a esta unidad como posiblemente correspondiente a rocas volcánicas porosas con un alto grado de saturación, que posee espesores entre 100 y 200 metros. Además, del análisis geológico previo, los perfiles norte de la zona de estudio se encuentran en medio de un área afectada por fallamiento noroeste y noreste, por lo que la posibilidad de existir rocas con alta permeabilidad secundaria en este sector es alta.

Unidad sub-superficial conductora. Se trata de una unidad que subyace a las dos anteriores y donde la resistividad presenta valores menores a 10 Ohm-m. Según Geodatos (2008), una resistividad inferior a este valor es producto de aumento de temperatura del agua o a la existencia de sales disueltas o a ambas. Para este trabajo, se postula la ubicación en este nivel de las rocas de la Formación Utayane, Chojña Chaya e incluso Condoriri, que en profundidad presentan buenas posibilidades de almacenar un reservorio.

Finalmente, en la revisión de los mapas de planta a diferentes profundidades, se observa que a los 100 metros existen sectores de baja resistividad, la que se incrementa paulatinamente a mayor profundidad, no entregados en el presente estudio.

4.3.2.- MT

Este método permite el análisis en profundidades de hasta 10.000 metros ya que utiliza la corriente eléctrica natural de la ionosfera aplicada directamente en el subsuelo. La ventaja de este método es la profundidad que puede alcanzar, siendo a su vez la desventaja la sensibilidad del mismo ya que cualquier ruido puede distorsionar sus resultados (camiones, perforaciones a distancia, etc.).

De los resultados obtenidos, Geodatos (2008) ha dividido el área de trabajo en dos sectores con propiedades algo diferentes. Los perfiles L1, L2 y L3 corresponden a la zona sur, mientras que los perfiles L5 y L6-7 a la zona norte respectivamente. El perfil L4 sería una transición

entre ambas zonas. (Figuras PERFIL MT L1 a MT L6-7 en ANEXO II: PLANTA Y PERFILES GEOFÍSICOS)

Sector sur. Se observa la presencia de un núcleo resistivo ubicado en la parte centro oriente del área, el cual Geodatos (2008) ha interpretado como rocas sin alteración, posiblemente lavas. Además se observa una zona conductora de valores menores a 10 Ohm-m, que podría corresponder a un reservorio geotérmico, cuyos espesores serían del orden de los 1.000 metros. Finalmente hacia el sector oeste de este sector se observa un incremento de la conductividad eléctrica, lo cual es explicado por Geodatos (2008) como un estructura geológica saturada que correspondería a la fuente de calor del sistema.

Sector norte. También es posible observar en esta zona un núcleo resistivo con valores superiores a 50 Ohm-m, y que se ubica bajo los 1.500 metros de profundidad. La interpretación que se ha hecho de esta característica es que correspondería a productos volcánicos alterados, del tipo brechas. Además, también en esta zona se ha interpretado a una unidad de roca como reservorio geotérmico, en virtud de su espesor el cual se desarrolla entre los 200 y los 1.800 metros, con resistividades menores a 10 Ohm-m. Finalmente, al igual que en el sector sur, hacia el O del área de estudio se observa un núcleo conductor a una profundidad aproximada de 1.500 metros, el cual se interpreta como una estructura geológica que favorece el emplazamiento de la fuente de calor del sistema. En estos perfiles es posible observar que existe una conexión entre esta unidad conductora del oeste con aquellas más superficiales del centro y este.

CAPÍTULO V: MODELO CONCEPTUAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO

5.1.- MODELO CONCEPTUAL PRELIMINAR

Al integrar las actualizaciones en geología y geoquímica de aguas, junto con el desarrollo de los métodos geofísicos MT y TEM, se puede establecer un modelo conceptual preliminar del campo.

El campo geotérmico de Puchuldiza tendría un control estructural, es decir el mecanismo por el cual se produce el reservorio geotérmico está dado principalmente por la actividad tectónica.

Lahsen (1975, 1978) y Cusicanqui (1975) propusieron la existencia de dos zonas productoras en profundidad. La zona más somera estaría ubicada en promedio a los 800 metros, siendo sus flujos de carácter horizontal. La segunda zona se encontraría alrededor de los 1.200 metros y poseería flujos de movimiento vertical y mayor entalpía.

En parte lo anterior se corrobora con los resultados entregados en el levantamiento MT y TEM donde hasta los 2.000 metros de profundidad la dinámica de los fluidos efectivamente correspondería a un movimiento horizontal que provendría de la zona norte del área de estudio, dado que a través de los perfiles se observa un nivel con baja resistividad que se continúa hacia el norte del campo geotérmico. Como la topografía presenta mayores altitudes hacia esta zona, se entiende que la gradiente hidráulica avanzaría en un movimiento subhorizontal hacia el sur.

Sin embargo, bajo los 2.000 metros aproximadamente sólo se encuentra roca con alta resistividad, lo que impide la posibilidad de albergar reservorios geotermales en una segunda capa.

Se propone así en el presente estudio que al desarrollarse la actividad tectónica distensiva en el plioceno, se producen las fallas principales (Tuja, Condoriri y Puchuldiza) que generan el hundimiento del bloque central de este graben. Es a través de estas fallas profundas que se infiltra el agua meteórica proveniente de las serranías inmediatamente al norte (o incluso de sectores más lejanos), transformándose también en el medio para que aquellos fluidos más cercanos a la fuente migren hacia la superficie, combinándose en algunos casos con aguas someras o descargándose con poca dilución en otros.

Por ello es que las manifestaciones termales de mayor importancia se ubican precisamente en el cruce de las fallas principales y/o a lo largo de ellas.

También es por esto que los límites del sistema quedan bien definidos a través de los resultados geoeléctricos, límites que se correlacionan con la traza de las fallas antes mencionadas.

Los fluidos que a través de las fallas principales migran a la superficie, calientan convectiva y lateralmente las rocas del entorno, entregando la energía suficiente para que el agua almacenada en acuíferos profundos aumente su entalpía y se transformen en aquel primer nivel permeable de menor entalpía y que se mueve lateralmente. Dichos acuíferos en profundidad se correlacionan con las unidades geológicas favorables para el almacenamiento de agua: Formación Condoriri, Chojña Chaya o Utayane.

La ubicación de la fuente de calor del sistema podría encontrarse en el sector cercano a Quebrada Tuja, hacia el SSO del campo geotérmico (Figura 5.1).

5.2.- UBICACIÓN DE POZOS DE EXPLORACIÓN

Actualmente en el campo geotérmico de Puchuldiza se encuentran seis pozos exploratorios perforados, de los cuales el que presentó mejores resultados resultó ser el pozo n° 6, ubicado cercano a Quebrada Tuja.

Mediante el análisis de los mapas en planta para diferentes profundidades, según el método MT y TEM, se pueden establecer zonas de interés para futuros pozos de exploración. Tales zonas serían por un lado las inmediaciones hacia el sector este de Quebrada Tuja, a un costado de la misma; y por otro lado alrededor del punto N 7.859.300 y E 504.900, el cual mostró según perfiles en planta de MT poseer una baja resistividad ($> 3 \text{ Ohm-m}$) hasta inclusive los 1.500 metros de profundidad.

5.3.- POTENCIAL ESTIMADO

A la luz del modelo propuesto, que en parte modifica a los anteriores, se hace necesario revisar la estimación del potencial del campo, pues es probable que la zona productora inferida anteriormente sea transformada bajo esta propuesta, con lo que el potencial sugerido para Puchuldiza, que en algunos autores (Lahsen, 1976; Cusicanqui 1975; Marinovic et al, 1975) va de 100 a 200 megawatts, podría ser incluso de mayor cantidad.

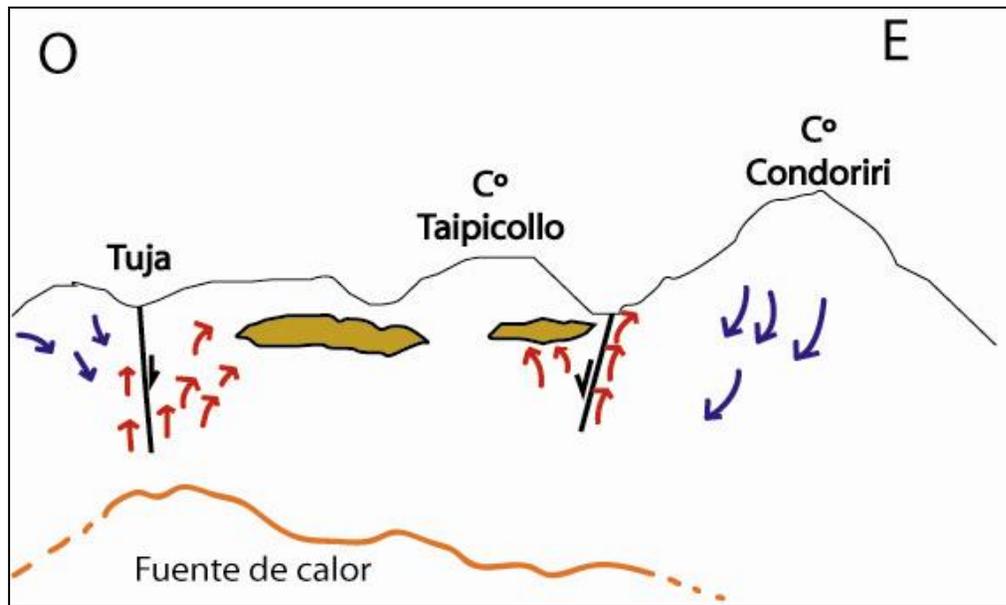


Figura 5.1. Esquema simplificado del modelo geotérmico de Puchuldiza. En rojo, los fluidos geotérmicos profundos; en azul la recarga de agua; en café claro, acuíferos someros calentados por la acción de los fluidos profundos. La diferencia con el modelo clásico es que en el actual no se postula la existencia de un reservorio profundo, si no más bien diferentes acuíferos someros calentados por los fluidos que se mueven a través de las fallas.

