



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

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE MANIFESTACIONES
TERMALES DE LA REGIÓN DE LOS LAGOS, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

BÁRBARA SALOMÉ RUIZ VELÁSQUEZ

PROFESOR GUÍA:

JUAN ROJAS ERAZO

PROFESOR CO-GUÍA:

DIEGO MORATA CÉSPEDES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALFREDO LAHSEN AZAR
CARLOS PARRAGUEZ DECKER

SANTIAGO DE CHILE

2015

Resumen

La información disponible acerca de las características de las manifestaciones termales existentes en la décima Región de Los Lagos, Chile, es escasa; sin embargo, los factores que hacen pensar en la Región de Los Lagos como una zona de interés para el desarrollo geotérmico son, básicamente, los numerosos centros volcánicos y aguas termales presentes, al igual que la alta densidad de estructuras, donde aquellas que presentan una orientación aproximada NE-SW y que son en su mayoría dextrales son agrupadas en el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO); mientras que las que muestran orientación WNW-ESE y con dinámicas esencialmente sinistralas son agrupadas en el Sistema de Fallas de Larga-vida oblicuas al Arco (SFLA).

Se utilizan análisis químicos de 18 de 36 manifestaciones catastradas. Algunas fuentes muestran correlaciones entre sus composiciones químicas y sus ubicaciones geográficas. A partir de ello, se identifican 2 grandes grupos: las manifestaciones localizadas sobre estructuras del SFLA y aquellas sobre trazas del SFLO. Las fuentes pertenecientes al primer grupo (Porcelana Chico, El Comau, Porcelana Grande) se caracterizan por tener aportes volcánicos directos relacionados al transporte lateral de fluidos, presentando mayores razones B/Cl, un origen netamente geotermal de cloruros y un menor intercambio catiónico. El segundo grupo se subdivide según se ubiquen en la zona intermareal o en zona continental. El primer subgrupo (termas de Rollizos, Cochamó, Sotomó y El Yate) lo forman las únicas manifestaciones que parecen mostrar, aunque leve, una interacción con aguas salinas pertenecientes al fiordo El Comau y al estuario Reloncaví, por lo tanto el origen de sus cloruros se considera mixto. Finalmente, el segundo subgrupo reúne al resto de las termas (Puyehue, Aguas Caliente, Rupanco, El Callao, Cayetué, Ralún, Puelo, Pichicolo, Llancahué, Cahuelmó y El Amarillo), en particular, aquellas localizadas lejos de estuarios y fiordos, y muestra un importante intercambio catiónico, presentando un transporte de fluidos básicamente vertical y con una importante interacción con rocas del Batolito Norpatagónico.

Todas estas características químicas son reflejadas en las diferencias entre las temperaturas estimadas con el geotermómetro de Na/K, al cual se le determinan índices de corrección respecto a los valores otorgados por el geotermómetro de SiO₂, aplicados en la generación de un mapa de índices de favorabilidad geotérmica, el cual muestra a la península de Huequi como la zona con condiciones más favorables.

A mis abuelos Yunia y Francisco

A mi mamá Marcela

A mis hermanos pequeños

Luciano, María Ignacia, José Joaquín y María José

*“Los marcianos descubrieron el
secreto de la vida entre los animales.
El animal no discute la vida, vive.
su única razón de vivir es la vida.
Ama la vida y disfruta de ella (...)
Combinaron religión, arte y ciencia,
pues la ciencia no es más que la investigación
de un milagro inexplicable, y el arte,
la interpretación de ese milagro.”*

Ray Bradbury, *Crónicas marcianas* (1950)

Agradecimientos

Deseo agradecer a los profesores Juan Rojas, Diego Morata, Alfredo Lahsen y Carlos Parraguez quienes me guiaron y ayudaron con el desarrollo de este trabajo, en especial al profesor Diego Morata por su excelente disposición y entusiasmo. También deseo reconocer el apoyo otorgado por el Servicio Nacional de Geología y Minería para la realización de esta memoria junto al Programa de Geotermia.

No quiero dejar de lado, por supuesto, a las personas que me acompañaron durante todos mis eslabones académicos, en orden cronológico: a mis compañeras de colegio: Cecilia Arenas, definitivamente mi mejor e incondicional amiga y sicóloga personal, y a Alexandra Cabello, con su linda y jugada amistad; a mis compañeros de Plan Común de Ingeniería: el Quinteto (María José Lambert, Laura Lagos, Daniela Márquez y Sylvia Vergara), Víctor Verdugo, Rodrigo Bolívar, Leonardo Navarro y, por supuesto, a mi confidente y mejor amigo durante tantos años, Rafael Meruane, por haber formado parte tan importante de mi vida. A mis compañeros de Geología: las Chaquetas de cuero (Daniela Fuentes, Camila Marambio, Paulina Vergara), el resto del Geogrupo (Álvaro Araya, Sebastián González, Paulina Pizarro, Daniela Villela), definitivamente tuve los mejores terrenos de mi vida junto a ellos, les agradezco su apoyo en las buenas, en las malas y en las peores. A mis compañeros de generación (Aralito, Caro, Cheketere, Chewy, Chino, Churri, Pelao, Curotto, Fabi, Fel, Feñi, Flop, Gabita, Gilla, Gordo, Javier, Juanfi, Justin, Ale, Lucas, Menares, Ñaña, Panchita, Panchito Cáceres, Panchito Parra, Pipe, Roxi, Rurik, Salo, Tito, Vale y Venao).

Deseo agradecer de manera especial a Cristian Morales por su amor, paciencia, gran compromiso e importantes enseñanzas (desde acerca de la Historia Universal hasta cómo trabajar con ArcMap e Illustrator para el presente trabajo); y por presentarme a una de las personitas más maravillosas, Salvador Morales.

Agradezco a quienes me acompañaron en los terrenos y durante el desarrollo de esta memoria: Paul Duhart, Martín Lemus, Yasna Pérez, Violchen Sepúlveda, Ignacio Villalón, gracias por su enorme disposición y maravillosa compañía.

Le doy las gracias a quienes pertenecen (o pertenecieron) a los pilares fundamentales del Departamento de Geología: María Rosa Rocco, Blanca Baccola, Arnoldo Quilodrán y Carlos Gómez. Y muchas gracias a uno de los profesores que me inspiró desde que recién entré a Geología, y tuve la oportunidad de aprender aún más de él durante mi trabajo de práctica, Jorge Clavero.

A mi familia: a Rodrigo Dell'Omodarme por considerarme su hija, a mi Tía Bernardita Velásquez por su apoyo, a mis tíos Cristian y Paola, a mis primos Benjamín y Alfonso, y a mi padre por creer siempre en mi.

Gracias a mis abuelos, les debo todo. Y a la incondicionalidad de mi madre.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Conceptos generales de geotermia	3
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo principal	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. Hipótesis de trabajo.....	6
2. Zona de estudio	8
2.1. Ubicación y vías de acceso.....	8
2.2. Marco Geológico	12
2.2.1. Marco geológico y tectónico regional.....	12
2.2.2. Marco geológico y tectónico local	15
2.2.3. Marco hidrológico	33
3. Manifestaciones termales analizadas	37
3.1. Puyehue (725.819E/5.489.795N).....	39
3.2. Aguas Calientes (727.207E/5.487.096N)	40
3.3. Rupanco (733.718E/5.473.169N).....	42
3.4. El Callao (738.413E/5.459.901N).....	43
3.5. Cayetué (733.655E/5.423.461N).....	44
3.6. Ralún (723.574E/5.417.562N).....	45
3.7. Rollizos (723.569E/5.410.446N)	46
3.8. Cochamó (786.861E/5.401.532N).....	48
3.9. Sotomó (717.7145E/5.385.151N).....	50
3.10. Puelo (722.705E/5.381.899N).....	52
3.11. El Yate (716.152E/5.380.099N)	53
3.12. Pichicolo (702.742E/5.350.125N)	55
3.13. Llancahué (705.682E/5.339.049N)	57
3.14. Cahuelmó (716.666E/5.318.751N)	58
3.15. Porcelana Chico (706.312E/5.300.883N)	61
3.16. El Comau (709.196E/5.297.272N)	63
3.17. Porcelana Grande (708.960E/5.296.258N).....	64

3.18. El Amarillo (708.511E/5.236.289N).....	66
4. Hidrogeoquímica.....	69
4.1. Geoquímica de aguas termales	69
4.2. Metodología	74
4.3. Resultados	76
4.3.1. Aguas geotermales.....	76
4.3.2. Aguas superficiales.....	89
5. Análisis de resultados.....	92
5.1. Agrupación de manifestaciones termales según datos geoquímicos.....	92
5.2. Geotermometría	101
5.3. Mapa de índices de favorabilidad geotérmica	109
5.3.1. Índices de corrección de aporte externo (ICAE)	112
5.3.2. Aplicación de índices de corrección.....	114
6. Discusiones	118
7. Conclusiones	123
8. Bibliografía.....	126
Anexo: Datos de terreno	139

Índice de tablas

Tabla 1: Lista de fuentes termales de la región sus respectivas rutas de acceso principales.....	10
Tabla 2: Índice de aguas superficiales analizadas. Las filas destacadas (celestes) muestran ríos y esteros próximos a las fuentes termales.....	33
Tabla 3: Índice de precipitaciones máximas en 24 horas para distintos períodos de retorno (datos en mm). Fuente: DMC, año desconocido.....	35
Tabla 4: Resumen de las muestras de aguas termales analizadas y sus códigos definidos para el presente trabajo.....	38
Tabla 5: Resumen de las muestras de aguas superficiales analizadas y sus códigos definidos para el presente trabajo.....	38
Tabla 6: Equipos utilizados para medición de parámetros termodinámicos <i>in situ</i>	75
Tabla 7: Resumen de condiciones de muestreo según el análisis requerido para cada duplicado de una fuente termal. Abreviaciones: pp: polipropileno; cr: cruda; f: filtrada a 0,45µm; HNO ₃ : 2 ml de ácido nítrico.....	76
Tabla 8: Análisis químicos de las aguas termales visitadas para el presente estudio....	78
Tabla 9: Clasificación de las aguas termales analizadas dentro de la Región de Los Lagos, según los diagramas de Piper (1944), Na-K-Mg de Giggenbach (1988) y aniones de Giggenbach (1991).	80
Tabla 10: Resumen de fuentes termales con sus respectivos complejos volcánicos a los que se asocian espacialmente	88
Tabla 11: Resumen de aguas termales y aguas superficiales probablemente involucradas en sus sistemas respectivos.....	90

Tabla 12: Resumen de temperaturas (°C) estimadas para los sistemas termales estudiados, determinados a partir de diversos geotermómetros.	107
Tabla 13: Calificación de cada rango de temperaturas superficiales medidas <i>in situ</i> ...	112
Tabla 14: Calificación de cada rango de temperaturas obtenidas mediante los geotermómetros de sílice y Na/K:.....	112
Tabla 15: Diferencias entre temperaturas calculadas mediante geotermómetros SiO ₂ y Na/K y sus respectivos índices de corrección establecidos por presuntos aportes externos (ICAE).	113
Tabla 16: Orígenes de fuentes termales inferidos para cada grupo definido en el apartado de Clasificación según comportamiento químico, con sus respectivas diferencias de temperatura entre el geotermómetro de sílice y el de Na/K; a partir de los cuales se asigna una influencia relativa (Índice de Corrección de Aporte Externo (ICAE)).....	113
Tabla 17: Rangos de temperaturas obtenidas mediante los geotermómetros de sílice y Na/K y su calificación como bajas, medias o altas:	114
Tabla 18: Tabla de factores de ponderación (FP) de cada parámetro de temperatura perteneciente a las fuentes termales.....	115
Tabla 19: Tabla de datos obtenidos en el trabajo de campo.....	139
Tabla 20: Tabla de abreviaciones para tipos de análisis químicos.....	149
Tabla 21: Tabla de abreviaciones para tipos de manifestaciones termales (Flores, 2011).	149

Índice de ilustraciones

- Figura 1.1: Esquema de un sistema geotermal hospedado en un estratovolcán andesítico (Modificado de Goff & Janik, 2000).4
- Figura 1.2: Perfil esquemático del campo geotérmico de Yangbajing (Chandrasekharam & Bundschuh, 2008). En este ejemplo los reservorios están alojados en granitos fracturados. (1): reservorio somero; (2) y (3) reservorios profundos. Este campo es parte del Cinturón Geotérmico del Himalaya.5
- Figura 2.1: Ubicación de zona de estudio. (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).9
- Figura 2.2: Mapa esquemático de volcanes y calderas importantes pertenecientes a la Zona Volcánica Sur (SVZ, por sus siglas en inglés. La línea discontinua con sentido aproximadamente N-S corresponde al Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (LOFS). Obtenido de Stern *et al.*, 2007. 14
- Figura 2.3: Distribución de unidades litológicas y zonas de falla principales y los volcanes del área de estudio. Extraído de Cembrano & Lara (2009). 15
- Figura 2.4: Esquema de formación de cuencas transtensivas relacionadas a una falla dextral en flexuras con sentido NNE. Modificado de <http://maps.unomaha.edu/maher/GEOL3300/week15/transcurrent.html> 17
- Figura 2.5: Esquema de los efectos del particionamiento de los *strain* dentro de un sistema de fallas unido cinemáticamente (Obtenido de Rosenau, 2004). En esta figura se observa cómo se desarrollan sistemas sinistresales con una orientación no paralela, pudiendo sugerir que las zonas donde se generan estas

geometrías de deformación heterogénea podrían corresponder a áreas debilitadas producto de deformaciones corticales previas.....	17
Figura 2.6: Ilustración de las estructuras activas de manera simultánea, representando la cinemática que sigue el modelo SC compuesta por fallas dextrales y siniestrales, las que dan forma al SFLO. Fuente: Rosenau <i>et al.</i> (2006).....	18
Figura 2.7: Esquema que relaciona el ascenso de fluidos magmáticos con la existencia de estructuras (Cembrano & Lara, 2009). En este caso, al sur de los 37°S existen lineamientos con sentido NE-SW y NW-SE, sobre los que se han desarrollado numerosos sistemas volcánicos; sin embargo, los centros eruptivos menores con composiciones más básicas corresponden a aquellas que ordenan en sentido NNE, debido a la configuración dextral del SFLO, generando zonas de extensión (cuencas transtensivas).	18
Figura 2.8: Mapa de distribución de fallas principales y centros volcánicos dentro de la zona continental de la Región de Los Lagos. (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006)	20
Figura 2.9: Mapa de distribución geológica de la Región de Los Lagos. BNP: Batolito Norpatagónico. CMBM: Complejo Metamórfico Bahía Mansa. (SERNAGEOMIN, 2000).	31
Figura 2.10: Ubicación de los lagos y principales sistemas fluviales de la Región de Los Lagos. (Albers, 2012)	34
Figura 2.11: Mapa de isoyetas de la Región de Los Lagos (Klaus, 2004).	36
Figura 3.1: Pozo que encierra la surgencia de agua termal, del complejo Termas de Puyehue.	39

Figura 3.2: Vertiente principal del complejo Termas de Puyehue. En esta imagen es posible observar un fuerte burbujeo (CO ₂), y lo incoloro de las aguas.	40
Figura 3.3: Instalación de pozo en zona de surgencia de vertientes calientes, en el balneario Termas de Aguas Calientes. Al costado derecho de la imagen, se puede apreciar el río Chanleufú.	41
Figura 3.4: Geología que rodea las termas de Puyehue (Puy) y Aguas Calientes (Agu).(SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Klaus, 2003; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006).....	41
Figura 3.5: Pozas calientes aflorando en el borde norte del lago Rupanco.	42
Figura 3.6: Surgencia del manantial de El Callao, el cual alcanza superficie en una zona de depósitos arcillosos mezclados con pocos depósitos fluviales asociados al río Sin Nombre.....	43
Figura 3.7: Geología que rodea las termas de Rupanco (Rup) y El Callao (Cal) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Klaus, 2003; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006)	44
Figura 3.8: Surgencia de poza caliente, correspondiente a la zona de Cayetué. A la izquierda se encuentra el sector que presenta mayor temperatura, pero con mayor cantidad de fango que el espejo de agua que se observa a la derecha de la imagen.	45
Figura 3.9: Vista de las manifestaciones termales del sector de Ralún, sobre la rivera izquierda al río homónimo.	46
Figura 3.10: Zona donde emergen las aguas termales de Rollizos con abundante burbujeo, en medio de una zona de mezcla entre aguas dulces y aguas estuariales.	47

Figura 3.11: Lugar donde se obtuvieron las muestras de agua utilizadas para los análisis geoquímicos de las termas de Rollizos. El sector consta de un pozo de bombeo, el cual se acumula en la tinaja que se muestra en la imagen.....	47
Figura 3.12: Geología que rodea las termas de Cayetúé (Cay), Ralún (Ral) y Rollizos (Rol) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006)..	48
Figura 3.13: Vista al oeste desde el sector de surgencias termales de Concha, en una zona de dominio fluvial que presenta gran influencia marina en períodos de marea alta.....	49
Figura 3.14: Vista del lugar de obtención de muestras de las aguas termales Concha. El color blanquecino de los rodados se debe a la existencia de finas costras salinas.	49
Figura 3.15: Geología que rodea las termas de Rollizos (Rol) y de Cochamó (Coch) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006).	50
Figura 3.16: Vista del afloramiento de granodioritas del BNP en el que emergen las aguas termales de las Termas de Sotomó (a la derecha de la zona fotografiada). Se indican con líneas blancas los planos aparentes del set de fracturas con mayor frecuencia observado en las rocas.....	51
Figura 3.17: Origen de las aguas termales de Puelo. En esta imagen se observa el área de surgencia de mayor temperatura medida, en una zona de escombros de ladera.....	52
Figura 3.18: Sector donde se encuentran los manantiales de Puelo. Las aguas termales escurren hacia la laguna que se ubica siguiendo el fondo de la imagen.	53

Figura 3.19: Poza tibia de El Yate. Se ve que sus dimensiones pueden intervenir en que parte del calor que eleva sus temperaturas por sobre las de ambiente provenga del sol.	54
Figura 3.20: Manifestación termal El Yate, a orillas del Estuario Reloncaví. La circunferencia blanca indica la posición del afloramiento entre rocas granodioríticas.	54
Figura 3.21: Geología que rodea las termas de Sotomó (Sot), Puelo (Pue) y El Yate (Yat) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006)..	55
Figura 3.22: Vertiente Arrayán, perteneciente a las Termas de Pichicolo. Esta aflora de manera difusa dentro del represamiento de madera que se observa en la figura, y se ubica al lado de un riachuelo de agua fría, que se vuelve tibia donde se mezcla con las aguas termales.....	56
Figura 3.23: Vertiente Chucao, perteneciente a las Termas de Pichicolo. En esta es donde se registró la mayor temperatura, alcanzando los 56°C.	56
Figura 3.24: Geología que rodea las termas de Pichicolo (Pich) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006).....	57
Figura 3.25: Área de surgencia difusa de las aguas pertenecientes a las Termas de Llancahué, las que afloran en una zona intermareal. La imagen fue capturada durante el período de marea baja.	58
Figura 3.26: Vertiente caliente de las Termas Cahuelmó, el diámetro de la apertura mide 50 cm.	59
Figura 3.27: Vista panorámica de la ubicación de las Termas Cahuelmó. Al fondo se distingue la apertura hacia el fiordo Leptepu, por lo que el área se trata de una zona estuarial. En el sector se observan piscinas talladas sobre depósitos	

morrénicos, donde se deja acumular parte del agua termal que circula desde el origen.....	60
Figura 3.28: Geología que rodea las termas de Llancahué (Llan) y Cahuelmó (Cah) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006).	60
Figura 3.29: A la izquierda se observa el río Punta Calle bordeando la zona de los Géiseres de Porcelana.	61
Figura 3.30: Columnas generadas a partir de la precipitación de aragonita y arcillas, en los Géiseres de Porcelana.....	62
Figura 3.31: Emanaciones de agua y vapor pertenecientes a los Géiseres de Porcelana, y estructuras de aragonita precipitada. La imagen (c) corresponde a un acercamiento de la estructura observada en la figura (b).....	63
Figura 3.32: Distribución de manifestaciones termales a lo largo de la costa del fiordo El Comau, al sureste de Porcelana Chico.	64
Figura 3.33: Pozones de agua tibia de las Termas de Porcelana Grande.	65
Figura 3.34: Geología que rodea las termas de Porcelana Chico (PoCh), El Comau (Com) y Porcelana Grande (PoG) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006).	65
Figura 3.35: Paredes de concreto que rodean una de la vertiente de las termas de El Amarillo.....	66
Figura 3.36: Superficie de surgencia de aguas termales de El amarillo.....	67
Figura 3.37: Geología que rodea las termas de El Amarillo (Ama) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau <i>et al.</i> , 2006).....	68
Figura 4.1: Diagrama de Piper con los datos de las aguas termales analizadas (Piper, 1944)..	81

Figura 4.2: Diagrama de cationes (K, Na y Mg), donde la línea de equilibrio total representa la intersección de las isotermas de 2 geotermómetros (Na-K y K-Mg) (Giggenbach, 1988).....	81
Figura 4.3: Clasificación de las aguas termales estudiadas según diagrama de Giggenbach (Giggenbach, 1991), basado en los contenidos de SO ₄ , Cl y HCO ₃	82
Figura 4.4: Diagramas de Na versus Cl y Ca versus Cl utilizando los datos de las aguas termales estudiadas, respecto al agua de lluvia (magenta) y diversas muestras de agua salina (morado). Se diferencian 3 grandes grupos mencionados posteriormente en el apartado 5.1. Las líneas punteadas muestran las tendencias de cada uno de estos grupos.	83
Figura 4.5: Razones de los contenidos de Mg y Cl en las aguas termales estudiadas, respecto al agua de lluvia (magenta) y diversas muestras de agua salina (morado). Se diferencian 3 grandes grupos mencionados posteriormente en el apartado 5.1. Las líneas punteadas muestran las tendencias de cada uno de estos grupos.	84
Figura 4.6: Diagrama binario de deuterio (² H) versus ¹⁸ O de las muestras de aguas termales y superficiales, comparadas con la Línea Meteórica Mundial (LMM) (Craig, 1961).....	85
Figura 4.7: Diagrama binario de deuterio (² H) versus ¹⁸ O centrado en las muestras de aguas termales, comparadas con la Línea Meteórica Mundial (LMM) (Craig, 1961).	87
Figura 4.8: Clasificación de aguas superficiales según el diagrama de Piper (Piper, 1944). Símbolos de color celestes corresponden a ríos y esteros; símbolos de	

color morado señalan muestras de aguas salinas presentes en el Fiordo El Comau y el Estuario Reloncaví; y símbolo de color magenta representa una muestra de agua de lluvia.....	91
Figura 5.1: Diagrama binario de Na/K versus Cl [Meq/l] correspondiente a las muestras de las manifestaciones termales estudiadas. Se diferencian los 6 grupos mencionados en este capítulo.	92
Figura 5.2: Diagramas de Schoeller comparativos entre aguas termales y superficiales cercanas. Los análisis corresponden a las aguas termales pertenecientes al Grupo 2: Cal: El Callao; Cay: Cayetué; Cah: Cahuelmó; Ama: El Amarillo.	96
Figura 5.3: Diagrama Na/Cl versus Cl (mmol/l). En esta figura se destacan aquellas fuentes termales que presentan razones de Na muy diferentes entre sí.	98
Figura 5.4: Diagrama de elementos conservativos (Giggenbach, 1988).....	98
Figura 5.5: Diagrama binario que relaciona los contenidos de B y Cl ⁻ de las aguas termales respecto a las aguas superficiales salinas más próximas. Se diferencian 6 grupos mencionados en el apartado Agrupación de manifestaciones termales según datos geoquímicos (página 92).	99
Figura 5.6: Diagrama de orígenes de cloruros según las relaciones B/Cl y Br/Cl. Modificado de Vengosh (2003).....	99
Figura 5.7: A. Diagrama de temperatura versus conductividad eléctrica correspondiente a agua marina estándar (Hayashi, 2004). B. Relación entre concentraciones de cloruros y temperaturas superficiales de las manifestaciones termales estudiadas. C. Diagrama de temperatura versus conductividad eléctrica correspondiente a Manifestaciones termales estudiadas.	100

Figura 5.8: Diagrama perteneciente al geotermómetro de Na^+/K^+ (Giggenbach, 1988), respecto a las aguas termales estudiadas.....	103
Figura 5.9: Diagramas de correlación entre los geotermómetros indicados en la Tabla 12 y las temperaturas medidas en superficie para cada agua termal. Referencias: (a) Fournier & Truesdell, 1973. (e) Fournier, 1991. (g) Verma & Santoyo, 1997. (h) Díaz-González <i>et al.</i> , 2008.....	108
Figura 5.10: Diagramas de relación entre temperaturas obtenidas mediante la aplicación de los índice de corrección versus (a la izquierda) las temperaturas calculadas mediante el geotermómetro de SiO_2 (g): Verma & Santoyo, 1997); y (a la derecha) las temperaturas obtenidas <i>in situ</i> en las manifestaciones superficiales.....	116
Figura 5.11: Mapa de favorabilidad geotérmica de la X Región de Los Lagos, generada a partir del estudio de 18 de 36 manifestaciones catastradas.....	117
Figura 6.1: Diagrama de K versus Cl^- , correspondiente a las concentraciones de las fuentes termales analizadas en el presente estudio. Se observa un empobrecimiento general en las concentraciones de K relativo al agua de lluvia obtenida. Las aguas termales más empobrecidas en K corresponden a Rollizos, Cochamó, Sotomó, El Yate y Pichicolo.	121
Figura 6.2: Esquema generalizado de los sistemas estructurales involucrados en la formación y localización de las manifestaciones (Modificado de Sánchez <i>et al.</i> , 2013; unidades litológicas son solo de referencia).	122

1. Introducción

Chile es un país que se ubica frente al margen de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Esta interacción entre placas de distintas densidades y a distintas temperaturas, sumado a los esfuerzos que conlleva la convergencia de placas, genera importantes tasas de fusión mantélica y cortical, dando lugar al ascenso de fluidos magmáticos, construyendo el imponente cordón montañoso de la Cordillera de Los Andes. Estos cuerpos de roca fundida, mediante su emplazamiento a través de fracturas, provocan elevados gradientes termales en el área que los rodea (Lahsen, 1988).

De este modo, estos fluidos magmáticos de alta temperatura no solo afectan a las rocas frías que lo rodean, sino que también a los flujos de agua que logran percolar hasta estas zonas calentadas, lo cual se ve favorecido por la existencia de unidades litológicas de alta permeabilidad, generada como una propiedad intrínseca en las rocas o por la presencia de fracturamientos intensos, relacionados generalmente al desarrollo de fallas geológicas. Así, se puede observar que existe una vinculación muy estrecha entre reservorios geotérmicos, volcanismo activo y existencia de fallas.

La décima región de Los Lagos se localiza en la Zona Volcánica Sur (ZVS) (33°–46°S) (Stern et al., 2007), en un ambiente dominado por la presencia del Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO), correspondiente a un conjunto de fallas y fracturas con una orientación predominante NW-SE y de movimiento dextral, por lo que estas estructuras determinan la distribución de los centros volcánicos dentro de toda su extensión, así como la de las aguas termales. Las trazas del SFLO se encuentran tanto sobre territorio continental como sobre zonas cubiertas por agua (lagos, fiordos y estuarios), por lo que el estudio de los procesos sufridos por las aguas que fluyen a través de estas estructuras y forman parte de las manifestaciones termales se hace muy complejo e interesante.

Para proponer posibles orígenes de las aguas involucradas en estos sistemas termales y las reacciones químicas que pueden haber sufrido durante su transporte bajo la superficie se analizará la geoquímica de las aguas.

En la región de Los Lagos se han catastrado 36 manifestaciones termales, las cuales presentan temperaturas superficiales entre 17 y 85°C (Hauser, 1997; Pérez, 1999; Flores, 2011 y página 61), todas ubicadas sobre sistemas volcánicos basálticos a andesíticos y/o directamente sobre estructuras pertenecientes al SFLO, ambas morfologías estrechamente relacionadas entre sí. Sin embargo, según Flores (2011), la información disponible respecto a los parámetros fisicoquímicos de estas aguas es insuficiente. Esto se puede considerar como uno de los factores negativos más relevantes en cuanto al retraso del desarrollo de la energía geotérmica en Chile, sumado al error en el catastro de concesiones, publicado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), según menciona Saldivia (2011).

En resumen, la información disponible de los recursos geotérmicos de la Región de Los Lagos es escasa, por lo que se hace necesario un estudio profundo que genere un mejor entendimiento acerca de las características de los sistemas geotérmicos.

1.1. Conceptos generales de geotermia

La geotermia se basa en el transporte de calor proveniente de la Tierra, donde la temperatura aumenta con la profundidad. Esta condición se hace más favorable para su aprovechamiento cuando existen factores que aportan mayor calor al sistema, básicamente la presencia de cámaras magmáticas. Por lo tanto, se puede inferir que Chile con su extensa presencia de volcanismo corresponde a una región con gran potencial geotérmico.

El calor necesita ser transportado, mediante conducción, convección o advección, rol que cumple muy bien el agua a nivel cortical. Por ende, otro aspecto que favorece la formación de sistemas geotérmicos es la presencia de zonas permeables que permitan el ingreso de aguas meteóricas hasta las profundidades que presentan mayor temperatura para que estas sean calentadas; estas zonas pueden tratarse de rocas intrínsecamente permeables, con gran porosidad, o bien de rocas fracturadas. Con ello, se determina que la presencia de los siguientes componentes es necesaria para que sea posible la existencia de un sistema geotermal: (i) una fuente de calor, (ii) un sector permeable que permita la percolación de agua, y (iii) una capa impermeable que mantenga el calor acumulado (Gupta & Roy, 2007), para el caso de sistemas principalmente convectivos (Marini, 2001).

En la ZVS se pueden encontrar principalmente 2 tipos de sistemas geotérmicos: (i) Sistemas ígneos jóvenes y (ii) Sistemas tectónicos. Estos últimos corresponden a los más frecuentes dentro de la décima región.

