

PROSPECCIÓN ELÉCTRICA PARA DETECCIÓN DE AGUA TERMAL EN ZONA DE LIQUIÑE, REGIÓN DE LOS RÍOS, CHILE.

F. Navarro Flores¹, R. King St-Onge² y A. Muñoz Jensen³

RESUMEN:

En los últimos años en Chile hay un creciente interés en la detección de fuentes geotermales de baja entalpia para el desarrollo de ámbito turístico como piscinas y spas. En el presente estudio se investiga la presencia y distribución de un sistema geotermal en una parcela en la zona del Valle de Liquiñe. Se realizaron mediciones de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) en tres puntos diferentes del lugar de terreno, estimando cambios bruscos en las propiedades eléctricas de las rocas e infiriendo la profundidad del acuífero. En las mediciones de Potencial Espontáneo (PE), las anomalías indican zonas de flujo de aguas por medio de fallas y fracturas, en un área con potencial presencia de agua termal subterránea cercana a unos de los puntos SEV. El método de PE se utilizó dado que es económico, rápido, fácil de manipular y puede abarcar grandes áreas en un tiempo acotado, permite diferenciar agua subterránea caliente de la fría, sin embargo, este método por sí solo no es determinante, se recomiendan otros estudios específicos para evaluar el potencial térmico del área de estudio.

PALABRAS CLAVES: Geotermia, Potencial Espontáneo, sondeo eléctrico vertical.

ABSTRACT:

In the last years in Chile there is a growing interest in the detection of geothermal sources of low enthalpy for the development of tourism such as swimming pools and spas. In the present study, the presence and distribution of a geothermal system in an area of the Liquiñe Valley is investigated. Vertical Electrical Sounding (SEV) measurements were taken at three different points of the site, estimating abrupt changes in the electrical properties of the rocks and inferring the depth of the aquifer. In the Measurements of Spontaneous Potential (PE), the anomalies indicate zones of flow of water by means of faults and fractures, in an area with potential presence of underground thermal water near one of the SEV points. The PE method was used since it is economical, fast, easy to handle and can cover large areas in a limited time, it allows to differentiate hot underground water from cold water, however, this method alone is not decisive; other specific studies are recommended to evaluate the thermal potential of the study area.

KEYWORDS: Geothermal, Spontaneous Potential, Vertical electric Sounding.

¹ Fernanda Navarro Flores, Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fnavarro@ing.ucsc.cl

² Robert Wallace King St-Onge, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

³ Alejandra Muñoz Jensen, EMGG TerraData Ltda., Concepción, CHILE. terradata.chile@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la geotermia se ha ido estableciendo cada vez con más fuerza en Chile, a través de investigaciones científicas desde baja a alta entalpía y aplicaciones de ésta. Una consecuencia es el creciente interés en la detección de fuentes geotermiales de baja entalpía y futura explotación en el ámbito turístico, como piscinas y spas.

La constante búsqueda en nuevas fuentes de energía, y el aprovechamiento de recursos naturales, ha incrementado notablemente en los últimos años. La declinación de reservas de petróleo, así también la aceptación del Protocolo de Kyoto, han favorecido la instalación de plantas geotérmicas a nivel global. La geotermia consiste en un tipo de energía renovable, la que utiliza el calor en el interior de la tierra.

Basándose en la temperatura, la energía geotérmica se puede dividir en cuatro categorías:

- a) Alta temperatura más de 150 °C: permite la transformación directa de vapor de agua en energía eléctrica.
- b) Media temperatura: entre 90 y 150 °C: produce la energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta a las centrales.
- c) Baja temperatura entre 30 y 90 °C: es más utilizado en la calefacción de edificios, balneología, termas, spa y piscinas.
- d) Muy baja temperatura menos de 30 °C: puede ser utilizada para calefacción y climatización necesitando una bomba de calor.

La prospección geofísica consta de múltiples disciplinas, como las físicas, geológicas y matemáticas las cuales se aplican a diversos tipos de estudios para investigar diferentes componentes de nuestro planeta, como el campo magnético, la resistividad en el subsuelo, la densidad de rocas, su capacidad de conductividad eléctrica, reservorios de agua, exploración de aguas termales, etc. Para obtener buenos resultados es necesario que existan algunos contrastes en lo que se está investigando, como por ejemplo cambios bruscos en las propiedades de las rocas, como velocidad de onda sísmica.

Los métodos eléctricos son un tipo de método geofísico, que forman parte de pruebas ejecutadas en la determinación de características geotécnicas de un terreno. Determinar la resistividad eléctrica de rocas constituyentes del subsuelo y también su distribución. Se puedan interpretar cambios producidos por la presencia de agua subterránea y/o concentración mineralógica en las formaciones de roca. Es posible observar zonas anómalas que pueden ser debidas a estructuras geológicas contrastantes o bien por la presencia de fluidos conductores como el agua y contenido mineralógico que altera los valores de resistividad del medio.

En la actualidad existe un número importante interesado en desarrollar y fomentar el turismo en el área termal. Según Chile Termas, en el año 2010, alrededor de 700 mil personas visitaron las termas del país y para el año 2015 se preveía un millón de personas.

El presente estudio tiene la finalidad de investigar y evaluar zonas con potencial de desarrollo termal. Dado que la prospección de aguas termales tiene un alto costo, en este caso se utilizarán primero unos métodos asequibles para público interesado en instalar centros termales.

Para este estudio se utilizará el método de potencial espontáneo (PE), el cual consiste en medir las variaciones de PE en campo. El registro de éste se utiliza para detectar las capas permeables y conocer la concentración iónica de los fluidos intersticiales de las rocas. Se hace un registro con la diferencia natural del potencial eléctrico, en milivoltios, entre dos electrodos uno móvil y otro fijo de referencia en la superficie. La confección del equipo de medición no requiere de una gran inversión. Se compararán los datos obtenidos con otro método de medición, Sondaje Eléctrico Vertical (SEV), para ver si se obtienen datos similares.

La zona de estudio se encuentra ubicada en la Región de los Ríos (XIV), a 72 Km al Este de la comuna de Panguipulli, a unos 4 Km al Sureste del Pueblo de Liquiñe. El área está situada en un ambiente geotermal activo donde a modo general las fuentes termales se distribuyen en zonas de acuerdo a patrones geológicos-estructurales que dominan en la región, distribuidas a lo largo de la zona de la Cordillera Principal. En la

Figura 1, en el recuadro A se ilustra la red hídrica de la Región de los Ríos y en el recuadro B la zona de estudio.

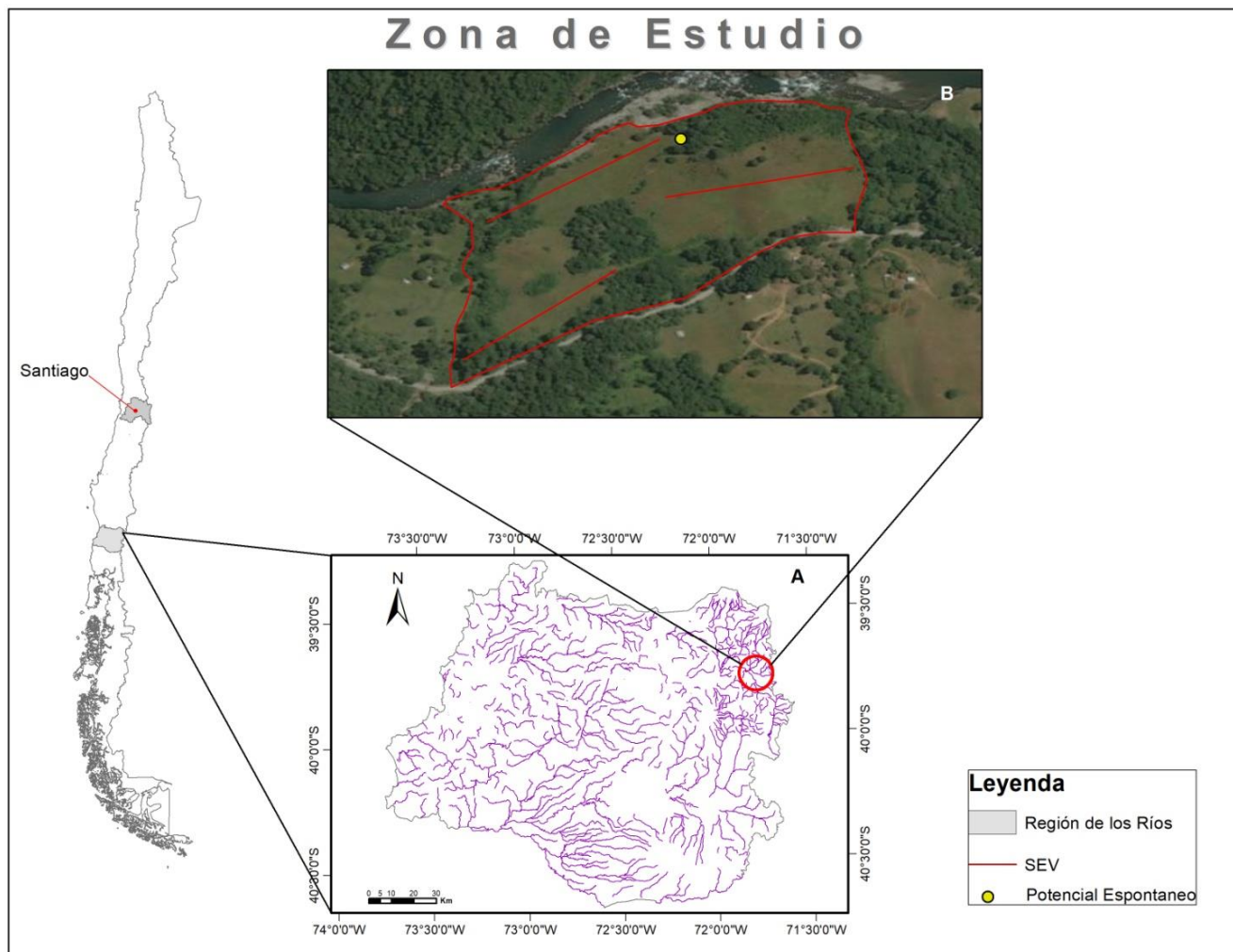


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio, en recuadro A se ilustra la red hídrica de la Región de los Ríos y en el recuadro B corresponde a la zona de estudio. Elaboración propia.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Geología Regional