CAPÍTULO VI: RELACIÓN CON EL ÁREA DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA DE GUANACOTA

6.1.- METODOLOGÍA

El levantamiento en terreno se desarrolló entre Junio y Agosto de 2008. Previo a este, se determinaron satelitalmente las unidades litológicas a visitar así como las estructuras y zonas de alteración de interés.

Conjuntamente con este, se recolectaron muestras de manifestaciones termales y aguas superficiales de esta área de estudio mediante botellas de polietileno de alta densidad y aciduladas las que fueron enviadas a dos laboratorios diferentes para análisis de cationes, aniones y especies importantes (SiO_2).

Posteriormente se interpretaron usando el software AQUACHEM, para finalmente compararlas con aquellos resultados del sector de Puchuldiza.

6.2.- GEOLOGÍA DE GUANACOTA

6.2.1.- Estratigrafía

En la zona de estudio se expone un basamento volcánico correspondiente a un paquete andesítico afanítico, seguido por una secuencia volcano-sedimentaria de tobas, areniscas y brechas. El techo de esta columna estratigráfica está compuesto por lavas andesíticas que se correlacionan con las andesitas de la Formación Puchuldiza.

En ANEXO I: MAPAS GEOLÓGICOS se encuentra el Mapa Geológico del área de exploración geotérmica Guanacota a escala 1:100.000.

En el presente trabajo se hace mención a esta sucesión litológica como **Estratos de Quebrada Huanca**. Sus espesores y características a continuación se señalan, de base a techo.

Andesitas afaníticas. Lavas de composición andesítica, verde grisáceas, afaníticas, que presentan alteración propilítica diseminada de cloritas \pm epidota (Foto 6.1). Su mineralogía es difícil de reconocer mediante inspección ocular, por lo que se recomienda un análisis petrográfico de microscopio para descartar que se trate de una arenisca fuertemente litificada y alterada. En terreno se definió como andesita debido a la presencia de magnetismo en ella.

Presenta mineralización de óxidos de cobre, principalmente crisocola, existentes como cúmulos o diseminados en la roca. Se encuentra intensamente fracturada, determinándose un manteo de 30° E para este set de fracturas. En un metro se encuentran entre 10 a 15 fracturas. Por ello, debido a esta permeabilidad secundaria, esta unidad representa la posibilidad de transformarse en albergue de aguas en profundidad.

Los afloramientos principales de estas andesitas se encuentran al interior de Quebrada Huanca Sur, extendiéndose a lo largo de ella (aproximadamente 10 km) con un ancho promedio de 500 metros (Foto 6.2). Se disponen subyacentes a una secuencia volcano-sedimentaria.

Secuencia volcano-sedimentaria. Se ubican sobreyaciendo al paquete de lavas andesíticas afaníticas, por relaciones de contacto encontradas entre estas rocas al sur de Cerro Huayna Potosi. Se trata de una secuencia compuesta por una alternancia de areniscas conglomerádicas y brechas en la base, seguidas por un nivel de tobas lítico cristalinas y tobas soldadas, bien estratificadas. El contacto entre los diferentes niveles es concordante (Fotos 6.3 y 6.4).

Esta secuencia tiene un espesor aproximado en la localidad de estudio de ca. 250 metros, donde el nivel basal posee cerca de 140 metros. Se extienden en diversos afloramientos dentro del área de exploración, principalmente hacia el este de Quebrada Huanca.

Las areniscas se presentan con una intensa alteración propilitica que produce su notorio color verde oscuro que las caracteriza y donde la presencia de mineralización de óxidos de cobre existe de manera moderada a baja. Por su parte las unidades volcánicas superiores poseen colores blancos y rosados, no presentando grados de alteración significativa, en cuya base se encuentra un nivel de areniscas oscuras que puede ser confundido con material de depósito de caída.

Por su litología, en profundidad esta secuencia puede constituirse en reservorio geotérmico.

Lavas porfíricas y piroclastos. Se trata de un primer nivel inferior de lavas de composición andesítica, porfíricas, con fenocristales de plagioclasa que en algunos casos llegan a tener hasta 1 cm de largo, anfíbolos y en menor medida piroxenos.

Se encuentra fuertemente alterada a óxidos de hierro \pm hematita y jarosita, por lo que su color distintivo es el rojo parduzco.

Se extiende ampliamente en la zona de estudio, siendo la litología más abundante. Se dispone sobreyaciendo a la secuencia volcano-sedimentaria antes descrita, en discordancia angular a esta.

Su espesor según la zona observada varía desde 20 a 50 m aproximadamente. Debido a su fuerte compactación, tiene características idóneas para ser tapa de un sistema geotérmico.

Sobre este nivel de lavas se encuentra una capa de material piroclástico soldado de composición dacítico, con cristales de cuarzo y fiammes. Su matriz se encuentra alterada a hematita \pm óxidos de Fe, por lo que se distingue por su color rojo-parduzco y que la confunde a la distancia con las andesitas porfíricas a las cuales sobreyace.

Su espesor es complejo de estimar. Correspondería a los productos piroclásticos asociados a la emisión de lavas de la misma composición.

Ignimbrita Guailleane. Definida así por Argandoña (1984), esta unidad se compone por un paquete de tobas soldadas de color rosado a blanquecino y que se extiende por Quebrada Aroma hacia el sur. Esta litología representa los últimos flujos emitidos por el Volcán Guailleane ubicado en el sector norte de la zona de exploración. Se distingue por su notorio aspecto aplanado en la parte superior.

Se dispone en algunos sectores sobreyaciendo al paquete volcánico de lavas y material piroclástico de Quebrada Huanca.

Depósitos no consolidados. Compuesto principalmente por escombros de falda y en menor medida por sedimentos fluviales y aluvionales observados a los pies de Cerro Teta. En estos depósitos se ubican diversos bofedales y cursos de riachuelos.

6.2.2.- Centros volcánicos

El volcanismo de la zona está representado por las emisiones de lavas y piroclastos de los centros volcánicos recientes. Entre ellos se exponen Volcán Casiri y Cerro Huayna Potosí.

Cerro Huayna Potosi. El lugar de exposición de estos afloramientos se encuentra en las rocas al sur de este volcán, hacia el sector suroeste de la concesión explorada. Dichos afloramientos se tratan de lavas de composición dacítica y altos niveles de sílice tal como lo reflejan los minerales de cuarzo y vidrio en ellas.

Volcán Casiri. Coladas de lava provenientes de este volcán, ubicado inmediatamente al sur de la zona de exploración, más allá de los límites de esta. Su masa fundamental está alterada a hematita, por lo que posee un notorio color rojo-parduzco. Debido a que no se encontraron en

los afloramientos visitados minerales de cuarzo y vidrio, se han diferenciado de aquellas dacitas vítreas descritas anteriormente.

6.2.3.- Estructuras

El rasgo distintivo del área de exploración estudiada es la existencia de fallas normales que se han generado probablemente por procesos distensivos del Plioceno. Entre estas fallas destacan en la zona un par de rumbo aproximado NS y EO de gran extensión (14 y 20 km respectivamente). La falla NS ubicada a lo largo de Quebrada Huanca es la responsable del hundimiento del bloque oeste que expone los afloramientos de la secuencia volcano-sedimentaria (Foto 6.5).

Dicha falla es inferida en el presente estudio debido a que no se pudo determinar el salto de la misma. Como indicadores cinemáticos de movimiento se observan estrías en los afloramientos de las tobas de la pared oeste que dan cuenta del movimiento normal de dicha falla.

Es también a través de esta falla y al oeste de la misma, donde se desarrolla la principal zona de alteración hidrotermal del área, por lo que se infiere que esta sirvió como medio para el avance de fluidos. La falla de rumbo aproximado EO por su parte no presenta mayores indicios de movimiento, sólo observándose como un notorio lineamiento en las imágenes satelitales trabajadas.

Junto a estas fallas extensas, se encuentra el desarrollo de diversos grabenes principalmente hacia el sector oriental del área de estudio, producidos por fallas normales menores asociados a movimientos distensivos.

Este fallamiento normal produce el basculamiento de las unidades, por lo que es observable secuencias basculadas de areniscas-brechas-tobas-andesitas, de base a techo, que se corresponden con la estratigrafía antes señalada.

En general, las rocas de la zona poseen rumbo N 30° O y manteo entre 20° y 40° E, con excepción de los flujos de lavas andesíticas porfíricas y las unidades que la sobreyacen, debido a que tales flujos rellenan la topografía existente.