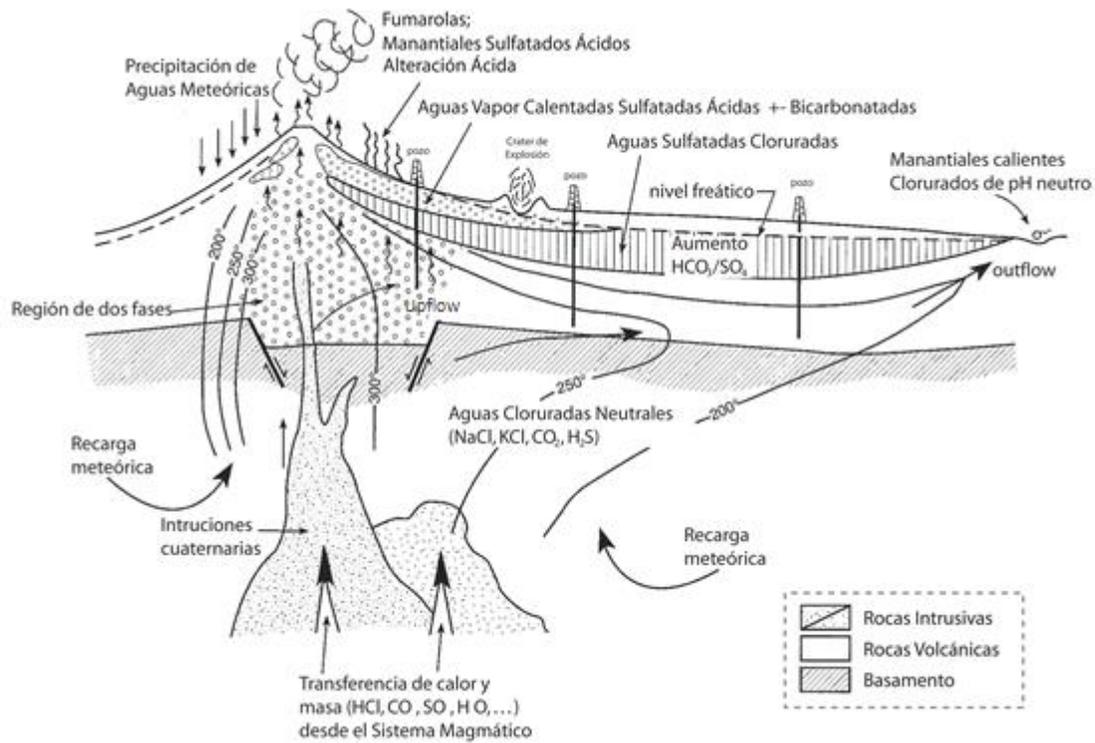


Figura 1.1: Esquema de un sistema geotermal hospedado en un estratovolcán andesítico (Modificado de Goff & Janik, 2000).

Los sistemas ígneos jóvenes corresponden a sistemas geotérmicos relacionados al volcanismo cuaternario e intrusiones magmáticas (Lahsen *et al.*, 2005) (Figura 1.1). Estos cuerpos recientemente cristalizados o en cristalización transfieren calor de manera directa y pueden involucrar interacción entre aguas de recargas meteóricas y fluidos volcánicos, se este modo se forman celdas convectivas las que provocan que los fluidos generen reservorios someros y de importante transporte lateral.

Los sistemas tectónicos se forman a raíz de la presencia de grandes flujos de calor producidos por el calor radiogénico proveniente de la desintegración atómica de elementos radioactivos como el U, Th y K en rocas intrusivas, generando altos gradientes geotermales, los cuales son alcanzados por aguas meteóricas de recarga (Figura 1.2), las que ascienden por convección aprovechando las debilidades corticales, (i.e. regiones de extensión cortical, a lo largo de zonas de

falla). De esta manera, estos sistemas se caracterizan por presentar una importante interacción agua-roca a grandes profundidades.

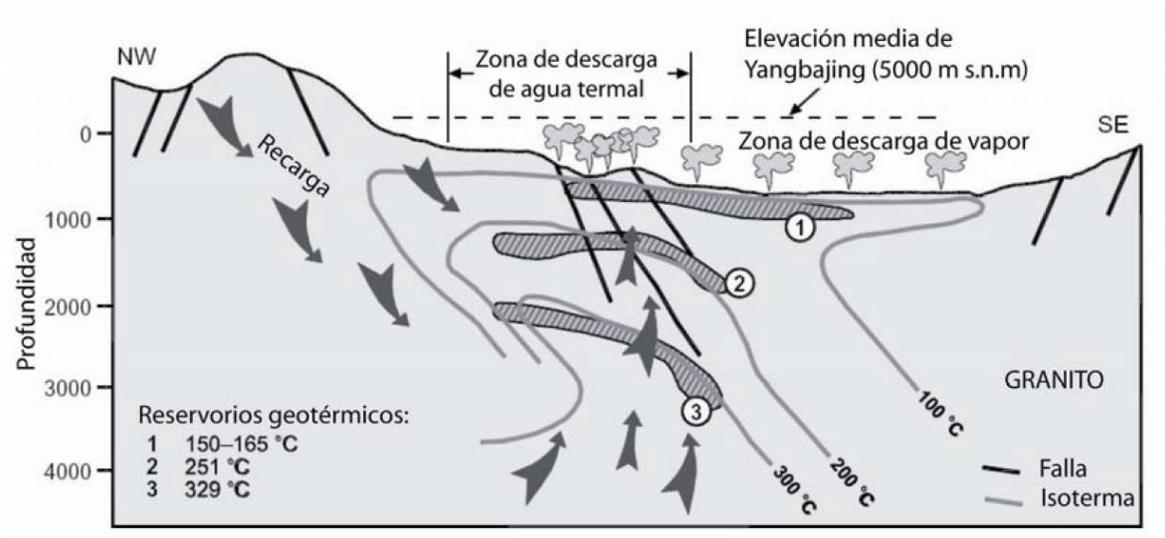


Figura 1.2: Perfil esquemático del campo geotérmico de Yangbajing (Chandrasekharam & Bundschuh, 2008). En este ejemplo los reservorios están alojados en granitos fracturados. (1): reservorio somero; (2) y (3) reservorios profundos. Este campo es parte del Cinturón Geotérmico del Himalaya.

Es así como en este trabajo se plantea caracterizar la mayoría de las manifestaciones termales de la décima región, identificando el tipo de sistema en cada uno de los casos según lo mencionado en los párrafos anteriores y, en parte, usando a la vez algunas de las observaciones de Alam & Parada (2013), como el considerar el análisis de isótopos ambientales y la interacción agua-roca de estos fluidos geotermales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo principal

Generar una caracterización geoquímica de los sistemas geotermales de la Región de Los Lagos, Chile, a través del estudio de manifestaciones termales distribuidas a lo largo de la región.

1.2.2. Objetivos específicos

- i. Recopilación de datos sobre las fuentes termales registradas y encontradas en la región de Los Lagos, incluyendo ubicación, dimensiones, datos logísticos y observaciones geológicas, litología presente y valores termodinámicos.
- ii. Obtención de datos geoquímicos actualizados de las fuentes termales de La Región de Los Lagos, mediante la realización de campañas de terreno en los sectores de estudio.
- iii. Correlación entre las manifestaciones termales y los posibles factores influyentes en el sistema (litología, actividad volcánica, recargas de agua, estructuras).
- iv. Establecer índices de corrección para los valores de temperatura obtenidos mediante el geotermómetro de Na/K (Díaz-González *et al.*, 2008), según los valores obtenidos de las concentraciones de Na y K respecto a las líneas de mezcla homogénea.
- v. Creación de un mapa que ilustre la favorabilidad geotérmica de esta zona, desarrollando una ponderación para las temperaturas estimadas por geotermómetros de sílice (Verma & Santoyo, 1997) y Na-K (Díaz-González *et al.*, 2008).

1.3. Hipótesis de trabajo

El siguiente trabajo presenta sus bases en las siguientes hipótesis de trabajo:

- i. La presencia de mezclas de agua superficiales y la interacción agua-roca afecta la favorabilidad aparente de sistemas geotérmicos de alta temperatura.
- ii. Es posible relacionar la geoquímica de sistemas geotermales con los dominios estructurales sobre los que se ubican.
- iii. Las manifestaciones con temperaturas sobre 40°C, ubicadas a gran distancia de los sistemas volcánicos activos o recientes, y presentes sobre áreas de importante dominio estructural, pueden relacionarse con zonas de importante favorabilidad geotérmica, relacionadas a sistemas emplazados a mayor profundidad.

2. Zona de estudio

2.1. Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio se ubica entre los paralelos 40°39' – 43°20' de latitud sur, abarcando las tierras continentales de la región (Figura 2.1). Las vías de acceso más importantes son la Ruta 5 Sur y la Ruta 7 (Carretera Austral); sin embargo, en la mayoría de los casos se requiere ingreso a caminos rurales y senderos para visitar las manifestaciones termales, adicional al transporte marítimo que es necesario para aproximarse a los manantiales ubicados al sur de Hornopirén, el cual consiste en lanchas, barcazas y transbordadores, estos últimos de uso público y con salidas preestablecidas.

La X región tiene como capital a la ciudad de Puerto Montt, y se subdivide en las provincias de Osorno, Llanquihue, Chiloé y Palena, con una población total estimada de 716.739 habitantes distribuida heterogéneamente en una superficie de 48.583,5 Km². De este modo, la Región de Los Lagos podría representar una zona con un gran potencial para la investigación geotérmica de mediana y baja entalpía, facilitando a través de este estudio el acceso a múltiple información necesaria para promover el interés, el cual en la actualidad es relativamente bajo, representado por la ausencia de concesiones geotérmicas en la región, exceptuando por una correspondiente a la Región de Los Ríos que cubre las cercanías de las manifestaciones termales de Puyehue y Pangal, en el límite norte de la región (SERNAGEOMIN, 2013).

La zona recorrida comprende únicamente el territorio continental, abarcando la zona de fiordos, valles glaciofluviales y precordillera, siguiendo principalmente la trazas de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO).

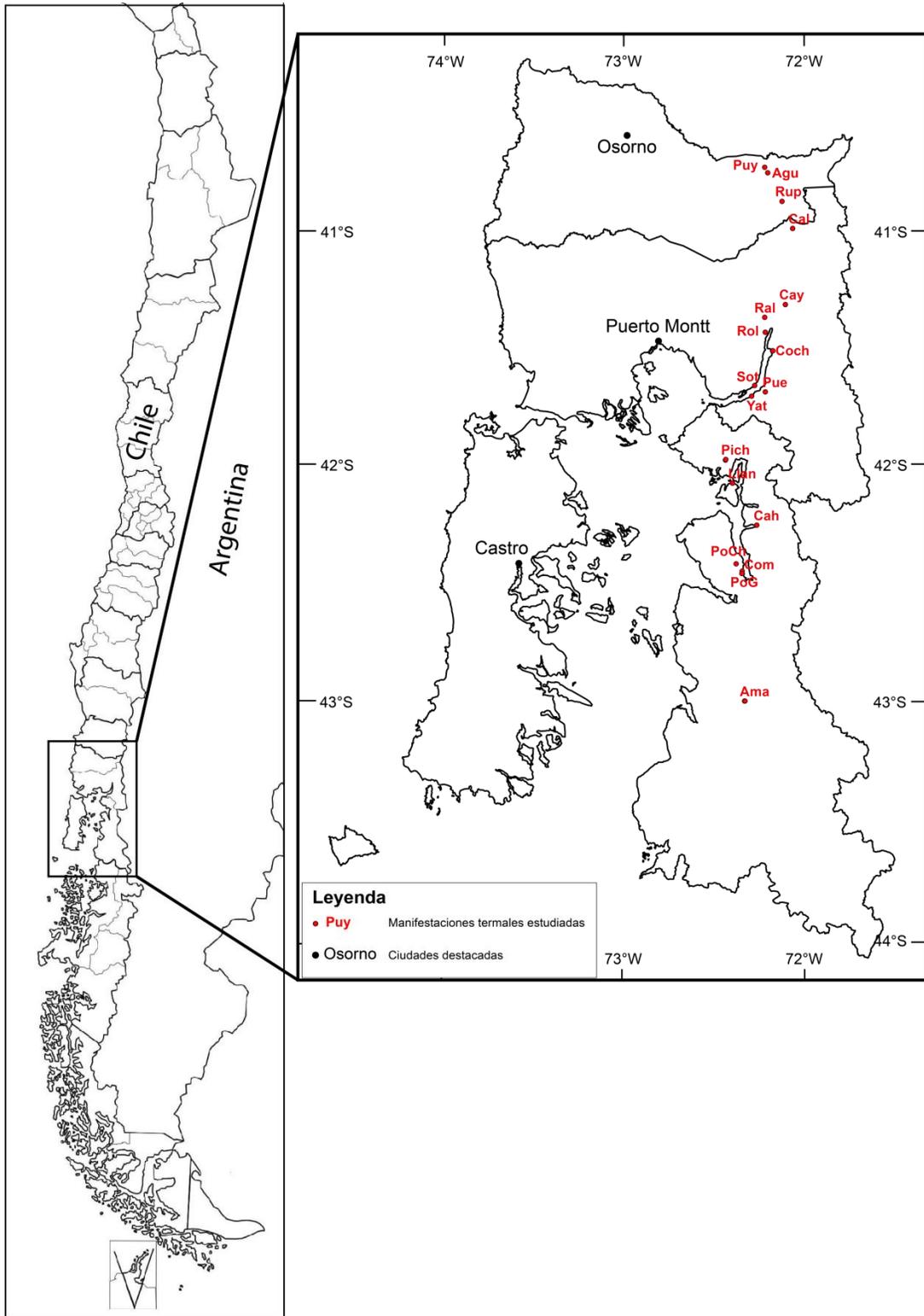


Figura 2.1: Ubicación de zona de estudio. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetú. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo. (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).

La mayoría de las manifestaciones presentan uso de balneario, por lo que, al pertenecer a dueños específicos, su localización se hace relativamente más fácil. Sin embargo, el modo de acceso varía dependiendo de dónde se ubique la fuente termal.

Dentro del área se encuentran dos tipos de fuentes termales: las que se ubican a un costado de un camino y las que se encuentran en zonas desconectadas de las redes viales, a las que se accede a través de distintos medios.

Accesos

Las fuentes se indican con sus respectivos tipos de accesos en la Tabla 1. Algunas de estas se encuentran al costado de una vía pública, mientras que en otros casos otros medios de transporte, como embarcaciones y caballos, son requeridos.

Tabla 1: Lista de fuentes termales de la región sus respectivas rutas de acceso principales.

Fuente termal	Acceso
Puyehue	U-485 (camino al Centro de Esquí Antillanca)
Aguas Calientes	U-485 (camino al Centro de Esquí Antillanca)
Rupanco	Final de ruta 26. Cruzar lago en bote
El Callao	Desde Petrohué, cruzar el Lago de Todos Los Santos y luego 2 horas de cabalgata hacia el norte.
Ralún	V-69 (camino a Puelo)
Rollizos	V-69 (camino a Puelo)
Cochamó	V-69 (camino a Puelo)
Sotomó	V-69 (camino a Puelo). Cruzar estuario Reloncaví en bote.
Puelo	V-69 (camino a Puelo)
El Yate	V-69 (camino a Puelo)
Pichicolo	Ruta 7 (Carretera Austral)
Cayetué	Ruta 33 hasta las cercanías de Ralún. Continuar 5 horas de cabalgata.
Llancahué	Desde la caleta Río Negro, traslado en bote hacia la isla recorriendo el fiordo El Comau.
Cahuelmó	Desde la caleta Río Negro, traslado en bote hacia la isla recorriendo el fiordo El Comau, hasta el fiordo Cahuelmó (Parque Pumalín).
Porcelana Chico	Desde la caleta Río Negro, traslado en bote hacia la isla recorriendo el fiordo El Comau, hasta Leptepú; desde donde se navega en bote por la costa NE de la península de Huequi hacia el norte.
El Comau	Desde la caleta Río Negro, traslado en bote hacia la isla recorriendo el fiordo El Comau, hasta Leptepú; desde donde se navega en bote por la costa NE de la península de Huequi hacia el norte.
Porcelana Grande	Desde la caleta Río Negro, traslado en bote hacia la isla recorriendo el fiordo El Comau, hasta Leptepú; desde donde se navega en bote por la costa NE de la península de Huequi hacia el norte.
El Amarillo	Ruta 7 (Carretera Austral)

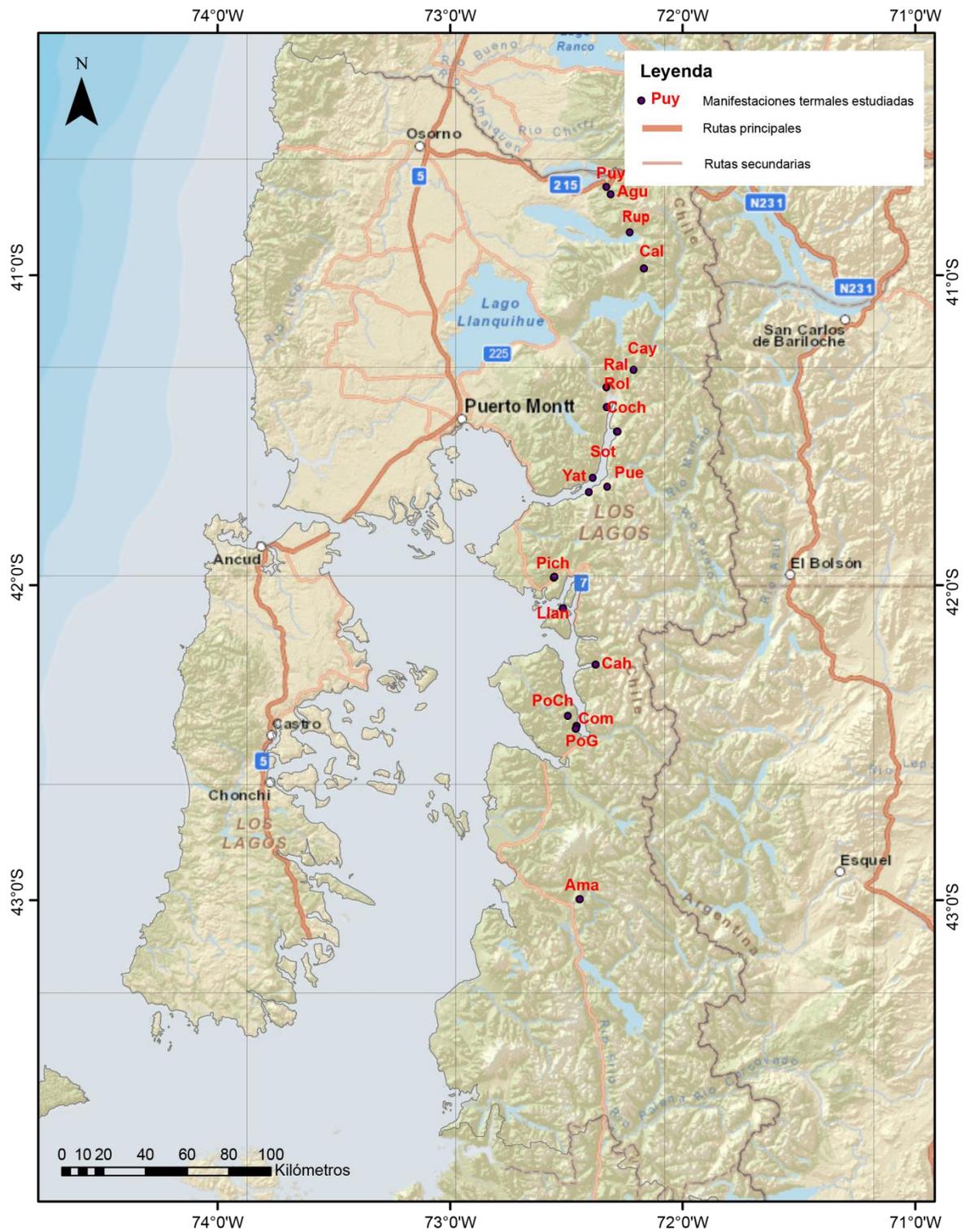


Figura 2.2: Mapa rutero de la Región de Los Lagos. Fuente: Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

2.2. Marco Geológico

2.2.1. Marco geológico y tectónico regional

La ubicación de Chile en escala terrestre es excepcional, ya que se encuentra frente a márgenes de placa, en los cuales la placa Sudamericana converge con las placas de Nazca y Antártica, donde estas dos últimas están siendo subductadas bajo la placa Sudamericana debido a su mayor densidad. Este contexto macro-geológico es responsable de la existencia de la Cordillera de Los Andes, estructura que se extiende por más de 7.500 km a lo largo del límite occidental del continente sudamericano (Stern, 2004).

Existe una relación directa entre tectónica y volcanismo, la cual depende de múltiples aspectos, como se explica a continuación. El volcanismo y la generación de cuerpos magmáticos son productos de la fusión del manto, lo que se genera a partir de la hidratación provocada por introducción de la placa oceánica bajo la continental, lo cual baja el punto de fusión de las rocas mantélicas. De este modo se podría pensar que toda la zona de contacto entre placas debe presentar a lo largo de sí un volcanismo continuo y homogéneo. Sin embargo, es conocido que esto no ocurre de este modo, lo cual se explica a través de la existencia de distintos factores, los que corresponden principalmente a importantes elementos estructurales que afectan directamente la subducción. El ángulo de subducción no es igual en todo el margen, sino que este varía de norte a sur. En Chile, en general, se presenta un ángulo de subducción que varía dentro del rango de 25-30°; sin embargo, existen dos importantes segmentos en los que la placa de Nazca desciende con un ángulo cercano a los 10° a profundidades >100 km, denominados sectores de *Flat-slab*, que se asocian espacialmente a áreas carentes de volcanismo activo (Stern, 2004). En ambos casos, en el sector de *Flat-slab* de la zona centro-norte y en la zona sur del país, se les relaciona con la subducción de la Dorsal Juan Fernández y la Dorsal de Chile, respectivamente, que interfieren en la profundidad de la Zona de Benioff y, por ende, en el proceso de convergencia de placas tectónicas (Jordan *et al.*, 1983; Yáñez *et al.*, 2001). Es importante destacar que la Dorsal de Chile comenzó a subducirse desde 14 Ma,

momento desde el cual su área de subducción ha migrado hacia el norte a lo largo del margen.

Adicionalmente, es relevante señalar que a lo largo de margen de placa tampoco existe una convergencia perpendicular en el plano horizontal, todo lo contrario, en general presenta oblicuidades desde 0° en la latitud de Arica (18°S) hasta 24° en el margen en el que se encuentra en la zona central (Stern, 2004). Lo anterior se suma a una variación en la velocidad de subducción de las distintas placas que convergen con la placa Sudamericana, donde los valores correspondientes a la Placa de Nazca y a la Placa Antártica son de 6,6 y 2,1 cm/año, respectivamente.

Finalmente, el vínculo entre el régimen tectónico y el volcanismo de una región quedaría demostrado mediante las características de los productos volcánicos asociados a ciertas etapas geológicas, sirviendo como evidencia para definir distintos ciclos geológicos que habrían presentado diferentes dinámicas tectónicas. El último gran cambio registrado en el actual margen chileno es el paso de un régimen tectónico extensivo a uno compresivo, dominado por un cambio en las características de convergencia de placas, este habría causado una evolución en el magmatismo (Mpodozis & Ramos, 1989), tendiendo a uno cada vez más diferenciado, el que permanece hasta la actualidad.

Así, el magmatismo producido es determinado por el estrés generado en la zona a causa de los dominios estructurales presentes a gran escala. De esta manera, se han definido zonas de acuerdo a la distribución del volcanismo en el margen andino. Estas fueron definidas por Stern (2004) como: Zona Volcánica Norte (ZVN: 2°N-5°S), Zona Volcánica Central (ZVC: 14°-28°S), Zona Volcánica Sur (ZVS: 33°-46°S) y Zona Volcánica Austral (ZVA: 49°-55°S). Las zonas pertenecientes al territorio chileno corresponden a las ZVC, ZVS y ZVA, por lo que, consecuentemente, Chile es caracterizado por ser una de las regiones con mayor potencial geotérmico del mundo (Lahsen *et al.*, 2005), teniendo dentro de su territorio más de 200 estratovolcanes y al menos 12 sistemas de calderas gigantes potencialmente activos.

Más adelante se dará mayor importancia a la ZVS, la cual se subdivide en Zona Norte (ZVSN), Zona Transicional (ZVST) y Zona Sur (ZVSS), (NSVZ, TSVZ y SSVZ por sus siglas en inglés, respectivamente) (Figura 2.2).

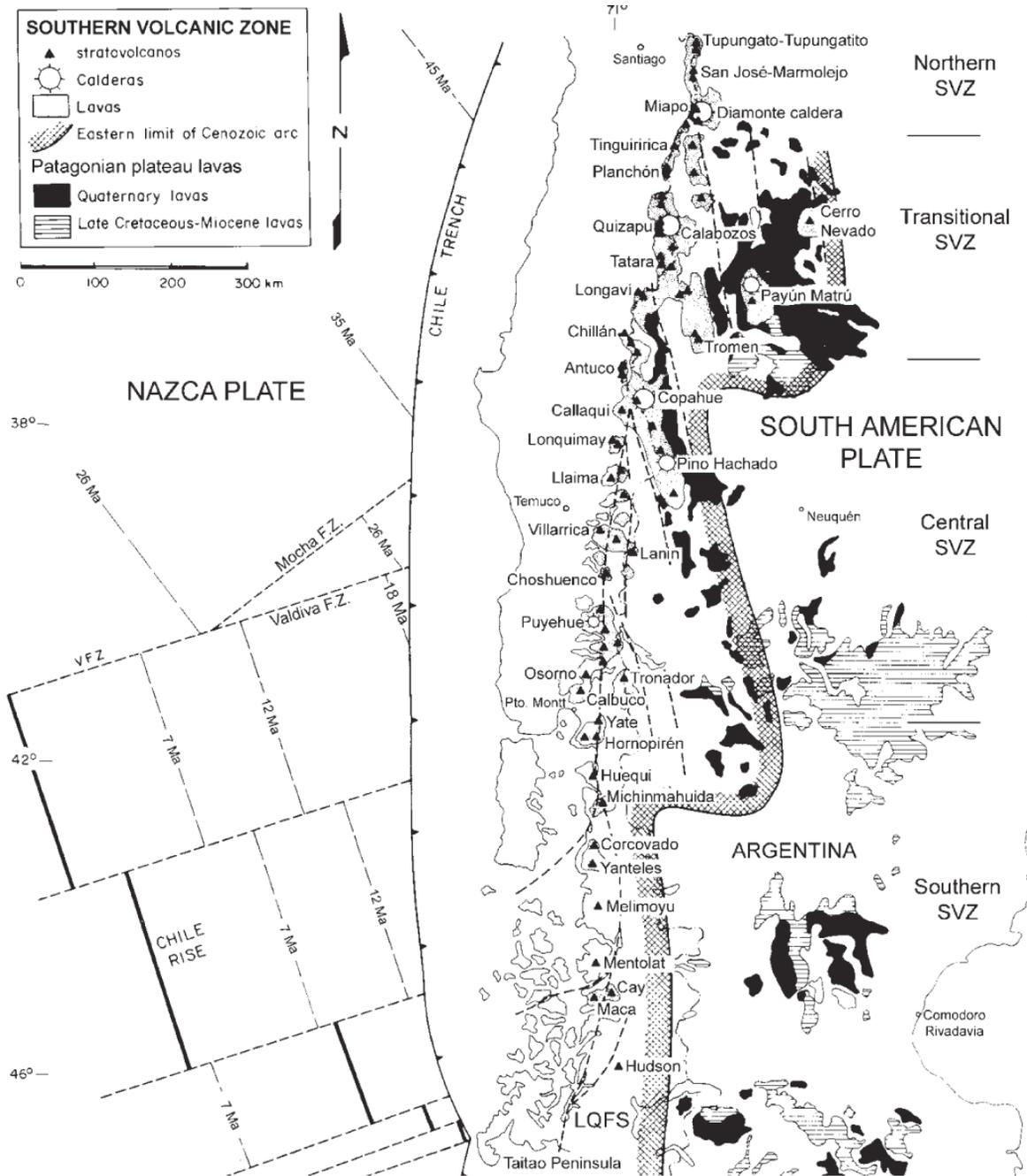


Figura 2.2: Mapa esquemático de volcanes y calderas importantes pertenecientes a la Zona Volcánica Sur (SVZ, por sus siglas en inglés). La línea discontinua con sentido aproximadamente N-S corresponde al Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (LOFS). Obtenido de Stern *et al.*, 2007.

2.2.2. Marco geológico y tectónico local

La décima Región de Los Lagos, se encuentra en la ZVS, entre los paralelos 40,5° y 44°S, presentando un activo volcanismo.

Las geomorfologías principales en la región se orientan paralelas a la costa, dividiendo el área en: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal. Por otra parte, con una orientación similar, aproximadamente N-S, se distribuyen los grupos de las principales unidades litológicas, de manera paralela a las zonas de falla y a los centros volcánicos (Figura 2.3).