El marco tectónico que rige la evolución geológica de Chile es definido debido a la convergencia entre las placas Sudamericana y Nazca, generando un régimen compresivo a lo largo de Chile entre los 18°S y 46°S de latitud. La convergencia, presenta una tasa de 7 cm por año durante los últimos 20 millones de años (Pardo-Casas y Molnar, 1987).

La región de la zona de estudio se encuentra ubicada en un contexto con dominio volcánico y estructural. En la Región de Los Ríos, la geología está segmentada según sus unidades morfoestructurales, de manera que la Cordillera de la Costa corresponde a rocas metamórficas asociadas al Complejo Metamórfico Bahía Mansa, la Depresión Central a depósitos glaciares y la Cordillera Principal a rocas intrusivas las del Batolito Norpatagónico (BNP) y a unidades volcánico-sedimentarias. (Lemus, et al., 2015).

En la Región el dominio estructural (se relaciona con recursos geotermales formados por circulación profunda de aguas meteóricas) en sistemas tectónicos, ambientes trasarco, regiones de extensión cortical, zonas de colisión y zonas de fallas y fracturas. Es importante mencionar la presencia de la Falla Liquiñe Ofqui (ZFLO) desde los 38°-47° S, la cual es el resultado de la convergencia entre las placas Sudamericana y Nazca, que se desarrolló en una zona de falla intra-arco y que tiene una extensión de 1.200 kilómetros de largo. Esta falla corresponde a una zona de cizalle activa, asociada a un régimen transpresional dextral (Cembrano et. al., 1996) desencadenando la ubicación de los principales estratovolcanes a lo largo de la zona de falla (Cembrano y Lara, 2009).

En el área el dominio estructural se relaciona con recursos geotermales formados por circulación profunda de aguas meteóricas. (Lemus, et al., 2015).

El basamento de la Cordillera Principal está constituido principalmente por rocas intrusivas de edades que varían desde el Carbonífero-Pérmico hasta el Mioceno, formando, cuerpos elongados en sentido Norte-Sur. (Lemus, et al., 2015). (Figura 2).

En el área de estudio no se identifican afloramientos de roca pero la presencia de rocas como tonalita y dioritas, pertenecientes al Batolito Norpatagónico (franja Cretácica superior), observadas en meandros del río Liquiñe. Se observan rocas redondeadas y bien seleccionadas, en meandros abandonados del río (Figura 4, letra A y B). Según Lara, Moreno, H. (2004), en el río Liquiñe, las tonalitas y dioritas intruyen los gneis del Complejo Metamórfico Liquiñe (Pzl). Ver en el mapa de la Figura 3.

El sector está cubierto por una terraza de material fluvio-glacial, se destaca la presencia de depósitos coluviales, fluvio-glaciales y de remoción en masa tardíos (Hc, Hf, Hrm) (ver Figura 3); cubierta por una abundante vegetación y material orgánico que impide ver con claridad la geología presente.

Hay áreas cercanas al río con un fuerte olor a azufre, sin embargo no hay manifestaciones termales superficiales que lo acompañen.

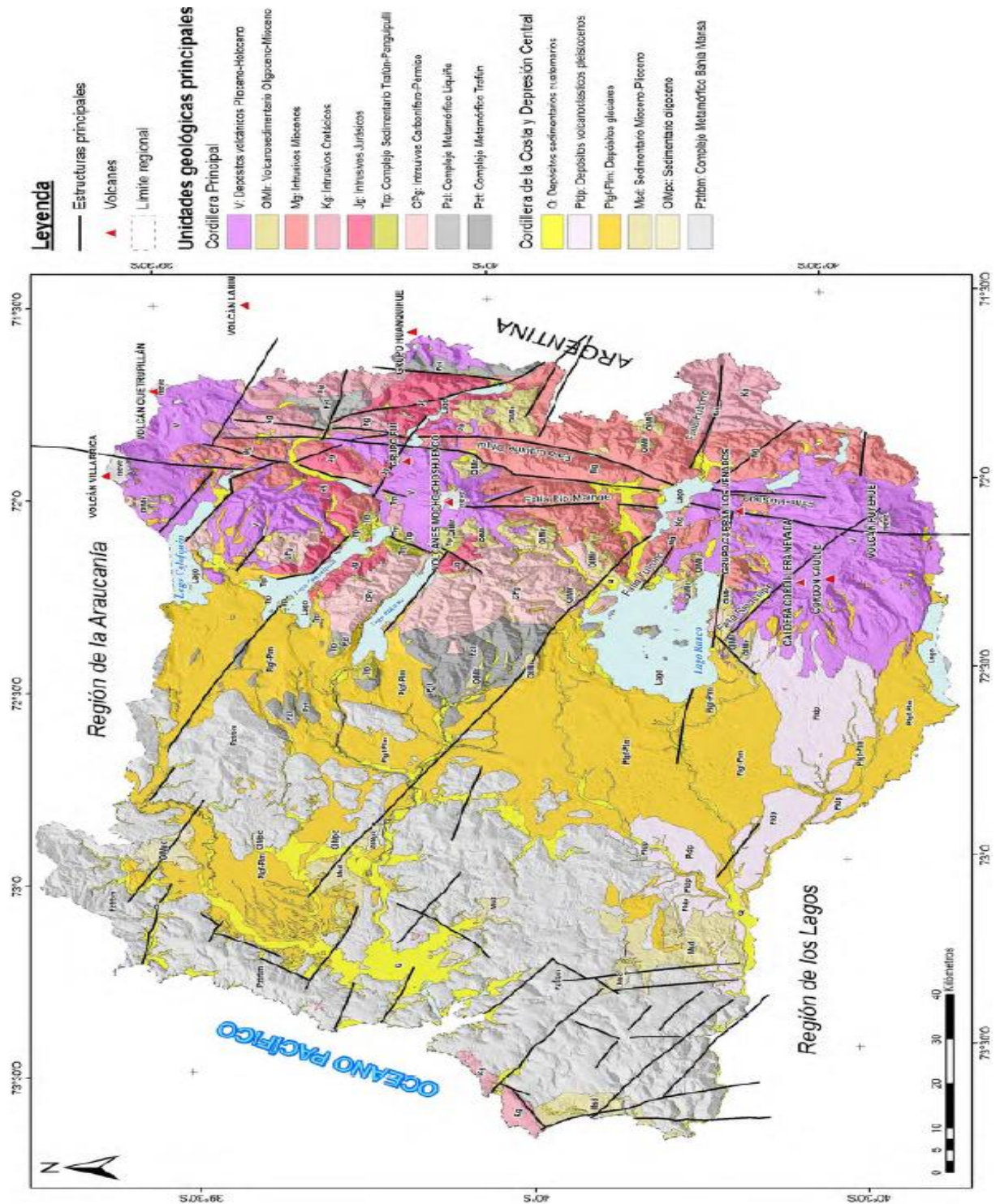


Figura 2: Mapa Geológico generalizado de la Región de los Ríos. Tomada de Lemus, et al., 2015.