Un rasgo notorio es la disposición de las capas de los afloramientos de las lavas y piroclastos del techo de Estratos de Quebrada Huanca. Tales capas se encuentran en su parte este manteando de manera divergente a aquellas de la parte oeste, lo que ha llevado a pensar en este estudio la posibilidad de estar en presencia de un pliegue cuyos flancos se separan menos de 1 km, con eje aproximado NS y buzamiento al sur, tal como ocurre con las formaciones cretácicas del sector de Puchuldiza (Formación Churicollo) (Foto 6.2).

6.2.4.- Alteración

Como característica principal en la totalidad de la zona de estudio es la existencia de una amplia zona alterada hidrotermalmente en el sector centro de esta. Dicha alteración no permite distinguir la roca primaria, pues al tratarse de alteración argílica avanzada, la litología primaria ha quedado completamente obliterada. Se observan arcillas del tipo caolín.

Se infiere que a través del cruce de las fallas de rumbo NS y EO antes mencionadas, se produce la alteración hidrotermal por fluidos provenientes de los centros volcánicos cercanos.

En el sector de Cerro Huayna Potosí también se observa una zona importante de alteración argílica avanzada con caolín, alunita, \pm jarosita y óxidos de Fe. Es en este sector también donde se distinguen brechas hidrotermales cuya matriz está completamente alterada a sílice y arcillas. Los clastos de dichas brechas corresponden a bloques angulosos de andesitas alterados a arcilla.

Guanacota presenta las alteraciones típicas de un sistema epitermal de alta sulfidización y es por esto que la profundización en su exploración puede entregar indicios de sistemas geotérmicos ocultos en su interior, bajo la cubierta volcánica reciente.

6.3.- GEOQUÍMICA DE AGUAS

Al igual que lo realizado para el sector de Puchuldiza, se exponen a continuación la caracterización química de las aguas de esta zona junto con los resultados e interpretación de los análisis.

Cabe señalar que al interior de la zona de exploración geotérmica denominado Guanacota no se encuentran manifestaciones termales de alta temperatura superficial. Sin embargo, hacia el este y sur de los límites de esta concesión se observa surgencia de aguas calientes junto a alto contenido de azufre (Figura 6.1)

La Tabla 6.1 muestra los resultados correspondientes a 8 muestras recolectadas. También se muestra la Tabla 6.2 con las razones molares respectivas.

La Figura 6.2 señala el diagrama de Piper respectivo para la caracterización química de las aguas. Estas se tratarían de aguas sódicas cloradas a sódicas bicarbonatadas.

De los datos graficados en el diagrama ternario $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl}$, el cual nos permite inferir el sistema al cual se asocian (Figura 6.3) se observa que las aguas de Guanacota se acercan más al campo de las aguas vapor calentadas, alejándose de los campos asociados a campos geotérmicos de interés, al contrario de lo que ocurre con las aguas de Puchuldiza. Lo anterior debido a que al ser las aguas de este sector menos cloradas, se deduce por tanto que la componente magmática en ellas es menor y la asociación a aguas de fuente de este tipo se aleja.

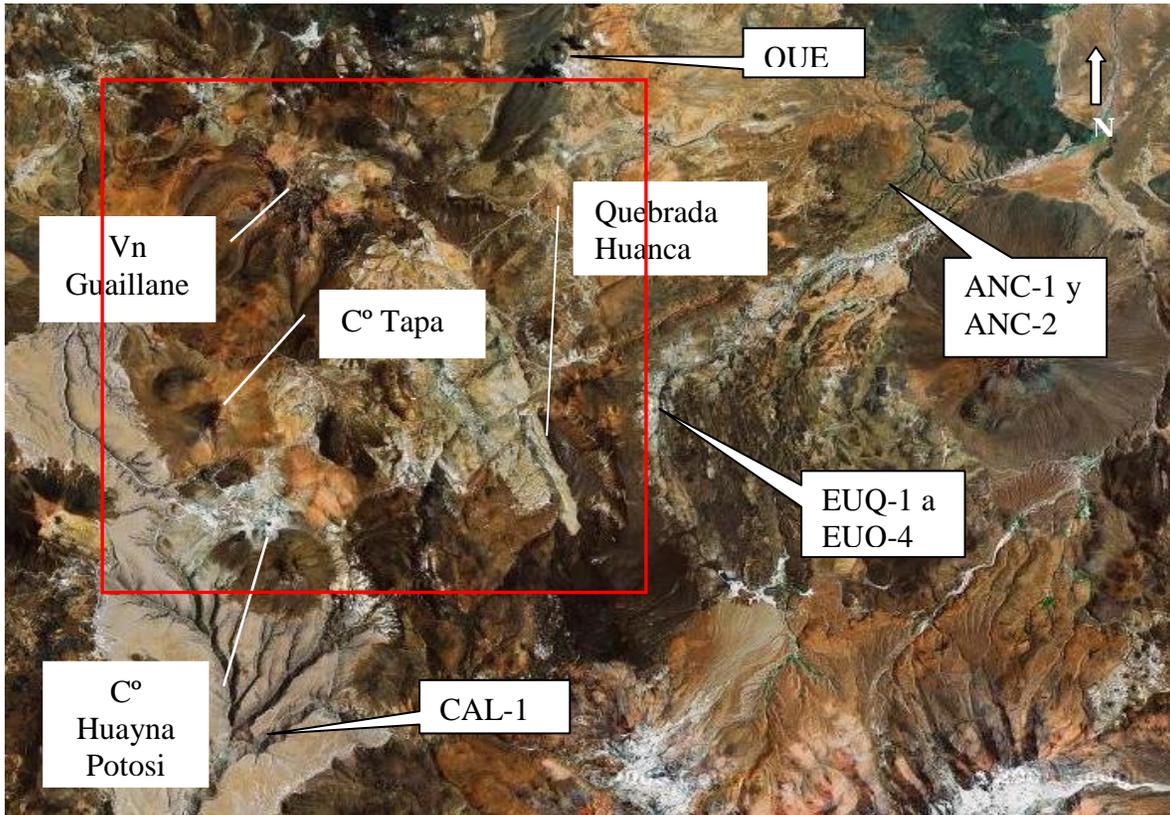


Figura 6.1. Imagen con la ubicación de las muestras recolectadas en el sector de Guanacota, para su análisis e interpretación. En rojo se muestra la concesión de exploración geotérmica, además de algunos rasgos topográficos relevantes.

Tabla 6.1. Resultado del análisis de 8 muestras de aguas calientes del área de exploración Guanacota. Valores en mg/l.

Muestra	PH	Temp. °C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	B ³⁺	HCO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	NH ₃	SiO ₂
EUQ-1	6,7	56	55	11	1500	130	7,60	-	1952	368	1202	-	3,25	-	-
EUQ-2	6,6	62	52,5	11	1540	130	7,60	-	1983	368	1193	-	3,24	-	-
EUQ-3	6,7	69	66,2	9,57	1477	130	16,3	36,1	1976	848	1287	0	4,02	<0,1	46,6
EUQ-4	6,5	69	59,4	9,24	1414	150	16	35,7	2025	819	1325	0	3,96	<0,1	45,1
ANC-1	6,6	32	47,5	6	1550	26	2,6	-	2111	226	1110	-	0,12	-	-
ANC-2	6,8	33	60,5	5,35	1477	29,4	6,58	31	2135	782	1175	0	1,28	<0,1	30,6
CAL-1	6,7	48	105	25	1180	140	6,2	-	1125	608	1065	-	0,3	-	-
QUE	6,6	30	2,13	<1,0	29	4,11	0,078	2,31	63,4	16	14,2	0	0,23	<0,1	22,6

8

Tabla 6.2. Razones molares para las aguas recolectadas en el área de exploración Guanacota.

Muestra	Na/K	Na/Li	Cl/B	Cl/F	Cl/SO4
EUQ-1	14,60	59,59		198,19	8,85
EUQ-2	14,99	61,18		197,31	8,78
EUQ-3	14,38	27,36	10,87	171,56	4,11
EUQ-4	11,93	26,68	11,32	179,30	4,38
ANC-1	75,45	179,99		4956,85	13,31
ANC-2	63,59	67,77	11,56	491,92	4,07
CAL-1	10,67	57,46		1902,36	4,75
QUE	8,93	112,25	1,87	33,08	2,40