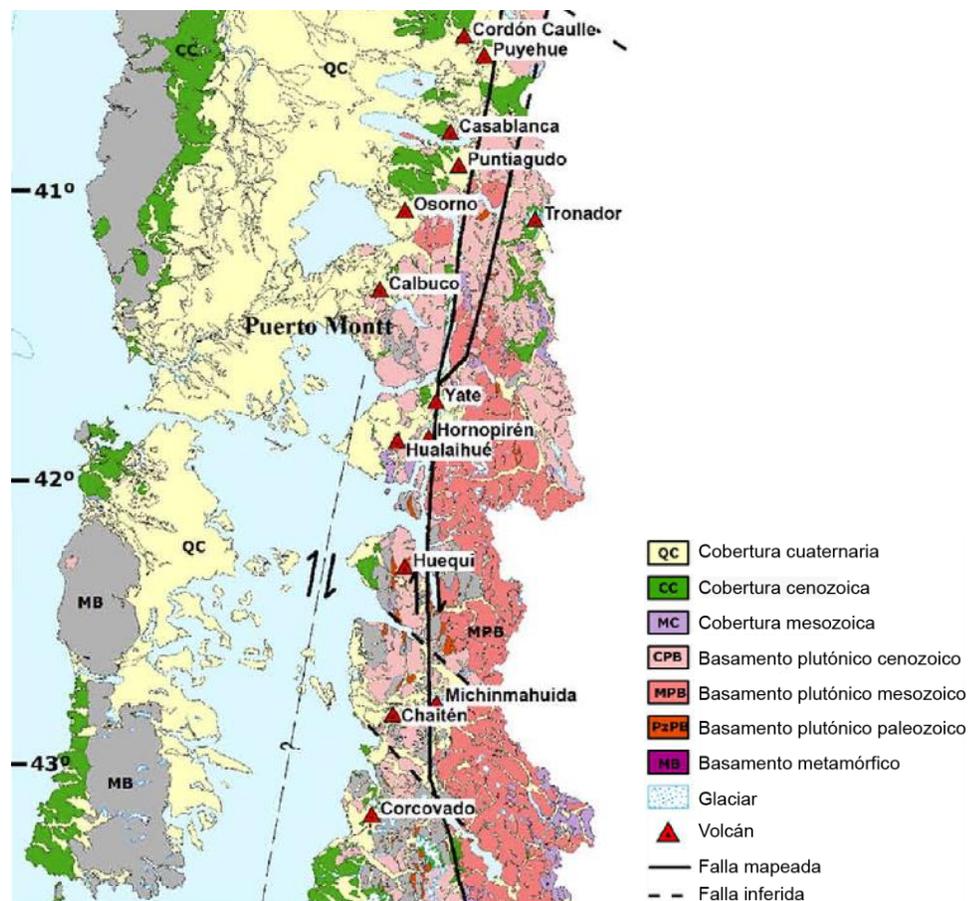


Figura 2.3: Distribución de unidades litológicas y zonas de falla principales y los volcanes del área de estudio. Extraído de Cembrano & Lara (2009).

A continuación se resumirán las características de la región separándolas según el ámbito al cual pertenezcan.

2.2.2.1. Geología estructural

La Región de Los Lagos se encuentra en un ambiente de margen tectónico activo, asociado a una convergencia dextral-oblicua con sentido N77°E que se lleva a cabo al norte del punto triple, el cual pone en contacto las placas Nazca, Antártica y Sudamericana (Tebbens *et al.*, 1997; Angermann *et al.*, 1999; Rosenau *et al.*, 2006). Este tipo de subducción se ha desarrollado durante el Cenozoico interrumpida por cortos períodos de convergencia ortogonal entre 20 y 26 Ma (Cande & Leslie, 1986; Pardo-Casas & Molnar, 1987; DeMets *et al.*, 1994; Somoza, 1998). De esta manera, en esta área se destaca la principal zona de falla de cizalle dextral transpresiva de intra-arco, el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO), el cual presenta una extensión de más de 1.200 km entre las latitudes 38°S y 47°S, con un rumbo aproximado NNE-SSW (Cembrano *et al.*, 1996; Cembrano *et al.*, 2000; Cembrano *et al.*, 2007; Lange *et al.*, 2008; Cembrano & Lara, 2009). De esta manera, se establece que la localización del volcanismo en esta área (ZVS) está controlada por el SFLO (López-Escobar *et al.*, 1995; Stern, 2004). Por otra parte, recordando que se está presente ante un sistema dominado por la subducción de la placa oceánica, específicamente por una levemente dextral-oblicua, cabe notar que no existe solo una componente normal al margen continental, sino que se reconoce un tensor de estrés adicional oblicuo al eje del margen de placas asociado a la rotación horaria que presentan los arcos volcánicos pliocenos, respecto al eje vertical (Dewey & Lamb, 1992).

Sumando lo anterior a la dinámica impuesta por el SFLO se destaca en sus zonas de dominio bifurcado y de cinemática tipo SC (Figura 2.6), provocando la generación de cuencas transtensivas (Figura 2.4), muchas de ellas presentando emisiones de fluidos magmáticos y termales como se observa en la Figura 2.7. De este modo, la corteza es fuertemente afectada por zonas de comportamiento frágil asociadas al SFLO, determinando el que existan lineamientos de estratovolcanes (EV) y centros eruptivos menores (CEM) con lavas de muy baja viscosidad con sentido NNE sobre estas estructuras formadas a partir de zonas de cizalle dúctil y

fallas frágiles del SFLO (López-Escobar *et al.*, 1995). Por otra parte, es importante señalar que centros eruptivos con orientaciones diferentes se relacionarían a discontinuidades pre-existentes en el basamento, las que dan a lugar canales de ascenso.

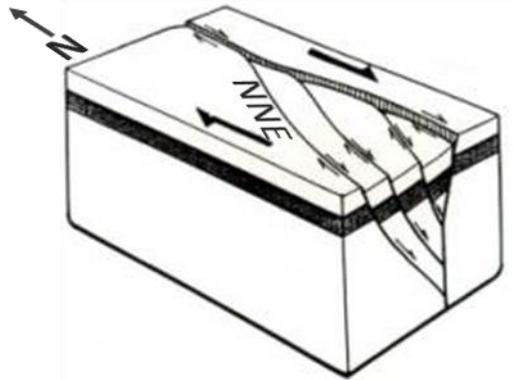


Figura 2.4: Esquema de formación de cuencas transtensivas relacionadas a una falla dextral en flexuras con sentido NNE. Modificado de <http://maps.unomaha.edu/maher/GEOL3300/week15/transcurrent.html>

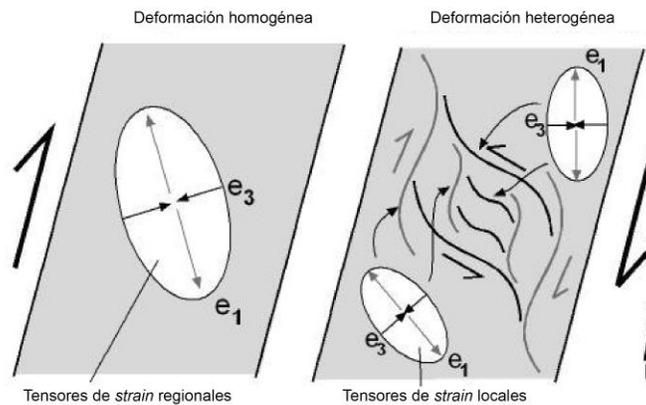


Figura 2.5: Esquema de los efectos del particionamiento de los *strain* dentro de un sistema de fallas unido cinemáticamente (Obtenido de Rosenau, 2004). En esta figura se observa cómo se desarrollan sistemas sinistresales con una orientación no paralela, pudiendo sugerir que las zonas donde se generan estas geometrías de deformación heterogénea podrían corresponder a áreas debilitadas producto de deformaciones corticales previas.

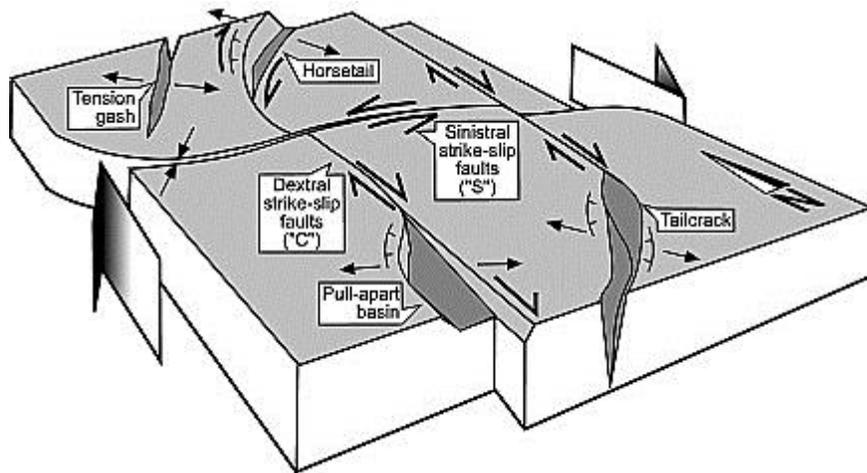


Figura 2.6: Ilustración de las estructuras activas de manera simultánea, representando la cinemática que sigue el modelo SC compuesta por fallas dextrales y siniestras, las que dan forma al SFLO. Fuente: Rosenau *et al.* (2006).

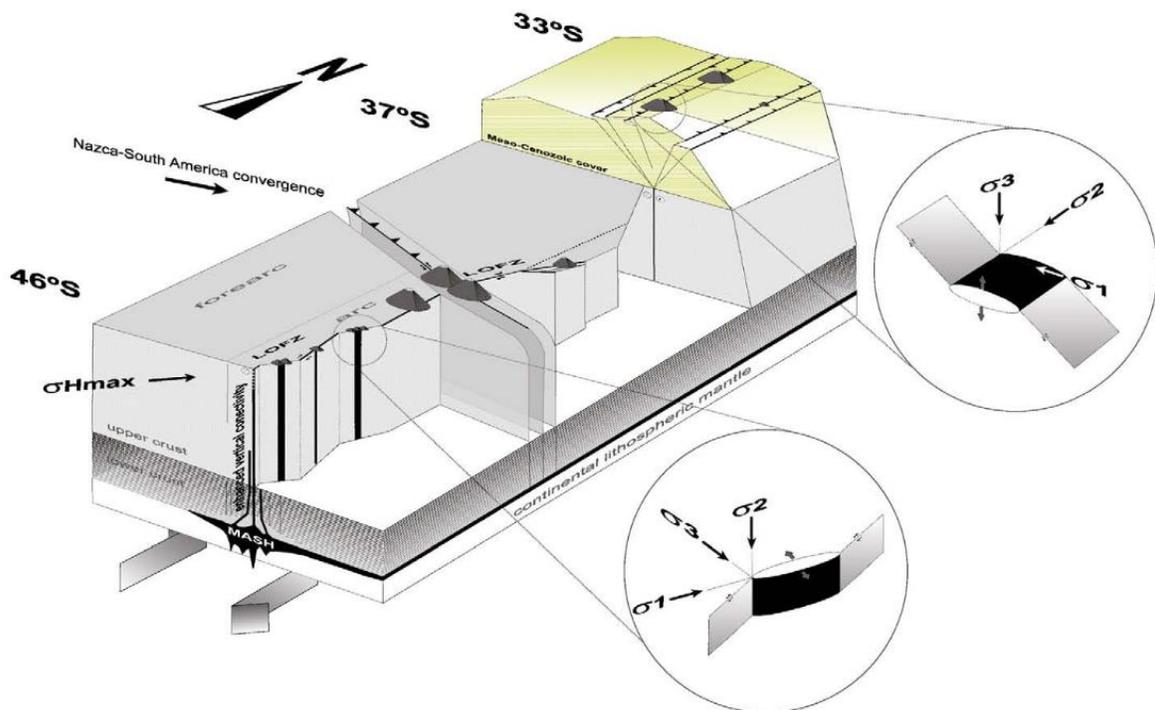


Figura 2.7: Esquema que relaciona el ascenso de fluidos magmáticos con la existencia de estructuras (Cembrano & Lara, 2009). En este caso, al sur de los 37°S existen lineamientos con sentido NE-SW y NW-SE, sobre los que se han desarrollado numerosos sistemas volcánicos; sin embargo, los centros eruptivos menores con composiciones más básicas corresponden a aquellas que ordenan en sentido NNE, debido a la configuración dextral del SFLO, generando zonas de extensión (cuencas transtensivas).

Como es posible observar en la Figura 2.4, Figura 2.5 y Figura 2.6, existen sistemas de fallas siniestras de rumbo WNW-ESE, las que habrían sido

generadas como fallas pre-andinas reactivadas como fallas de rumbo siniestrales (Sánchez *et al*, 2013), formando parte de una serie de estructuras que se agrupan en el Sistema de Fallas de Larga-vida oblicuas al Arco (SFLA). Este sistema de fallas se relaciona directamente a los sistemas volcánicos con orientación WNW-ESE, los cuales presentan un amplio espectro de composiciones: desde basálticas a riolíticas.

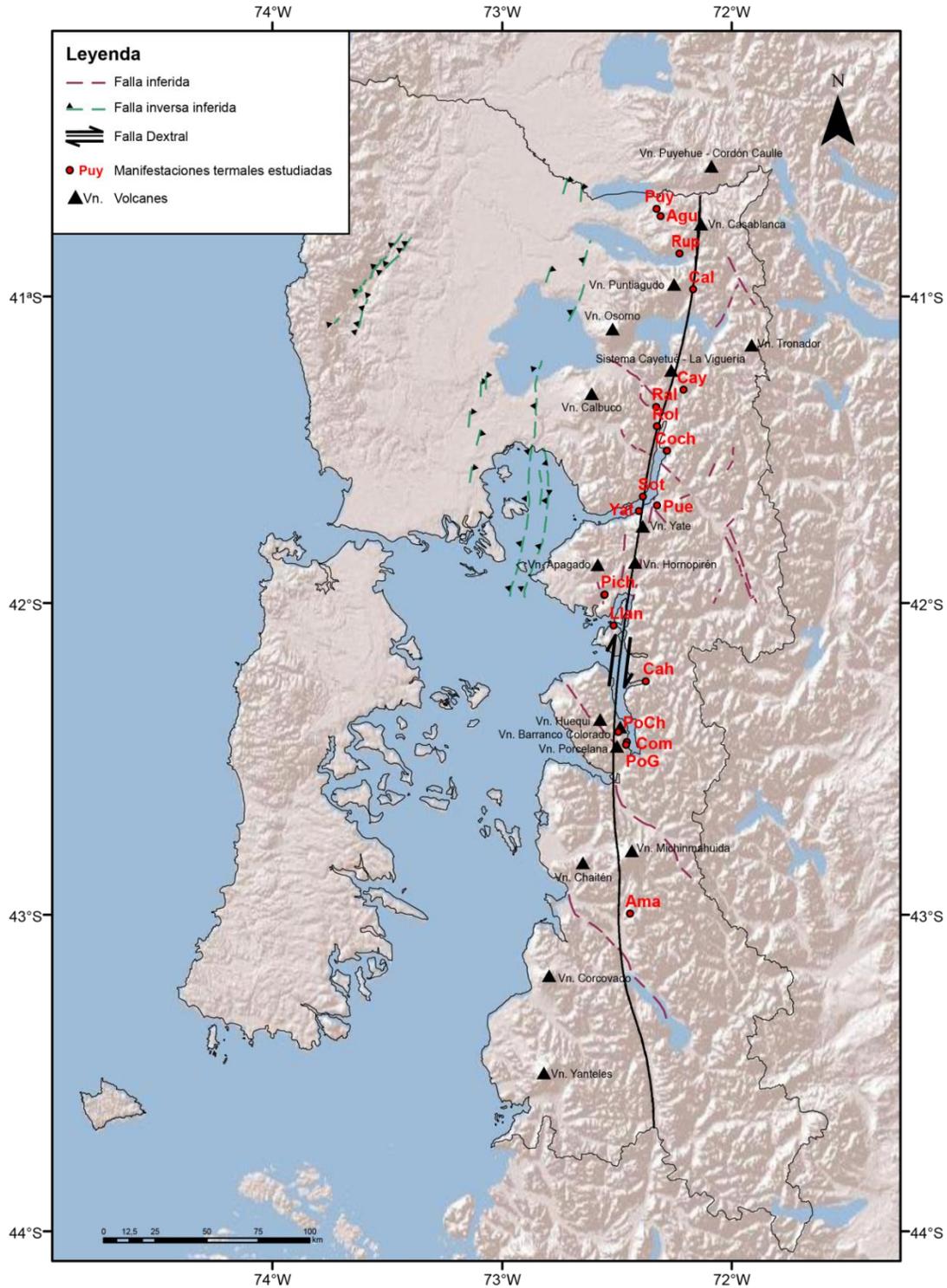


Figura 2.8: Mapa de distribución de fallas principales y centros volcánicos dentro de la zona continental de la Región de Los Lagos. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetú. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo. (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006)

2.2.2.2. Complejos volcánicos

Dentro de la región de estudio se reconocen 15 complejos volcánicos que en su mayoría guardan una estrecha relación con las zonas que presentan afloramiento de fluidos termales.

Se debe considerar que la deformación cortical, incluyendo zonas de dominio estructural, ejerce control sobre los procesos de diferenciación magmática, lo que puede determinar la composición asociada al volcanismo presente en las distintas zonas del margen tectónico (e.g. Cembrano & Moreno, 1994). Ante esto es que se han identificados relaciones entre la composición y ubicación de ciertos sistemas volcánicos. Los sistemas volcánicos alineados con orientación NE-SW corresponden básicamente a estratovolcanes pleistocenos-holocenos, de composición basáltica a andesítica, debido a una menor diferenciación en el ascenso de los cuerpos magmáticos desde el manto a través de la corteza, ya que es facilitado por las estructuras pertenecientes al SFLO (Figura 2.7). Por otro lado, existen complejos volcánicos cuya gran explosividad se debe principalmente a su composición química más ácida (mayor diferenciación durante el ascenso magmático), lo que provoca que presenten un mayor porcentaje de volátiles disueltos en el magma y, por lo tanto, lavas más viscosas.

A continuación se presentan las características generales de los sistemas volcánicos existentes en la Región de Los Lagos.

- i. Vn. Puyehue - Cordón Caulle: Este consisten en una depresión orientada NW-SE, ubicada a los 40°30'S, actualmente asociada a tectónica extensional relacionada al volcanismo de estilo monogenético, morfología de *plateau* y anomalías de Bouguer negativas. Su actividad volcánica se habría iniciado hace 0,3 Ma (Sepúlveda, 2006) la que ha presentado una importante evolución química, variando desde efusiones principalmente máficas a erupciones dacíticas-riolíticas post-glaciales. Las actividades históricas registradas corresponden a los años 1921-1922 y 1960.

- ii. **Grupo Volcánico Casablanca-Antillanca:** Complejo de volcanismo basáltico de edad pleistocena tardía a holocena ubicado sobre una alineación NE-SW sobre el SFLO, junto con los sistemas volcánicos Cordón Los Cenizos, volcán Puntigudo y volcán Osorno (Kappes, 2012). Este grupo se compone por el estratovolcán Casablanca y por diversos conos de escoria monogenéticos post-glaciales, relacionados a flancos y fisuras (López-Escobar *et al.*, 1995; Sepúlveda *et al.*, 2004). No existen registros de erupciones asociadas al volcán Antillanca (Bertrand *et al.*, 2008).
- iii. **Volcán Puntigudo-Cordón Los Cenizos:** Este sistema volcánico, correspondiente al estratovolcán Puntigudo y al sistema fisural del Cordón Los Cenizos, está ubicado a los 41°S y aproximadamente a 2.500 m.s.n.m., y tiene edad pleistocena (González-Ferrán, 1995; Bertrand *et al.*, 2008; Corbella & Lara, 2008), presentando un lineamiento estructural NE-SW asociado a la ubicación de los volcanes Osorno, La Picada y Antillanca. El volcán Puntigudo reporta erupciones de química alcalina relacionada a basaltos y andesitas basálticas. Su morfología aguda se debe a una fuerte erosión glacial que no fue modificada por actividad volcánica posterior. No existen registros de erupciones históricas.
- iv. **Volcán Osorno:** Este corresponde a un estratovolcán mixto predominantemente basáltico (López-Escobar *et al.*, 1992) (41,1°S; 72°W) ubicado a 2.661 m.s.n.m., corresponde al extremo SW de una cadena volcánica orientada NE-SW (Vn. La Picada, Cordón Los Cenizos, Vn. Puntigudo y Vn. Antillanca) (Kappes, 2012). Este yace sobre rocas del Batolito Norpatagónico y rocas volcánicas del edificio volcánico ancestral del volcán pleistoceno La Picada. Una importante fase explosiva se reconoce entre ca. 4-1 ka, seguido de erupciones de menor envergadura.

- v. **Volcán Tronador:** Perteneciente al Grupo Volcánico Tronador junto con el Complejo Volcánico Steffen, la unidad Garganta del Diablo (ambos del Pleistoceno Inferior) y el cono monogenético postglacial Fonkc. Se encuentra en el límite internacional entre Chile y Argentina a la altura de los 41°S. Yace sobre el Batolito Norpatagónico y tiene una edad pleistocena media (Mella *et al.*, 2005). La química se destaca por sus lavas correspondientes a basaltos y andesitas basálticas. Se considera un volcán extinto, con la finalización de su actividad ocurrida durante el Pleistoceno Medio alto.

- vi. **Volcán Calbuco:** Estratovolcán mixto de composición andesítica, localizado en los 41°2'S y 72°37'W a 2.003 m.s.n.m., de edad pleistocena tardía a reciente (López-Escobar *et al.*, 1992; Sellés & Moreno, 2011). El edificio volcánico también sobreyace sobre rocas del Batolito Norpatagónico. Sin embargo, a diferencia de otros centros eruptivos de la zona, no se ubica en un lineamiento regional ni se encuentra controlado por estructuras de este tipo, sino que se encuentra en un bloque cortical al oeste del SFLO. Las erupciones del volcán Calbuco se destacan por su gran explosividad asociada a la importante hidratación de los magmas, presentando flujos de lava de bajo alcance de la alta viscosidad, y fragmentos balísticos de piroclásticos que se depositan a amplias distancias del edificio volcánico. Como también mencionan Sellé & Moreno (2011), la actividad histórica documentada incluye más de 12 ciclos eruptivos, de los cuales 4 ocurrieron en el siglo XX, de manera efusiva y explosiva, siendo los lahares y flujos de bloques y ceniza los peligros principales asociados al volcán.

- vii. **Volcán Yate:** También llamado volcán Yates, corresponde a un complejo volcánico ubicado a los 41°8'S (Watt *et al.*, 2009). El edificio volcánico está formado por niveles de lava pleistocenas y rocas piroclásticas, que sobreyacen el basamento plio-pleistoceno; sobre estos depósitos se encuentran evidencias tobíferas que muestran la ocurrencia de erupciones

post-glaciales violentas durante el Holoceno, que habrían cubierto las zonas de la estructura con erosión glacial. Sin embargo, no se registran erupciones históricas. Este complejo se orienta en sentido norte-sur sobre la traza de la Falla Liquiñe-Ofqui, y al juntarse con la Cordillera Pululil-Candelaria –con orientación E-W– se presenta una morfología de cruz.

- viii. **Volcán Hornopirén:** Este volcán holoceno, localizado al suroeste del volcán Yate (41,87°S, 72,43°W), se presenta como un cono simétrico de forma elíptica de rápido crecimiento. Este se ubica en medio de una cuenca subsidente transtensiva entre fallas normales provenientes del SFLO, dando lugar a la cuenca del Lago Cabrera la que sigue flujos eruptivos del Holoceno temprano (Watt *et al.*, 2009). Algunos de sus depósitos corresponden a acumulaciones de tefra que se caracterizan por componerse por escoria vítrea muy estratificada a escala de centímetros, distribuida de este a oeste (Watt *et al.*, 2011). No presenta registro histórico de actividad eruptiva reciente a pesar de que se le atribuye, junto con el volcán Apagado, las erupciones explosivas más voluminosas de Holoceno dentro del sector de Huailahué.
- ix. **Volcán Apagado:** El volcán Apagado, cuya posición corresponde a las coordenadas 41,88°S, 72,58°W, constituye un cono monogenético de escoria que se ubica dentro de un complejo volcánico de edad pleistocena el cual se encuentra erodado; adicionalmente, se le relacionan depósitos de lava andesita-basáltica. Por otra parte, se le atribuyen erupciones explosivas y con importante emisión de material (Watt *et al.* 2011), sin embargo no presenta registro de erupciones históricas en el corto plazo, al igual como ocurre con el volcán Hornopirén.
- x. **Volcán Huequi:** Este volcán (42,4°S, 72,6°W) se ubica en el centro de la península aislada homónima. Consiste en múltiples domos de lava erosionados o tapados por depósitos de colapso, cuyos magmas tienen composición andesítico-basáltica a dacítica (López-Escobar *et al.*, 1993;

Watt *et al.*, 2011), lo que es poco común en la zona. A pesar de que se trata de un volcán no muy conocido a nivel popular, se han documentado erupciones históricas entre 1890 y 1920 (González-Ferrán, 1995), aunque poco se conoce acerca de la naturaleza de la magnitud de estos eventos.

- xi. **Volcán Michinmahuida:** Esta unidad, que se encuentra al sur del volcán Chaitén (42,78°S, 72,43°W; a 2.404 m.s.n.m.), se trata de un complejo estratovolcán/caldera masivo con edad pleistocena-holocena, que se distribuye a lo largo de 14 km de fisura con orientación NE-SW (Naranjo & Stern, 2004). Se han registrado erupciones históricas en 3 oportunidades; la primera de ellas tuvo lugar en noviembre de 1742, otra ocurrió el 26 de noviembre de 1834 y a mediados de marzo de 1835 (Darwin, 1838; Martin, 1917; von Wolff, 1929; Casertano, 1963 a y b; Naranjo & Stern, 2004).
- xii. **Volcán Chaitén:** El volcán Chaitén se ubica a los 42,83°S y 72,65°W, a 1.122 m.s.n.m. se caracteriza por tener una química principalmente ácida asociada a domos previos, depósitos de flujos piroclásticos y depósitos de caída de ceniza que contienen riolita en forma de pumita. Esto es bastante fuera de lo común si se abarca toda la zona aledaña. Se le reconoce un último evento de gran magnitud previo al recientemente ocurrido el 2008, el cual se posicionaría hace 9,4 ka (Lara *et al.*, 2006; Lara, 2009).
- xiii. **Volcán Corcovado:** El volcán Corcovado (43,18°S, 72,8°W) corresponde a un estratovolcán cónico intensamente erodado (Naranjo & Stern, 2004) el cual presenta una química fundamentalmente basáltica (López-Escobar *et al.*, 1993). A pesar de que se registran algunos eventos eruptivos, específicamente en los años 1834 y 1835 (Darwin, 1838), son puestos en duda debido a que coinciden temporalmente con eventos registrados en el volcán Michinmahuida. Adicionalmente, existen erupciones evidenciadas por depósitos de tefra correspondientes a 5, 6 y 6,6 ka.

- xiv. Volcán Yanteles: Esta estructura localizada a los 43,42°S, 72,83°W, a 2.050 m.s.n.m., se le atribuyen eventos eruptivos, probablemente, de gran envergadura correspondientes a ~9.000 años atrás (Naranjo & Stern, 2004), con posteriores erupciones menores, representadas todas por importantes depósitos de tefra (Heusser *et al.* 1992). No se registran erupciones recientes acerca de este volcán.

2.2.2.3. Litología

Las unidades litológicas principales presentes en la región de estudio, pueden agruparse tres conjuntos:

- i. Rocas metamórficas paleozoicas asociadas al Complejo Metamórfico Bahía Mansa

Las rocas pertenecientes a al Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM) componen un fragmento de la Serie Oeste, comprendido entre los 38-43°S. Este aflora en la Cordillera de la Costa, en los fiordos y en la Isla de Chiloé, presentando una edad aproximada de 396 ± 1 Ma (Martin *et al.*, 1999; Duhart *et al.*, 2001), con un protolito de edad devónica – pérmica.

Estas rocas metamórficas corresponden principalmente a esquistos pelíticos a semi-pelíticos, meta-grauvacas, metabasitas y algunos intrusivos máficos a ultramáficos; caracterizándose por un metamorfismo pervasivo de facie esquistos verdes, relacionado a una foliación regional con sentido NW-SE.

Las asociaciones minerales típicas encontradas en los esquistos máficos se componen por anfíbola, epidota, esfeno, clorita, albita, cuarzo y estilpnomelano; mientras que en las rocas metasedimentarias corresponden a

cuarzo, albita, mica blanca, clorita, grafito, esfero, y ocasionalmente granate y biotita, donde estos últimos indican metamorfismo de alta temperatura (facie esquistos verdes en el grado de biotita). Este proceso de metamorfismo prógrado fue seguido por uno de metamorfismo retrógrado parcial. De esta manera, las condiciones de presión y temperatura del clímax metamórfico estimadas por Kato & Godoy (1995) son de 300-400°C y 3-4 kbar, respectivamente.

A las metapelitas pertenecientes a este complejo se les atribuye un origen principalmente detrítico, mientras que las metabasitas son caracterizadas por una composición basáltica de afinidad toleítica y alcalina. Esta diferencia es causada, según menciona Duhart *et al.* (2001) a que estas rocas se habrían generado por la acreción de material cortical proveniente de diferentes ambientes tectónicos a lo largo del margen suroeste de Gondwana.

Adicionalmente, Duhart *et al.* (2001) estimaron, mediante los métodos de Ar-Ar y K-Ar, 260-220 Ma como edad de la máxima deformación, mientras que la etapa previa de alta P/T se establece entre 320 y 300 Ma (Carbonífero Tardío). Por otro lado, razones de U/Pb en circones detríticos indican edades máximas de depositación pertenecientes al período comprendido entre el Devónico Medio y el Pérmico Temprano.

Finalmente, El CMBM presenta zonas de mineralización de sulfuros masivos, asociadas a anomalías de Au-As, Au-(Pb), Au-Cr, Au y Cu-Pb-Zn, con presencia de pirita y arsenopirita; lo que puede influir en los fluidos que percolen a través de estas rocas por medio de fracturas (Ordóñez & Crignola, 2003).

ii. Rocas asociadas al Batolito Norpatagónico.

El Batolito Norpatagónico (BNP), formado principalmente tonalitas y granodioritas, se extiende entre las latitudes 40° y 47°S (Adriasola *et al.* 2006) con una orientación aproximadamente N-S y con un ancho de hasta 200 km desde la

Cordillera Principal hasta la Cordillera de la Costa, cuyo emplazamiento está fuertemente controlado por el SFLO.

A partir del estudio de Pankhurst *et al.* (1992, 1999) se determina que este batolito comprende rocas de una serie calcoalcalina, predominando tonalitas y granodioritas. Su historia de intrusión se divide mediante una zonación cronológica que muestra edades ubicadas entre el Jurásico Tardío y el Cretácico Medio en los bordes este y oeste, y otras dentro del rango Mioceno temprano – Plioceno en el centro; la intermitencia de estos episodios de emplazamiento magmático correspondió a incrementos en la tasa de subducción y a disminuciones en el ángulo de convergencia respecto a la fosa Perú-Chile.