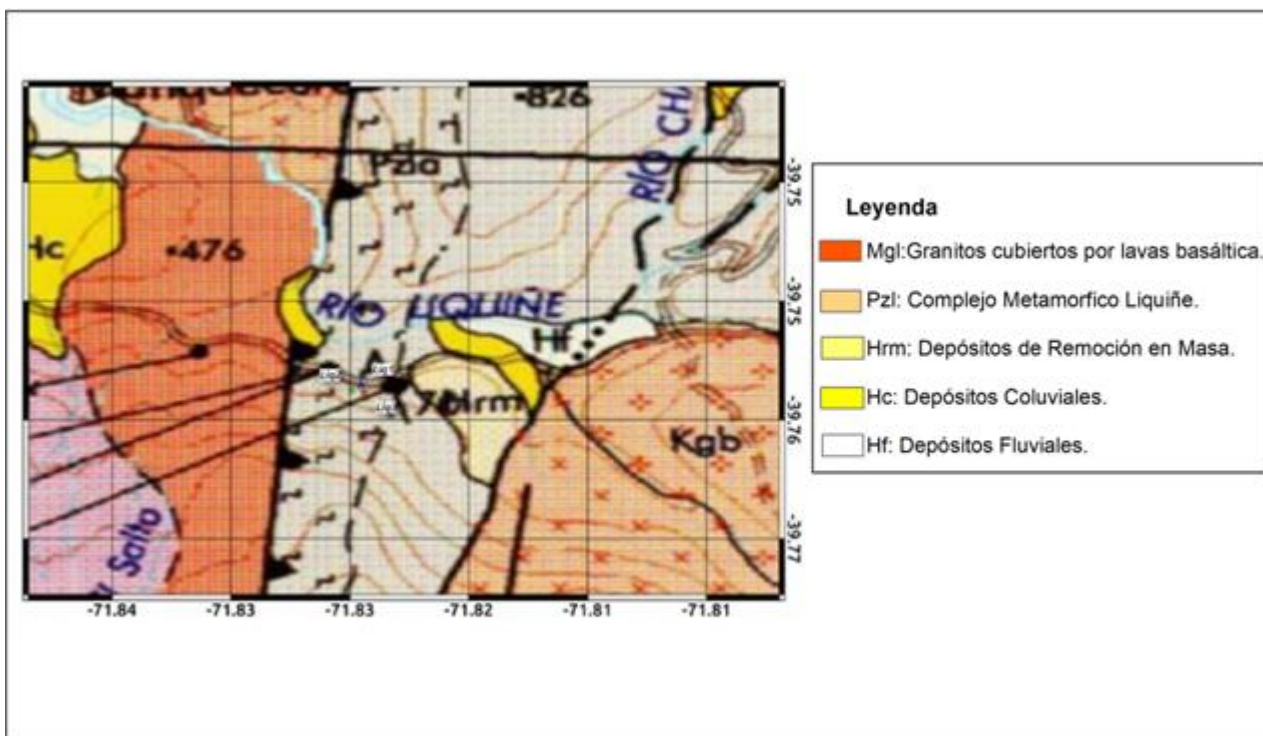


Figura 3: Mapa Geológico de la Zona de estudio. En naranja la unidad Mgl, en beige la formación Pzl, en amarillo claro la unidad Hrm, amarillo intenso la Hc y blanco la Hf. Las estrellas muestran la ubicación de los SEV medidos. (Modificado de Carta geológica de escala 1:1.000.000; SERNAGEOMIN, 2003).



Figura 4: A: Meandro abandonado de río Liquiñe indicando el norte justo en el punto con abundante olor a azufre (a la izquierda) y B: roca tonalita con alteración hidrotermal (derecha).

2.2 Geotermia

La constante búsqueda en nuevas fuentes de energía, y el aprovechamiento de recursos naturales, ha incrementado notablemente en los últimos años. La declinación de reservas de petróleo, así también la aceptación del Protocolo de Kyoto, han favorecido la instalación de plantas geotérmicas a nivel global.

Según lo anterior la geotermia consiste en un tipo de energía renovable, la que utiliza el calor en el interior de la tierra.

Basándose en la temperatura, la energía geotérmica se puede dividir en cuatro categorías:

- a) Alta temperatura más de 150 °C: permite la transformación directa de vapor de agua en energía eléctrica.
- b) Media temperatura: entre 90 y 150 °C: produce la energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta a las centrales.
- c) Baja temperatura entre 30 y 90 °C: es más utilizado en la calefacción de edificios, balneología, termas, spa y piscinas.
- d) Muy baja temperatura menos de 30 °C: puede ser utilizada para calefacción y climatización necesitando una bomba de calor.

Chile actualmente cuenta con una central, Cerro Pabellón, en la comuna de Ollague a 4500 metros de altura y a 100 km de Calama, la cual inyecta 48 MW de energía limpia a la matriz energética, existe un invernadero geotérmico para producir verduras en invierno en el extremo Sur del País.

Proyectos de calefacción en dependencias con geotermia. Uso turístico utilizando piscinas termales, Spa y recreativos.

2.2.1 Favorabilidad Geotérmica de la Zona de Estudio

Según un estudio de favorabilidad geotérmica que realizó SERNAGEOMIN (Lemus, et al., 2015), el cual consta en ser una medida cualitativa de la posible existencia de recursos geotermiales en una determinada Región, en este caso los parámetros relevantes que controlan la favorabilidad geotérmica en la Cordillera Principal son: a) temperatura profunda de los fluidos emitidos desde manifestaciones superficiales; b) patrón estructural a nivel regional y distribución de fallas y lineamientos; c) distribución de las unidades litológicas permeables; d) distribución y edad de los depósitos asociados a centros eruptivos.

Una vez obtenidas las favorabilidades parciales para cada parámetro considerado (Estructuras, Geoquímica, Centros Eruptivos y Geología), se realiza una integración de ellos mediante un promedio ponderado de cada factor. La Ponderación elegida para cada factor es:

1. 40% Favorabilidad estructural
2. 30% Favorabilidad geoquímica
3. 20% Favorabilidad volcánica
4. 10% Favorabilidad geológica

Esta ponderación, según SERNAGEOMIN (Lemus, et al., 2015), es la que correlaciona mejor la información disponible utilizada en esa investigación. En la Figura 5, se muestra el resultado de la ponderación de los distintos parámetros.

Se realizaron estudios TEM (Transiente Electromagnético, espectrometría de rayos gamma y espectrometría de reflexión, para elaborar un mapa (Figura 5). La señal analítica permite resaltar anomalías magnéticas producidas por discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda (Salem, 2005). Con respecto al magnetismo, la anomalía positiva principal del área es producto del entorno geológico, tal como lo verifica el bajo magnetismo del borde este del polígono, que está asociado al Complejo Metamórfico Liqueñe.

Por otro lado para poder ajustar un modelo geofísico con una buena interpretación y determinar el método potencialmente útil en detectar zonas de mayor permeabilidad, este tiene que ser consistente con la geología presente, geoquímica e hidrología del lugar a estudiar. Hay seis factores que controlan la distribución y el tipo de alteraciones hidrotermales: la temperatura, la composición del fluido, la presión, el tipo de roca, el tiempo y la permeabilidad. Esta última puede ser primaria, originada de la porosidad intergranular y caracterizada por disminuir con la profundidad debido a la compactación y cementación, o secundaria, debida a la presencia de fallas abiertas, fracturas, diques y brechas provocadas por fracturación hidráulica (Muñoz, 2011)

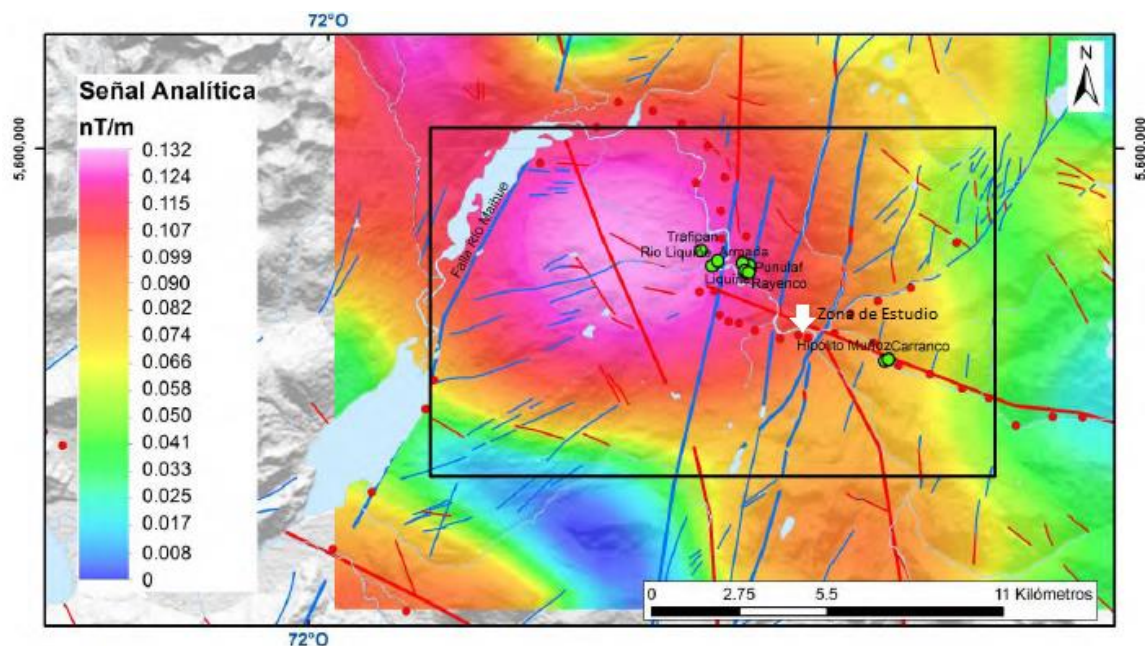


Figura 5: El recuadro ilustra la zona de alta favorabilidad, puntos verdes muestran las fuentes termales de la zona. Las líneas azules y rojas corresponden a fallas expansivas y compresivas respectivamente y la flecha blanca a la zona de estudio. En la parte izquierda, la Señal Analítica. (Modificado de Lemus, et al., 2015).