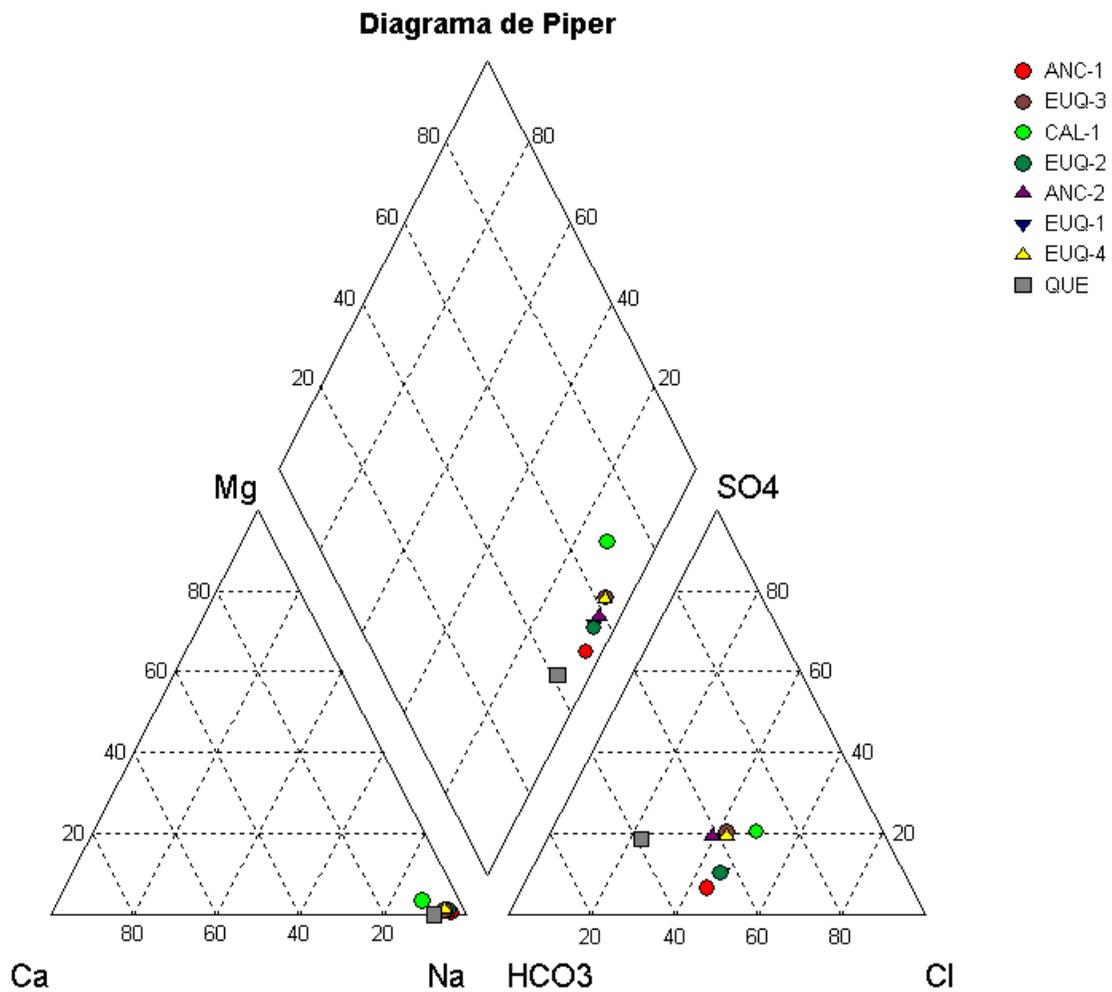


Figura 6.2. Diagrama de Piper para las muestras recolectadas en el área de exploración geotérmica de Guanacota. Se observa la concentración de aguas en el campo de las sódica cloruradas a sódica bicarbonatadas.

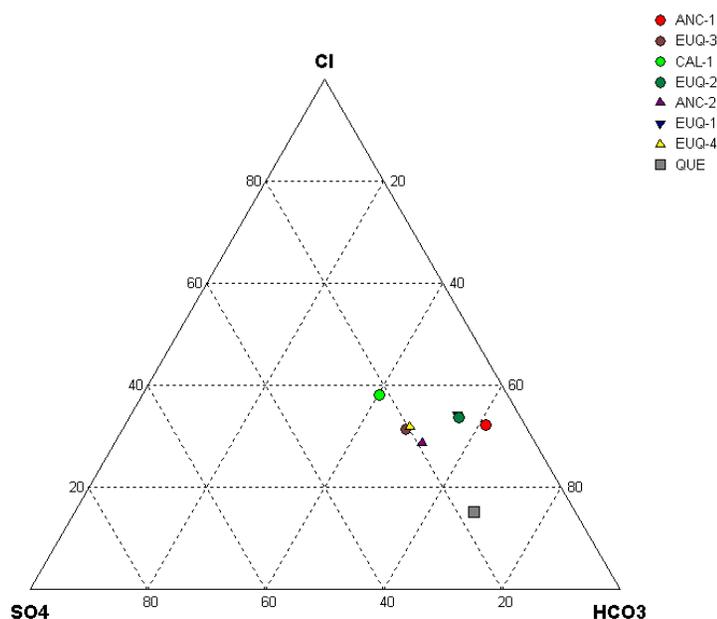


Figura 6.3. Diagrama ternario mostrando características respecto al origen de las aguas recolectadas en el área de exploración geotérmica de Guanacota. A diferencia de Puchuldiza, las aguas de este sector muestran mayor cantidad de bicarbonatos

Las razones molares observadas en Tabla 6.2 muestran un amplio rango para las razones Cl/Li y Cl/F, por lo que es posible señalar que las fuentes termales de mayor temperatura encontradas, de pertenecer a un sistema geotérmico en profundidad, no serían parte del mismo.

De igual manera, del análisis de la razón molar Cl/SO₄ para las muestras, se observa que los valores no son altos, lo que significa una cantidad similar en los moles de Cl y SO₄ encontrados en las aguas.

Cl es indicativo de aporte magmático en las aguas, mientras que SO₄ lo es respecto al grado de dilución de las aguas profundas con acuíferos superficiales. Por tanto, los valores bajos encontrados en la razón Cl/SO₄ señalan un equilibrio entre la componente magmática y la dilución superficial de las aguas, en un proceso continuo donde el aporte volcánico de aguas se diluye simultáneamente.

El alto contenido de Mg de las muestras indica aguas relacionadas a un sistema de baja temperatura. La excepción se da en las muestras rotuladas CAL-1 y ANC-1; de ambas, la primera fue registrada en terreno como mesotermal, mientras que la segunda es hipotermal, debiéndose su alta concentración de cloro a otros factores.

Por otro lado, claramente el contenido bajo de Cl en estas aguas es indicio suficiente para proponer una alta dilución de las mismas.

El bajo contenido de amoníaco señala que el sistema geotérmico en subsuperficie asociado a las manifestaciones termales encontradas no se relaciona con rocas sedimentarias, por lo que es posible descartar a la secuencia sedimentaria descrita en la sección anterior como el reservorio geotérmico. Sin embargo, al igual que en Puchuldiza, las razones Cl/B se centran en valores cercanos a 10 para las muestras EUQ-3, EUQ-4 y ANC-2, lo que como se explicó anteriormente se relaciona a rocas andesíticas. Tales rocas se observan en la base de la estratigrafía estudiada.

Finalmente la Figura 6.4 muestra el geotermómetro de cationes observado. En este, se señala que las temperaturas de sub-superficie encontradas superarían en algunos casos los 200 °C. Dicho valor se contradice con las cantidades de SiO₂ determinadas. Estas al ser bajas se relacionan a sistemas geotérmicos de baja entalpía (< 150 °C).

Geotermómetro de cationes

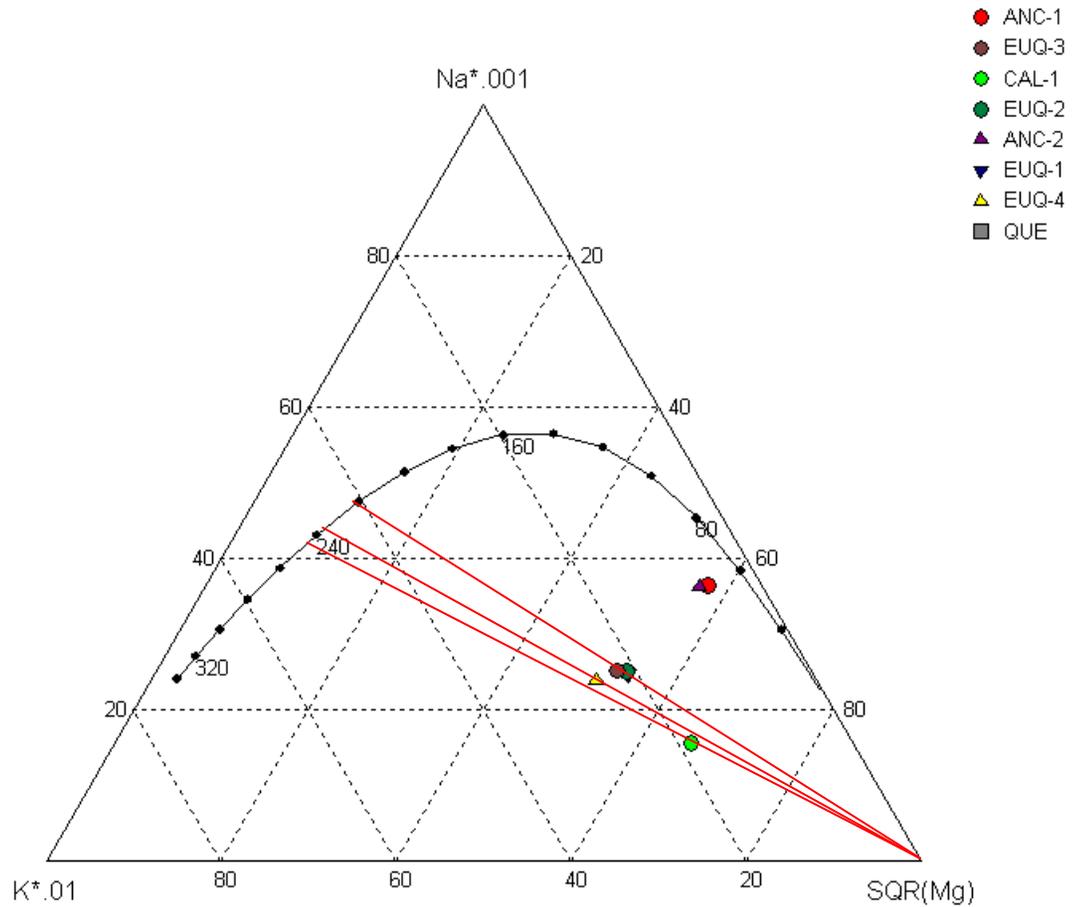


Figura 6.4. Geotermómetro de cationes Na-K-Mg para las aguas muestreadas en el sector de Guanacota. Este geotermómetro entrega valores elevados para casi la mayoría de las muestras, valores que se contradicen con lo observado en terreno y con las cantidades determinadas de sílice total.