Los plutones con tasas de denudación mayores (0,7 – 3,1 mm/año) fueron encontrados a lo largo de la ZFLO, intruyendo complejos acrecionarios pertenecientes al Paleozoico Tardío a Mesozoico Temprano en el flanco occidental, y rocas volcánicas silíceas jurásicas en el flanco oriental. Algunos afloramientos muestran foliación tanto tectónica como magmática.

El flujo de calor regional estimado para el BNP es de ~80 – 100 mW/m² (Hamza & Muñoz, 1996; Muñoz, 1999; Adriasola *et al.*, 2006), mientras que las conductividades termales de granitoides varían entre 2,5 y 3,5 W/(m·K) (Seipold, 1998); por lo tanto, se han calculado gradientes geotermales alrededor de 32±8°C/km (Adriasola *et al.* 2006), los que pueden servir como datos basales ante las temperaturas calculadas en profundidad mediante las manifestaciones termales presentes.

- iii. Depósitos sedimentarios consolidados a no consolidados paleógenos-neógenos y cuaternarios en la Depresión Central.

Según lo observado en terreno estos están compuestos principalmente por depósitos fluviales y suelos arcillosos de gran espesor provenientes de la alteración de depósitos de lavas más antiguos, del tipo trumao. En las bahías que se abren hacia el Estuario Reloncaví y el Golfo de Ancud también se observan antiguos depósitos morrénicos pertenecientes a la última era glacial.

Secuencias volcano-sedimentarias

En general, estas secuencias se encuentran depositadas en cuencas sobre rocas metamórficas y miembros del Batolito Norpatagónico. Entre estas cuencas se destacan aquellas originadas por un evento tectónico mayor de subsidencia regional, probablemente relacionado a erosión por subducción (Encinas *et al.*, 2014); este evento habría generado cuencas marinas inestables alcanzando la zona batial inferior, como se estima para la formación Ayacara, del Mioceno temprano a medio (OIMvs), la que aflora entre los 42 y 43°S (Adriasola, 2003), acotada estructuralmente por una cuenca de antearco del Mioceno. De este modo, la edad de estas secuencias marcaría el momento del alzamiento y deformación del flanco occidental de los Andes Norpatagónicos y el inicio de la deformación transpresiva relacionada a la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui.

Estas secuencias están compuestas principalmente por conglomerados y areniscas volcánicas silíceas en su base, mientras que en su miembro superior incluye dacitas y fangolitas, presentando estructuras sin-sedimentarias y microfósiles que reafirman el ambiente batial.

Depósitos fluviales

Depósitos no consolidados, estratificados (de modo planar, cruzado y granodecreciente) de buena selección y redondeamiento, con imbricaciones observables. Forman terrazas antiguas bordeando los cursos actuales de los ríos.

Estos sedimentos son subyacidos por suelo de muy bajo espesor (entre 10 y 50 cm), el que se correlaciona estratigráficamente con depósitos glaciales y glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Pérez *et al.*, 2003); a partir de lo cual se asume su formación como posterior al último retiro de glaciares relacionados a la Glaciación Llanquihue (Lowell *et al.* 1995).

Depósitos morrénicos, glaciofluviales y glaciolacustres

En la Depresión Intermedia, la intensa erosión glacial generó profundas cuencas que fueron rellenadas por agua marina del Océano Pacífico, constituyendo el actual mar interior de Chiloé. El material removido producto de la erosión glacial fue depositado en toda la Depresión Intermedia, aflorando hoy en el borde occidental de la franja continental de la región, en las islas del mar interior de Chiloé y en las costas orientales de la isla Grande de Chiloé; estos depósitos corresponden a sedimentos morrénicos, glaciofluviales y glaciolacustres relacionados con las glaciaciones que afectaron toda la Región de Los Lagos: Río Llico, del Pleistoceno Medio (Plgf3); Santa María, del Pleistoceno Media a Superior (Plgl2, Plgf2), y Llanquihue, del Pleistoceno Superior (Plgl1, Plgf1) (Mercer, 1972, 1976; Porter, 1981). En general, en toda la región, los depósitos glaciales presentan algún contenido de oro detrítico de origen andino (Ordóñez, 2000).

Depósitos fluviales actuales

Estos depósitos constan principalmente de gravas y arenas holocenas asociadas a erosión fluvial variando en algunos sectores, asociados a ambientes de menor energía, a arenas y limos, a veces interdigitados con gravas. Estos se encuentran en las laderas y terrazas actuales de los principales ríos de la región (Pérez *et al.*, 2003).

Se caracterizan por ser depósitos clastosoportados, de selección moderada, y con clastos polimícticos (rocas piroclásticas e intrusivas, asociadas al Batolito Norpatagónico), a veces imbricados, de buen redondeamiento, cuya matriz arenosa está localmente ausente.

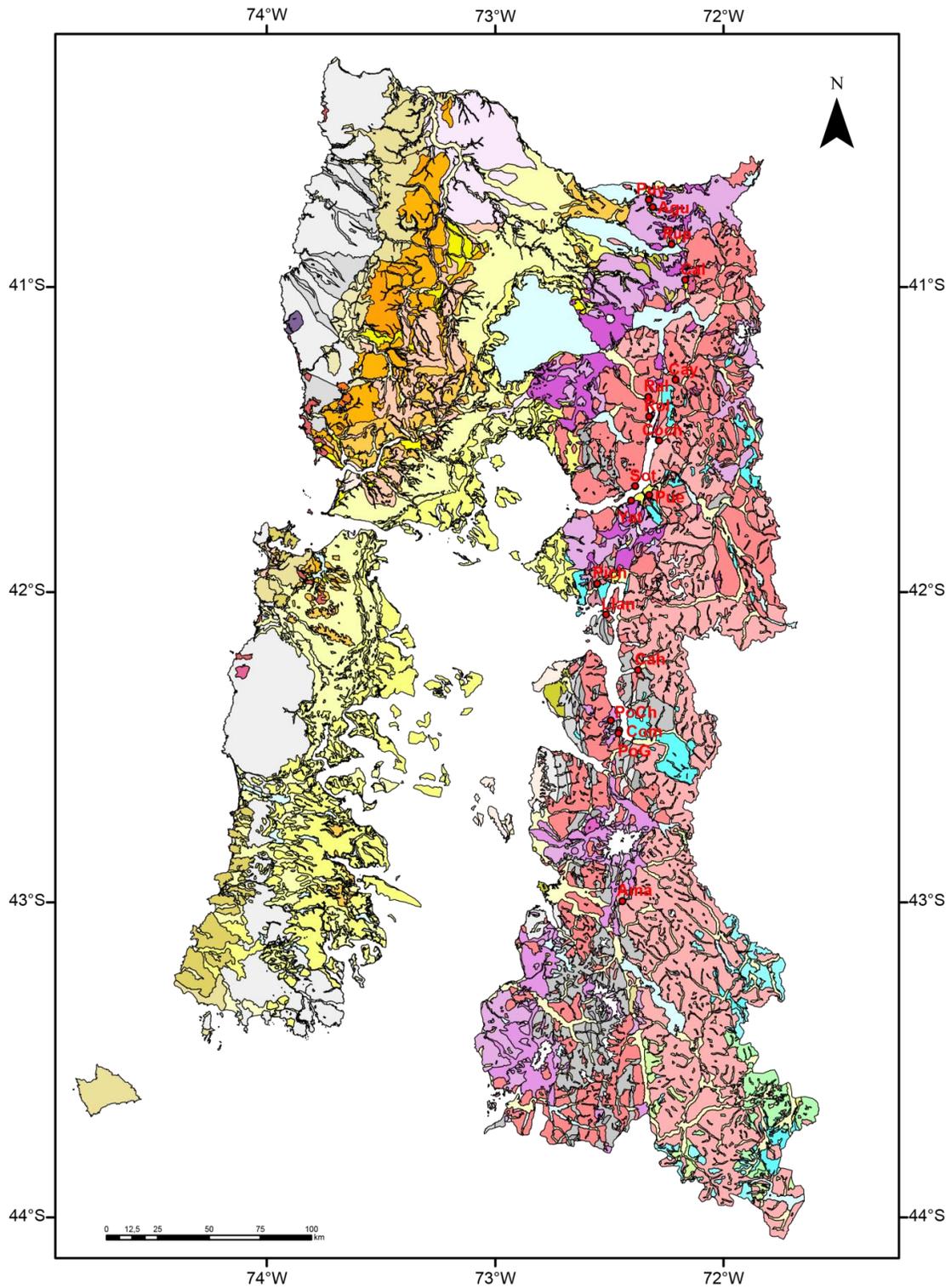


Figura 2.9: Mapa de distribución geológica de la Región de Los Lagos. BNP: Batolito Norpatagónico. CMBM: Complejo Metamórfico Bahía Mansa. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetúe. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo. (SERNAGEOMIN, 2000).

Leyenda

Unidades litológicas

	Heo. Dep. Eólicos.
	Hp. Dep. Litorales.
	Ha. Dep. Aluviales.
	Hc. Dep. Coluviales.
	Hd. Dep. Sedimentarios no consolidados (deltaicos).
	He. Dep. Estuarinos.
	PIHf. Dep. Fluviales.
	PIHp. Dep. Litorales.
	Plgf1a. Dep. Glaciofluviales plegados. Glaciación Llanquihue.
	Plgf1. Dep. Glaciolacustres. Glaciación Llanquihue.
	PIm1. Fm. Llahuén. Dep. Morrénicos. Glaciación Llanquihue.
	Plgf2. Dep. Lacustres. Glaciación Santa María.
	Plgf3. Dep. Glaciofluviales. Glaciación Río Lllico.
	Plgf2. Dep. Glaciofluviales. Glaciación Santa María.
	PIm2. Fm. Llahuén. Dep. Morrénicos. Glaciación Santa María.
	PIm3. Fm. Llahuén. Dep. Morrénicos. Glaciación Río Lllico.
	PIm4. Fm. Llahuén. Dep. Sedimentarios no consolidados (morrénicos). Glaciación Tegalda.
	Pldi. Dep. sedimentarios no consolidados (diamícticos antiguos, indiferenciados).
	Pldp. Abanicos de dep. Piroclásticos
	Plv. Lavas y depósitos piroclásticos y laháricos, asociados a estratovolcanes
	PIHv. Lavas y dep. piroclásticos y laháricos.
	Q3l. Estratovolcanes y Complejos Volcánicos. Lavas basálticas a riolíticas.
	Plav. Dep. de avalancha volcánica
	Plicg. Fm. Caleta Godoy
	Mg. BNP. Granitos, granodioritas, monzonitas, tonalitas, dioritas y gabros.
	Mi. Fm. Lacui.
	Ms. Areniscas, lutitas, conglomerados, fangolitas y tobas, de origen marino litoral.
	Msd. Fm. Santo Domingo.
	Oicc. Fm. Caleta Chonos.
	OIMp. estratos de Parga
	OIMc. Estratos de Cheuquemó
	OIMa. Complejo Volcánico Ancud.
	OIMvs. Fm. Ayacara. Conglomerados, areniscas, lutitas, tobas y areniscas tobáceas.
	OIMch. Estratos de Chonchi.

	OIMcp. Complejo Volcánico Caleta Parga
	OIMec. Complejo Volcánico Ensenada Capitanes
	EOldg. Dacita Gamboa.
	Eg. BNP
	Egm. Plutón Metalqui.
	Kg. BNP. Granitoides.
	JKg. BNP. Gabros y microgabros.
	Kv. Andesitas, brechas andesíticas a dacíticas, piroclásticas y tobas.
	Kvs. Andesitas y brechas andesíticas, dacitas y tobas; areniscas, lutitas y calizas marinas.
	JKv. Rocas piroclásticas, lavas andesíticas y cuerpos hipabisales andesíticos.
	JKs. Areniscas, lutitas y calizas, de origen marino.
	JKvs. Lavas porfídicas, brechas y cuerpos subvolcánicos.
	Jg. Dioritas, gabros y gabronoritas.
	Trs. Areniscas, pelitas, limonitas y conglomerados.
	PzTrbma. CMBM. Esquistos pelíticos y semipelíticos.
	PzTrbmb. CMBM. Esquistos máficos.
	PzTrbmc. CMBM. Esquistos anfibolíticos y rocas ultramáficas.
	PzTrbmd. CMBM. Milonitas de Tril Tril.
	Pzcp. CMBM. Esquistos pelíticos, anfibolitas y rocas ultramáficas.
	PTrg. Gabros y, en menor proporción, ultrabasitas.

Simbología

	Lago
	Hielo
	Fuentes termales estudiadas

2.2.3. Marco hidrológico

2.2.3.1. Sistemas fluviales

En la X región se destaca la existencia de numerosos esteros, ríos y lagos perennes, cuya ubicación muchas veces se relaciona con sectores permeabilidad elevada, ya sea debido a la litología presente o a la presencia de estructuras, como trazas de la ZFLO. Su ubicación dentro de la región se detalla en la Figura 2.10.

Dentro de estos sistemas se seleccionan aquellos que se ubican cercanos a las fuentes termales estudiadas en el presente trabajo, como se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Índice de aguas superficiales analizadas. Las filas destacadas (celestes) muestran ríos y esteros próximos a las fuentes termales.

Código	Nombre	Caudal [l/s]	X [UTM]	Y [UTM]	Alt [m.s.n.m]	pH	T medida [°C]
A	Río Petrohué	278.000	723173	5417611	5	7,34	15,4
B	Río Cochamó	50.000	731290	5406002	25	6,71	11,6
C	Mar Estuario Reloncaví	-	718249	5385433	0	7,86	15,3
D	Mar Estuario Reloncaví	-	716981	5380677	0	7,6	19,1
E	Estero Pichicolo	50	702874	5350330	75	6,41	10,8
F	Mar Fiordo El Comau	-	705681	5339050	0	8,08	18,1
G	Río Cahuelmó	10	716672	5318760	2	5,96	11,7
H	Lluvia Península de Huequi	-	709370	5302513	42	6,43	-
I	Río Punta Calle	15.000	706312	5300883	370	6,96	10
J	Río san Antonio	-	708458	5236287	251	7,13	10,8
K	Río Porcelana	30.000	708933	5296263	117	7,31	11
L	Mar Fiordo El Comau	-	710859	5294831	0	7,5	19,8

Cada una de los ríos y esteros forma parte de la recarga de agua de los sistemas geotermales, por lo que su reconocimiento es de mucha importancia.

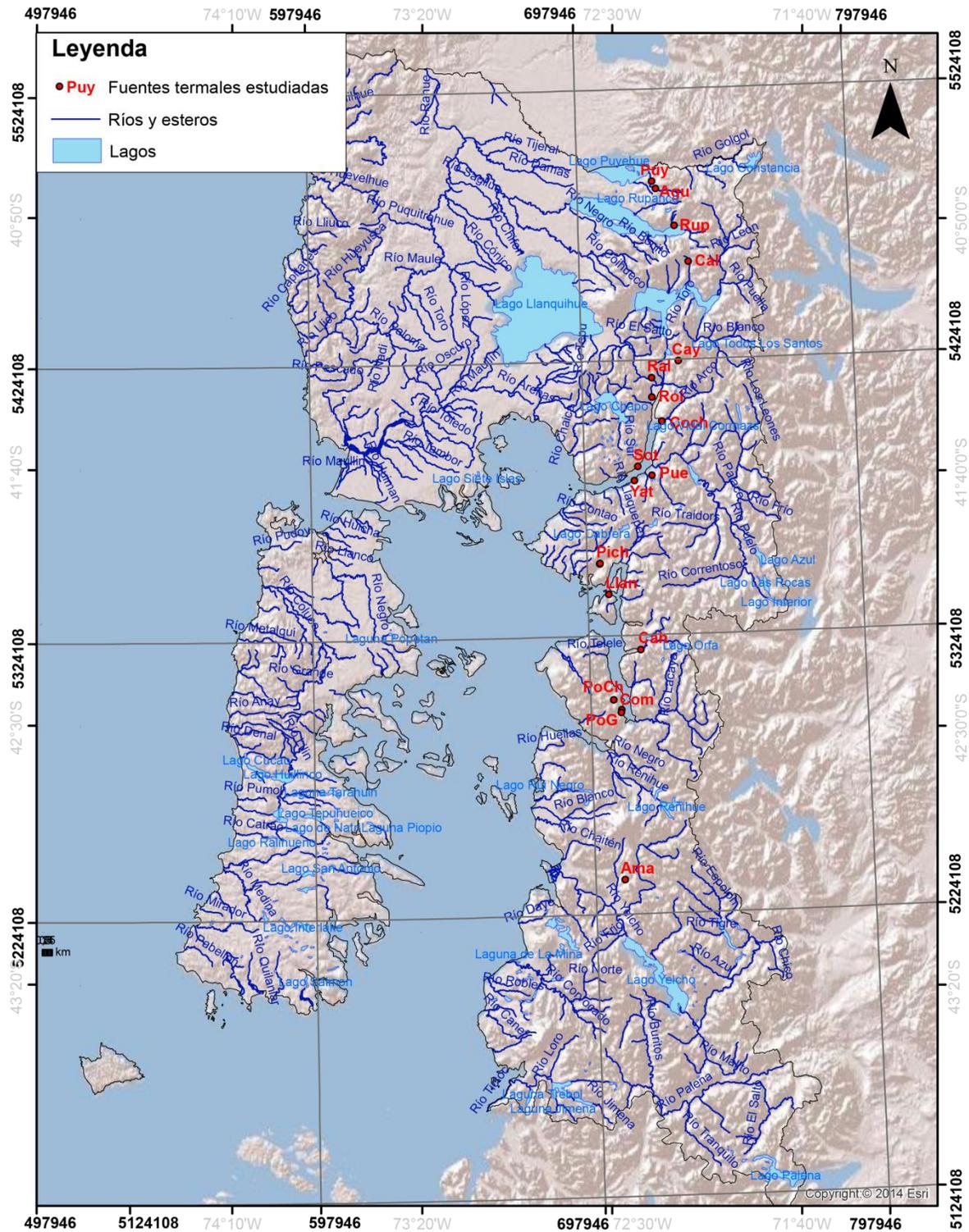


Figura 2.10: Ubicación de los lagos y principales sistemas fluviales de la Región de Los Lagos. (Albers, 2012). Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetúe. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

2.2.3.2. Pluviometría

Como se señaló anteriormente, las aguas pertenecientes a los sistemas geotérmicos suelen verse afectadas por aportes de agua superficial durante su proceso de transporte lateral, por ende el conocer las características pluviales de la Región de Los Lagos puede aportar información adicional.

La Región de los Lagos se destaca a nivel histórico por su alto régimen pluviométrico, respecto al resto del país, como se destaca en la Tabla 3 y la Figura 2.11. La precipitación normal anual medida en las estaciones de Osorno y Puerto Montt corresponde a 1.331,8 y 1.802,5 mm, respectivamente, según la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Sin embargo, al tratarse de una zona muy lluviosa es importante conocer las intensidades de precipitación en 24 horas para distintos períodos de retorno, las cuales se expresan en la Tabla 3.

Tabla 3: Índice de precipitaciones máximas en 24 horas para distintos períodos de retorno (datos en mm). Fuente: DMC, año desconocido.

Estación	60 años	30 años	20 años	15 años	10 años	5 años
Osorno	96,4	96,0	94,6	88,0	76,4	73,0
La Ensenada	135,7	135,1	133,1	123,9	107,5	102,7
Puerto Montt	177,0	117,8	116,0	100,4	90,0	82,9

Por otra parte, las precipitaciones medidas durante el año 2013 para los meses de agosto y diciembre, correspondientes al más lluvioso y al más seco, respectivamente, se distribuyen de distinta manera dentro de la región, cuya distribución se observa en la Figura 2.11.

Finalmente, debido a la evidente relevancia del aporte pluvial en las recargas de los sistemas geotérmicos, se obtuvo una muestra de agua de lluvia de la zona central de la región, la cual presenta muy bajas concentraciones de todos los principales iones y elementos traza, por lo que su atribución a las aguas involucradas en los sistemas acuíferos es principalmente neutralizante.

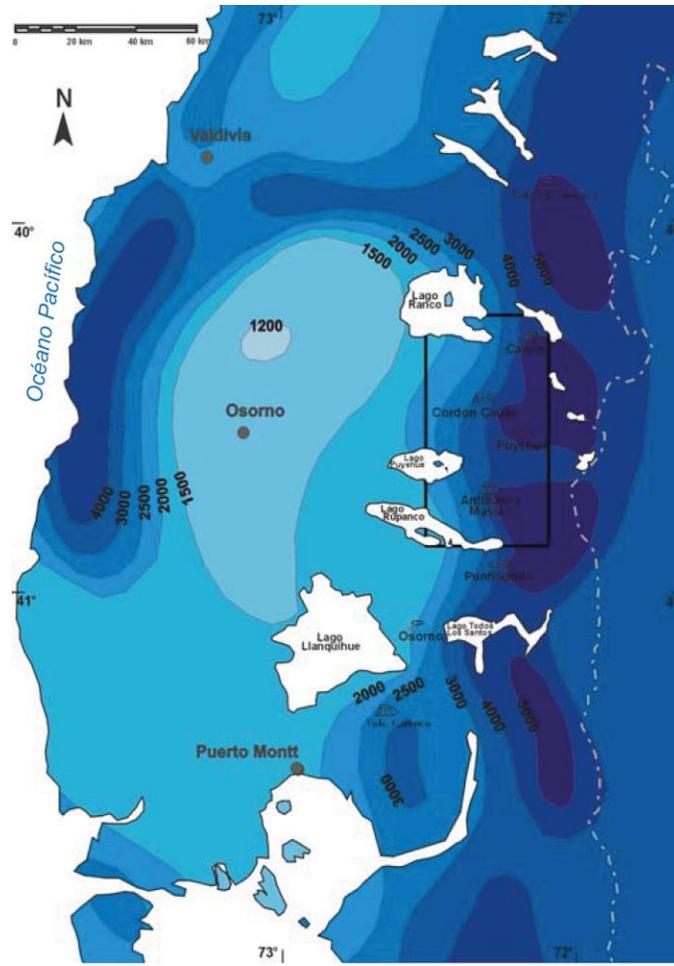


Figura 2.11: Mapa de isoyetas de la Región de Los Lagos (Klaus, 2004).

3. Manifestaciones termales analizadas

En Chile la actividad geotérmica está dominada por el intenso volcanismo presente en la región, atribuible a las condiciones tectónicas mencionadas en el capítulo 2.2.1 dirigidas por las características de la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana desde la zona norte del país hasta los 46° latitud sur (Lahsen *et al.*, 2005; Lahsen *et al.*, 2010); al igual como ocurre con los sistemas estructurales, los cuales se encuentran alineados en sentido N-S, específicamente la ZFLO. Estos factores muestran tener cierta relación espacial con la ubicación de las manifestaciones termales, por lo menos en la región de estudio, siguiendo una cierta orientación N-S.

En la Región de Los Lagos se han catastrado 36 manifestaciones cuyas temperaturas abarcan valores desde los 20° a sobre los 60°C, distribuidas a lo largo de la región, todas con una gran influencia de aguas superficiales, las que corresponden principalmente a aguas lluvias, sistemas fluviales y aguas marinas que interactúan con las zonas costeras de litología y depósitos permeables.

A continuación se presentan las 18 manifestaciones termales visitadas en la X^a Región, en orden de norte a sur.

Tabla 4: Resumen de las muestras de aguas termales analizadas y sus códigos definidos para el presente trabajo.

Fuente termal	Fecha	X	Y	Alt [m.s.n.m]	pH	Temp [°C]
Puyehue	12-04-2013	725819	5489795	337	8,51	58,2
Aguas Calientes	15-04-2013	727207	5487096	464	7,69	60,8
Rupanco	12-04-2013	733718	5473169	128	7,86	54,4
El Callao	11-04-2013	738413	5459901	427	9,5	55,9
Cayetué	15-04-2013	733655	5423461	179	7,64	50,5
Ralún	12-04-2013	723574	5417562	4	7,25	40,1
Rollizos (marea alta)	11-04-2013	723569	5410446	11	7,82	29,7
Rollizos (marea baja)	21-03-2014	723569	5410444	0	8,04	28,4
Cochamó	11-04-2013	726861	5401532	4	7,73	25,9
Cochamó	21-03-2014	726971	5401512	0	8,02	24,7
Sotomó	20-03-2014	717666	5385199	28	7,94	30,8
Puelo	22-01-2014	722704	5381914	45	7,19	30,2
El Yate	24-01-2014	716152	5380099	2	8,01	34,9
Pichicolo	20-01-2014	702742	5350125	95	7,94	42,2
Pichicolo	21-01-2014	702763	5350158	85	7,06	49,6
Pichicolo	23-01-2014	702877	5350334	83	8,95	56,6
Llancahué	23-01-2014	705681	5339050	0	7,83	51,6
Cahuelmó	23-01-2014	716672	5318760	2	9,06	60,9
Porcelana Chico	15-03-2014	706312	5300883	370	8,04	85,1
El Comau	17-03-2014	709196	5297272	21	7,91	74,8
Porcelana Grande	17-03-2014	708960	5296258	73	7,33	57,3
El Amarillo	18-03-2014	708511	5236289	264	9,50	53,8
El Amarillo	18-03-2014	708532	5236328	266	9,49	53,1

Tabla 5: Resumen de las muestras de aguas superficiales analizadas y sus códigos definidos para el presente trabajo.

Agua superficial	Fecha	X	Y	Alt [m.s.n.m]	pH	Temp [°C]
Río Petrohué	21-03-2014	723173	5417611	5	7,34	15,4
Río Cochamó	20-03-2014	731290	5406002	25	6,71	11,6
Mar Estuario Reloncaví	20-03-2014	718249	5385433	0	7,86	15,3
Mar Estuario Reloncaví	24-01-2014	716981	5380677	0	7,6	19,1
Estero Pichicolo	23-01-2014	702874	5350330	75	6,41	10,8
Mar Fiordo El Comau	23-01-2014	705681	5339050	0	8,08	18,1
Río Cahuelmó	23-01-2014	716672	5318760	2	5,96	11,7
Lluvia Península de Huequi	17-02-2014	709370	5302513	42	6,43	
Río Punta Calle	15-03-2014	706312	5300883	370	6,96	10
Río san Antonio	18-03-2014	708458	5236287	251	7,13	10,8
Río Porcelana	17-02-2014	708933	5296263	117	7,31	11
Mar Fiordo El Comau	17-02-2014	710859	5294831	0	7,5	19,8

3.1. Puyehue (725.819E/5.489.795N)

Estas aguas termales se encuentran a 3 km del borde sureste del lago Puyehue a 337 m.s.n.m., sobre una de las trazas del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui, dentro del Parque Nacional homónimo, en presencia del complejo turístico Termas de Puyehue, donde se le ha construido un pozo de recolección, con mampostería y una bomba de succión. A las aguas termales se les atribuye uso de balneario por parte del hotel, el que incluye variados servicios asociados a los manantiales.

En general, estas aguas levemente básicas poseen temperaturas que se aproximan a los 60°C, aflorando sobre sedimentos de remoción, principalmente rocas volcánicas y parte de la mampostería perteneciente a la construcción del pozo expuesto. El burbujeo de CO₂ existente es leve a moderado, al igual que el vapor emitido, mientras que el agua es dulce, translúcida e inodora. Paralelamente se observa vegetación propia de ambientes de agua dulce y boscosos, adicional a la presencia de algas finas verde a verde oscuro en las paredes de la instalación. La geoquímica puede estar levemente alterada debido a que la gente suele lanzar monedas dentro del pozo, las que se encuentran en el piso de este.



Figura 3.1: Pozo que encierra la surgencia de agua termal, del complejo Termas de Puyehue.



Figura 3.2: Vertiente principal del complejo Termas de Puyehue. En esta imagen es posible observar un fuerte burbujeo (CO₂), y lo incoloro de las aguas.

3.2. Aguas Calientes (727.207E/5.487.096N)

Las Termas Aguas Calientes se ubican dentro del Parque Nacional Puyehue a cargo de la Corporación Nacional Forestal (Conaf), camino al volcán Antillanca, en la terraza fluvial de la ladera norte del Río Chanleufú, las que se utilizan para el desarrollo del balneario y para la calefacción de las instalaciones presentes, mediante la función de un pozo y bomba de extracción.

Se encuentra aflorando mediante dos manifestaciones correspondiendo a fuentes con alta emisión de vapor y de aguas neutras, dulces, translúcidas, con un casi imperceptible olor a ácido sulfhídrico y con burbujeo moderado a intenso de CO₂. Las temperaturas medidas sobrepasan ampliamente los 60°C, registrando hasta 65°C, aunque se estima una alta influencia fluvial subterránea, por lo que en períodos de crecidas del río se asume que la temperatura pueda bajar y acercarse a los 50°C. El caudal pareciera ir en descenso dentro de los últimos años, midiéndose actualmente 4,4 l/s a partir de un test de bombeo.



Figura 3.3: Instalación de pozo en zona de surgencia de vertientes calientes, en el balneario Termas de Aguas Calientes. Al costado derecho de la imagen, se puede apreciar el río Chanleufú.