SERNAGEOMIN (Lemus, et al., 2015), realizó una intersección de una cobertura de imágenes diurnas y nocturnas con sensores remotos en el infrarrojo térmico, tomadas en 2005 y 2007; con las cuales se realizó un análisis termal. Ver Figura 6.

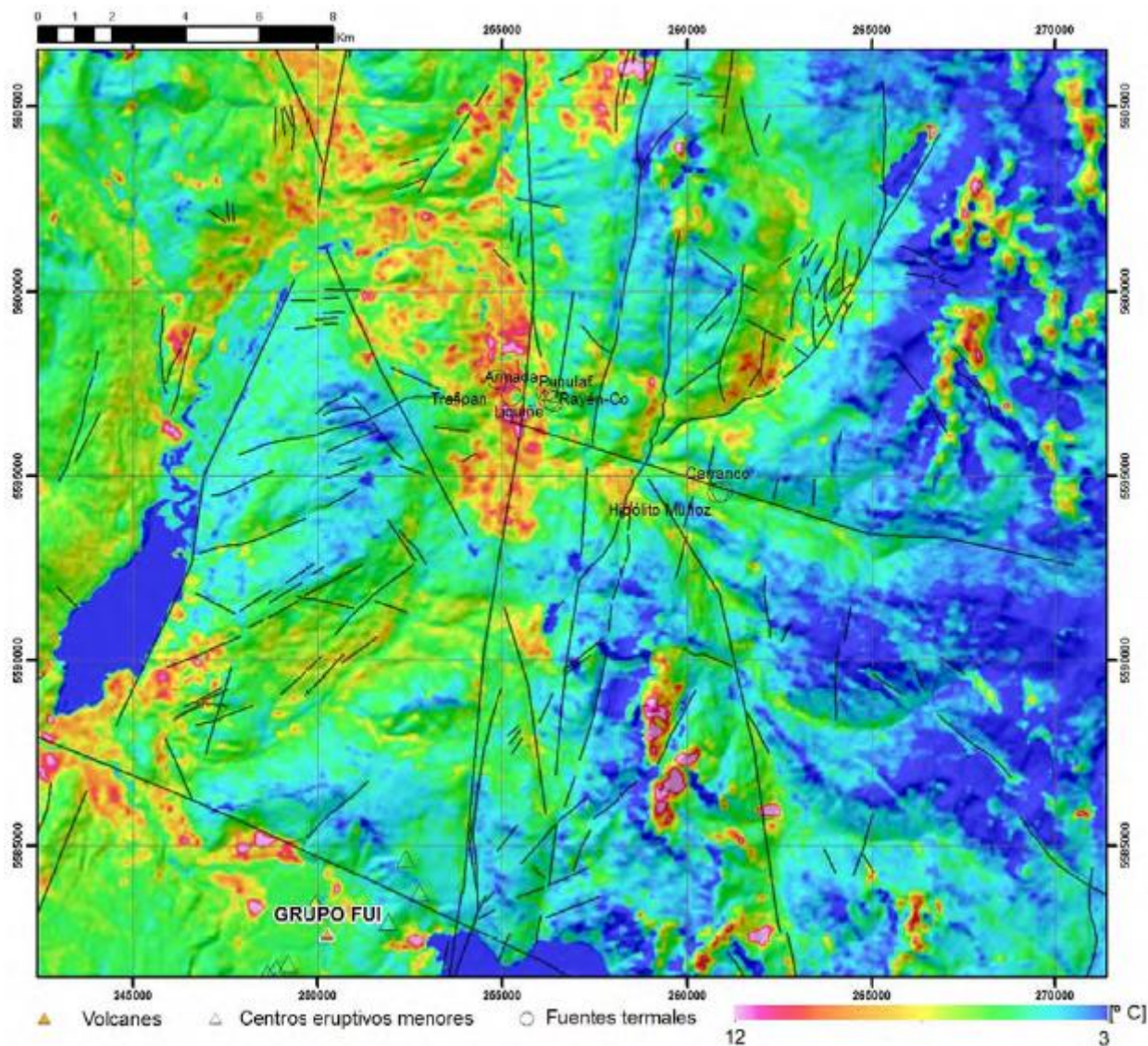


Figura 6: Anomalía termal resultante en la zona de Valle de Liqueñe. Datum WGS84, proyección 19S. (Lemus, et al., 2015).

Se pueden apreciar las anomalías térmicas en el sector del Valle de Liqueñe, muy cercano a la zona de estudio, estas anomalías están controladas por las estructuras geológicas presentes, como fallas y lineamientos. La temperatura superficial estimada corresponde aproximadamente a los 7°C según la figura anterior.

3. METODOLOGÍA

La Geofísica es una ciencia que estudia el comportamiento del planeta, desde un ángulo físico, analizando diversos aspectos como la Vulcanología, Tsunamis, sismología, caracterización del suelo, Cambio climático y en este caso en estudio de agua termal.

Esta ciencia se ha utilizado en la prospección de agua termal, a través de métodos geoeléctricos en corriente continua y potencial espontáneo.

Por otro lado para poder ajustar un modelo geofísico con una buena interpretación y determinar el método potencialmente útil en detectar zonas de mayor permeabilidad, este tiene que ser consistente con la geología presente, geoquímica e hidrología del lugar a estudiar. Hay seis factores que controlan la distribución y el tipo de alteraciones hidrotermales: la temperatura, la composición del fluido, la presión, el tipo de roca, el tiempo y la permeabilidad. Esta última puede ser primaria, originada de la porosidad intergranular y caracterizada por disminuir con la profundidad debido a la compactación y cementación, o secundaria, debida a la presencia de fallas abiertas, fracturas, diques y brechas provocadas por fracturación hidráulica (Muñoz, 2011).

El método del Potencial espontáneo (PE) consiste en un método de prospección eléctrica el cual en sus inicios se desarrolló como una técnica de búsqueda de recursos minerales, que posteriormente su uso se extendió a otras áreas, como la prospección de agua termal.

Este método geofísico mide la diferencia de potencial natural producidas por corrientes entre dos puntos del subsuelo, los potenciales son causados por lo general por la separación de carga en la arcilla u otros minerales, también por una interface semipermeable que impide la difusión de los iones. Es un método pasivo, no invasivo en el terreno y no se necesita aplicar una corriente eléctrica. Consiste en ubicar dos electrodos, uno fijo y otro móvil y se registra una diferencia de potencial entre ambos, en milivoltios. Lo útil de las diferencias es el potencial electroquímico ya que se genera un flujo y pequeñas corrientes eléctricas entre los electrodos, creando una diferencia de potencial, el cual podría causar una deflexión importante ante las capas permeables.

3.1 Medición del Potencial Espontáneo (PE)

Una condición necesaria, es que la roca que rodea al cuerpo esté meteorizada, de modo que los iones puedan desplazarse adecuadamente. En rocas muy sanas, compactas, y zonas desérticas no puede darse el Potencial Espontáneo, debido a la escasa humedad. El método PE encuentra las condiciones más favorables en las zonas templadas (Daza, 2012).

Se utilizan 2 electrodos de cobre impolarizables, los cuales están sumergidos en una solución de sulfato de cobre saturada (Cu SO_4) (cuya solución se prepara con 200 g de sulfato de cobre y 400 ml de agua destilada en un recipiente de vidrio como referencia), dentro de un recipiente poroso para permitir el contacto con el suelo en el terreno (Figura 7).

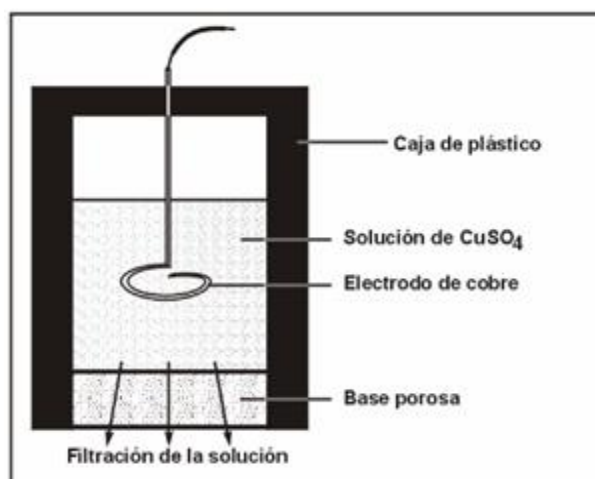


Figura 7: Esquema para la medición de Potencial Espontáneo (Auge, 2008).

El perfil que se obtuvo para esta investigación, fue de un perfil eléctrico convencional, que registra las diferencias de Potencial Espontáneo en terreno, ilustrado en la Figura 8, lo que permite interpretar e identificar estratos y la presencia de material permeable a escala local y superficial. En paralelo, también se obtuvieron perfiles del tipo Sondaje Eléctrico Vertical (SEV) los que respaldan la información obtenida e indica si el método del potencial espontáneo es factible o no para identificar la posible presencia de aguas termales.