6.4.- CORRELACIONES

6.4.1.- Correlaciones estratigráficas

La correlación estratigráfica entre las litologías reconocidas en el área de Puchuldiza y Guanacota se muestra en la Figura 6.5.

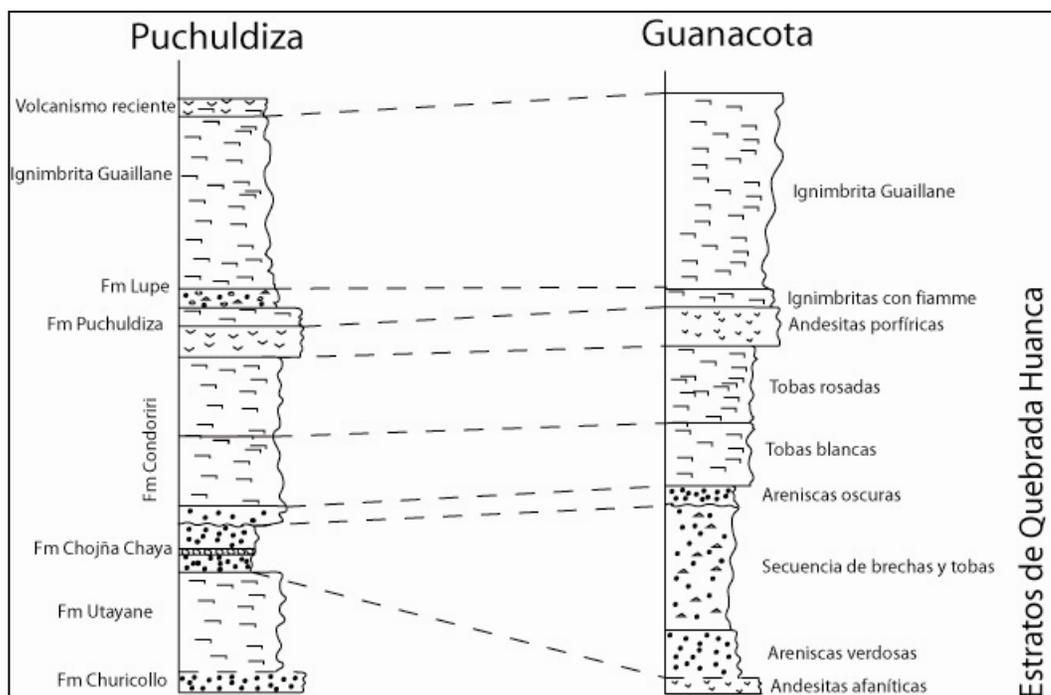


Figura 6.5. Correlación estratigráfica entre la columna desarrollada en Puchuldiza (Lahsen, 1978) y la levantada en el presente estudio.

Se desprende de la comparación entre las columnas que en el sector de Guanacota se continúan las unidades litológicas encontradas en la zona de Puchuldiza. Lo anterior era de esperar dada la cercanía de ambos lugares.

El paquete de andesitas afaníticas observadas pueden ser parte de las unidades litológicas que no aparecen en el sector de Puchuldiza y que aflorarían en la zona de Mauque, distante 10 km

al este del campo geotérmico. Estas andesitas fueron definidas por Lahsen (1975) como Formación Huayna Cota compuesta de andesitas que subyacen a la Formación Churicollo.

La secuencia volcano-sedimentaria descrita se correlaciona con las rocas de la Formación Chojña Chaya, en tanto la Formación Condoriri serían los afloramientos de tobas de la parte superior de esta secuencia volcano-sedimentaria mencionada.

La Formación Puchuldiza estaría bien representada por las andesitas porfíricas y las ignimbritas con fiamme que cubren a las anteriores secuencias.

Finalmente la Formación Lupe no aparecería en esta zona debido a que su desarrollo es local, en cambio la Ignimbrita Guallane, por razones estratigráficas se encuentra sobreyaciendo a las ignimbritas con fiamme que han sido correlacionadas con el Miembro Superior de la Formación Puchuldiza.

Por tanto, encontramos en la zona las unidades litológicas adecuadas para la existencia de reservorios en profundidad, tal como sucede en Puchuldiza.

6.4.2.- Correlaciones geoquímicas

A la luz de los antecedentes expuestos en relación al análisis e interpretación de las manifestaciones termales presentes en el campo geotérmico de Puchuldiza y el área de exploración de Guanacota, resulta claro establecer con la información disponible, que no existiría una correlación en términos de los sistemas geotérmicos entre ambas zonas.

Los reservorios más profundos podrían ser de la misma litología (andesitas); sin embargo las fuentes de calor no se correlacionan, encontrándose la respuesta a las aguas calientes de Guanacota en centros volcánicos independientes que dominan la zona.

CAPÍTULO VII: DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1.- DISCUSIONES

En relación a la actualización geoquímica de las aguas de Puchuldiza, se adjunta la Tabla 7.1 la cual entrega algunos resultados de las muestras analizadas por Cusicanqui (1978), además de la Tabla 7.2 de las razones molares correspondientes.

Se muestra en la Figura 7.1 el geotermómetro de cationes calculado. Este señala claramente que la tendencia de todas las muestras intersecta a la curva geotermométrica sobre los 200 °C, lo que corrobora aún más la potencia de este campo geotérmico. Además basta observar el Diagrama de Piper para notar la similitud de los datos.

Se entrega además el diagrama de Piper correspondiente para revisar la caracterización geoquímica (Figura 7.2). También se muestra desde la Figura 7.3 a la Figura 7.5 la comparación de las razones molares Na/Li, Cl/F y Cl/SO₄.

Respecto a las comparaciones de las razones molares Na/Li se observa una fuerte concordancia entre las muestras colectadas en el sector de Tuja con aquellas de Cusicanqui (1978), a diferencia de las muestras de Taipicollo que se mantienen más bajas. Esto debido a la diferencia en esta razón entre ambos sectores que muestra la participación de acuíferos superficiales probablemente distintos.

En relación a las razones Cl/F, se puede observar una buena concordancia entre los datos, con excepción de dos muestras de Tuja, las cuales probablemente poseen algún error de muestreo o análisis.

Finalmente, la razón Cl/SO_4 muestra mayores diferencias en el grueso de las muestras. Se observa una tendencia a la disminución de esta razón respecto de aquellas de Cusicanqui (1978). Esta baja puede ser explicada por una mayor dilución de las aguas con el paso del tiempo, lo que hace que proporcionalmente una mayor cantidad de Cl se diluya. Debido a que no se encontraron cantidades significativas de sulfuros como mineralización en las rocas se descarta el hecho que SO_4 se haya depositado en forma de metales.

Sin embargo los valores de Cl se muestran mayores en las muestras recolectadas lo que hace pensar en una menor dilución, lo que evidentemente contradice la discusión realizada anteriormente. El hecho que se hayan seleccionado 6 muestras de Cusicanqui (1978) de un total de más de 50 en función de sus temperaturas de subsuperficie y composición de sílice conlleva un error asociado que puede ser la fuente de esta contradicción.

A su vez, los valores de SiO_2 encontrados por Cusicanqui (1978) son levemente mayores, lo que mostraría mayor temperatura de subsuperficie. Lo anterior tiene sentido en cuanto se comprende que con el paso del tiempo (30 años) la entalpía del sistema ha variado probablemente disminuyendo.