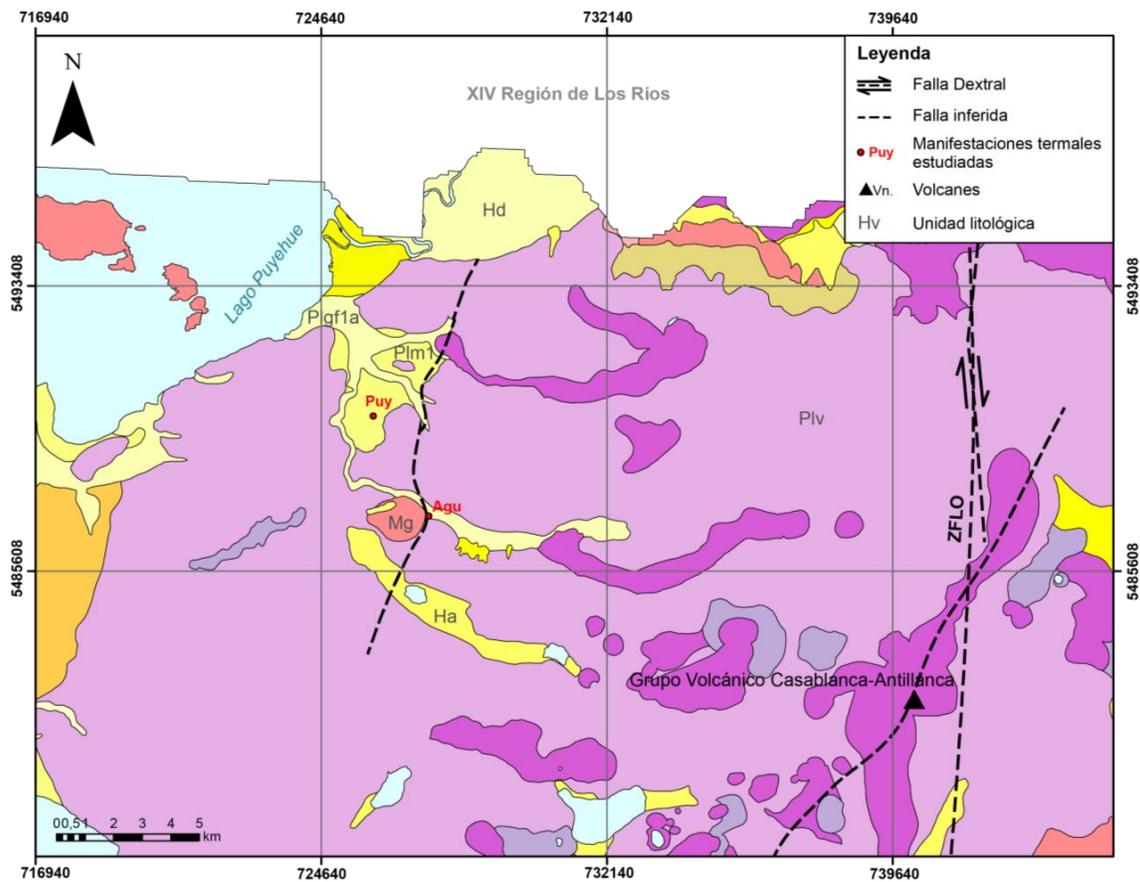


Figura 3.4: Geología que rodea las termas de Puyehue (Puy) y Aguas Calientes (Agu). (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Klaus, 2003; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).

3.3. Rupanco (733.718E/5.473.169N)

Las Termas de Rupanco se ubican en una extensión de 5 km sobre la costa noreste del lago con el mismo nombre, con su máxima expresión entre los ríos Judío y Las Turbinas, de manera paralela a los escarpes presentes. En la zona existe morfología relacionada al volcán Casablanca, al cual se puede atribuir un importante cono monogénético visible hacia el oeste de las manifestaciones. Estas se muestran en forma de pozas con dimensiones que varían desde los 0,4 a 5 m de diámetro y profundidades inferiores a 50 cm, cuyo número varía según la temporada debido a que el nivel del lago en algunos casos aumenta y cubre varios de estos pozas, ya que se encuentran a menos de 2 m de distancia de la orilla (Figura 3.5).

El área termal se caracteriza por presentar arenas medias a gruesas y gravas de tono oscuro atribuibles a un origen volcánico, al igual que la presencia de fragmentos rocosos correspondientes a lavas. Las aguas se muestran inodoras, translúcidas, sin burbujeo alguno y con temperaturas que superan los 50°C, llegando hasta la máxima medida de 54°C.



Figura 3.5: Pozas calientes aflorando en el borde norte del lago Rupanco.

3.4. El Callao (738.413E/5.459.901N)

Este afloramiento se ubica en la ladera derecha del río Sin Nombre, ubicado a 15 km de la ribera norte del lago Todos Los Santos, sector de la Península; a las faldas orientales del volcán Puntiajudo, el cual pertenece al Cordón Los Cenizos y corresponde a un estratovolcán, cuya última erupción se habría registrado en 1930 sin mayores antecedentes. El manantial, de una superficie que no supera los 0,5 m² aflora en sedimentos arcillosos de origen volcánico asociados al Cordón Los Cenizos. Las aguas son levemente básicas y presentan burbujeo de CO₂, mas no se observa mineralogía de alteración, son inodoras, translúcidas y coexisten con vegetación típica de ambientes de agua dulce. La temperatura de las aguas varía alrededor de los 55 y 56°C; mientras que su caudal no supera los 25 ml/s. La zona presenta numerosos escarpes en rocas ígneas leucocráticas que evidencian la actividad de una de las trazas del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui.

Actualmente las aguas tienen uso de balneario debido al bajo caudal y a las bajas temperaturas, las instalaciones son artesanales y consisten en tinajas de madera.



Figura 3.6: Surgencia del manantial de El Callao, el cual alcanza superficie en una zona de depósitos arcillosos mezclados con pocos depósitos fluviales asociados al río Sin Nombre.

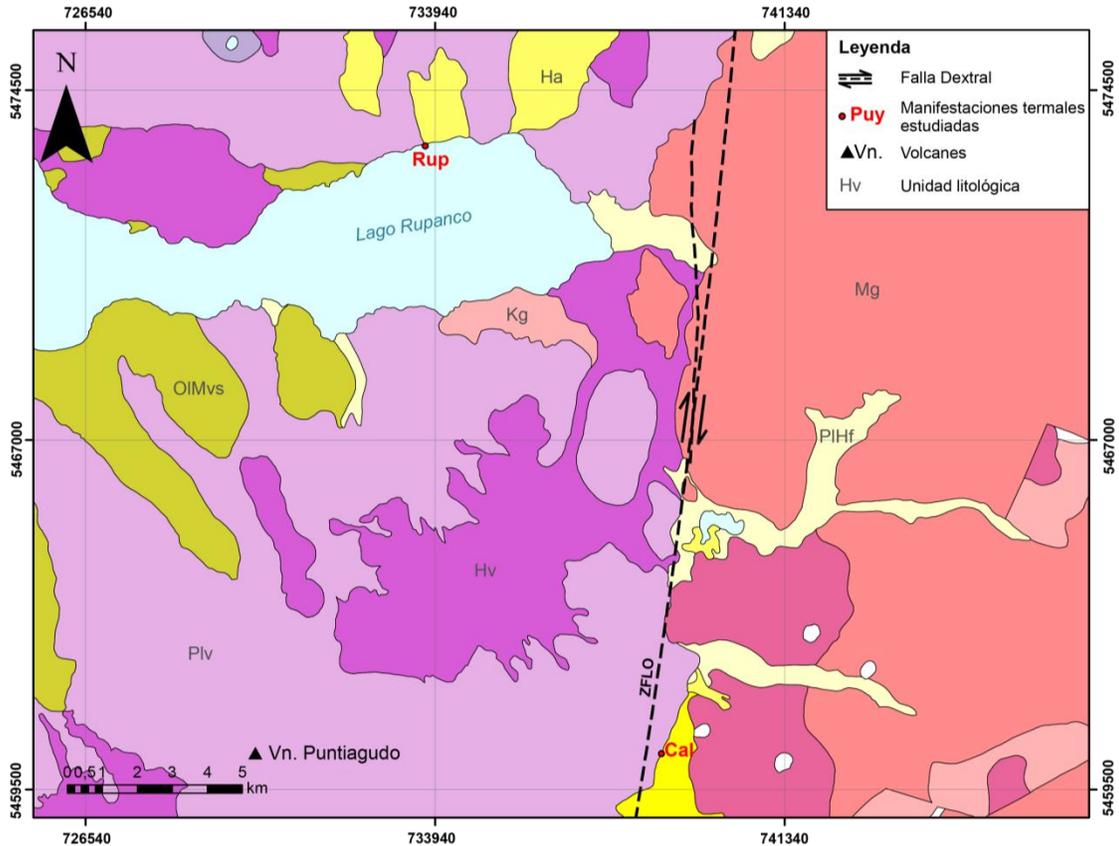


Figura 3.7: Geología que rodea las termas de Rupanco (Rup) y El Callao (Cal) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Klaus, 2003; Rosenau, 2004; Rosenau et al., 2006)

3.5. Cayetú (733.655E/5.423.461N)

Estas aguas termales, carentes de instalación, afloran cerca de 4 km al sureste del lago Cayetú, a las cuales se puede acceder solo mediante una cabalgata de 4-5 horas o caminata de un día entero. Las aguas afloran en medio de una zona fluvio-lacustre con características pantanosas cuyas dimensiones son de aproximadamente 20 x 15 m, de esta manera se presentan muy turbias, debido al fango y a los restos de algas que se encuentran en suspensión, mientras se propicia un ambiente anóxico, llegándose a medir una concentración de O_2 inferior a 0,6 mg/l.

Estas aguas neutras y dulces alcanzan una temperatura de $50,5^\circ C$, mostrando un leve burbujeo de CO_2 y altas emanaciones de vapor, en el cual se percibe un fuerte olor a ácido sulfhídrico y a descomposición vegetal. No se

observa mineralogía de alteración y su caudal es muy bajo no sobrepasando los 0,5 l/s.



Figura 3.8: Surgencia de poza caliente, correspondiente a la zona de Cayetué. A la izquierda se encuentra el sector que presenta mayor temperatura, pero con mayor cantidad de fango que el espejo de agua que se observa a la derecha de la imagen.

3.6. Ralún (723.574E/5.417.562N)

Los Baños de Ralún, también llamados Termas de Petrohué, se encuentran sobre la llanura de inundación de la ladera derecha del río homónimo, lugar al que se debe acceder cruzando el río en bote o lancha. Se manifiestan en forma de pozas de surgencia excavadas, de un diámetro promedio de 6,2 m y de 33 cm de profundidad, sobre sedimentos fluviales de origen volcánico (arenas medias a gruesas de color gris oscuro) entre rodados dioríticos orientados, provenientes de un gran escarpe en la ladera contraria. Las pozas muestran leves emisiones de vapor y presentan un burbujeo muy poco significativo de CO₂. Las aguas evidencian importante olor a ácido sulfídrico y son principalmente translúcidas, aunque dentro de las mismas pozas se observa un poco de turbidez, lo que se debe a sedimentos y posibles microorganismos en suspensión.

Su uso es de balneario y no posee instalaciones, sin embargo en algunos casos suelen presentarse mezclas de aguas termales con aguas fluviales

provenientes del Río Petrohué generando una gama de temperaturas que varían desde 22 a 40°C.



Figura 3.9: Vista de las manifestaciones termales del sector de Ralún, sobre la rivera izquierda al río homónimo.

3.7. Rollizos (723.569E/5.410.446N)

Esta manifestación se ubica al oeste de la península de Rollizos al nivel del mar, sobre una rústica instalación consistente en una plataforma que se eleva sobre la zona intermareal que se encuentra en la costa de la bahía de Ralún. La plataforma consta de una bomba de succión unida a un pozo de 29 m de profundidad y una tinaja de madera de, aproximadamente, 2 m³; la cual pertenece a las dependencias del ex hotel Ralún.

Las surgencias de agua termal son levemente cloruradas dado que se ubican en medio de la zona intermareal aflorando de manera puntual y distribuyéndose todas cercanas entre sí, donde muestran burbujeo moderado a intenso de CO₂ y olor moderado a ácido sulfhídrico. Según se observa en el agua bombeada se ve que esta es translúcida y muy poco amarillenta, además de tener un caudal estimado de 5 l/s, con una temperatura medida cercana a los 30°C. La vegetación presente corresponde principalmente a juncos típicos de este tipo de zonas.



Figura 3.10: Zona donde emergen las aguas termales de Rollizos con abundante burbujeo, en medio de una zona de mezcla entre aguas dulces y aguas estuariales.



Figura 3.11: Lugar donde se obtuvieron las muestras de agua utilizadas para los análisis geoquímicos de las termas de Rollizos. El sector consta de un pozo de bombeo, el cual se acumula en la tinaja que se muestra en la imagen.

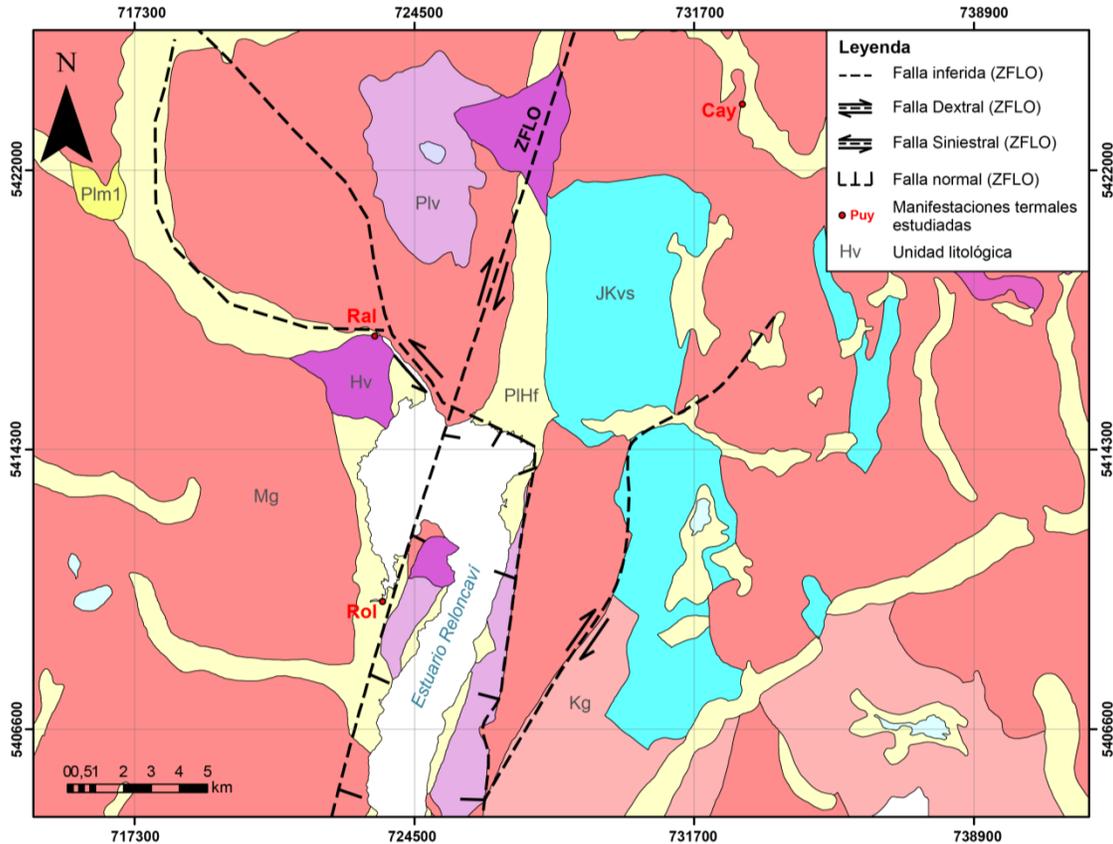


Figura 3.12: Geología que rodea las termas de Cayetúé (Cay), Ralún (Ral) y Rollizos (Rol) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).

3.8. Cochamó (786.861E/5.401.532N)

También conocidos como Baños Concha, estos manantiales, sin instalación alguna, afloran de manera difusa en la ladera izquierda del río del mismo nombre, a un costado de la ruta V-69, que une Puerto Varas con Puelo. Las aguas afloran sobre el delta del río, la cual es al mismo tiempo una zona intermareal fangosa de bajo caudal fluvial, donde las aguas surgen entre rodados pertenecientes a escombros de ladera, donde el aporte marino aumenta de manera importante en períodos de marea alta, por lo que los altos valores conductividad eléctrica (relacionados a la presencia de cloruros): sobre los 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Pérez, 1999; Risacher & Hauser, 2008; y el presente estudio), pueden atribuirse a una importante influencia marina, que podría evidenciarse mediante la presencia de costras salinas.

Las aguas presentan olor a ácido sulfhídrico, sabor salado y un leve burbujeo de CO₂, son translúcidas a moderadamente amarillentas, afloran con una temperatura de 26°C y se observa un caudal no mayor a 1 l/s. Además, coexisten con vegetación típica de zonas estuariales, principalmente juncales.



Figura 3.13: Vista al oeste desde el sector de surgencias termales de Concha, en una zona de dominio fluvial que presenta gran influencia marina en períodos de marea alta.



Figura 3.14: Vista del lugar de obtención de muestras de las aguas termales Concha. El color blanquecino de los rodados se debe a la existencia de finas costras salinas.

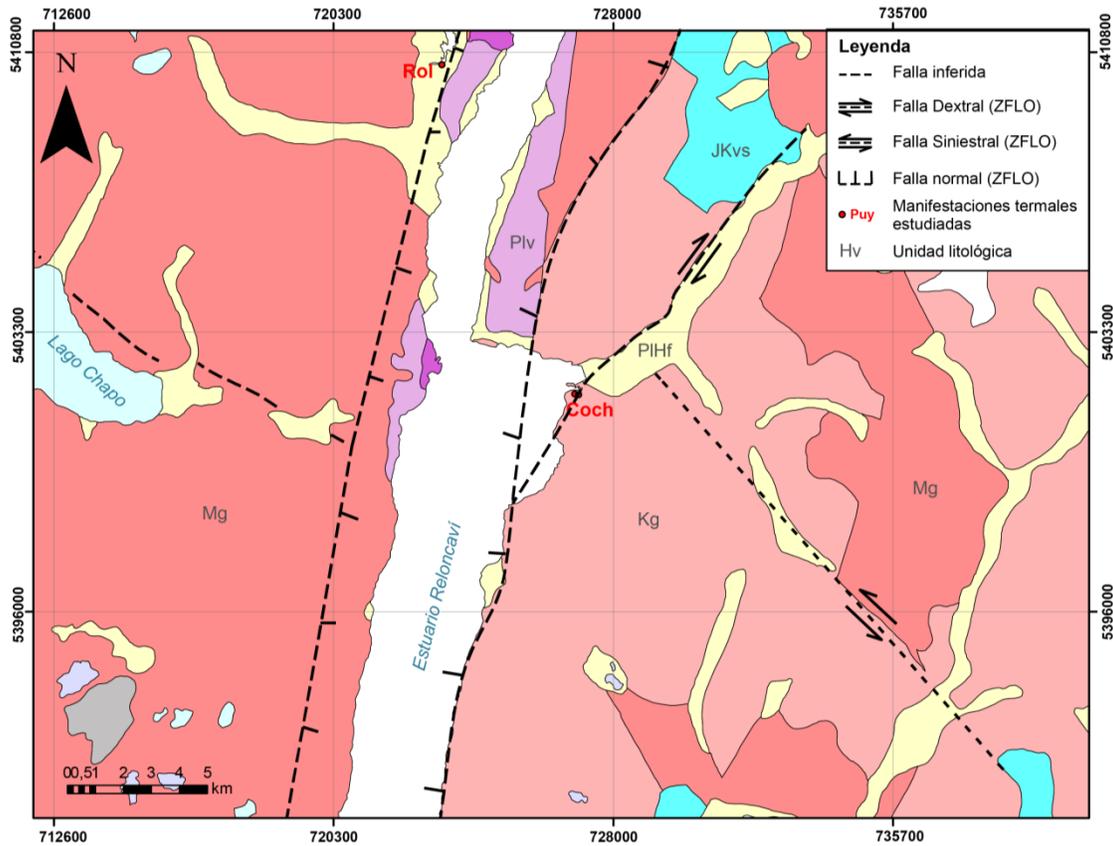


Figura 3.15: Geología que rodea las termas de Rollizos (Rol) y de Cochamó (Coch) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).

3.9. Sotomó (717.7145E/5.385.151N)

Esta manifestación corresponde a aguas de temperatura media (34,9°C), con infraestructuras muy rudimentarias para uso de balneario, represada con tablonces de madera. Se ubica en la ladera derecha del Estuario de Reloncaví, en un área dominada por las aguas marinas, lo que provoca que estas fuentes sean cubiertas en períodos de marea alta. La roca albergante corresponde a granodioritas pertenecientes al Batolito Norpatagónico con alteración cuarzo-sericita (silificadas), cloritización, epidotización muy leve y presencia de pequeños cristales de pirita. Estas rocas presentan fracturas que mantean hacia el SW paralelas entre sí (Figura 3.16); sobre estas rocas se encuentran depósitos morrénicos y fluviales recientes no consolidados.

Estas aguas, de régimen continuo, presentan un leve olor a ácido sulfhídrico, casi no hay emisión de vapor, y se observa burbujeo de CO₂ interrumpido y muy leve. También se pueden describir como aguas translúcidas y no contienen ningún tipo de vegetación ni algas en su interior, lo que se asocia, probablemente, a la intervención antropogénica.



Figura 3.16: Vista del afloramiento de granodioritas del BNP en el que emergen las aguas termales de las Termas de Sotomó (a la derecha de la zona fotografiada). Se indican con líneas blancas los planos aparentes del set de fracturas con mayor frecuencia observado en las rocas.

3.10. Puelo (722.705E/5.381.899N)

A estas aguas termales puede accederse por la ruta 7, a la altura de Caleta Puelche, ingresando por el comienzo de la ruta V-69, entre los ríos Blanco y Puelo Chico, o bien tomar esta misma ruta desde Puerto Varas, mediante el camino internacional 225. Dentro de la propiedad privada se encuentran dos surgencias de aguas termales de bajo caudal, aflorando entre secuencias de rocas volcánicas andesíticas silicificadas y depósitos lacustres, en el comienzo de la ladera N de un pequeño cerro, en presencia de estructuras de falla y al NW de una laguna sin nombre, rodeada de sectores pantanosos.

Esta surgencia presenta aguas de turbidez baja, insípidas, con ausencia de burbujeo, con un leve olor a ácido sulfhídrico, relativamente neutras y con temperaturas máximas registradas de 35,2 (Risacher & Hauser, 2008) y 30,2°C (medida en el presente estudio).



Figura 3.17: Origen de las aguas termales de Puelo. En esta imagen se observa el área de surgencia de mayor temperatura medida, en una zona de escombros de ladera.



Figura 3.18: Sector donde se encuentran los manantiales de Puelo. Las aguas termales escurren hacia la laguna que se ubica siguiendo el fondo de la imagen.

3.11. El Yate (716.152E/5.380.099N)

Esta pequeña poza tibia se encuentra sobre un escarpe costero del estuario Reloncaví, cerca de las faldas del volcán Yate, en dirección NW, aflora sobre grandes rodados de playa cubiertos por depósitos fluviales, corresponde a una surgencia puntual de muy bajo caudal y con vestigios que evidencian un antiguo uso de balneario. Solo se puede llegar a esta manifestación durante períodos de marea baja, embarcando desde una pequeña playa ubicada a 1 km al NE en la misma rivera, próxima a una zona de criaderos de *choritos*.

Presenta temperaturas cercanas a los 35°C, las que pueden estar influidas en parte por su baja circulación y exposición al sol. Estas aguas inodoras, insípidas e incoloras, con algas en su fondo, carentes de burbujeo y de emanaciones de vapor, poseen un valor de pH próximo a 8.



Figura 3.19: Poza tibia de El Yate. Se ve que sus dimensiones pueden intervenir en que parte del calor que eleva sus temperaturas por sobre las de ambiente provenga del sol.



Figura 3.20: Manifestación termal El Yate, a orillas del Estuario Reloncaví. La circunferencia blanca indica la posición del afloramiento entre rocas granodioríticas.

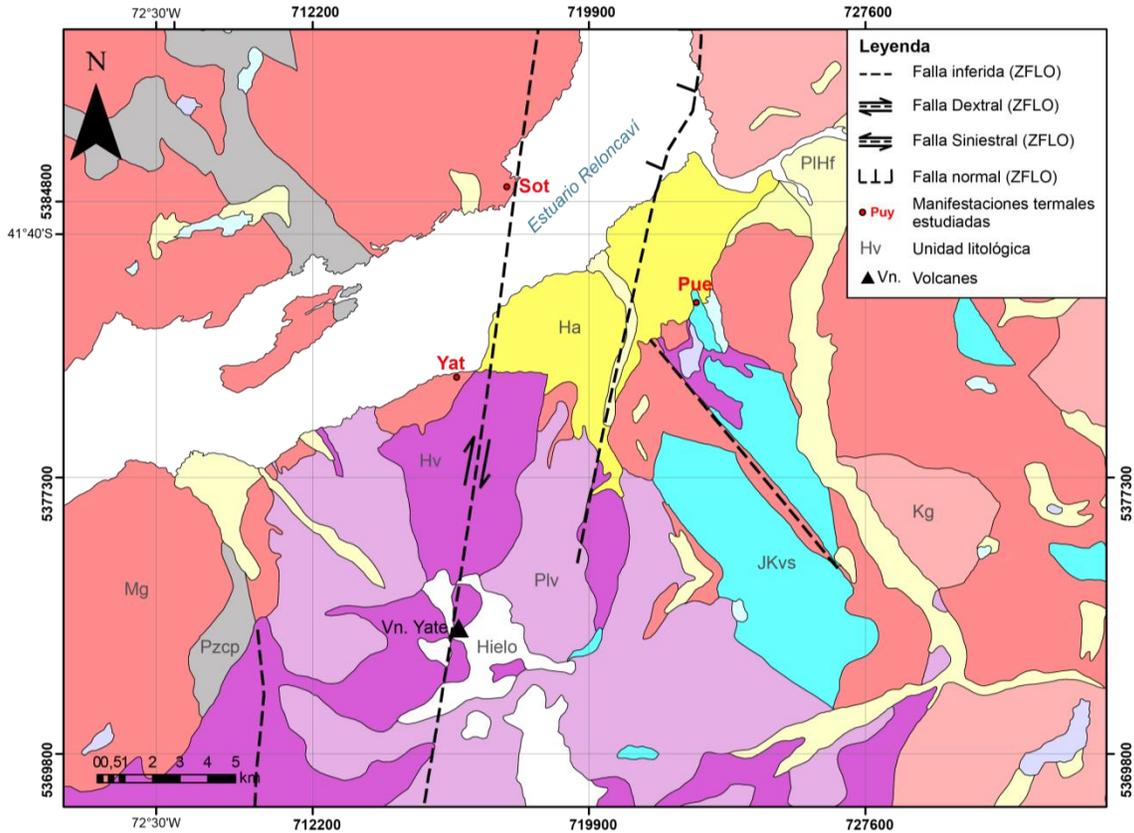


Figura 3.21: Geología que rodea las termas de Sotomó (Sot), Puelo (Pue) y El Yate (Yat) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).

3.12. Pichicolo (702.742E/5.350.125N)

Las termas de Pichicolo corresponden a un complejo turístico con características de balneario ubicado cerca del kilómetro 90 de la Carretera Austral, localizado en un sector de surgencias de aguas termales, las que principalmente afloran en contactos entre arcillas de origen volcánico, depósitos de terrazas fluviales de distintas edades y secuencias de rocas volcánicas andesíticas, sobre la ladera izquierda del río homónimo, asociadas a una zona de amplio dominio estructural perteneciente a la ZFLO. En el área existen ocho surgencias reconocidas, las que se encuentran alineadas entre sí en sentido NE-SW, cuyas temperaturas varían entre los 27,3 y los 56°C, según lo registrado en este estudio.

Las aguas presentan un pH neutro, olor a azufre moderado, emanación de vapor, son burbujeantes (CO₂) y translúcidas. La mayoría de los manantiales son carentes de instalación, mientras que otras solo presentan un pequeño represamiento en madera.



Figura 3.22: Vertiente Arrayán, perteneciente a las Termas de Pichicolo. Esta aflora de manera difusa dentro del represamiento de madera que se observa en la figura, y se ubica al lado de un riachuelo de agua fría, que se vuelve tibia donde se mezcla con las aguas termales.



Figura 3.23: Vertiente Chucao, perteneciente a las Termas de Pichicolo. En esta es donde se registró la mayor temperatura, alcanzando los 56°C.

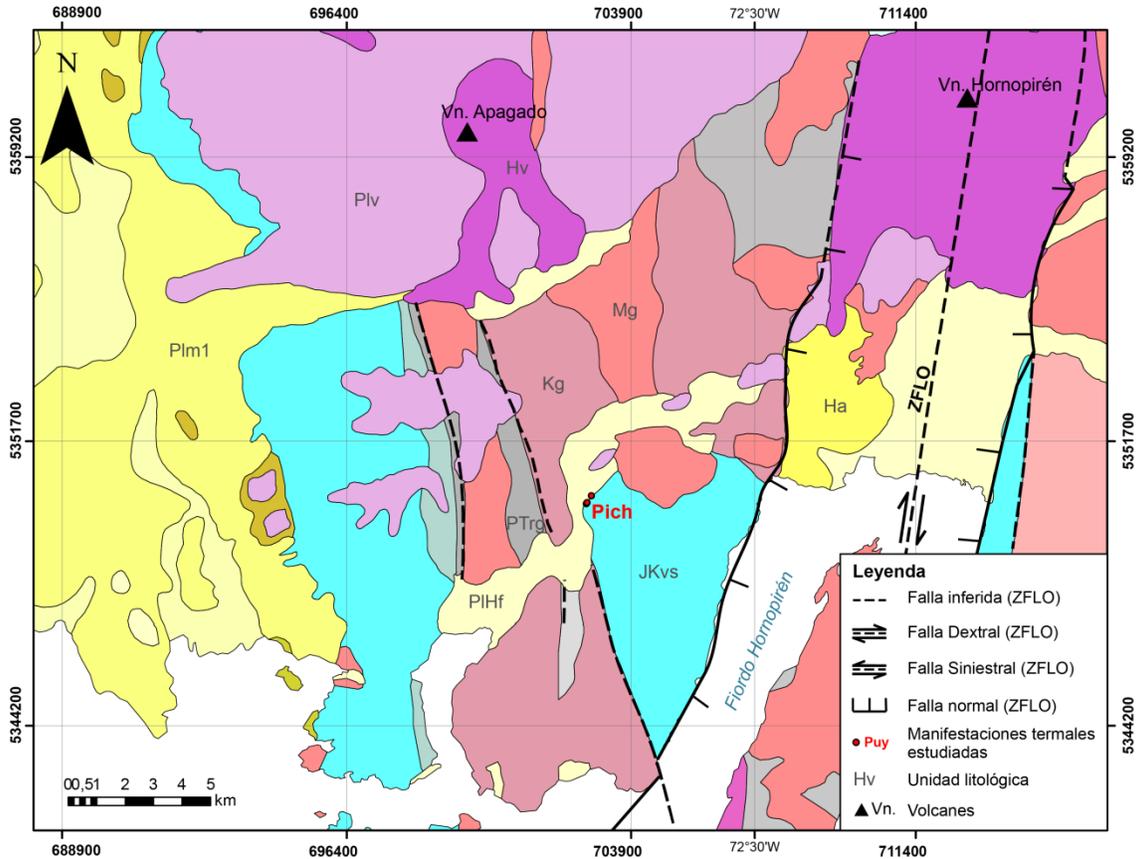


Figura 3.24: Geología que rodea las termas de Pichiccolo (Pich) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).