El equipo utilizado para la medición de Potencial Espontáneo (PE) consiste en:

- Dos Tubos de PVC de 12 cms de largo
- 500 gramos de sulfato de cobre (Cu SO_4)
- 2 barras de cobre
- 2 tapas de caucho para cerrar el tubo en la parte superior
- Madera permeable, que permita el contacto con el suelo
- Varios metros de cable con un buen recubrimiento aislante y ligero
- Multímetro y GPS



Figura 8: Medición de Potencial Espontáneo en terreno.

3.2 Medición de Sondaje Eléctrico Vertical (SEV)

Las mediciones de SEV, consiste en inyectar corriente eléctrica al terreno generando un campo eléctrico, para luego medir su magnitud (voltaje). Su finalidad es establecer una distribución vertical de la resistividad aparente calculada por debajo del sondeo. Los resultados de las mediciones fueron calculados por medio de un arreglo geométrico conocido como Schlumberger, así también cada punto SEV, con los electrodos de corriente ubicados en cada extremo del arreglo y los electrodos de voltaje en el centro, equidistantes al punto de interés a medir.

3.2.2 Arreglo tipo Schlumberger

Trata de un dispositivo simétrico, donde se espacian los electrodos de corriente móviles los cuales se alejan de los fijos, este dispositivo debe cumplir la condición que la distancia que separa a AB debe ser igual o mayor que 5MN, como se ilustra en la figura 9.

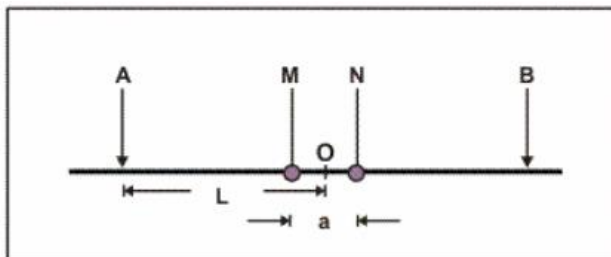


Figura 9: Arreglo electrónico de tipo Schlumberger (Auge, 2008).

La resistividad aparente fue calculada a partir de la fórmula teórica correspondiente a tal configuración:

$$\rho = \pi \frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{2MN} \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Los puntos para realizar las mediciones fueron elegidos después de realizar la primera visita a terreno, considerando la topografía del acceso, el interés turístico en recursos de aguas termales y también considerando manifestaciones en el lugar como el olor característico a azufre.

Las mediciones constaron de tres puntos SEV (Liq1, Liq2, Liq3) se midieron con extensiones de electrodos de corriente entre 100 y 160 metros de distancia. Los dos primeros puntos (Liq1 y Liq2) se ubicaron al sur del curso del río Liquiñe en la terraza inferior del lugar de terreno y fueron medidos en dirección Oeste-Este, con una separación de 60 metros aproximadamente (perfil A). El punto Liq3 se midió en la terraza superior a unos 60 metros de distancia lineal del perfil A, situado entre los puntos Liq1 y Liq2, formando un triángulo (perfil B). Se realizó inyección de corriente eléctrica al terreno para poder realizar las mediciones, lo que se realizó con éxito dado la buena conductividad del suelo en el sitio. (Ver Figura 10)



Figura 10: Imagen satelital de la zona de estudio, con la configuración de las mediciones. Obtenida de Google Earth.

El equipo utilizado para medición de SEV consiste en (Figura 11):

- Un generador a gasolina
- Transmisor de corriente eléctrica
- Un variador
- Un voltímetro
- Un amperímetro
- 4 estacas metálicas
- Cable eléctrico
- Radios de comunicación y GPS



Figura 11: En el recuadro A ejecución y medición de SEV, en el recuadro B, el equipo utilizado para la medición.

Es necesario tener en cuenta que para la interpretación de estos datos, exista una relación coherente entre los antecedentes geológicos y las mediciones geofísicas aplicadas. Figura 12 demuestra la resistividad de algunas rocas y minerales comunes.

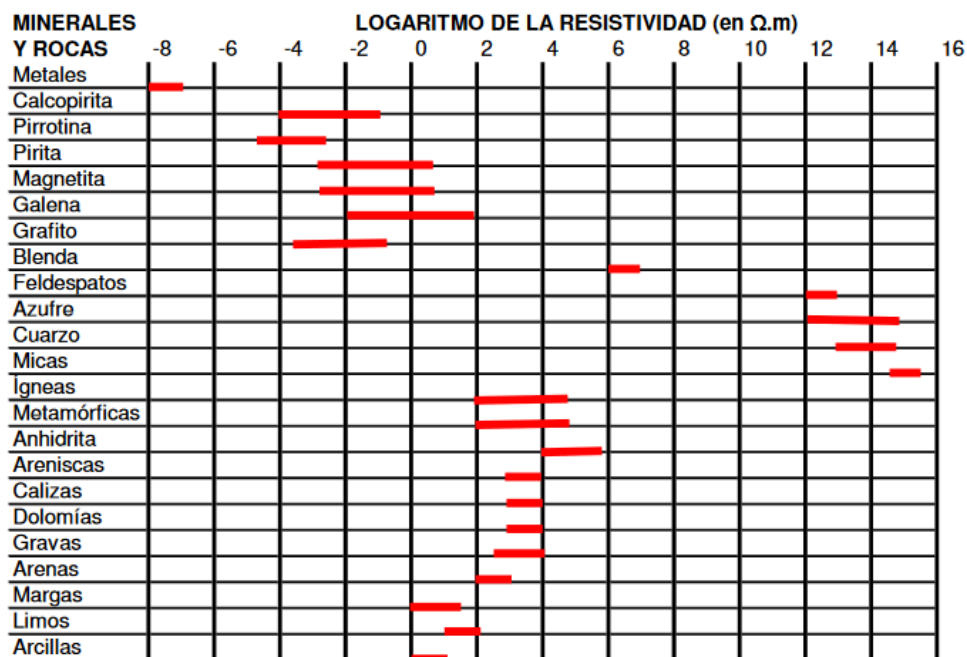


Figura 12: Resistividad de algunas Rocas y Minerales en escala logarítmica (Auge, 2008).

3.3 Medición de Temperatura con Cámara Termográfica Fluke Ti125

Para las mediciones de temperatura en terreno se utilizó una cámara Termofluke Ti125 (Figura 13) de resolución de 160x120 FPA, el equipo tiene un enfoque exclusivo IR-OptiFlex™, quiere decir que tiene un enfoque correcto desde una distancia de 1.2 metros. A distancias más cortas es necesario cambiar el modo de la cámara a manual. El modelo Fluke Ti125 posee un rango de medición de -20 °C a +350 °C, con una precisión de medida de temperatura +/- 2 °C o 2%.

Se realizaron 3 líneas paralelas fotográficas, siendo la principal, la línea de al medio ya que se tomó sobre la misma línea de medición de Potencial Espontaneo, las fotografías se tomaron a 1.3 metros de distancia del suelo, perpendicular a éste, cada 2 metros de distancia una fotografía de la otra.



Figura 13: Cámara Termográfica Fluke Ti125.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación se representan los perfiles de Potencial Espontáneo (PE) en la zona estudiada, relativa a punto base escogido y las curvas de resistividad aparente de los perfiles SEV, cuyas mediciones fueron tratadas con el arreglo geométrico Schlumberger respectivamente.

El área estudiada se encuentra completamente cubierta de vegetación, las mediciones se realizaron en Septiembre (17/09/2017) (Figura 14) y Febrero (5/02/2018) (Figura 15) respectivamente, ambas mediciones de efectuaron en días seco sin lluvia. Los datos obtenidos del gráfico tratan de mediciones tomadas desde un punto base (coordenadas UTM 2578886 m E, 5595283 m S, huso 19 H, indicado con un círculo de color blanco), en las Figuras (14) y (15).

El perfil tiene 20 puntos distanciados 3 a 4 metros uno de otro (Figura 14), en el cual hay 14 puntos medidos hacia el este (lado izquierdo del gráfico) y 6 hacia el oeste (lado derecho del gráfico), desde el punto base de referencia. En el perfil, el mínimo negativo de la anomalía de PE coincide de manera aproximada con la altura máxima relativa a ese perfil. Los máximos corresponden, uno en el punto base en un área de depresión (mínimo topográfico), y otro valor máximo coincide con el mayor nivel relativo a ese perfil. Siendo todas estas anomalías negativas (valores negativos).