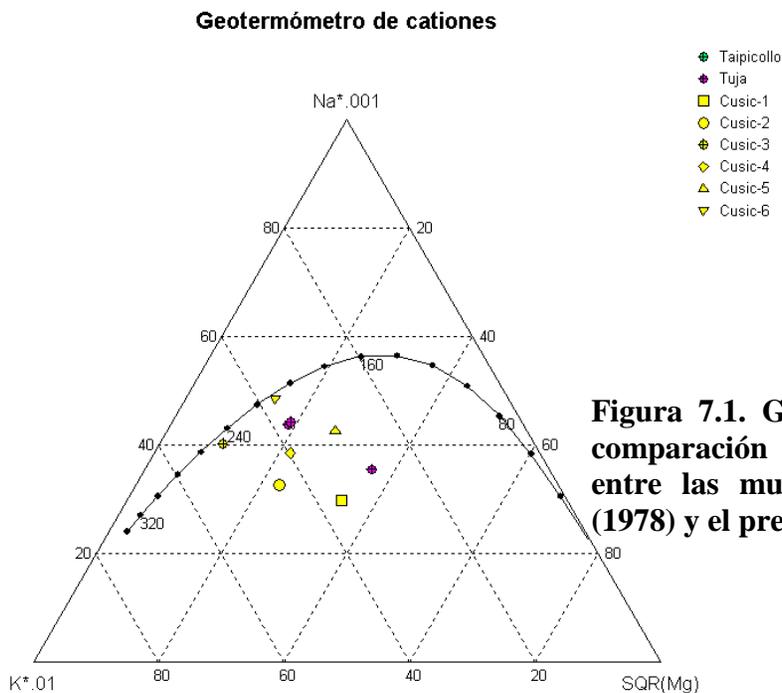


Figura 7.1. Geotermómetro de Na-K-Mg para la comparación de temperaturas de sub-superficie entre las muestras recolectadas por Cusicanqui (1978) y el presente estudio.

Tabla 7.1. Resultado del análisis de 8 muestras de aguas calientes del área de exploración Guanacota. Valores en mg/l.

Muestra	PH	Temp. °C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	B ³⁺	HCO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	NH ₃	SiO ₂
Cusic-1	7,78	82	85	2,54	1380	167	11,7	74	261	114	2308	0	4,2	1,6	260
Cusic-2	8,04	86	25	1,16	1525	208	11,7	81	203	125	2457	0	4,1	1,1	319
Cusic-3	-	86	15	0,16	1587	196	13,8	89	130	137	2679	0	4	1,2	300
Cusic-4	6,66	82	25	0,7	1483	153	12,6	35,7	154	114	2439	0	4	2,3	272
Cusic-5	6,96	86	82	1,02	1600	115	12,3	102	73	89	2744	0	2,5	3,2	258
Cusic-6	7,87	86	33	0,14	1265	97	9,8	80	15	94	2154	0	3,4	2,1	255

69

Tabla 7.2. Razones molares para las aguas recolectadas en el área de exploración Guanacota.

Muestra	Na/Li	Cl/F	Cl/SO ₄
Cusic-1	35,6	294	54,8
Cusic-2	39,2	-	53,3
Cusic-3	34,7	359	52,9
Cusic-4	35,5	327	67,9
Cusic-5	38,5	588	83,5
Cusic-6	39,6	339	62

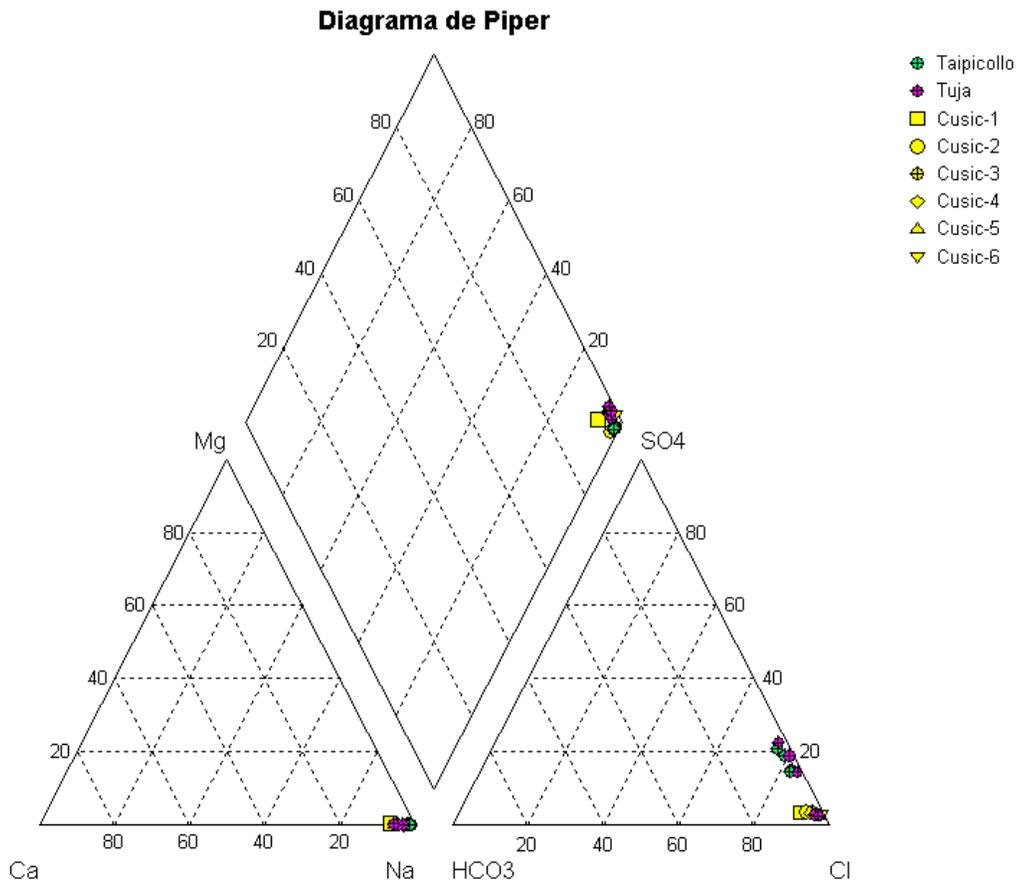


Figura 7.2. Diagrama de Piper para comparar las caracterizaciones geoquímicas de las aguas de Puchuldiza según Cusicanqui (1978) y el presente estudio.

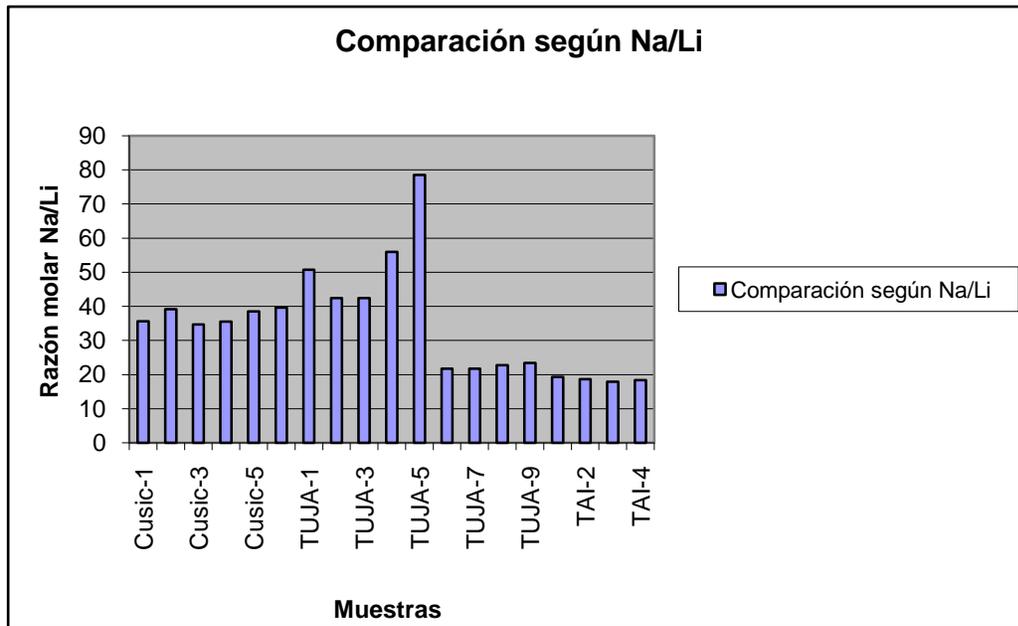


Figura 7.3. Gráfico de comparación respecto a las razones molares Na/Li entre las muestras recolectadas en Puchuldiza en el presente estudio y aquellas analizadas por Cusicanqui (1978).

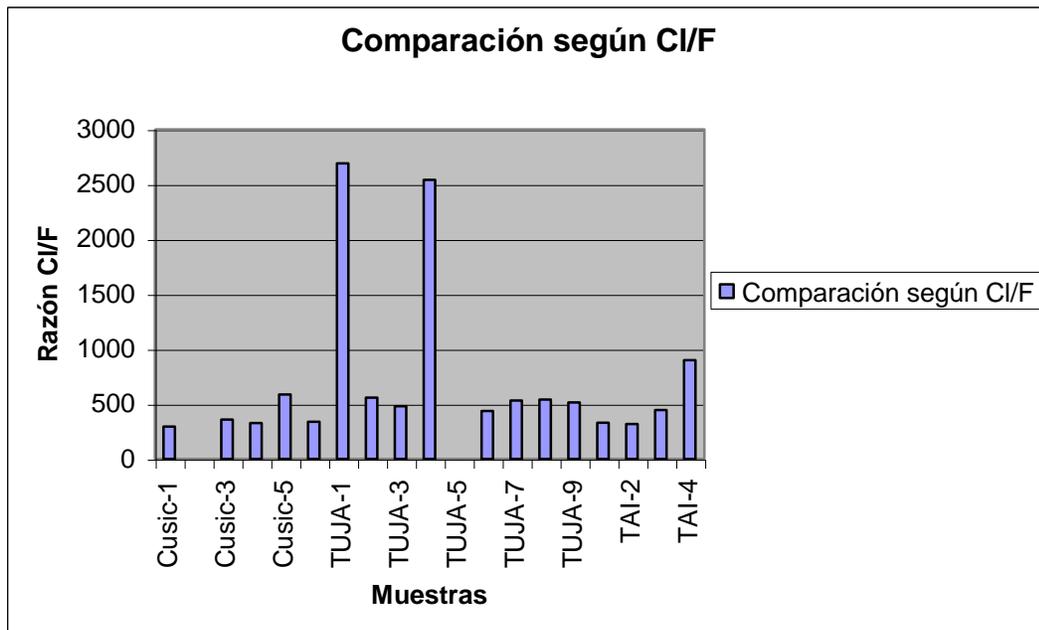


Figura 7.4. Gráfico de comparación respecto a las razones molares Cl/F entre las muestras recolectadas en Puchuldiza en el presente estudio y aquellas analizadas por Cusicanqui (1978).