3.13. Llancahué (705.682E/5.339.049N)

En el hotel Termas de Llancahué se encuentran las fuentes de aguas calientes, las que se encuentran al nivel del mar, en el extremo norte de la isla Llancahué, a la que se accede en embarcación desde Hornopirén, navegando a través del fiordo del mismo nombre. Existen cuatro surgencias ubicadas en la costa de la isla, de los cuales 3 son apreciables solo con marea baja; a partir de ello se asume una gran influencia marina evidenciada por los cambios observados en los caudales de las manifestaciones dependiendo de los ciclos lunares.

Estas aguas, con un caudal aproximado de 10 l/s, alcanzan la superficie entre depósitos morrénicos de espesor superior a 2 m y arenisca gruesa, a temperaturas superiores a 51°C (Risacher & Hauser, 2008) y a un pH cercano

a 7,5. Presentan un sabor sulfuroso y olor a ácido sulfhídrico de manera moderada. Desde el lecho de la poza de caudal bajo emergen burbujas con CO₂ de manera intermitente y débil.



Figura 3.25: Área de surgencia difusa de las aguas pertenecientes a las Termas de Llancahué, las que afloran en una zona intermareal. La imagen fue capturada durante el período de marea baja.

3.14. Cahuelmó (716.666E/5.318.751N)

Ubicadas en el Parque Privado Pumalín, en la rivera izquierda del Río Mirta, las Termas Cahuelmó presentan uso de balneario sobre depósitos morrénicos labrados en forma de piscinas por los indígenas que habitaron la zona. Para acceder a estas se debe navegar desde Río Negro a través del fiordo Hornopirén, siguiendo un recorrido paralelo a la Carretera Austral hacia el sur, a través del fiordo Leptepu.

El sector cuenta con dos manantiales pequeños, de 40 y 60 cm de diámetro y con temperaturas de 60,2 y 60,9°C, respectivamente, donde las muestras para análisis químicos se obtuvieron desde el manantial con mayor temperatura. Las surgencias se ubican en granodioritas fracturadas y en coberturas de depósitos morrénicos recientes, con presencia de conchuelas, no consolidados. Con un caudal cercano a 0,5 l/s, estas aguas presentan un pH semi-alcalino, próximo a 8,5, sabor sulfuroso y olor a ácido sulfhídrico leve.

La vegetación existente está compuesta por árboles comunes de la zona y algas extremófilas en el lecho del manantial.



Figura 3.26: Vertiente caliente de las Termas Cahuelmó, el diámetro de la apertura mide 50 cm.



Figura 3.27: Vista panorámica de la ubicación de las Termas Cahuelmó. Al fondo se distingue la apertura hacia el fiordo Leptepu, por lo que el área se trata de una zona estuarial. En el sector se observan piscinas talladas sobre depósitos morrénicos, donde se deja acumular parte del agua termal que circula desde el origen.

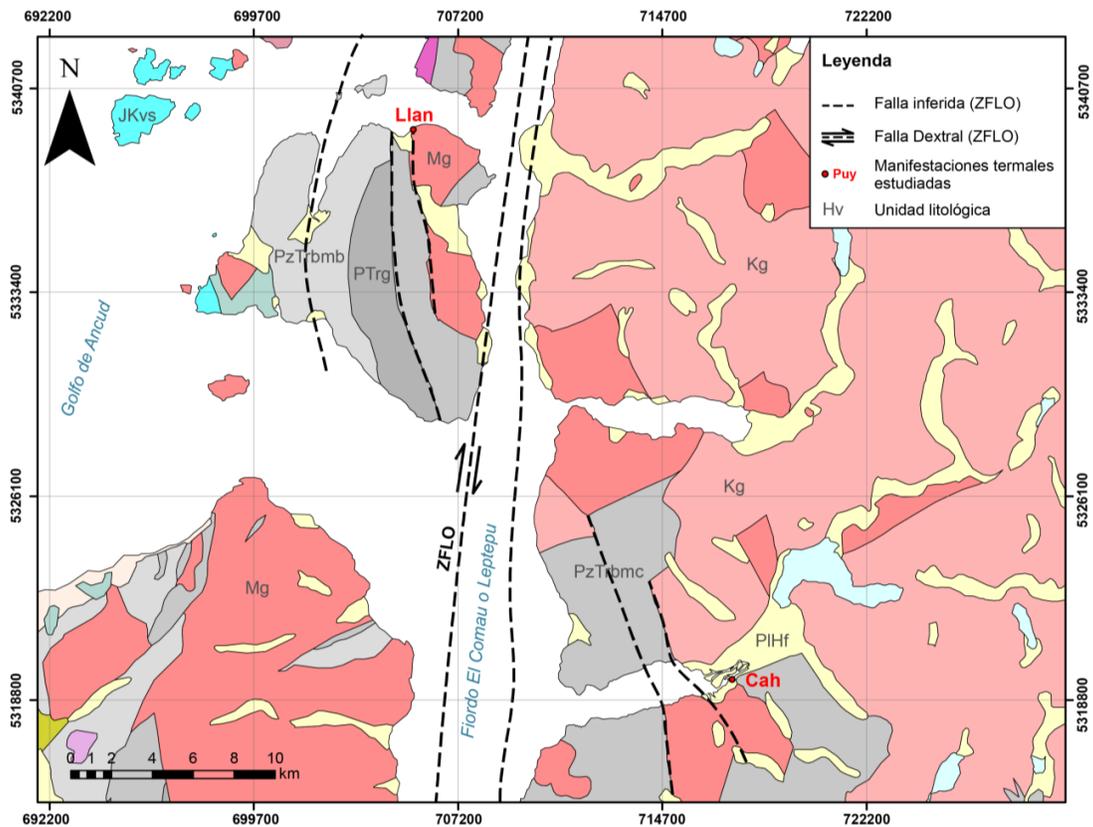


Figura 3.28: Geología que rodea las termas de Llancahué (Llan) y Cahuelmó (Cah) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).

3.15. Porcelana Chico (706.312E/5.300.883N)

Esta zona está compuesta por un conjunto de manifestaciones del tipo géiser y manantiales de agua caliente. Ubicados en la Península de Huequi, a 370 m.s.n.m, estos géiseres corresponden a los únicos conocidos en la zona sur del país. Los Géiseres de Porcelana surgen en la ribera oeste del río Punta Calle. La mineralización existente, de arcillas, aragonita y óxidos de Fe y Ti, forma grandes columnas que sobrepasan los 2 m de altura, sobre lavas y depósitos piroclásticos. Las temperaturas medidas alcanzan los 85,1°C y presentan una muy leve tendencia a ser aguas neutras-alcalinas. Emiten mucho vapor y contienen gran cantidad de CO₂, lo que se evidencia por la alta densidad de burbujas observada.

La estructura volcánica a la cual se le atribuye como fuente de calor corresponde al volcán Barranco Colorado, de este modo este sistema geotermal se relaciona a uno de aguas vapor calentadas, utilizando la permeabilidad otorgada por la presencia de una de las trazas siniestrales del Sistema de Falla de Larga-vida oblicuas al Arco (SFLA).



Figura 3.29: A la izquierda se observa el río Punta Calle bordeando la zona de los Géiseres de Porcelana.



Figura 3.30: Columnas generadas a partir de la precipitación de aragonita y arcillas, en los Géiseres de Porcelana.

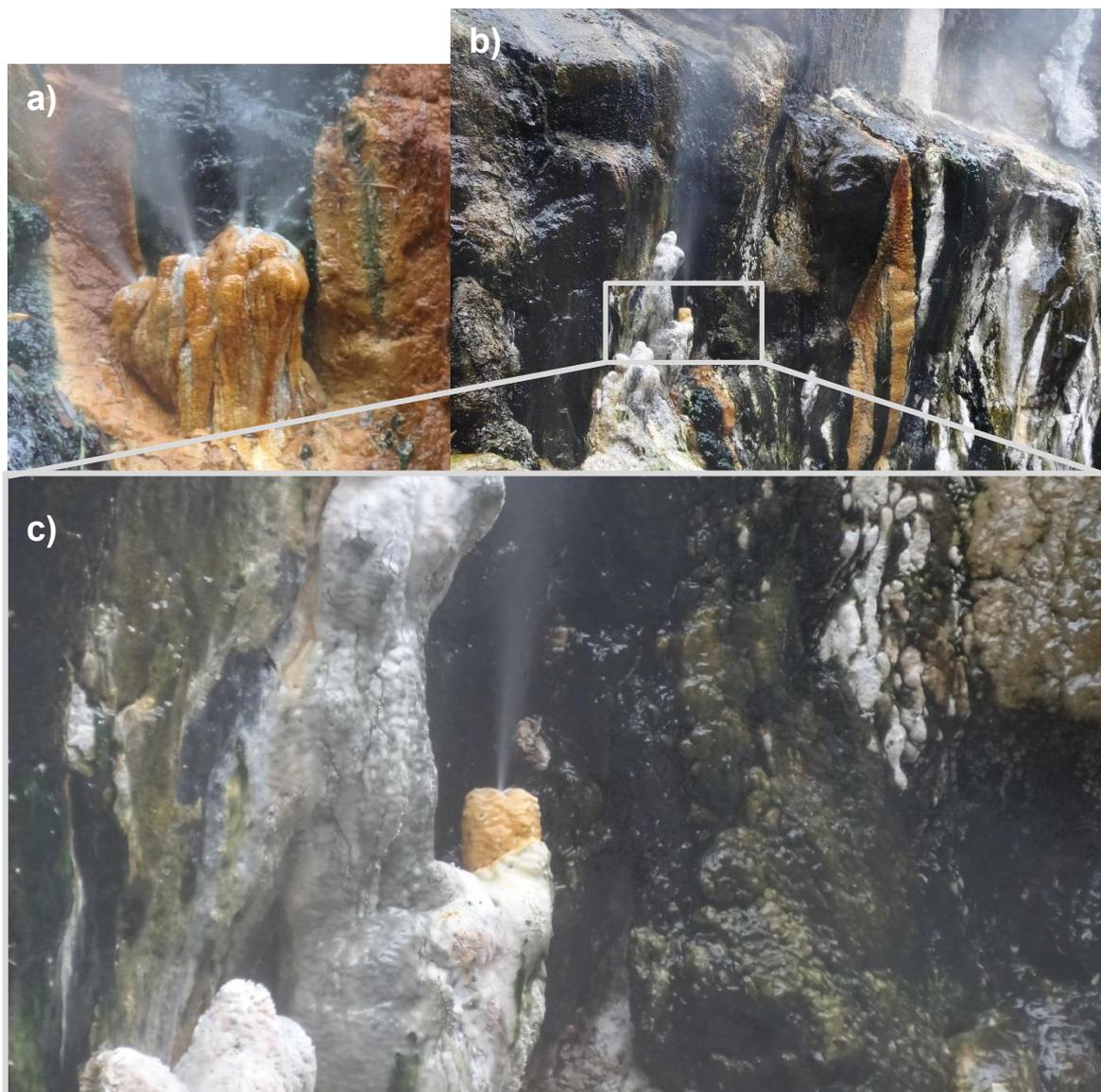


Figura 3.31: Emanaciones de agua y vapor pertenecientes a los Géiseres de Porcelana, y estructuras de aragonita precipitada. La imagen (c) corresponde a un acercamiento de la estructura observada en la figura (b).

3.16. El Comau (709.196E/5.297.272N)

Estas termas corresponden a afloramientos de aguas termales en la zona intermareal de la costa oriental de la Península de Huequi, donde el agua emerge entre depósitos de playa y escombros de ladera compuestos por esquistos y pizarras pertenecientes al CMBM (PzTrbmc y PzTrbmd) y gabros paleotriásicos a lo largo de 95 m de costa. Las temperaturas

medidas alcanzan los 74,8°C con pH neutro. Se presentan ciertas evidencias de alteración propilítica y existencia de arcillas en la superficie de las surgencias de aguas. A pesar de existir una instalación de una piscina de concreto, encargada de represar el agua termal, esta es usada solo esporádicamente como balneario público.



Figura 3.32: Distribución de manifestaciones termales a lo largo de la costa del fiordo El Comau, al sureste de Porcelana Chico.

3.17. Porcelana Grande (708.960E/5.296.258N)

Las Termas de Porcelana Grande son esencialmente manantiales calientes que afloran sobre el SFLA, aprovechando el plano de contacto entre depósitos fluviales de muy mala selección y una unidad de esquistos verdes paleozoicos pertenecientes al CMBM. La zona de surgencia se distribuye sobre una extensión de ~100 m en la ladera oriental del río Porcelana, represándose en pozones distanciados por pocos metros entre sí. Su acceso es similar al de los Géiseres de Porcelana, ya que se ubica en la costa norte de la Península de Huequi. Las temperaturas observadas no superan los 57,3°C y no se presenta precipitación de minerales de alteración, lo cual se condice con la característica neutra de sus aguas (pH *in situ*: 6,59).



Figura 3.33: Pozonas de agua tibia de las Termas de Porcelana Grande.

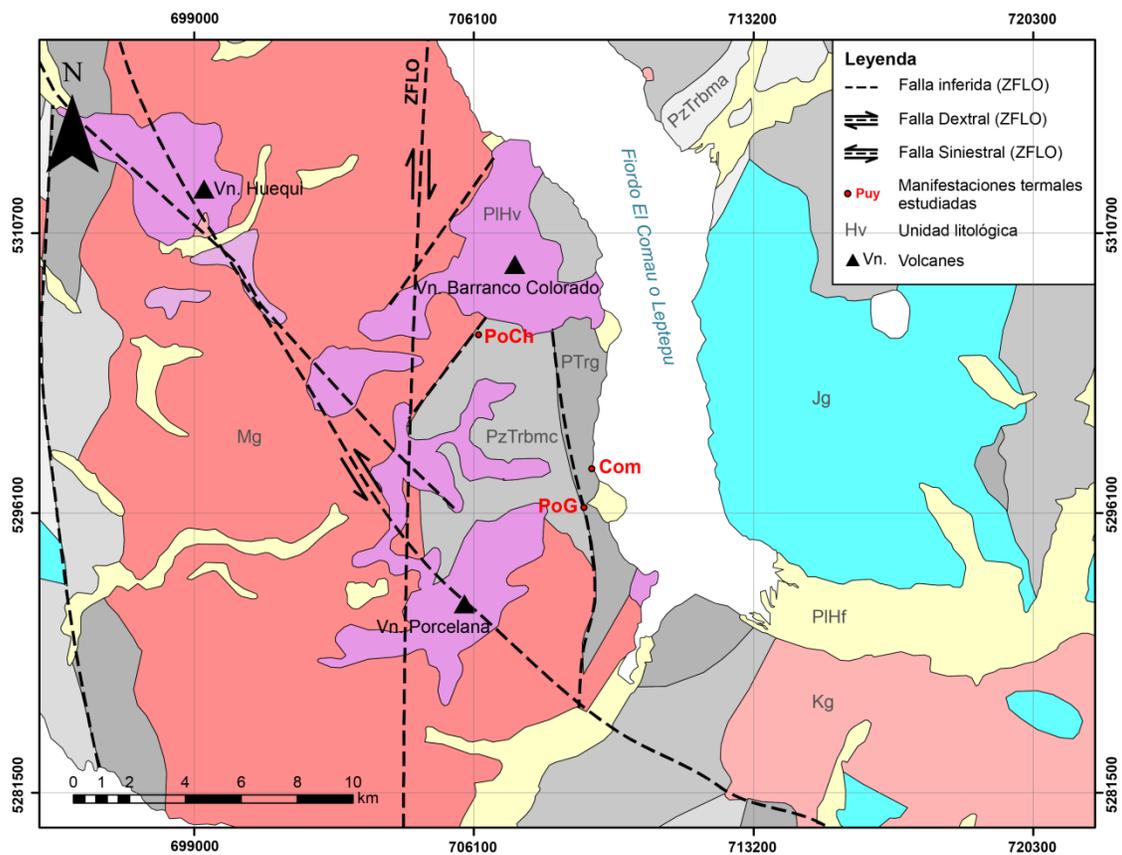


Figura 3.34: Geología que rodea las termas de Porcelana Chico (PoCh), El Comau (Com) y Porcelana Grande (PoG) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).

3.18. El Amarillo (708.511E/5.236.289N)

Las Termas de El Amarillo corresponden a 2 vertientes termales de aguas translúcidas ubicadas a menos de 50 m de distancia entre sí. Se ubican sobre el contacto entre granitoides cretácicos del Batolito Norpatagónico (Kg) y una unidad pleistocena de lavas y depósitos piroclásticos y laháricos (PIHv). Estas se localizan al sur del volcán Michinmahuida y presentan temperaturas entre 53,1 y 53,8°C con alta presencia de burbujeos y olor a H₂S leve a moderado, mientras que el valor promedio de pH medido en las vertientes fue de 9,09. Las instalaciones que bordean las manifestaciones corresponden a paredes de concreto que forman secciones cuadradas de muy baja altura (aproximadamente de 1,5 m sobre el suelo), de esta manera las surgencias de aguas termales son conectadas mediante tuberías de PVC a las piscinas pertenecientes al Balneario Termas El Amarillo.



Figura 3.35: Paredes de concreto que rodean una de la vertiente de las termas de El Amarillo.



Figura 3.36: Superficie de surgencia de aguas termales de El amarillo.

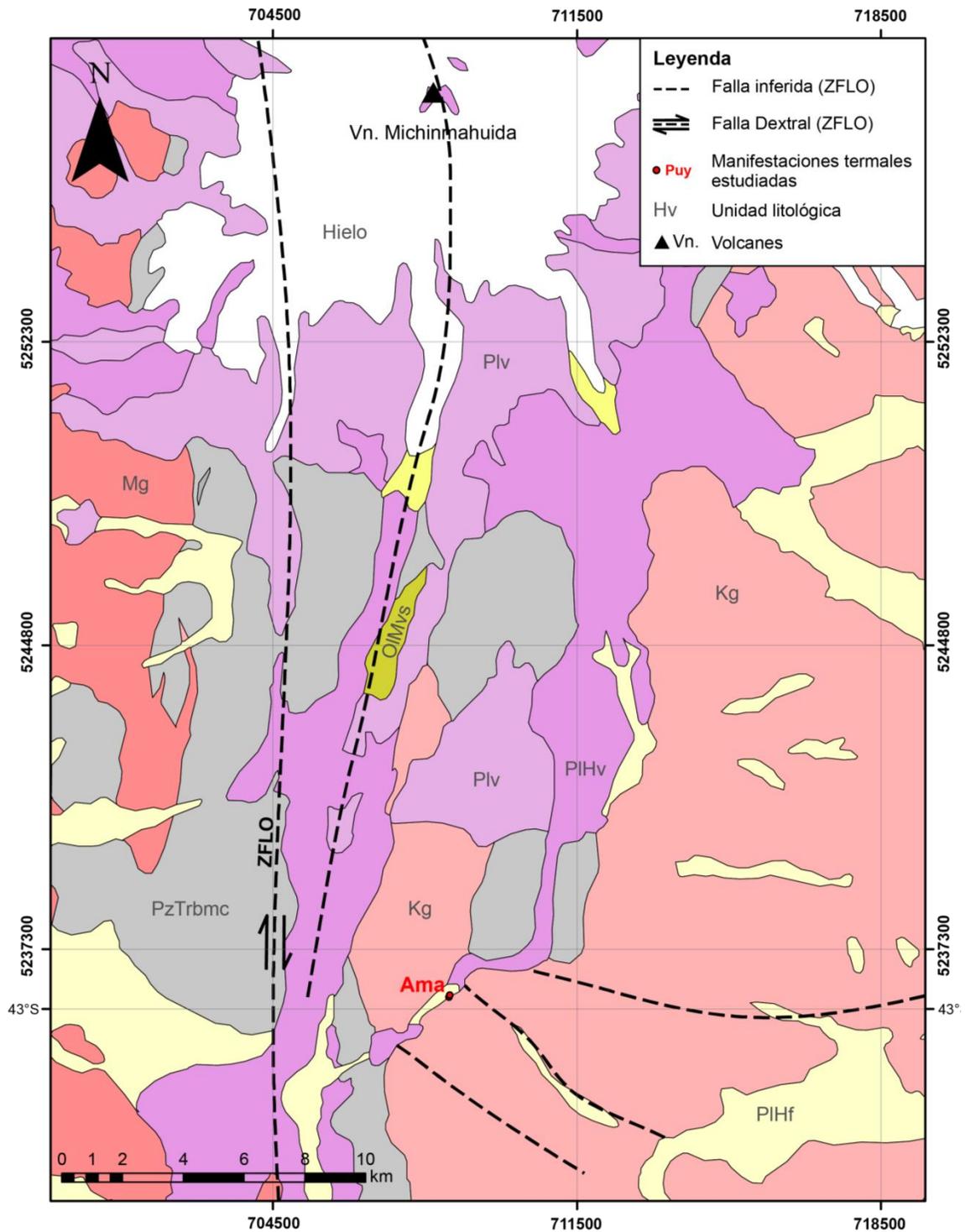


Figura 3.37: Geología que rodea las termas de El Amarillo (Ama) (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; Rosenau, 2004; Rosenau *et al.*, 2006).

4. Hidrogeoquímica

Para analizar las posibles aguas participantes en los sistemas termales estudiados en la X Región de Los Lagos, es necesario comparar los datos químicos de cada una de estas respecto a la composición de las aguas superficiales aledañas que podrían estar interviniendo en las áreas que rodean estas zonas de surgencia, de manera de poder despejar los tipos de interacciones que ocurren durante el transporte del agua observada en las manifestaciones. Esto es posible debido a que se asume que los fluidos se reequilibran según las condiciones existentes durante su recorrido en subsuperficie, ayudado por la aceleración de las reacciones que generan las altas temperaturas asociadas a un sistema geotermal; mientras que al ascender estas presentarían un enfriamiento tal que mantendrían gran parte de sus características generadas en el reservorio. Ante estos supuestos, es que se procede a caracterizar cada una de las aguas estudiadas.

4.1. Geoquímica de aguas termales

La geoquímica de aguas termales corresponde a una de las partes iniciales en cualquier estudio de un sistema geotérmico, puesto que entregan información sobre las condiciones existentes bajo la superficie, pudiendo orientar el estudio del origen de las aguas.

Giggenbach (1991) identificó dos grandes grupos de constituyentes:

- Trazadores: También llamados *conservativos*, estos son constituyentes no-reactivos, es decir, mantienen sus razones originales durante el transporte del fluido, por lo que representan de buena manera las condiciones de la fuente de origen. Algunos constituyentes que pertenecen a este grupo son los gases nobles He y Ar, además de Cl, B,

Li, Rb, Cs y N₂, que se consideran conservativos de manera comparativa.

- Geoindicadores: Estos son constituyentes reactivos, es decir, su concentración varía según los cambios presentados en el ambiente de transporte, por lo que pueden llegar a ser muy útiles para indicar condiciones fisicoquímicas de este. Por ejemplo, Na, K, Mg, Ca y SiO₂ son constituyentes cuya concentración varía con la interacción con rocas aluminosilicatadas, que muchas veces albergan el reservorio. Mientras que H₂, H₂S, CH₄ y CO₂ presentan razones que varían según la ocurrencia de reacciones de redox dependientes de la presión y la temperatura.

De acuerdo a los datos pertenecientes a fuentes termales a lo largo de los grupos de estructuras, incluyendo fuentes de la Región de Los Lagos, se definen dos dominios geotermales según la ocurrencia de las manifestaciones (Alam *et al.*, 2010; Sánchez, 2010; Sánchez *et al.*, 2013):

Dominio del SFLO: Estas manifestaciones geotermales se distribuyen superficialmente a lo largo de fallas dextrales (NNE-SSW), de manera que la circulación de fluidos meteóricos es esencialmente vertical, reduciéndose a las áreas de alta densidad de fracturamiento, generando celdas convectivas. Estos sistemas disponen de una importante interacción agua-roca, en especial con rocas intrusivas y metamórficas, mientras que carecen de contribuciones magmáticas directas. Así, lo anterior se refleja en la presencia de ciertos elementos conservativos, obteniéndose bajas razones de B/Cl⁻, mientras que los valores de pH son, por lo general, neutros a alcalinos.

Dominio del SFLA: Estas manifestaciones geotermales se distribuyen sobre fallas antiguas reactivadas que presentan una dinámica siniestral y una orientación WNW-ESE, las que corresponden al Sistema de Fallas de Larga-vida oblicuas al Arco (SFLA). En este caso estos sistemas se relacionan a aquellos de aguas vapor-calentadas, es decir, que se generan a partir del transporte lateral de las aguas meteóricas infiltradas en las zonas más altas, con una importante

interacción con fluidos volcánicos, lo que las vuelve más reactivas, de modo que se camufla la geoquímica original. Además, presentan mayores razones de B/Cl⁻ y valores de pH neutros.

Por otro lado, la clasificación geoquímica de las aguas geotermales dispuesta por Arnórsson *et al.* (2007) desarrollada a partir de los procesos que generan fraccionamiento de los fluidos durante su ascenso desde el reservorio, describe los siguientes grupos:

Fluidos primarios: Son aquellos que forman parte inicialmente del sistema geotermal, es decir, se encuentran en la base de la celda convectiva (nivel profundidad-base) y su origen puede consistir en una mezcla entre aguas meteóricas, marinas y connatas. Estas se clasifican mayormente como aguas cloruradas, sulfatado-ácidas o salmueras híper-salinas.

Fluidos secundarios: Estos corresponden a los fluidos generados a partir de los procesos que ocurren durante el ascenso, como separación y mezcla, producto de los cambios de las condiciones termodinámicas y la intersección con zonas permeables comunes con otros sistemas de agua fría. Estas se agrupan en aguas sulfato-ácidas vapor calentadas, carbonatadas y mezcladas.

Los procesos principales que dan origen a los fluidos secundarios, aquellos ocurridos durante el ascenso de los fluidos, corresponden a (Arnórsson *et al.*, 2007):

- i. Vaporización por despresurización (*flasheo*) y generación de una fase líquida y otra gaseosa.
- ii. Separación de fases en un fluido salino, teniendo como producto una salmuera híper-salina y vapor diluido.
- iii. Condensación del vapor al contacto con aguas subterráneas o superficiales para producir aguas sulfato-ácidas o bicarbonatadas ricas en Na o CO₂.
- iv. Mezcla de aguas termales subterráneas con CO₂ proveniente de fuentes profundas.

- v. Mezcla de fluidos termales con aguas superficiales de baja temperatura.

Fluidos primarios

Estos fluidos geotérmicos presentan una composición dependiente de las características de las fuentes que intervengan (principalmente agua marina, meteórica, además de fluidos magmáticos, metamórficos y connatos) y de las reacciones de equilibrio que se produzcan producto de la interacción agua-roca, a partir de la disolución de minerales primarios, precipitación de minerales secundarios, adicional a la ocurrencia de procesos de adsorción y desorción¹.

Aguas cloruradas: Estas aguas son las más comunes en los sistemas geotermales, y también las más presentes en este estudio, las cuales presentan altas concentraciones de NaCl, variando desde cientos hasta miles de ppm. Estas cantidades están determinadas por el aporte proveniente de la lixiviación de las rocas existentes en el reservorio, o también generado mediante la reacción entre HCl magmático y los minerales formadores de roca.

Bajo condiciones de altas temperaturas (entre 100 y 150°C), el Cl es el único elemento mayor con un comportamiento conservativo, por lo que su presencia genera condiciones óptimas para la estimación de las condiciones en subsuperficie.

Aguas sulfato-ácidas: Estas corresponden a aguas que interactúan con sistemas volcánicos activos, los cuales aportan gases como HCl y/o HSO₄, los que acidifican estos fluidos, llegando a alcanzar valores de pH ~2 a 25°C, mientras que a altas temperaturas el HSO₄⁻ se disocia, por lo que estas aguas tienden a presentarse neutras. De este modo, la principal diferencia entre las aguas cloruradas y las sulfato-ácidas radica en el *buffer* de pH que actúa en cada caso: CO₂/HCO₃⁻ en las aguas cloruradas, y HSO₄⁻/SO₂⁻² (Arnórsson *et al.*, 2007).

¹ La desorción es la operación, inversa de la absorción, en la cual se produce la extracción de la fracción volátil de una disolución mediante el contacto del líquido con un gas; la transferencia de masa ocurre desde el líquido al gas.

Salmueras híper-salinas: Estos fluidos se generan a partir de la existencia especialmente de rocas sedimentarias como secuencias marinas y evaporitas, las cuales se disuelven con agua meteórica y luego reaccionan con minerales primarios y HCl magmático. También se generan como producto de una separación de fases, de modo que resulta una fase líquida con una alta concentración de sales (debido a la propiedad higroscópica de las sales), mientras que la fase vapor queda totalmente empobrecida.

Fluidos secundarios

Estos tienden a ser los fluidos más presentes en las zonas de surgencias termales, puesto que corresponden a los productos de los procesos que se ocurridos bajo la superficie.

Aguas sulfato-ácidas vapor calentadas: Estas se generan a partir del calentamiento de aguas subterráneas, meteóricas de infiltración somera, o de lagos volcánicos mediante la condensación de gases volcánicos, la cual corresponde a una reacción exotérmica, por lo que produce una pluma de calor que afecta a los cuerpos de agua que intersecta en su camino. Mediante este proceso las aguas afectadas presentan bajos contenidos de Cl y se acidifican de manera importante ($\text{pH} < 1$), por lo tanto lixivian fácilmente los minerales primarios de las rocas volcánicas comunes, dejando residuos de sílice oquerosa, anatasa, azufre nativo, sulfuros, esmectita y caolinita (Arnórsson *et al.*, 2007).