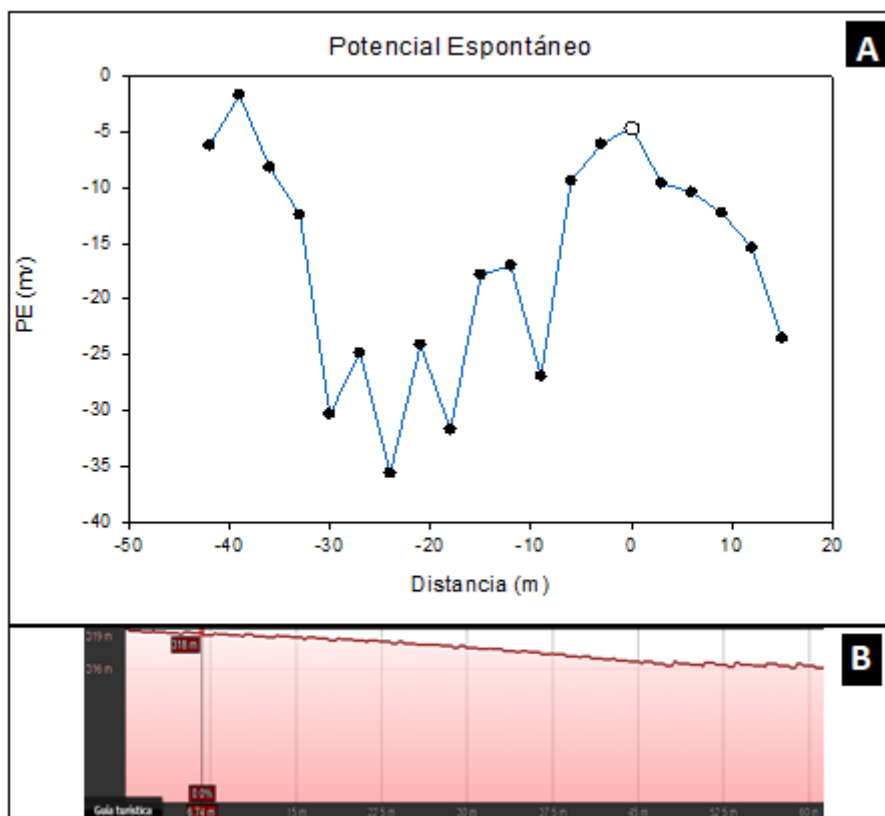


Figura 14: En el recuadro A: se ilustra la curva de Potencial Espontáneo (PE) relativo a punto base elegido (círculo blanco). Elaborado en SigmaPlot. Recuadro B: Perfil I de Elevación, extraído de Google Earth Pro.

La Figura 15 correspondiente a las mediciones efectuadas en el mes de febrero (2018), el valor mínimo negativo del PE coincide con la mayor altura de ese perfil, pero la existencia de otras anomalías (Positivas y negativas) con puntos en la pendiente y otras en el mínimo topográfico hace que sea una situación más o menos confusa. Según otras investigaciones realizadas por Muñoz (1984), estas fluctuaciones se pueden interpretar al flujo de agua a poca profundidad. A lo largo del Perfil I no se observa una correlación entre la topografía y PE, por otro lado en el Perfil II en cierta medida existe una tendencia de pasos de anomalías negativas de PE a positivas a medida que alcanzan niveles topográficos menos elevados en el perfil.

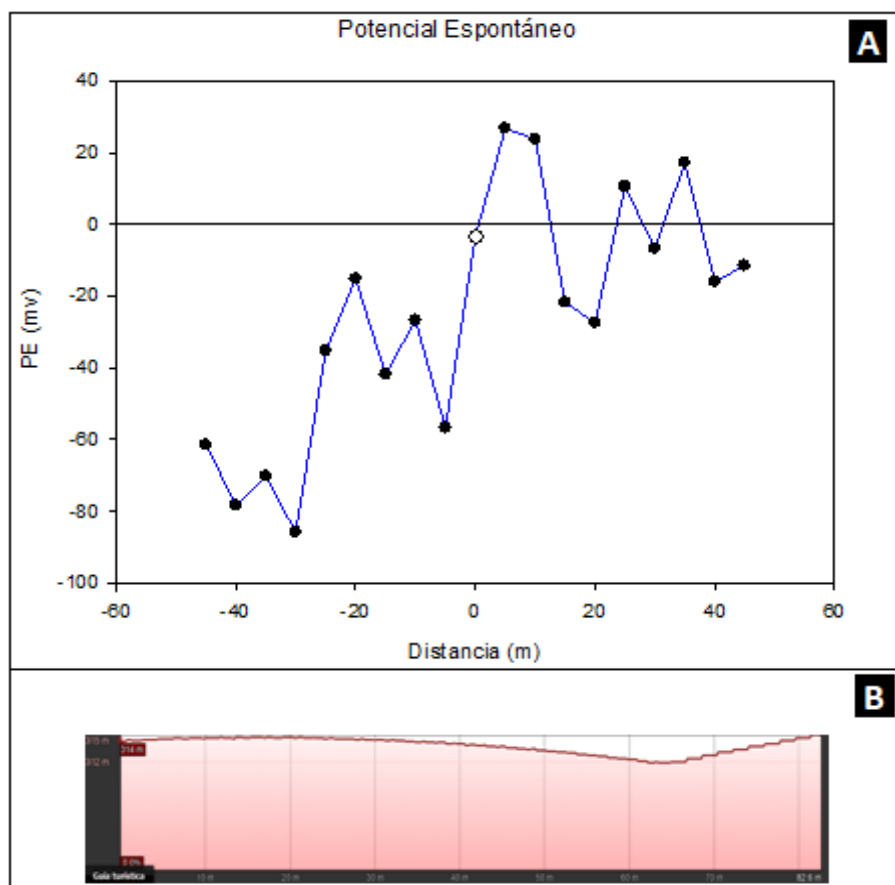


Figura 15: En recuadro A curva de Potencial Espontáneo (PE) relativo a punto base elegido (círculo blanco). Elaborado en SigmaPlot. Recuadro B, perfil II de Elevación, extraído de Google Earth Pro.

Los resultados de ambas mediciones septiembre (2017) y febrero (2018); se representan en la Figura 16. Los valores de la primera medida realizada en septiembre (2017) (color morado), presenta valores negativos, debido que las mediciones se tomaron en un día que el suelo presentaba mayor humedad y en época otoñal. Los datos de la segunda medida, febrero (2018) reflejan tanto valores positivos como negativos, perfil realizado en un periodo con baja y media humedad del suelo en época de verano. Si bien no se midieron la misma cantidad de puntos de ambas mediciones, estas muestran una tendencia similar entre una y otra, presentan anomalías negativas a medida que se acercan al sector con olor a azufre. Es importante mencionar que en el mes de febrero no se percibió este olor, lo que puede ser interpretado como una disminución del nivel freático, esto se respalda con los resultados de Sermeño J (s.f.).

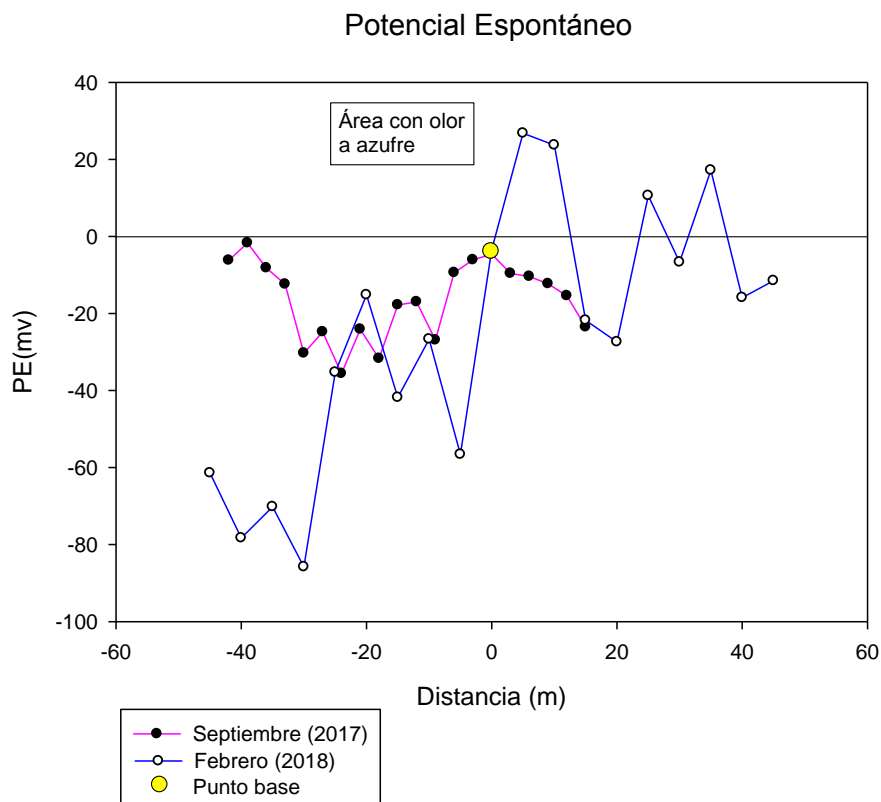


Figura 16: Curvas de Potencial Espontáneo (PE) Realizadas en Septiembre (2017) y Febrero (2018).
Elaborado en SigmaPlot.

A continuación, en la Figura 17, se presentan las 3 curvas de resistividad aparente (Liq1, Liq2 y Liq3) calculadas a través de la metodología Schlumberger, considerando corriente inyectada, voltaje medido en ambas polaridades y promediado, y valor de potencial espontáneo al realizar la medición. Más adelante en la Tabla 1, se detallan las coordenadas correspondientes a cada sondaje eléctrico vertical (SEV).