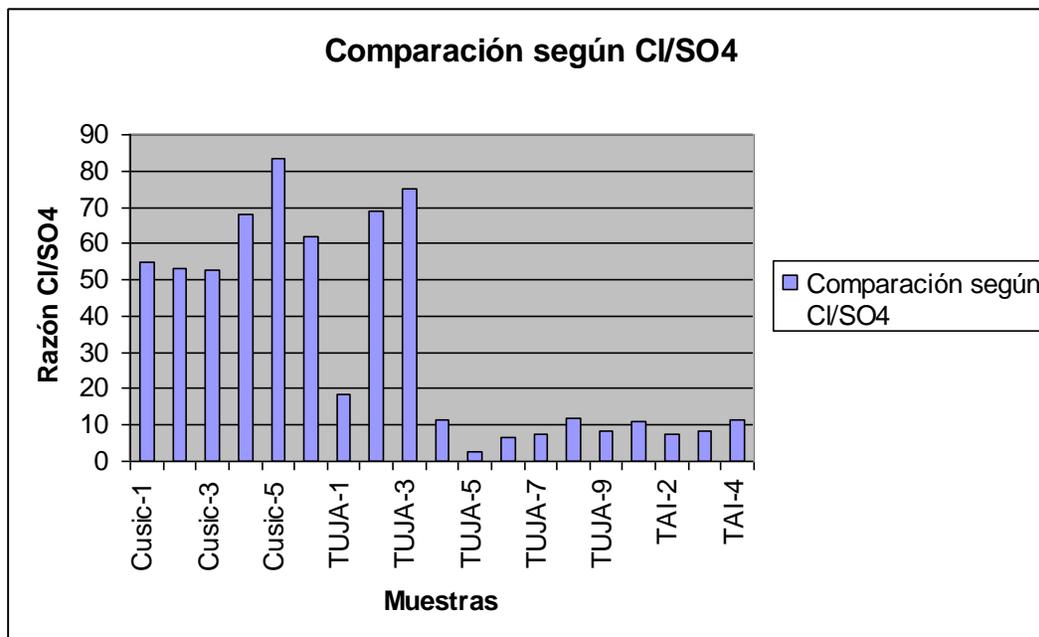


Figura 7.5. Gráfico de comparación respecto a las razones molares Cl/SO4 entre las muestras recolectadas en Puchuldiza en el presente estudio y aquellas analizadas por Cusicanqui (1978).

Respecto a la actualización geofísica, cabe señalar que es de especial interés determinar la fuente real de calor del sistema. La idea que se ha sostenido por mucho tiempo es que esta fuente se ubicaría en los volcanes Plio-Pleistocenos que se encuentran en la Serranía de Macurquima, inmediatamente al norte de Puchuldiza.

Los resultados entregados a través de perfiles magnetotéluricos muestran una zona de muy baja resistividad (alta temperatura) hacia el sur del campo geotérmico. Por lo que se hace necesario correlacionar más detalladamente la geología de esta parte sur con los perfiles desarrollados.

7.2.- CONCLUSIONES

El campo geotérmico de Puchuldiza posee temperaturas de sub-superficie sobre los 200 °C. El reservorio de dicho campo se encontraría en unidades andesíticas ubicadas en profundidad, las cuales no afloran en el sector de estudio.

Tales rocas andesíticas representarían un reservorio profundo, mientras que más superficialmente existirían otros reservorios de menor entalpía asociados a rocas volcánicas del tipo tobas correspondientes posiblemente a la Formación Condoriri, la cual se encuentra hundida producto de la acción del graben que posibilita la existencia de este campo geotérmico.

La geoquímica de las aguas termales de las manifestaciones de Taipicollo y Tuja muestra que si bien la fuente de calor puede ser la misma para ambos sectores, la participación de diferentes acuíferos se refleja en las diferencias leves que se observan en las razones molares de Cl/F y Na/Li.

El análisis de estas aguas indica que a través del tiempo el campo geotérmico de Puchuldiza puede haber variado de manera importante su grado de dilución, aumentándolo. Al respecto, cabe señalar que la comparación de los datos recogidos hace casi 30 años y los actuales presentes en este estudio, se asemejan fuertemente.

De los estudios geofísicos de magnetotelúrica se observan perfiles EO que cruzan el Cerro Taipicollo completamente. En estos aparece la idea de generar una pequeña modificación al modelo utilizado hasta ahora.

Según el modelo “antiguo”, en Puchuldiza existiría un reservorio somero ubicado alrededor de los 800 metros donde los fluidos tienen un carácter horizontal. En cambio bajo los 1.200 metros se encontraría un segundo reservorio de mayor temperatura donde los fluidos poseen un movimiento ascendente (Figura 7.6 a).

En el presente estudio se propone que este sistema geotérmico posee un control netamente estructural. Es mediante la actividad tectónica que se desarrollan los mecanismos para la movilidad de fluidos profundos de gran entalpía. Tal sería el caso de la Falla NS de Tuja, a través de la cual los fluidos con fuerte componente magmática ascienden calentando a su paso lateralmente a las rocas que alojan aguas superficiales (Figura 7.6 b). Estos fluidos emergen sin mayor dilución en la conjunción de los sistemas de fallas como es de esperar.

La fuente de calor, además, puede ser ya no solo el volcanismo del sector norte de Puchuldiza donde no se encuentran manifestaciones termales, sino más bien el volcanismo del sector inmediatamente al sur del campo geotérmico, específicamente hacia el Volcán Guallane donde se han encontrado surgencia de aguas calientes en sus costados.

En este sentido, se postularía de esta forma que efectivamente Tuja es el sector más cercano a la fuente de calor.

Con respecto al estudio del área de exploración geotérmica de Guanacota, el resultado de las investigaciones preliminares señala que este sector no se correlaciona en términos de un mismo sistema geotérmico. Vale decir, las manifestaciones termales de Guanacota no presentarían el mismo proceso que aquellas de Puchuldiza, a pesar de la cercanía entre ambas zonas. Las aguas de Guanacota poseen grados de dilución notablemente mayores que los de Puchuldiza, junto con una mayor composición en bicarbonatos, lo que evidencia su carácter más superficial. Los geotermómetros encontrados se relacionan a sistemas geotérmicos de baja entalpía ($<180\text{ }^{\circ}\text{C}$), no susceptibles de ser explotados económicamente. Al respecto los valores determinados a través del análisis geoquímico de las aguas muestreadas más allá de los límites de la concesión presentan una fuerte contradicción con lo observado en terreno, asumiendo errores de muestreo y análisis para estos.

Lo que si se presenta como una continuidad es la estratigrafía de Guanacota con Puchuldiza. Las unidades reconocidas por Lahsen (1978) en este último aparecen ampliamente en la zona

de exploración. Esto implica que Guanacota posee las características litológicas para albergar algún sistema geotérmico en profundidad.

Los procesos distensivos del altiplano han creado pequeñas estructuras de horst-graben que se extienden mayoritariamente hacia el sector oriental de la zona de estudio. Esto, unido a la existencia de volcanismo reciente (Plioceno) genera las condiciones para el calentamiento de acuíferos en profundidad.

Finalmente el modelo propuesto para Guanacota es el de pequeños sistemas geotérmicos de baja entalpía ubicados en las cercanías de centros volcánicos recientes, favorecidos por litología y sistemas de fallas normales actuando.