Aguas carbonatadas: Ante la misma situación que da a lugar a las aguas sulfato-ácidas se pueden generar las aguas carbonatadas, pero los gases condensados corresponden mayormente a gases geotérmicos, estos pueden presentar un alto contenido de CO_2 , el cual al interactuar con las aguas vapor-calentadas las transforma en aguas carbonatadas. Sin embargo, también se pueden generar aguas sulfatadas-carbonatadas cuando los gases presentan concentraciones importantes de H_2S , de modo que la reacción de este compuesto produce una leve disminución en el pH de las aguas afectadas. Finalmente, se debe contemplar la ocurrencia de aguas sulfatadas-carbonatadas producto de la

mezcla de aguas primarias de muy alta temperatura con aguas subterráneas frías enriquecidas en HCO_3^- (Arnórsson *et al.*, 2007).

Aguas mezcladas: Estas aguas corresponden a las más comunes en las zonas de manifestaciones termales, debido a que la mezcla de fluidos termales con aguas superficiales es muy frecuente en los sectores más someros del sistema geotermal (Fournier, 1977). Las proporciones de mezcla se pueden observar de manera relativa mediante la correlación negativa entre la temperatura y el caudal de las manifestaciones, perceptible también en la correlación positiva entre componentes conservativos e isotópicos. Al corresponder a un sistema abierto, las concentraciones iniciales de los componentes reactivos se ven modificadas. En general se observa una dilución simple del fluido del reservorio geotermal para algunos componentes (Reed & Spycher, 1984; Pang & Reed, 1998). Por otra parte, los componentes que ven modificadas sus concentraciones corresponden principalmente al Ca y Mg, los que aumentan, mientras que la razón Na/K es afectada por una disminución. De este modo, la mezcla de aguas es un proceso que debe tenerse siempre presente en el análisis de aguas termales, debido a que altera considerablemente las estimaciones geotermométricas y los diagramas de equilibrio multimineral.

4.2. Metodología

Las características termodinámicas *in situ* de las aguas termales son sustancialmente relevantes, ya que describen de mejor manera las condiciones existentes en cada manifestación, sin los cambios que pueden darse durante el transporte desde el lugar de obtención de las muestras hasta el laboratorio. Sobre todo, al considerar que estas botellas deben trasladarse a 4°C, es esperable que se altere el equilibrio químico presente en la fuente, el cual es determinado, básicamente, por las altas temperaturas.

Estas propiedades fueron medidas con los siguientes equipos:

Tabla 6: Equipos utilizados para medición de parámetros termodinámicos *in situ*.

	Medidor portátil	Sensor	Rango de medición		Límites T	Exactitud
Conductividad [S/cm]	Profiline Cond 3310	TetraCon® 325	1 μ S/cm	2 S/cm	0 - 100°C	
pH	Multi 340i	SenTix® 940	0 pH	14 pH	0 - 80°C	$\pm 0,05$
U [mV]	Multi 340i	SenTix® ORP	-1.999 mV	+1.999 mV	0 - 100°C	± 1

Los datos químicos se obtuvieron en el laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería, por medio de los siguientes métodos:

- i. **pH:** Potenciometría.
- ii. **Alcalinidad:** OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- . Volumetría ácido-base.
- iii. **Cationes:** (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Li^+) espectrofotometría de absorción atómica (AAS), marca Perkin Elmer, modelo 4000. El error analítico $\leq 5\%$.
- iv. **SiO₂:** AAS, marca Perkin Elmer, modelo 4000. Con un error analítico $\leq 2\%$.
- v. **Aniones:** (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+) cromatografía iónica, marca Dionex, modelo ICS 3000. Con un error analítico $\leq 5\%$.
- vi. **Elementos traza:** (Ag, Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, P, Pb, Sb, Se, Sn, V, Zn) y de B y Br fue realizado mediante por ICP-MS, marca Agilent, modelo 7500a. Con un error analítico $\leq 5\%$.
- vii. **Isótopos D y 18O:** espectrómetro de masa IRMS ISOPRIME. La precisión externa para el isótopo $\delta^{18}\text{O}$ es $\leq 0,15\text{‰}$ y para el isótopo $\delta^2\text{H}$ es $\leq 2,0\text{‰}$ respectivamente.

Para obtener los datos acerca de las condiciones químicas de las aguas estudiadas es necesario obtener varios duplicados (varias muestras de una misma fuente), para poder someterlos a diferentes análisis, ya que todos utilizan distintos métodos los cuales, a su vez, requieren diversos estándares de muestreo exigidos por el laboratorio, según el análisis químico que se desee obtener:

Tabla 7: Resumen de condiciones de muestreo según el análisis requerido para cada duplicado de una fuente termal. Abreviaciones: pp: polipropileno; cr: cruda; f: filtrada a 0,45µm; HNO₃: 2 ml de ácido nítrico.

	Elementos mayores	Elementos traza	Isótopos de D y ¹⁸ O
Material botella	pp	pp	pp
Volumen	1 l	125 ml	125 ml
Tratamiento	cr	f	cr
		HNO ₃	

4.3. Resultados

4.3.1. Aguas geotermales

En la Región de Los Lagos se reconocen 36 sectores que presentan manifestaciones termales (Hauser, 1997; Pérez, 1999), de los cuales 18 fueron catastrados y analizados en el presente trabajo mediante muestras obtenidas en superficie, los que se encuentran asociados a distintas geomorfologías presentes en la zona y que presentan distintas características químicas. Las muestras obtenidas constituyen ejemplares de las emanaciones con mayores temperaturas medidas, de modo que puedan ser consideradas las más representativas de la fuente termal.

Para verificar la fiabilidad de los análisis realizados a las aguas termales, se utiliza el valor del balance iónico (BI) (e.g. Marini, 2000). Este valor es obtenido mediante el porcentaje de diferencia entre las cargas positivas y negativas totales (concentraciones en meq/l):

$$BI = 100 \cdot \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \quad (1)$$

Los diferencias aceptables corresponden a valores de BI <5% (Custodio & Llamas, 1983).

Elementos mayores

Según lo mencionado anteriormente, se procederá a caracterizar las aguas presentes en las manifestaciones termales estudiadas; las que se resumen en la Tabla 9.

En general, se destacan cinco conjuntos de aguas a partir de los resultados mostrados en la Tabla 8:

- i. *Cloruradas*: Las aguas clasificadas como cloruradas corresponden a las termas de Rollizos. Estas solo presentan una componente relevante respecto al contenido de cloruros, lo que puede asociarse *a priori* a su localización poco aislada de las aguas del estuario Reloncaví (como puede deducirse del apartado 3.7).
- ii. *Clorurada-sódicas*: En esta clasificación se agrupan las aguas termales de Puyehue, Aguas Calientes, Rupanco, Cochamó, Sotomó, Puelo, El Yate, Pichicolo, Porcelana Chico (Géiseres de Porcelana), El Comau y Porcelana Grande. Estas presentan una importante componente sódica, la que puede deberse en variados casos a la mezcla de las aguas termales con aguas marinas, también a la presencia de feldespatos como mineral primario en las rocas que albergan el reservorio, entre otras posibilidades que se estudiarán más adelante.

Tabla 8: Análisis químicos de las aguas termales visitadas para el presente estudio

Fuente termal	Código	Fecha (DD-MM-AAAA)	X (UTM)	Y (UTM)	Altura (m.s.n.m.)	pH	Temperatura superficial [°C]	Conductividad [µS/cm]	TDS	Li [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Ca [mg/l]	Sr [mg/l]	Fe [mg/l]	NH ₄ [mg/l]	Cl [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	HCO ₃ [mg/l]	CO ₃ [mg/l]	NO ₃ [mg/l]	Al [mg/l]	B [mg/l]	Bi (%)	Sistema estructural		
Aguas termales																												
Puyehue	MBA-089	12-04-2013	725819	5489795	337	8.51	58.20	833.00	461.00	0.30	160.01	4.55	0.60	8.50	1.89	0.02		133.97	111.99	71.81	4.40	3.00	0.00	2.50	0.45		SFLO	
Aguas Calientes	MBA-090	15-04-2013	727207	5487096	464	7.69	60.80	931.00	526.00	0.40	165.01	7.01	1.40	18.00				184.96	116.99	65.10	0.00	3.00	0.00	2.30	-2.32		SFLO	
Rupanco	MBA-088	12-04-2013	733718	5473169	128	7.86	54.40	877.00	475.00	0.10	155.01	6.16	1.60	19.00				168.96	90.20	67.60	0.00	3.00	0.00	1.90	1.14		SFLO	
El Callao	MBA-084	11-04-2013	738413	5459901	427	9.50	55.90	253.00	145.00	0.02	50.00	1.05	0.10	7.50				24.59	27.40	20.90	24.18	3.00	0.00	0.34	2.45		SFLO	
Cayetú	MBA-091	15-04-2013	733655	5423461	179	7.64	50.50	338.00	204.00	0.05	60.00	2.15	0.30	10.00				14.70	93.00	44.20	0.00	3.00	0.00	0.23	1.03		SFLO	
Ralún	MBA-087	12-04-2013	723574	5417562	4	7.25	40.10	5060.00	2798.00	0.20	740.04	22.52	2.00	270.00		0.44		1524.66	216.99	27.80	0.00	8.00	0.00	4.30	-1.80		SFLO	
Rollizos	MBA-086	11-04-2013	723569	5410446	11	7.82	29.70	2600.00	1316.00	0.05	265.01	4.85	1.90	205.00		0.00		751.83	48.40	79.01	0.00	3.00	0.00	0.08	-3.33		SFLO	
	XBR-31	21-03-2014	723569	5410444	0	8.04	28.40	2270.00	1106.00	0.04	223.00	5.10	0.10	187.00		1.65		612.00	41.00	76.00	0.00	3.00	0.02	0.06	-0.62		SFLO	
	MBA-085	11-04-2013	726861	5401532	4	7.73	25.90	5700.00	3080.00	0.05	1020.0	31.03	74.92	29.50		0.06		1599.64	56.00	545.04	0.00	3.00	0.00	1.50	-2.28		SFLO	
	XBR-29	21-03-2014	726971	5401512	0	8.02	24.70	3370.00	1709.00	0.02	556.00	27.50	7.90	47.00	0.34	0.26	1.05	834.00	63.00	353.00	0.00	3.00	0.02	0.52	-4.76		SFLO	
Sotomó	XBR-28	20-03-2014	717666	5385199	28	7.94	30.80	4880.00	2643.00	0.02	800.00	30.00	12.00	144.00	0.67	0.95	0.24	1450.00	196.00	21.00	0.00	3.00	0.02	0.06	-1.83		SFLO	
Puelo	XBR-10	24-01-2014	716152	5380099	2	8.01	34.90	570.00	308.00	0.21	310.00	7.80	1.50	193.00	1.60	1.64	8.20	712.00	240.00	46.50	0.00	3.00	0.02	0.69	-4.97		SFLO	
El Yate	XBR-03	22-01-2014	722704	5381914	45	7.19	30.20	2770.00	1487.00	0.11	112.00	0.70	0.60	6.90	0.45	0.43	2.40	107.00	61.00	34.00	0.00	3.00	0.02	0.78	3.83		SFLO	
	XBR-01	20-01-2014	702742	5350125	95	7.94	42.20	584.00	338.00	0.11	112.00	0.70	0.60	15.00	0.03	0.08	3.70	117.00	67.00	39.30	0.00	5.40	0.02	0.33	2.35		SFLO	
	XBR-02	21-01-2014	702763	5350158	85	7.06	49.60	517.00	277.00	0.11	90.00	0.60	0.70	15.00	0.03	0.05	2.50	97.00	55.00	33.80	0.00	3.00	0.04	0.23	2.74		SFLO	
	XBR-08	23-01-2014	702877	5350334	83	8.95	56.60	739.00	390.00	0.09	120.00	0.70	0.40	17.00	0.03	0.21	3.50	145.00	83.00	22.00	13.00	3.00	0.05	0.38	-4.24		SFLO	
Llancahué	XBR-06	23-01-2014	705681	5339050	0	7.83	51.60	4530.00	2034.00	0.43	605.00	12.00	8.80	163.00	1.64	2.05	15.00	1120.00	96.00	17.00	0.00	22.00	0.02	0.84	1.80		SFLO	
Cahuelmó	XBR-04	23-01-2014	716672	5318760	2	9.06	60.90	202.00	126.00	0.02	48.00	0.70	0.10	1.70	0.02	0.02	1.10	12.00	13.00	52.00	24.00	3.00	0.10	0.17	-2.46		SFLO	
Porcelana Chico	XBR-13	15-03-2014	706312	5300883	370	8.04	85.10	2170.00	1131.00	2.46	383.00	39.00	0.20	49.00	0.18	0.28	0.35	528.00	19.00	227.00	0.00	3.00	0.02	16.00	2.71		SFLA	
El Comau	XBR-15	17-03-2014	709196	5297272	21	7.91	74.80	1550.00	833.00	1.50	242.00	17.00	0.30	54.00	0.34	0.25	0.50	293.00	149.00	157.00	0.00	0.00	0.02	13.80	-0.94		SFLA	
Porcelana Grande	XBR-17	17-03-2014	708960	5296258	73	7.33	57.30	1308.00	695.00	1.71	192.00	17.00	0.30	48.80	0.35	0.29	< 0.05	238.00	152.00	96.00	0.00	3.00	0.02	12.70	-1.11		SFLA	
	XBR-25	18-03-2014	708511	5236289	264	9.50	53.80	208.00	127.00	0.02	38.00	0.50	0.10	5.60	0.04	0.02	< 0.05	7.30	39.00	34.00	0.00	3.00	0.05	0.06	9.22		SFLO	
	XBR-23	18-03-2014	708532	5236328	266	9.49	53.10	207.00	127.00	0.02	37.70	0.50	0.10	5.70	0.04	0.02	0.78	7.60	39.00	33.00	23.00	3.00	0.06	0.06	-10.09		SFLO	
Aguas superficiales																												
Río Petrohué	XBR-34	41719	723173	5417611	5	7.34	15.4	64	34	<0.02	5.7	0.5	0.3	7.9	0.01	0.042	0.07	3.2	4.4	25		<3.0	<0.02	<0.06				
Estero Sacho	XBR-33	41719	723569	5410444	0	6.99	10.5	264	123	<0.02	34	1.7	1	9	3.87	0.085	130	60	7.6	19		<3.0	<0.02	<0.06				
Río Cochamó	XBR-30	41718	731290	5406002	25	6.71	11.6	18	12	<0.02	2.2	<0.1	0.1	4.1	1.28	0.034	< 0.05	<1.0	<1.0	8		<3.0	<0.02	<0.06				
Mar Estuario Reloncaví	XBR-11	41718	718249	5385433	0	7.86	15.3	24000	14798	<0.02	5010	183	278	217	0.01	0.878	0.1	7920	1156	69	20	<3.0	<0.02	1.14				
Mar Estuario Reloncaví	XBR-26	41663	716981	5380677	0	7.6	19.1	8650	4883	0.03	1420	42	177	49	1.12	0.446	<0.05	2780	394	42		<3.0	<0.02	0.313				
Estero Pichicolo	XBR-09	41662	702874	5350330	75	6.41	10.8	38.2	19	<0.02	2.4	0.11	1	2.2	0.02	0.054	< 0.05	3.5	1.3	18		<3.0	0.028	<0.06				
Mar Fiordo El Comau	XBR-07	41662	705681	5339050	0	8.08	18.1	25100	15564	0.13	4520	147	563	205	0.04	1.8	0.12	8860	1236	68		<3.0	<0.02	0.871				
Río Cahuelmó	XBR-05	41662	716672	5318760	2	5.96	11.7	21.3	11	<0.02	3.3	0.2	0.4	0.4	0	0.027	0.81	2.9	<1.0	6.5		<3.0	0.089	<0.06				
Lluvia Península de Huequi	XBR-21	41687	709370	5302513	42	6.43		83	49	<0.02	2.6	23.1	0.1	2.8	0.02	<0.010	0.1	3.3	1.5	31		<3.0	<0.02	<0.06				
Río Punta Calle	XBR-14	41713	706312	5300883	370	6.96	10	101	51	0.1	12	1.1	0.2	7.5	3.18	0.024	< 0.05	15	7.3	16		<3.0	<0.02	0.291				
Río Porcelana	XBR-20	41687	708933	5296263	117	7.31	11	128	70	0.04	9	0.6	0.2	16	0.01	0.083	< 0.05	8.2	26	22		<3.0	0.069	<0.06				
Mar Fiordo El Comau	XBR-18	41687	710859	5294831	0	7.5	19.8	11010	6230	<0.02	2200	78	25	108	0.65	0.326	< 0.05	3330	473	30		<3.0	<0.02	0.571				
Río san Antonio	XBR-24	41716	708458	5236287	251	7.13	10.8	65	35	<0.02	5.9	0.7	0.3	7.8	0.02	0.154	0.07	3.3	4.4	26		<3.0	<0.02	<0.06				

- iii. *Sódicas*: Las aguas termales de El Callao se clasifican en este grupo. Al igual que los casos anteriores puede deberse tanto a efectos de mezcla de aguas como a reacciones de equilibrio mineral. Sin embargo, es importante considerar que no se destacan los cloruros como componentes fuertes, lo que puede significar un problema a la hora de asumir simplemente mezclas con aguas cloruradas.
- iv. *Sulfatadas sódicas*: Estas corresponden a las termas de Cayetúé. Dado que estas aguas se encuentran en medio del sistema volcánico Cayetúé – La Viguera, que contiene numerosos conos de ceniza repartidos en el área, es probable que el aporte de SO_4^{-2} esté asociado a gases provenientes de estos, lo que puede alterar finalmente la composición original de las surgencias de aguas subterráneas.
- v. *Bicarbonatadas-sódicas*: Las aguas que caen dentro de esta clasificación son las aguas termales de Cahuelmó y de El Amarillo. Estas presentan una destacada presencia del ion bicarbonato, lo que puede tener distintos orígenes, tanto relacionados a la presencia de materia orgánica, como de carbonatos en las rocas albergantes. Sin embargo, una posible explicación corresponde a la incorporación de CO_2 proveniente de otros fluidos existentes en el subsuelo; lo que debe estudiarse para cada caso en particular.

Tabla 9: Clasificación de las aguas termales analizadas dentro de la Región de Los Lagos, según los diagramas de Piper (1944), Na-K-Mg de Giggenbach (1988) y aniones de Giggenbach (1991).

Fuentes termales	Piper (1944)	Giggenbach (1988)	Giggenbach (1991)
Puyehue	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	
Aguas Calientes	Clorurada-sódica	Aguas inmaduras	
Rupanco	Clorurada-sódica	Aguas inmaduras	
El Callao	Sódica	Aguas inmaduras	
Cayetué	Sulfatada-sódica	Aguas inmaduras	Vapor-calentadas
Ralún	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	Volcánicas
Rollizos (marea alta)	Cloruradas	Aguas en equilibrio parcial	Aguas maduras
Rollizos (marea baja)	Cloruradas	Aguas en equilibrio parcial	Aguas maduras
Cochamó	Clorurada-sódica	Aguas inmaduras	Aguas maduras
Cochamó	Clorurada-sódica	Aguas inmaduras	Aguas maduras
Sotomó	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	Volcánicas
Puelo	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	Volcánicas
El Yate	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	
Pichicolo	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	Volcánicas
Pichicolo	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	Volcánicas
Pichicolo	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	Volcánicas
Llancahué	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	Volcánicas
Cahuelmó	Bicarbonatada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	Periférica
Porcelana Chico	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	Aguas maduras
El Comau	Clorurada-sódica	Aguas en equilibrio parcial	
Porcelana Grande	Clorurada-sódica	Aguas inmaduras	
El Amarillo	Bicarbonatada-sódica	Aguas inmaduras	Vapor-calentadas
El Amarillo	Bicarbonatada-sódica	Aguas inmaduras	Vapor-calentadas

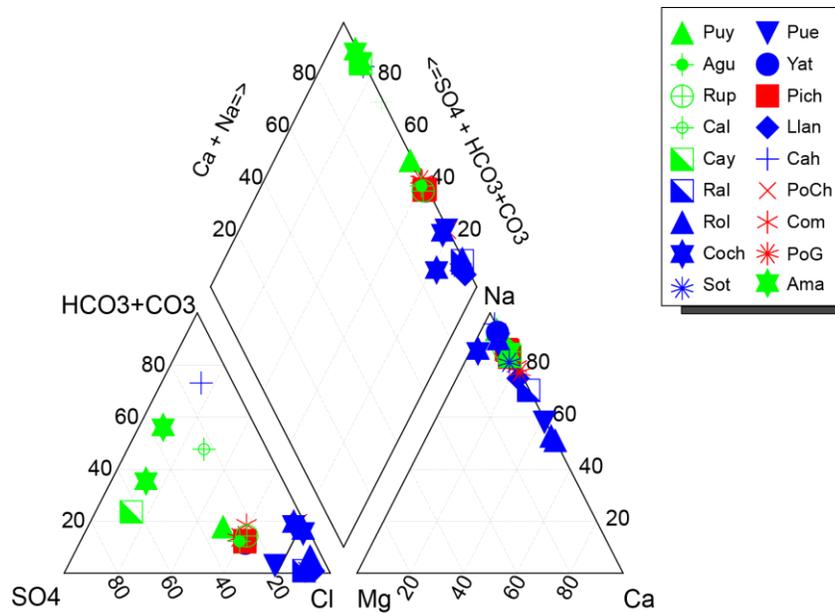


Figura 4.1: Diagrama de Piper con los datos de las aguas termales analizadas (Piper, 1944). Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

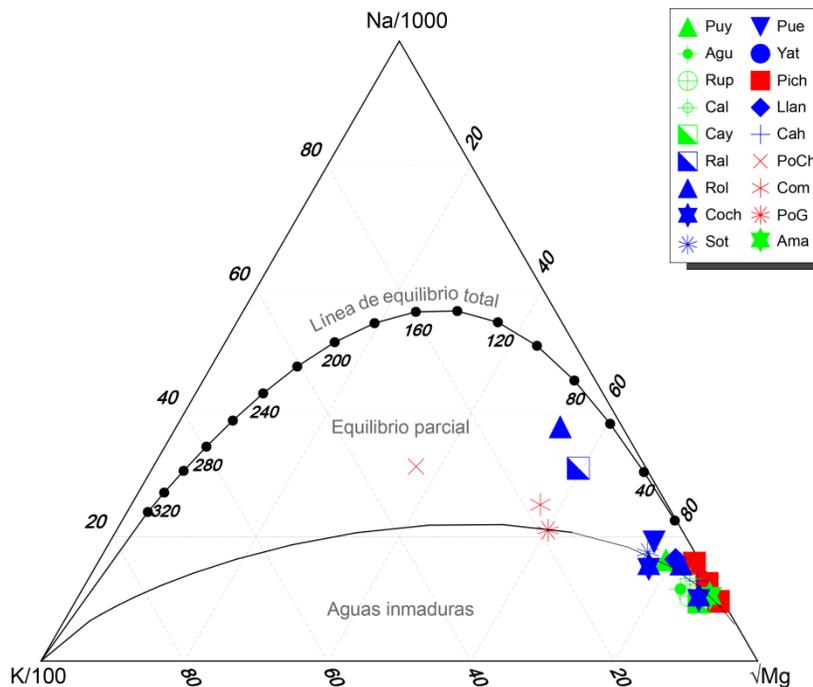


Figura 4.2: Diagrama de cationes (K, Na y Mg), donde la línea de equilibrio total representa la intersección de las isotermas de 2 geotermómetros (Na-K y K-Mg) (Giggenbach, 1988). Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

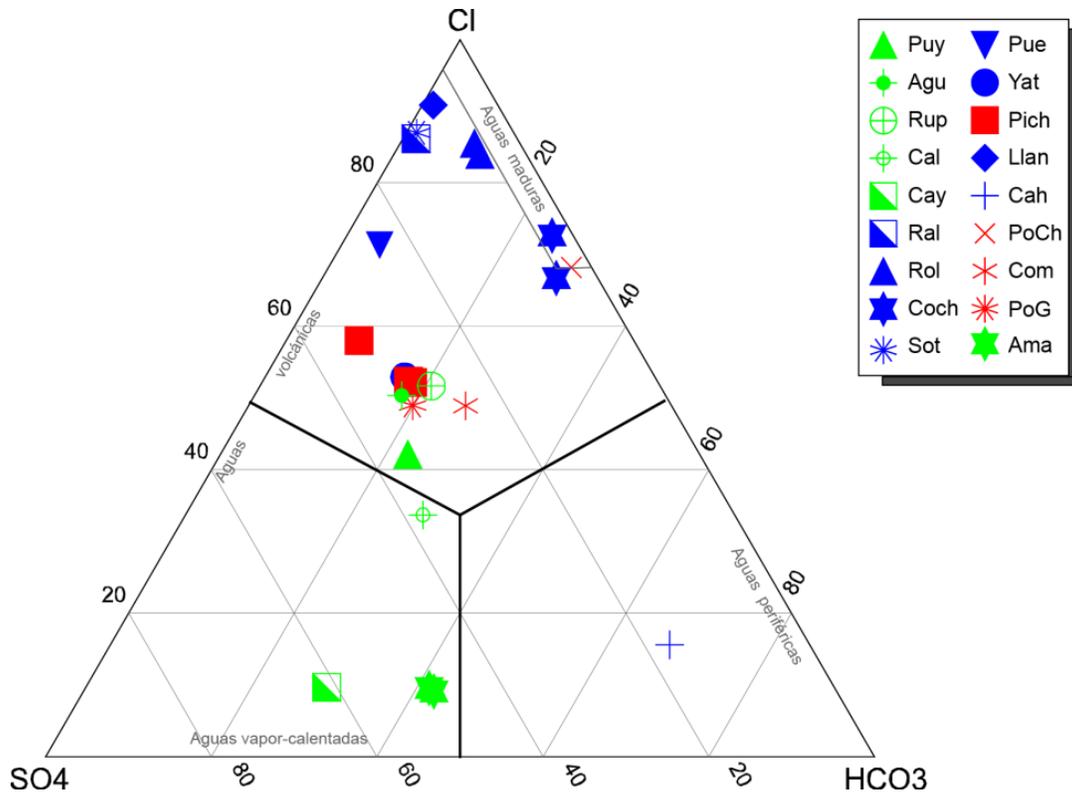


Figura 4.3: Clasificación de las aguas termales estudiadas según diagrama de Giggenbach (Giggenbach, 1991), basado en los contenidos de SO_4 , Cl y HCO_3 . Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

A partir de los índices de correlación de Pearson entre elementos mayores, se procede a observar las relaciones Na-Cl, Ca-Cl y Mg-Cl (Figura 4.4 y Figura 4.5, respectivamente), las que presentan tendencias curvilíneas que se alejan de las líneas de mezcla homogénea generadas a partir de las concentraciones del agua de lluvia y de los extremos salinos del fiordo El Comau y el estuario Reloncaví; lo que indica que la mezcla no es homogénea absoluto.