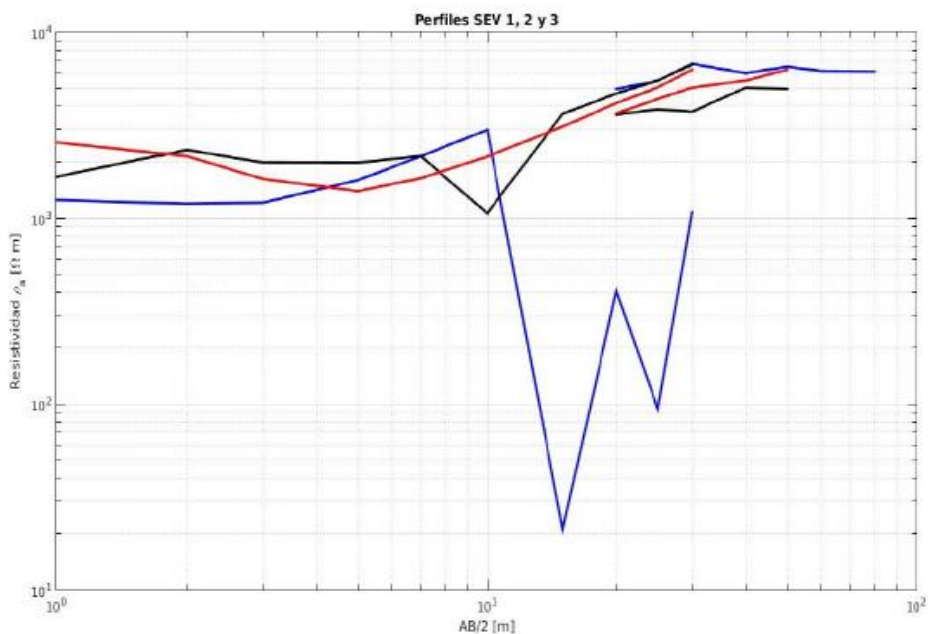


Figura 17: Curvas de resistividad aparente para Liq1 (azul), Liq2 (negro) y Liq3 (rojo). (TerraData Ltda., 2017).

En la siguiente tabla se registran las coordenadas UTM de cada sondaje (SEV).

Tabla1: Coordenadas UTM WGS 84 zona 19 H, de cada punto SEV.

Punto SEV	Este (m)	Sur(m)	Elevación (m.snm)
Liq1	257876	5595289	303 +/- 2
Liq2	257830	5595252	312 +/- 2
Liq3	257893	5595240	333 +/- 2

La información obtenida de los 3 puntos SEV, permitió estimar la estratigrafía de la zona estudiada, ayudando a determinar especies geológicas dominantes en la zona, también a determinar el nivel de agua una vez evidenciada su presencia. En la Figura 18 se puede apreciar una diferencia de tres estratos, identificando superficialmente una capa con una muy baja resistividad (azul). En contraste a los otros dos estratos, se aprecia también una capa muy delgada (color gris) la cual está presente cercana a la superficie debido a que no supera los 10 m de profundidad según lo obtenido. Luego, le subyace una capa en la que aumenta la resistividad considerablemente (color rojo). Esta última no está a más de 20 – 30 metros de profundidad, interpretándola según la geología del lugar como una roca metamórfica lo que concuerda con los mapas geológicos de la zona (Figura 1 y Figura 3) y los valores más bajos de resistividad podrían estar afectados por la erosión provocada por el río Liquiñe en las rocas, provocando fracturaciones, deterioro y haciendo posible la circulación de flujos de agua termal en la zona.

Es importante señalar, que existe una resistividad un poco más baja en lo que corresponde al punto de Liq 1 en dirección a los árboles (Figura 10), dónde se tomaron las mediciones de Potencial Espontáneo (Línea roja, en la Figura 20).

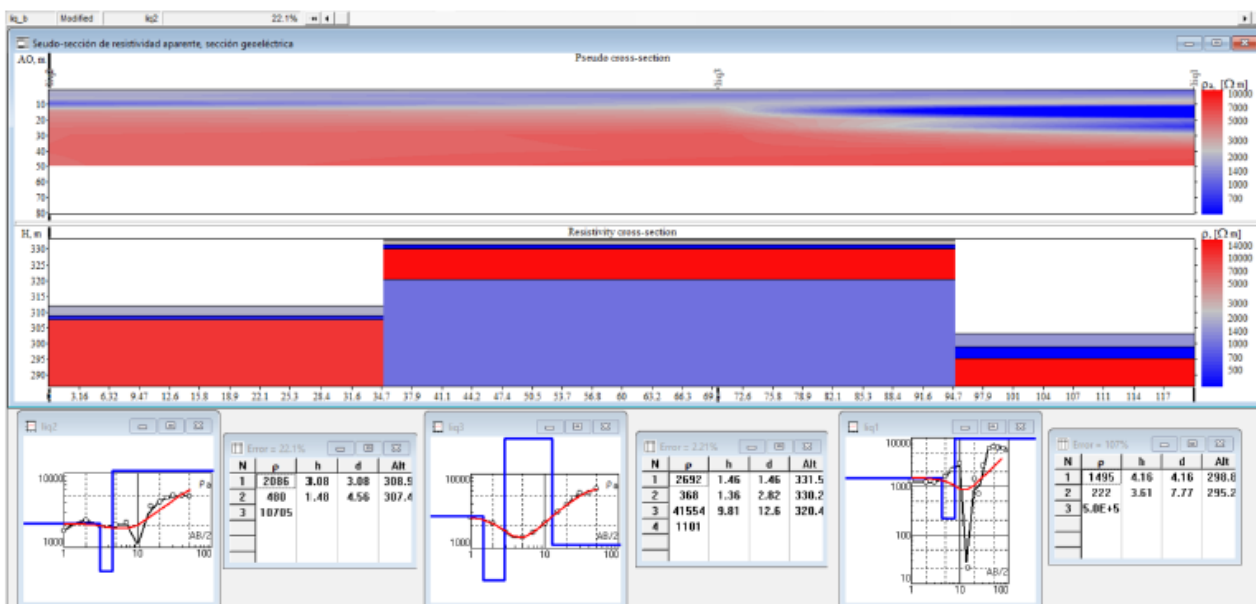


Figura 18: Modelo de litológico y valores de resistividad para Liq2, Liq3 y Liq1, de izquierda a derecha. (TerraData Ltda., 2017).

A continuación se detalla la litología para cada capa, según valores de resistividad obtenidos y antecedentes geológicos, obteniendo 4 capas de diferentes litologías en cada punto SEV medido.

Tabla 2: Interpretación litológica para los perfiles SEV1, SEV2 Y SEV3.

Litología	Liq2		Liq3		Liq1	
	1° Capa	0- 2 m	Suelo orgánico de resistividad media	0-3 m	Suelo orgánico de resistividad media	0-2 m
2° Capa	2- 6 m	Arenas y till	3-5 m	Till en matriz arenosa	2-6 m	Arenas y till
3° Capa	6- 30 m	Till y gravas en matriz arenosa	5-20 m	Till y gravas, arenas	6- 30 m	Till y gravas de matriz arenosa
4° Capa	+ 30 m	Roca metamórfica fracturada	+ 20 m	Roca metamórfica fracturada	+ 30 m	Roca metamórfica fracturada

Se realizaron mediciones de temperatura en terreno con la cámara termográfica Fluke, el día 5 de febrero 2018 a las 9:50 am. Cada foto fue tomada a 1,30 m de distancia perpendicular al suelo, registrando temperaturas desde los 2 °C hasta los 10 °C (Figura 19). En estas mediciones factores como, humedad, vegetación sobre la superficie del suelo (hojas de arboles), sombra, viento, arrojan valores con cierto rango de error (+/- 2 °C, según manual) por lo que cada imagen fue trabajada con el Software SmartView 4.3, y georreferenciada respectivamente. Se fotografiaron 3 Líneas paralelas, siendo la línea paralela principal la del medio, ya que en ella se realizaron mediciones de PE y SEV y las otras dos líneas se tomaron para realizar una proyección de estas temperaturas en el terreno.