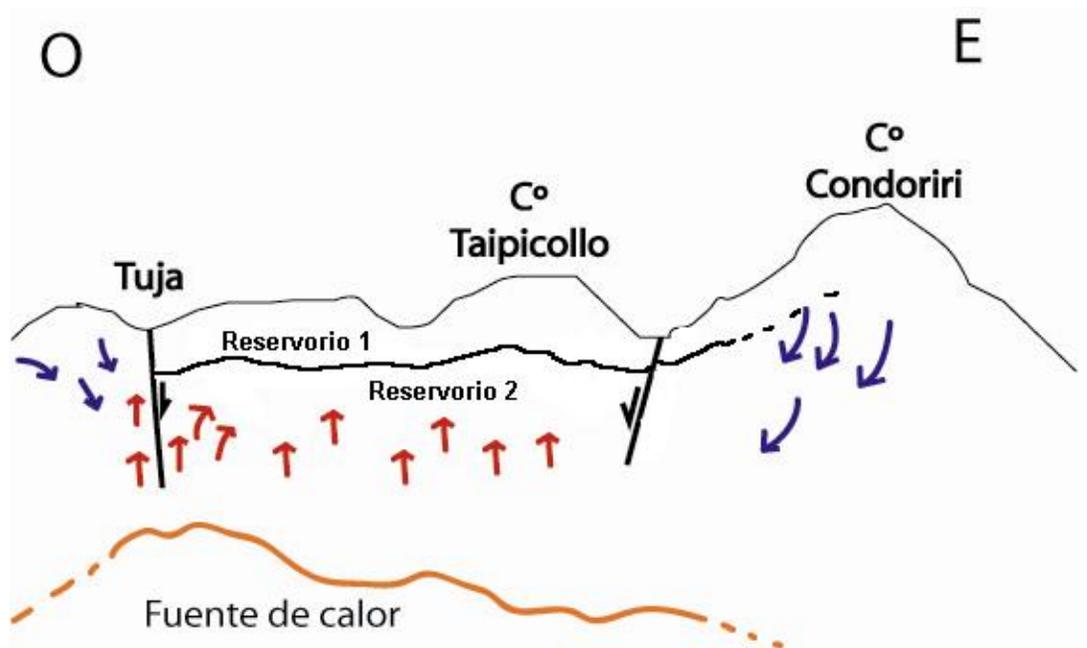


Figura 7.6 a. Modelo clásico, donde se asume que existen 2 reservorios geotérmicos. Este modelo implica la existencia del sistema antes del desarrollo del fallamiento.

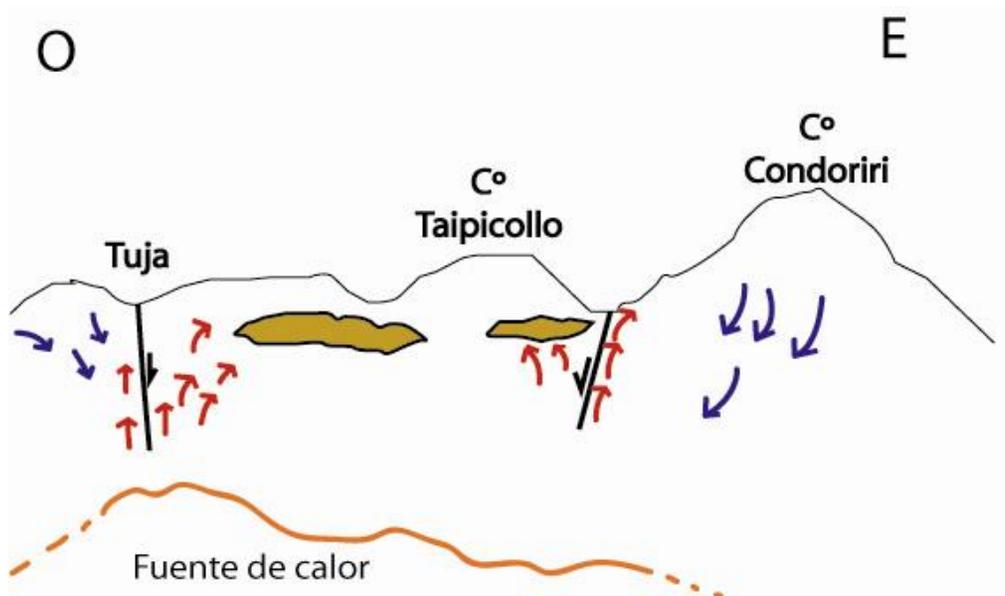


Figura 7.6 b. Modelo propuesto, donde se postula la existencia de acuíferos vapor calentados por los fluidos transportados a través de las fallas profundas. Este modelo implica que el sistema se generó como resultado del fallamiento profundo.

7.3.- RECOMENDACIONES

1. Dirigir nuevas investigaciones hacia el sector suroeste de Puchuldiza, concretamente en el Volcán Guailleane el cual podría representar una fuente de calor de este sistema. Para ello se hace necesario realizar un estudio volcanológico detallado de este centro volcánico y de aquellos volcanes pertenecientes a la serranía de Macurquima, y compararlos. En particular realizar dataciones, petrografía y geoquímica de rocas para entender la evolución del volcanismo en la zona.
2. Realizar la perforación de un nuevo pozo de exploración geotérmico utilizando la propuesta entregada en el presente trabajo el cual debiera tener a lo menos 1.000 metros dependiendo del lugar escogido.
3. Realizar estudios de resistividad en el sector de Volcán Guailleane con el objetivo de determinar los límites del campo.
4. Desarrollar estudios hidrogeológicos en el campo geotérmico de Puchuldiza para determinar la recarga y el balance de aguas del campo.
5. Realizar un catastro más exhaustivo de las manifestaciones termales de Guanacota, y en función de ellos determinar los objetivos más interesantes de exploración. Para ello se recomienda comenzar con estudios de resistividad en las inmediaciones de aquellas manifestaciones en conjunto con un levantamiento geológico a escala 1:25.000 para aquellas zonas escogidas.
6. Estudiar la petrología de los volcanes recientes en el sector de Guanacota y determinar mediante geobarometría la profundidad estimada para el emplazamiento magmático.

REFERENCIAS

Argandoña, R., 1984. Geología del cuadrángulo Cerro Socora y características generales del área geotermal de Puchuldiza. Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile. 150 pags.

Charrier, R; Muñoz, N; 1996. Geología y tectónica del altiplano chileno. En Simposio, Ciencias Veterinarias, Universidad de Chile.

Charrier, Reynaldo; Pinto, Luisa, 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En *The Geology of Chile*. Teresa Moreno ed.; Gibbons ed. Pp. 21-114

Cusicanqui, H., 1975. Evaluación geoquímica del yacimiento hidrotermal de Puchuldiza I Región. Informe inédito, Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica, CORFO. 20 pags.

Dirección Meteorológica. www.meteochile.cl.

Galli, C., 1957. Las formaciones geológicas en el borde occidental de la Puna de Atacama, Sector de Pica, Tarapacá. *Revista Minerales*, Año 12, NQ 56, p. 14-26, Santiago

Geodatos; 2008. Estudio geofísico mediante método magnetoteléurico (MT) y Transiente electromagnético (TEM), Proyecto Puchuldiza. Informe Inédito para COMINOR S.A.

Harambour, S., 1990. Geología pre-cenozoica de la Cordillera de los andes entre las quebradas Aroma y Juan de Morales, 18 Región, Chile. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 228 p.

Hochstein, M.P.; 1971. Geophysical survey of the Puchuldiza geothermal area, results up to december 1970. Survey for geothermal development in northern Chile. Informe interno CORFO.

J.I.C.A., 1979. Report on Geothermal Power Development Project in Puchuldiza Area. Informe inédito para Comité para el Aprovechamiento de la energía Geotérmica, CORFO.

Lahsen, A., 1973. Geología de Puchuldiza. Informe inédito para Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica, CORFO.

Lahsen, A., 1976. Geothermal exploration in northern Chile. Summary. *A.A.P.G. Mem.*, 25: 169-175.

Lahsen, A., 1978. Evaluación de los resultados de la exploración del campo geotérmico de Puchuldiza I Región Tarapacá. Informe inédito para Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica, CORFO.

Lahsen, A., Munizaga, F., 1979. Nuevos antecedentes cronológicos del volcanismo cenozoico superior de Los Andes Centrales del Norte de Chile, entre los 19° 00' y los 22° 30' Lat. Sur. Actas II Congreso Geológico Chileno, Tomo I, pp. F61-F82.

Letelier P., Margarita, 1981. Geoquímica de las manifestaciones termales de Puchuldiza y sus alrededores. CORFO – Comité de Energía Geotérmica: 60 pags.

Marinovic, N.; Jeraldo, R.; Sanchez, J., 1975. Estudio de Resistividad del Campo Geotérmico de Puchuldiza. Informe inédito para Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica, CORFO.

Muñoz, N., Elgueta, S. y Harambour, S., 1988. El Sistema Jurásico en el curso superior de la quebrada Azapa, I Región: Implicancias paleogeográficas. Actas 5^o Congreso Geológico Chileno, Tomo 1, p. A403-A415.

Muñoz, N., 1991. Marco Geológico y Estratigrafía de un sistema fluvio-lacustre, Paleogeno, Altiplano de Arica, Norte de Chile. Actas 6^o Congreso Geológico Chileno, Viña del Mar, p. 201-204

Sepúlveda, F., 2005. El sistema geotérmico de Cordón Caulle, sur de Chile: caracterización geológica y geoquímica. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología, Universidad de Chile.

Trujillo, P., 1970. Manifestaciones termales de Puchuldiza y Tuja. Informe inédito para Comité Geotérmico, CORFO.

Trujillo, P., 1998. Recursos Geotérmicos de Tarapacá. En : I Encuentro Minero del Cono Sur. 10 pags.

Urzúa, L., 1999. Geoquímica y productos de alteración en el área geotermal de Puchuldiza, Región de Tarapacá, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile. 96 pags.