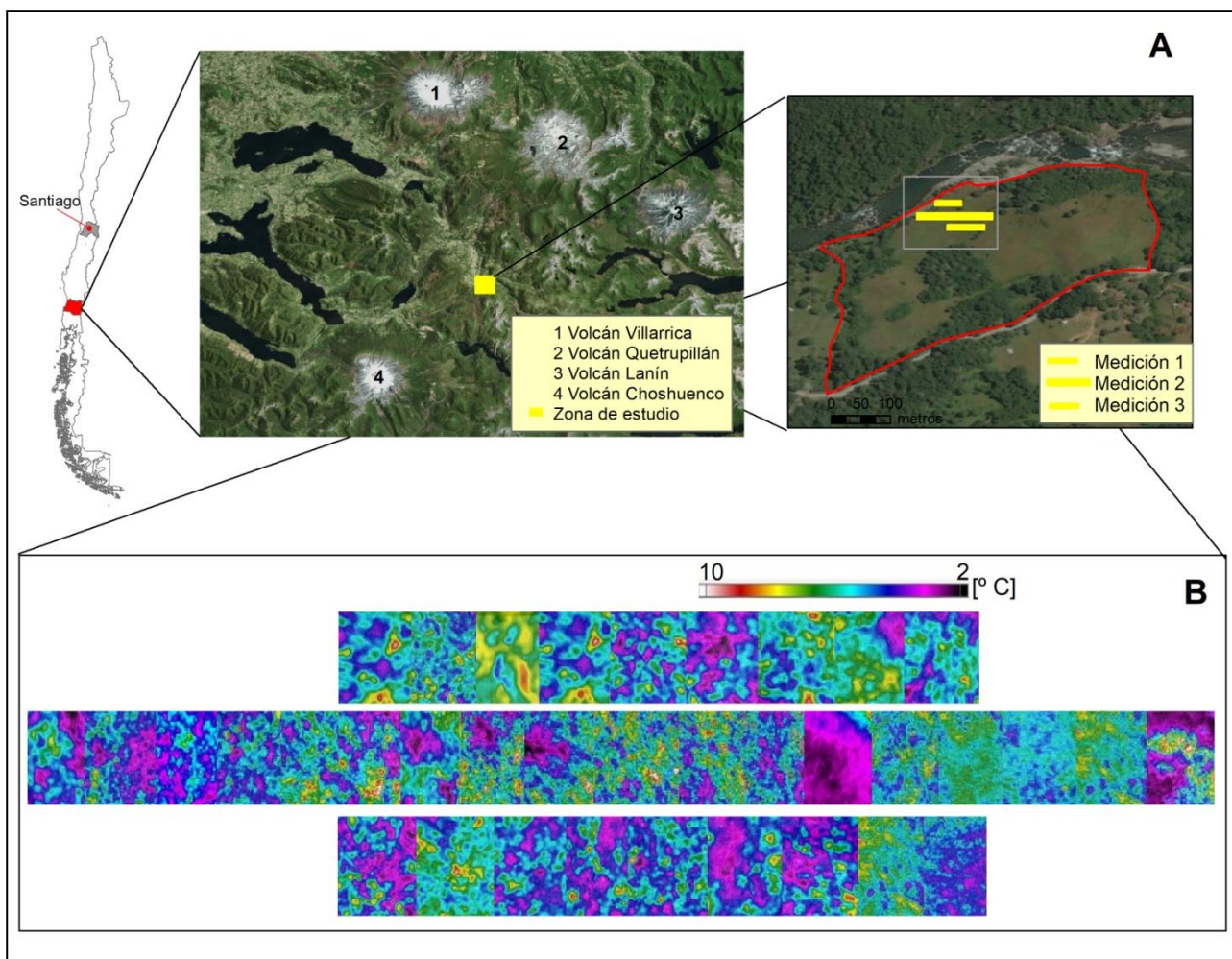


Figura 19: Medición de Temperatura en Terreno con Cámara termográfica Fluke Ti125. En la parte A se ilustra el contexto volcánico en el que está ubicada la zona de estudio y un acercamiento señalando las 3 líneas paralelas fotográficas, en la parte B se ilustra los 3 perfiles de fotografías con la escala de temperatura. Imágenes de temperatura trabajadas en SmartView. Elaboración Propia.

5. INTERPRETACIONES

Los datos obtenidos de las mediciones de Potencial Espontáneo (PE) nos lleva a relacionar el contexto geológico del lugar, considerando que estamos ubicados en la Zona Volcánica Sur (ZVS) y en el inicio de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO). Influye directamente en las mediciones tomadas, considerando también el área como un medio fisurado, en el cual existe una baja resistividad, registrada por las mediciones de los puntos SEV. Se observan en las Figuras 14 y 15 valores negativos de PE, que pueden ser interpretados como un arrastre de sales por infiltración de agua meteórica hacia el acuífero, conocida como zona hidrogeológica. Es decir, cuerpos o depósitos constituidos por semiconductores los cuales se polarizan en determinadas circunstancias y producen el efecto de pilas enterradas, produciendo corrientes eléctricas cuyos potenciales pueden ser medidos y revelando la presencia de un cuerpo polarizado. Esto respalda la hipótesis de la presencia de una posible fuente geotermal, la cual se debe colaborar y posiblemente profundizar con otros estudios más especializados.

Existe una disminución de la resistividad de los puntos SEV medidos, de manera vertical, que puede interpretarse como una especie de fractura y/o falla que actúa como canal, permitiendo el flujo de agua termal por debajo de la capa resistiva, se respalda con las imágenes satelitales anteriormente ilustradas, que manifiestan los puntos con la favorabilidad geotérmica de la zona.

En el contexto geológico, la zona estudiada, está situada en una terraza fluvio-glacial, cubierta por una abundante capa de vegetación y material orgánico. No se observan afloramientos de rocas en la zona de la parcela pero sí a unos kms de esta y correspondientes a tonalitas y granodioritas del Batolito Norpatagónico.

De las mediciones de temperatura tomadas localmente, los valores de estas se acercan a las tomadas por SERNAGEOMIN a través de las imágenes satelitales, interpretando temperaturas desde 2 °C hasta los 10 °C, Estableciendo una relación entre ambos registros de temperatura aún cuando se utilizaron diferentes medios para medirlas.

6. CONCLUSIONES

En esta investigación se realizó un estudio de resistividad geoelectrica y medición de temperatura en terreno aplicado a la búsqueda de agua termal subterránea al suroeste del pueblo de Liquiñe, Región de los Ríos, en el mes de Septiembre (2017) y Febrero (2018).

La zona de estudio está situada en un dominio regional estructural, asociadas al sistema de la falla Liquiñe-Ofqui, las que estarían controlando la permeabilidad y distribución de las emisiones termales en superficie.

El método de Potencial Espontáneo (PE), ayudó a corroborar estimaciones mediante Sondaje Eléctrico Vertical (SEV). Las anomalías presentes en el Potencial Espontáneo (PE) evidencian zonas de flujo de agua por medio de fallas, lineamientos y fracturas. Se observó que el Potencial Espontáneo (PE) del suelo puede variar significativamente según las condiciones climáticas en las jornadas de medición, esta variación podría ser mayor en terrenos de topografía irregular.

El método de Potencial Espontáneo (PE) puede ayudar en el conocimiento de áreas geotermales considerando información geofísica y geológica.

El método de Potencial Espontáneo (PE) se utilizó dado que es económico, rápido, fácil de manipular y puede abarcar grandes áreas en un tiempo acotado, permite diferenciar agua subterránea caliente de la fría. Sin embargo este método por sí sólo, no es determinante si no que se debe complementar con otros estudios específicos como un análisis geoquímico, para asegurar una fiel interpretación.

Es posible apreciar una zona de baja resistividad asociada a lo medido con el PE en esa zona, por lo que este último método resulta ser confiable, sin embargo para este tipo de exploración es un paso preliminar.

La temperatura superficial promedio estimada de 6 °C en la zona, contribuye a los altos valores de favorabilidad anteriormente determinados por SERNAGEOMIN por medio de una ponderación de imágenes satelitales diurnas y nocturnas; y a las fotografías tomadas con la cámara Fluke Ti125. Es importante tener en cuenta que la presencia de una gran cobertura vegetal en la zona pudo atenuar la señal térmica.

Debido a lo anterior se recomienda realizar otro tipo de estudios para investigar y determinar con exactitud el potencial térmico real del lugar, tales como geoquímicos y la realización de perforaciones.

7. REFERENCIAS

- Auge, M.**, 2008. “Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea”. Área de Hidrogeología. Departamento de Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Apuntes de cátedra.
- Cembrano, J., Hervé, F., Lavenu, A.**, 1996. The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 259, pp. 55-66.
- Cembrano, J., Lara, L.**, 2009. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics* 471, pp. 96-113.
- Daza, F.**, 2012. “Métodos Geoelectricos Aplicados a la Exploración de Aguas Subterráneas y Termales”. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Concepción.
- Pardo-Casas, F., Molnar, P.**, 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since late Cretaceous time. *Tectonics* 6, pp. 233-248.
- Lara, L.; Moreno, H.** 2004. Geología del Área Liquiñe-Neltume, Regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 83, 23 p., 1 mapa escala 1:100.000
- Lemus M., et al.**, 2015. Evaluación de los Recursos Geotérmicos De La Región De Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería, informe Registrado IR-15-59:289p
- Muñoz, A.**, 2011. “Exploración de Aguas Termales usando Métodos Eléctricos Resistivos de Prospección Geofísica: Termas de Menetúe y Pellaifa”. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Concepción.
- Muñoz, M.**, 1984. “Estudios preliminares de potencial espontaneo en zonas de los Volcanes Villarrica y Llaima”. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- Salem, A. y Smith, R.**, (2005). Depth and structural index from normalized local wavenumber of 2D magnetic anomalies. *Geophysical Prospecting*, 53 (1): 83-89.
- SERNAGEOMIN**, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago, Chile.
- Sermeño, J.**, (s.f.). Henríquez, B., Dueñas, S., Benitez, J. E., Olmos, R., Funes, R., & Barahona, F. Mediciones de potencial espontaneo (SP) del área fumarólica del cerro La Hoya, volcán San Salvador.