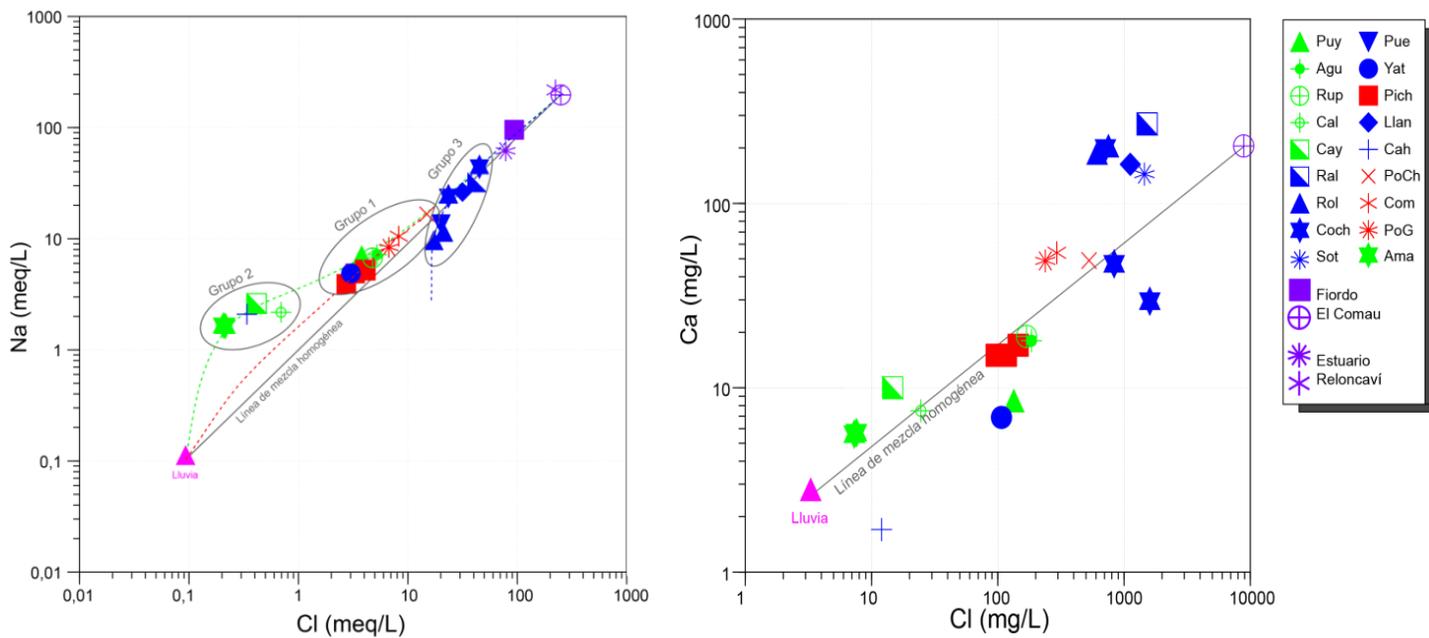


Figura 4.4: Diagramas de Na versus Cl y Ca versus Cl utilizando los datos de las aguas termales estudiadas, respecto al agua de lluvia (magenta) y diversas muestras de agua salina (morado). Se diferencian 3 grandes grupos mencionados posteriormente en el apartado 5.1. Las líneas punteadas muestran las tendencias de cada uno de estos grupos. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetúe. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

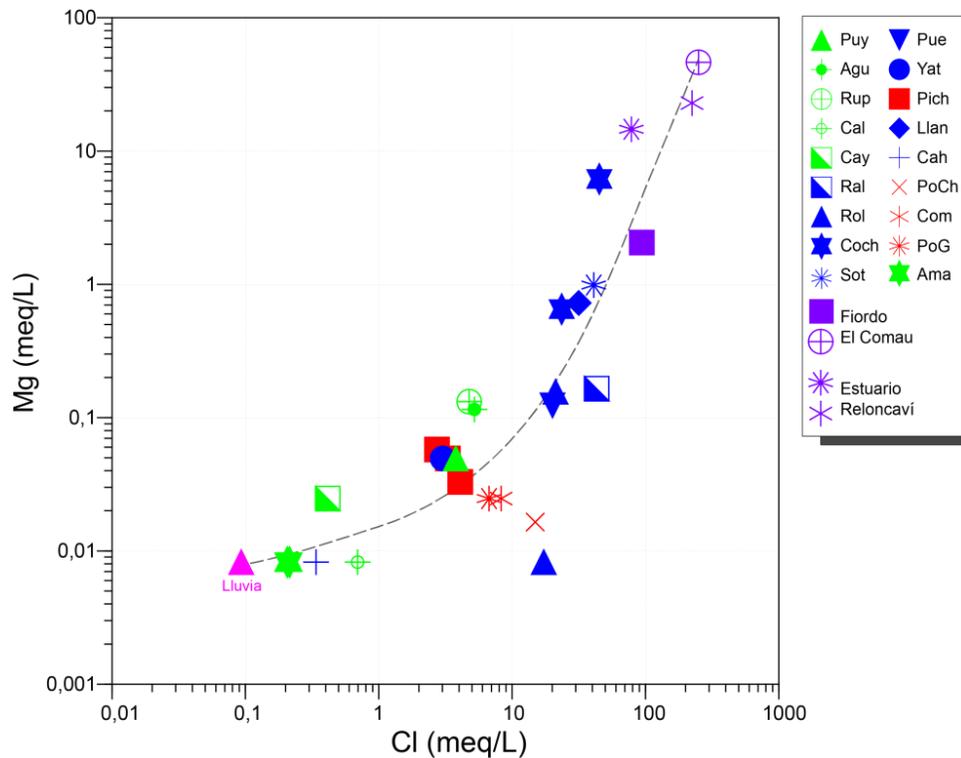


Figura 4.5: Razones de los contenidos de Mg y Cl en las aguas termales estudiadas, respecto al agua de lluvia (magenta) y diversas muestras de agua salina (morado). Se diferencian 3 grandes grupos mencionados posteriormente en el apartado 5.1. Las líneas punteadas muestran las tendencias de cada uno de estos grupos. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

Isótopos ambientales

El diagrama de deuterio/hidrógeno versus $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (Figura 4.6) muestra los resultados de distintos procesos de fraccionamiento isotópico ocurridos en las aguas que participan en los sistemas estudiados, estos procesos ocurren durante distintos episodios del ciclo del agua, donde los componentes isotópicos más pesados (^2H y ^{18}O) tienden a concentrarse en las fases líquidas durante la evaporación, lo que genera cambios en las razones isotópicas. Los valores que se utilizan para realizar estas comparaciones se encuentran normalizados según los estándares correspondientes al VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), los cuales se analizan respecto a los datos pertenecientes a la Línea Meteórica Mundial (LMM), definida por la (2).

$$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \quad (2)$$

(Craig, 1961)

Donde: $\delta D = [(D_{\text{medido}}/H_{\text{medido}}) / (D_{\text{VSMOW}}/H_{\text{VSMOW}})] - 1$

$\delta^{18}O = [(^{18}O_{\text{medido}}/^{16}O_{\text{medido}}) / (^{18}O_{\text{VSMOW}}/^{16}O_{\text{VSMOW}})] - 1$

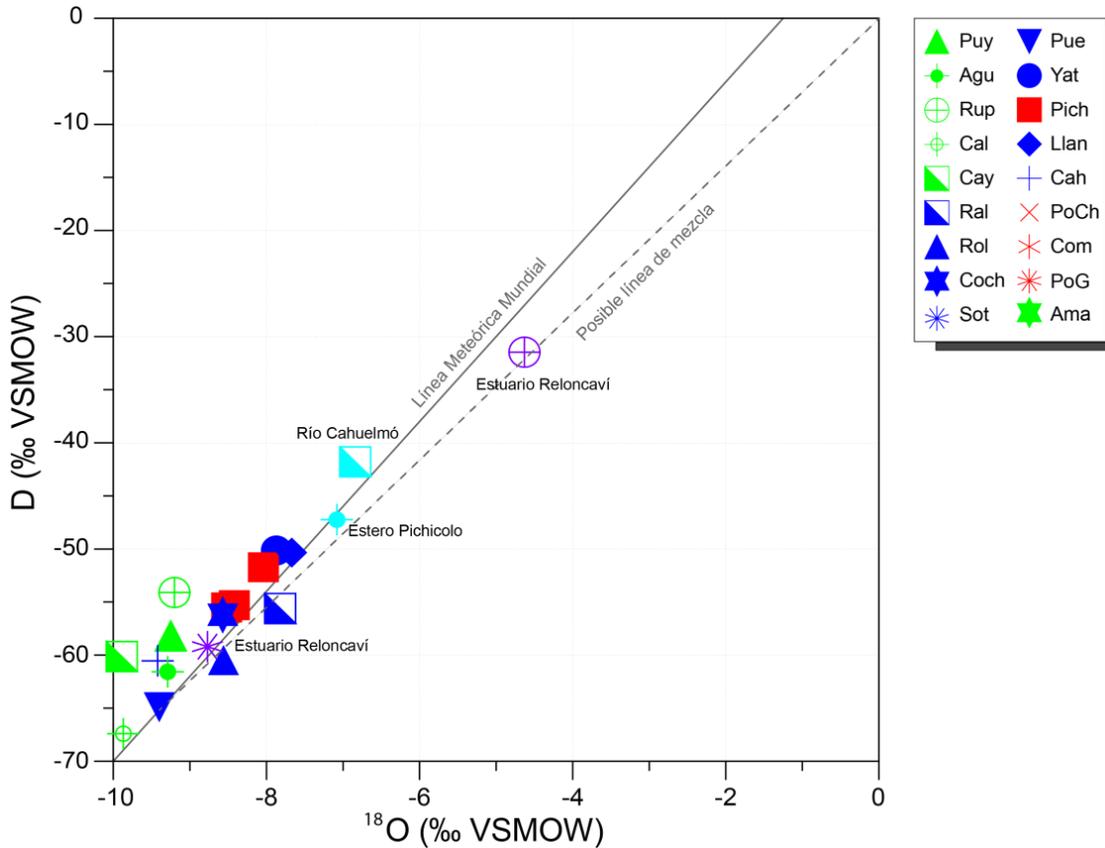


Figura 4.6: Diagrama binario de deuterio (²H) versus ¹⁸O de las muestras de aguas termales y superficiales, comparadas con la Línea Meteorica Mundial (LMM) (Craig, 1961). Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

Se puede observar en la Figura 4.6 que casi todos los valores de δD y $\delta^{18}O$ figuran muy cercanos a la LMM, cuya interpretación se discutirá más adelante. Por otra parte, se ha optado, ante la carencia de datos pertenecientes a aguas de lluvia, generar una posible línea de mezcla uniendo la muestra correspondiente a Puelo, que se encuentra casi exactamente sobre la LMM, y el punto perteneciente a los valores estándares del agua marina (coordenada (0,0)), pasando por uno de los puntos que representa al estuario Reloncaví.

Observando más de cerca (Figura 5.1), se puede determinar que las muestras pertenecientes a Ralún y Rollizos muestran una leve cercanía a la línea de mezcla creada. Adicionalmente, se obtiene una notoria dispersión de los datos que representan las termas de Puyehue, Aguas Calientes, Rupanco, El Callao, Cayetú y Cahuelmó.

Por otra parte, se decide estudiar con mayor detalle el comportamiento de estas aguas en cuanto a sus concentraciones de Na, K y Cl, las que presentan los siguientes coeficientes de correlación de Pearson (ρ): ρ (Na-Cl) = 0,97; ρ (K-Cl) = 0,72; ρ (Na-K) = 0,8. Así es como se obtienen 3 grupos constituidos de igual manera a como se muestra en la Figura 4.4. A estos se les realizará un profundo análisis mediante el uso de elementos mayores.

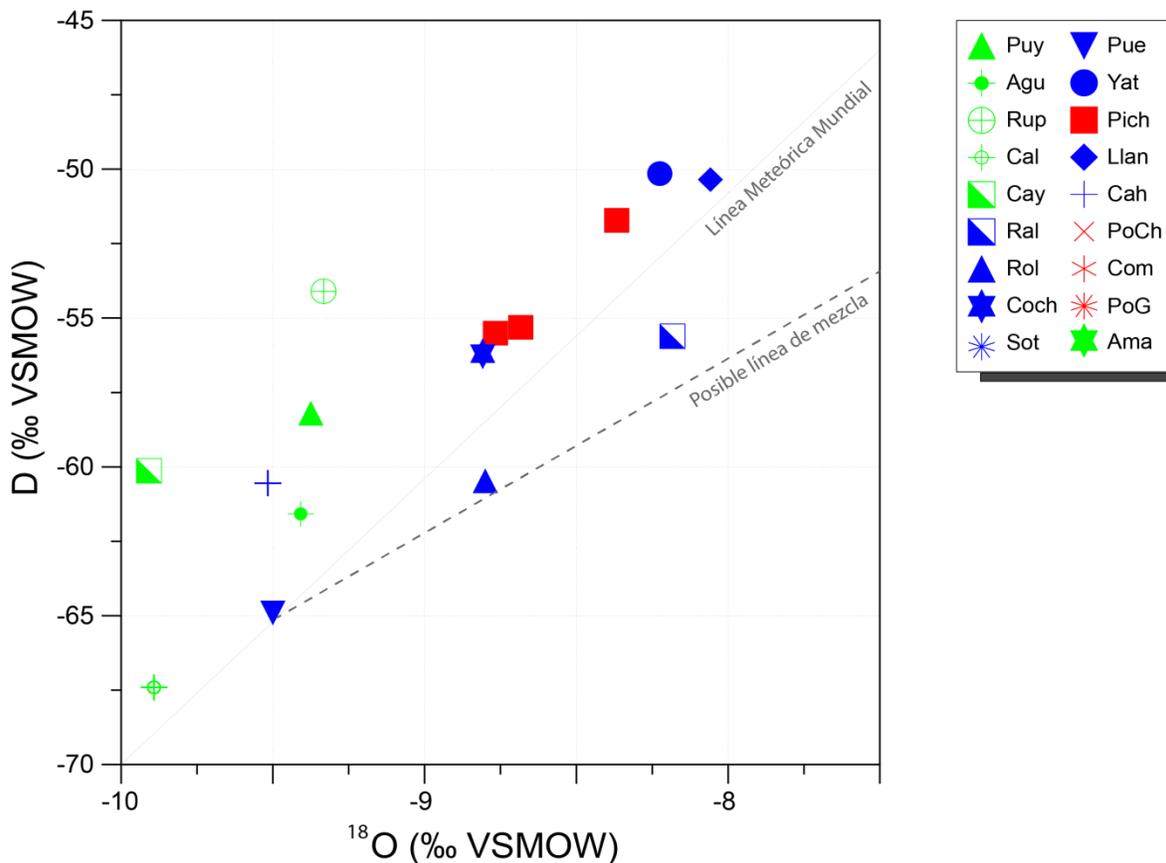


Figura 4.7: Diagrama binario de deuterio (^2H) versus ^{18}O centrado en las muestras de aguas termales, comparadas con la Línea Meteorica Mundial (LMM) (Craig, 1961). Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupancho. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

Clasificación según localización

A partir de la ubicación de las manifestaciones respecto a los elementos importantes para el desarrollo de un sistema geotermal (fuente de calor, permeabilidad y recarga de agua), se pueden dividir en 3 grandes grupos:

Manifestaciones relacionadas con sistemas volcánicos (SV): Estas corresponden a las aguas termales que se ubican en los alrededores de centros eruptivos (Pichicolo, Porcelana Chico, El Comau y Porcelana Grande), por lo que se asume que la influencia de estos se debe expresar en su información geoquímica. Las fuentes y los respectivos complejos volcánicos se resumen en la

Tabla 10. Sin embargo, se observa que esto no se ve reflejado en la acidez de las aguas (todas muestran valores de pH entre 6,59 y 8,39), ni en la razón de cloruros (Figura 4.3), incluso se perciben diferencias en las razones B/Cl (Figura 5.4), lo cual podría deberse a las estructuras que conectan las manifestaciones con los centros volcánicos; debido a esto se establece un subgrupo que separa a aquellas aguas termales que afloran sobre estructuras siniestrales pertenecientes al SFLA (Porcelana Chico, El Comau y Porcelana Grande) de las que lo hacen mediante fallas del SFLO (Pichicolo). Las temperaturas registradas varían desde 42,2 y 85,1°C (media: 60,9°C), siendo, de esta manera, las temperaturas más altas observadas en la zona de estudio. Estas aguas termales afloran sobre lavas y depósitos piroclásticos pleistocenos, rocas de la franja central del BNP, y sobre esquistos anfibolíticos del CMBM. Estas presentan símbolos de color rojo en los diagramas químicos existentes en este trabajo.

Tabla 10: Resumen de fuentes termales con sus respectivos complejos volcánicos a los que se asocian espacialmente

Fuentes termales	Centro volcánico cercano
Pichicolo	Volcanes Apagado y Hornopirén
Pichicolo	Volcanes Apagado y Hornopirén
Pichicolo	Volcanes Apagado y Hornopirén
Porcelana Chico	Volcán Huequi y Barranco Colorado
El Comau	Porcelana
Porcelana Grande	Porcelana

Manifestaciones situadas sobre trazas de la ZFLO en el continente (ZFLO-C): Las manifestaciones termales que se clasifican en este grupo corresponden a las que se localizan sobre estructuras relacionadas al SFLO dentro de territorio continental y que no se ven afectadas directamente por las variaciones del nivel del mar, pero sí pueden mostrar una importante relación con recargas de aguas meteóricas por permeabilidad secundaria. En particular, estas corresponden a aguas neutras con tendencia alcalina, observándose valores de pH entre 7,18 y 9,50. Las temperaturas observadas se encuentran en el rango de 50,5 – 65,0°C. Por otro lado, estas surgencias ocurren sobre lavas pleistocenas y cretácicas; y

rocas del BNP (franja central y oriental). Estas presentan simbología de color verde (Puyehue, Aguas Calientes, Rupanco, El Callao, Cayetú y El Amarillo).

Manifestaciones situadas sobre trazas de ZFLO o del SFLA asociadas a aguas marinas (ZFLO-M; SFLA-M): La mayoría de las aguas termales estudiadas corresponden a este grupo, ya que se ubican sobre estructuras pertenecientes a la ZFLO que son cubiertas por aguas salinas, ya sea en fiordos o estuarios. Casi todas las muestras correspondientes a estas aguas se obtuvieron durante períodos de marea baja, ya que durante las horas con marea alta eran tapadas por las aguas salinas. Estas presentan contenidos muy altos de cloruros y presentan valores de pH neutros a levemente alcalinos (pH: 7,19 – 9,06). Las temperaturas que registran estas aguas varían desde 24,7 hasta 60,9°C (media: 35,8°C); de modo que estas manifestaciones son más frías que las pertenecientes a los otros grupos. También, es importante recalcar que los lugares de surgencia se ubican principalmente sobre lavas pleistocenas y cretácicas, rocas del BNP (franja central y oriental) y sobres esquistos anfíbolíticos del CMBM; es decir, básicamente sobre rocas ígneas y metamórficas fracturadas. Estas manifestaciones se representan con símbolos de color azul en los diagramas de este estudio (Ralún, Rollizos, Cochamó, Sotomó, Puelo, El Yate, Llancahué y Cahuelmó).

4.3.2. Aguas superficiales

Las aguas superficiales que posiblemente influyen en las aguas termales estudiadas se resumen en la Tabla 11, comprendiendo esteros, ríos, estuarios y fiordos.

Tabla 11: Resumen de aguas termales y aguas superficiales probablemente involucradas en sus sistemas respectivos.

Agua superficial	Termas asociadas	Fecha	X	Y	Alt [m.s.n.m]	pH	Temp [°C]
Río Petrohué	Ralún	21-03-2014	723173	5417611	5	7.34	15.4
Estero Sacho	Rollizos	21-03-2014	723569	5410444	0	6.99	10.50
Río Cochamó	Cochamó	20-03-2014	731290	5406002	25	6.71	11.6
Mar Estuario Reloncaví (centro del estuario)	Rollizos, Cochamó, El Yate	20-03-2014	718249	5385433	0	7.86	15.3
Mar Estuario Reloncaví (costa)	Rollizos, Cochamó, El Yate	24-01-2014	716981	5380677	0	7.6	19.1
Estero Pichicolo	Pichicolo	23-01-2014	702874	5350330	75	6.41	10.8
Mar Fiordo El Comau (costa)	Llancahué, Cahuelmó, Porcelana Chico, El Comau, Porcelana Grande	23-01-2014	705681	5339050	0	8.08	18.1
Río Cahuelmó	Cahuelmó	23-01-2014	716672	5318760	2	5.96	11.7
Lluvia Península de Huequi	Todas	17-02-2014	709370	5302513	42	6.43	
Río Punta Calle	Porcelana Chico	15-03-2014	706312	5300883	370	6.96	10
Río Porcelana	Porcelana Grande	17-02-2014	708933	5296263	117	7.31	11
Mar Fiordo El Comau (centro del fiordo)	Llancahué, Cahuelmó, Porcelana Chico, El Comau, Porcelana Grande	17-02-2014	710859	5294831	0	7.5	19.8
Río san Antonio	El Amarillo	18-03-2014	708458	5236287	251	7.13	10.8

Las aguas con mezclas marinas (Estuario Reloncaví y Fiordo El Comau) se clasifican, según el diagrama de Piper (1944) como aguas cloruradas sódicas, mientras que las aguas pertenecientes a ríos y esteros muestran tendencias mucho más variadas, sobre todo respecto a las concentraciones de aniones, como se observa en la Figura 4.8. Las aguas dulces que muestran mayores concentraciones de cloruros corresponden a las del Estero Sacho y el Río Cochamó, las cuales caen dentro del campo de aguas cloruradas sódicas.

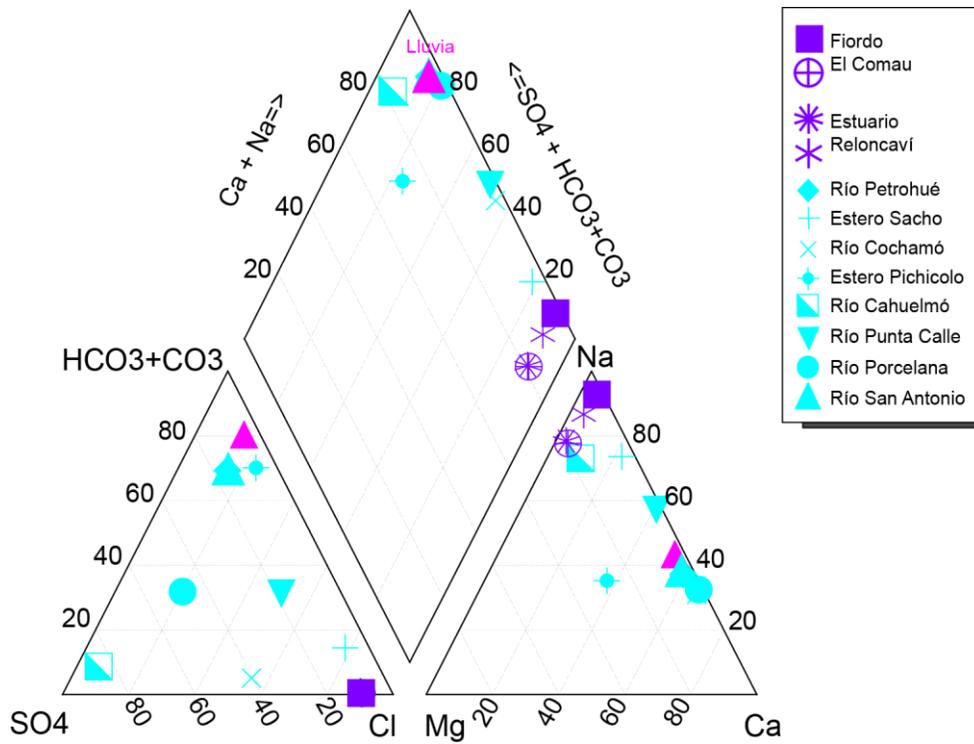


Figura 4.8: Clasificación de aguas superficiales según el diagrama de Piper (Piper, 1944). Símbolos de color celestes corresponden a ríos y esteros; símbolos de color morado señalan muestras de aguas salinas presentes en el Fiordo El Comau y el Estuario Reloncaví; y símbolo de color magenta representa una muestra de agua de lluvia.

5. Análisis de resultados

5.1. Agrupación de manifestaciones termales según datos geoquímicos

Dadas las agrupaciones de manifestaciones que se observan en las figuras anteriores, se procede a ilustrar los comportamientos que tienen en común las aguas termales pertenecientes a un mismo grupo, observables en diferentes diagramas de clasificación, y contrastar estos conjuntos respecto a sus ubicaciones geoespaciales mediante el uso de colores.

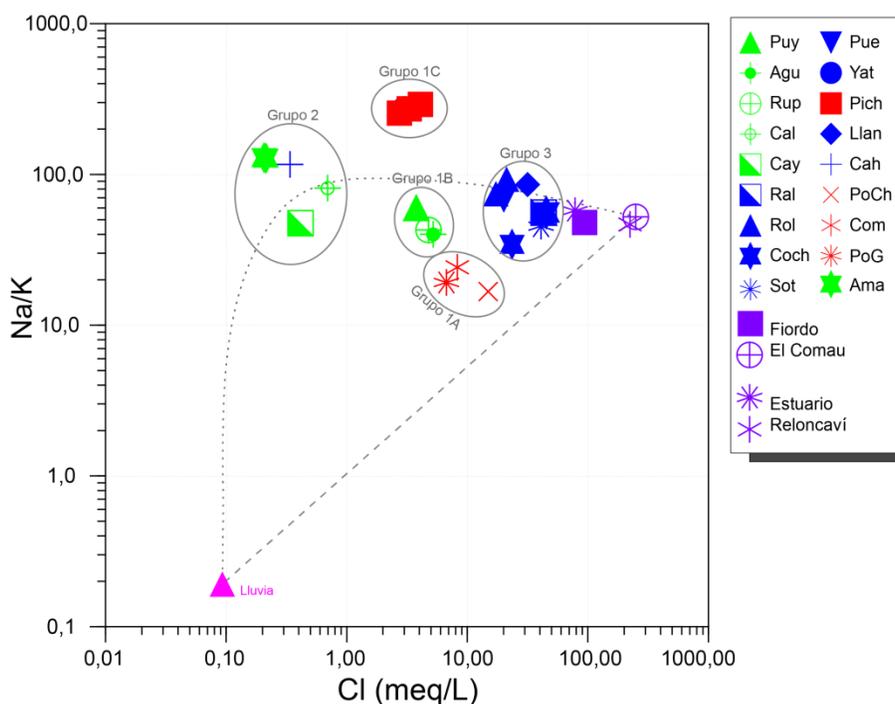


Figura 5.1: Diagrama binario de Na/K versus Cl [Meq/l] correspondiente a las muestras de las manifestaciones termales estudiadas. Se diferencian los 6 grupos mencionados en este capítulo. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

Utilizando los resultados presentados anteriormente, particularmente los diagramas de la Figura 4.4, la Figura 4.6, y la Figura 5.1, se pueden determinar distintos grupos:

a) **Grupo 1:** Este se compone principalmente por aguas con comportamientos similares entre sí respecto a sus concentraciones de elementos mayores, las que estarían relacionadas a ambientes de dominio volcánico y que muestran un especial enriquecimiento de Na respecto a la línea de mezcla homogénea (Figura 4.4), como se puede corroborar en el diagrama de la Figura 5.1. De acuerdo a los coeficientes de correlación de Pearson existentes entre las concentraciones de cloruros y las de Na y K, 0,97 y 0,72 respectivamente, se puede establecer *a priori* que los manantiales pertenecientes a este grupo con menores concentraciones de Na corresponderían a aquellos que contienen menor influencia de aguas salinas. A partir de ello es que se han creado 3 subgrupos como se definen a continuación:

- i) **Grupo 1A:** En este se clasifican las aguas termales de Porcelana Chico, El Comau y Porcelana Grande, pertenecientes a la clasificación SV (página 87) específicamente al grupo de termas que afloran sobre el SFLA. Estas corresponderían a los sistemas geotérmicos que tendrían mayores aportes profundos según lo que indican las altas razones B/Cl (Giggenbach, 1991; Sánchez *et al.*, 2013), y por ende se asume un aporte marino despreciable, reafirmado por las razones de Cl/B observados en la Figura 5.5, donde el valor promedio para casos de origen hidrotermal es de $r_{Cl/B} = 366,0$.
- ii) **Grupo 1B:** A este subgrupo pertenecen las fuentes termales de Puyehue, Aguas Calientes y Rupanco. Debido a su localización, a estas se les estima un pequeño dominio de aguas superficiales, relacionadas a los lagos Puyehue y Rupanco, y una gran influencia de parte de la interacción agua-roca con plagioclasas sódicas contenidas en la unidad más antigua del volcán Puyehue, correspondiente a lavas basalto-andesíticas (Otero, 2013), lo que puede evidenciarse por medio de la leve tendencia vertical observada en el diagrama de isótopos estables

(Figura 4.7) de estas 3 fuentes estrechamente relacionadas; de modo que se puede discutir acerca de la existencia de interacciones entre estas aguas y ácido sulfhídrico (H_2S) proveniente de estos centros volcánicos. Por otra parte, los aportes de cloruros se presumen de origen principalmente geotérmico (Celis, 2012).

- iii) **Grupo 1C:** En este conjunto se han agrupado las manifestaciones termales de Pichicolo y El Yate, correspondiendo estas a aguas con mayores concentraciones de sodio en comparación a los subgrupos 1A y 1B, por lo tanto se consideran como aguas de aporte marino muy bajo, mientras que los cloruros no aportados por mezclas con aguas salinas podrían tener orígenes geotérmicos.

- b) **Grupo 2:** Este conjunto se define por las termas de El Callao, Cayetué, Cahuelmó y El Amarillo, correspondiente a aguas que presentarían aportes subterráneos similares a los aportes de las aguas del grupo 1B (Figura 5.5) (Giggenbach, 1991), lo que se relaciona de buena manera con los bajos índices de cloruros, de modo que se puede establecer desde ya al origen meteórico como la componente principal de la recarga de estos sistemas. Por otra parte, lo anterior se refleja de excelente manera en el diagrama de Schoeller que relaciona las composiciones de estas aguas termales y las aguas superficiales aledañas (Figura 5.2).

- c) **Grupo 3:** Este grupo es conformado únicamente por fuentes termales pertenecientes al conjunto ZFLO-M, las que presentan las mayores concentraciones de cloruros dentro de las fuentes termales estudiadas. Sin embargo, existen importantes diferencias dentro de la química de estas fuentes reflejadas en las concentraciones de B, HCO_3 y Ca,

correspondientes a componentes relacionados con el nivel de transporte de las aguas hasta la zona de manifestación, con el aporte de CO₂ magmático y con diversas posibilidades de equilibrio mineral relacionadas con la participación del calcio, para cada caso; las cuales se estiman desvinculadas de la actividad del K y, en menor medida, del Na, puesto que presentan bajos índices de correlación de Pearson (0,21 y 0,51, respectivamente), lo que acota la búsqueda de reacciones de equilibrio para el modelamiento de fases minerales estables en las condiciones presentes en estos fluidos.

Tomando en cuenta lo anterior, se clasifican los siguientes subgrupos:

- i) **Grupo 3A:** Las fuentes termales pertenecientes a este conjunto corresponden a las termas de Ralún y de Rollizos. Estas presentan altos índices de cloruros, y presentan una signatura isotópica meteórica con una posible mezcla con aguas marinas de manera leve (Figura 4.7). A pesar de estas similitudes es importante considerar que contienen concentraciones de B muy distintas (Figura 5.5, muestras 6 y 7): Ralún presenta un alto valor (4,3 mg/l), mientras que para las termas de Rollizos estos son muy bajos (0,06-0,08 mg/l), lo que se puede relacionar directamente, en este último caso, a un mayor transporte desde el lugar del posible reservorio.

- ii) **Grupo 3B:** Esta clasificación la componen las termas de Cochamó, Sotomó, Puelo y Llancahué, las que presentan signaturas isotópicas que indican un origen principalmente meteórico (Figura 4.6), además de presentar las mayores concentraciones de Mg que, por lo general se asocian a interacciones con aguas marinas (Custodio & Llamas, 1983).

Teniendo presente la característica higroscópica de las sales, y dado que en todos los diagramas que involucran concentraciones de cloruros se observa que

existen importantes enriquecimientos, estos pueden tomarse como trazadores, considerando que la curva $\delta D - \delta^{18}O$, muestra que la componente marina no es relevante y que, por lo tanto, estas sales mostrarían otras posibles recargas y procesos. Si las sales no corresponden en su totalidad a aportes geotérmicos podrían eventualmente afectar los resultados de las temperaturas obtenidas por geotermómetros basados en los cationes con altos p respecto a los cloruros.

Una evidencia relacionada a los múltiples orígenes de los cationes corresponde a la dispersión en la que se distribuyen las fuentes termales respecto a la relación Na/Cl. En la Figura 4.4 y la Figura 5.3 se muestra que existen grados de mezcla distintos y, probablemente, diferentes orígenes para los grupos recién definidos. Para ello se recomienda notar que la correlación entre Na y Cl cambia de manera importante entre cada cúmulo.

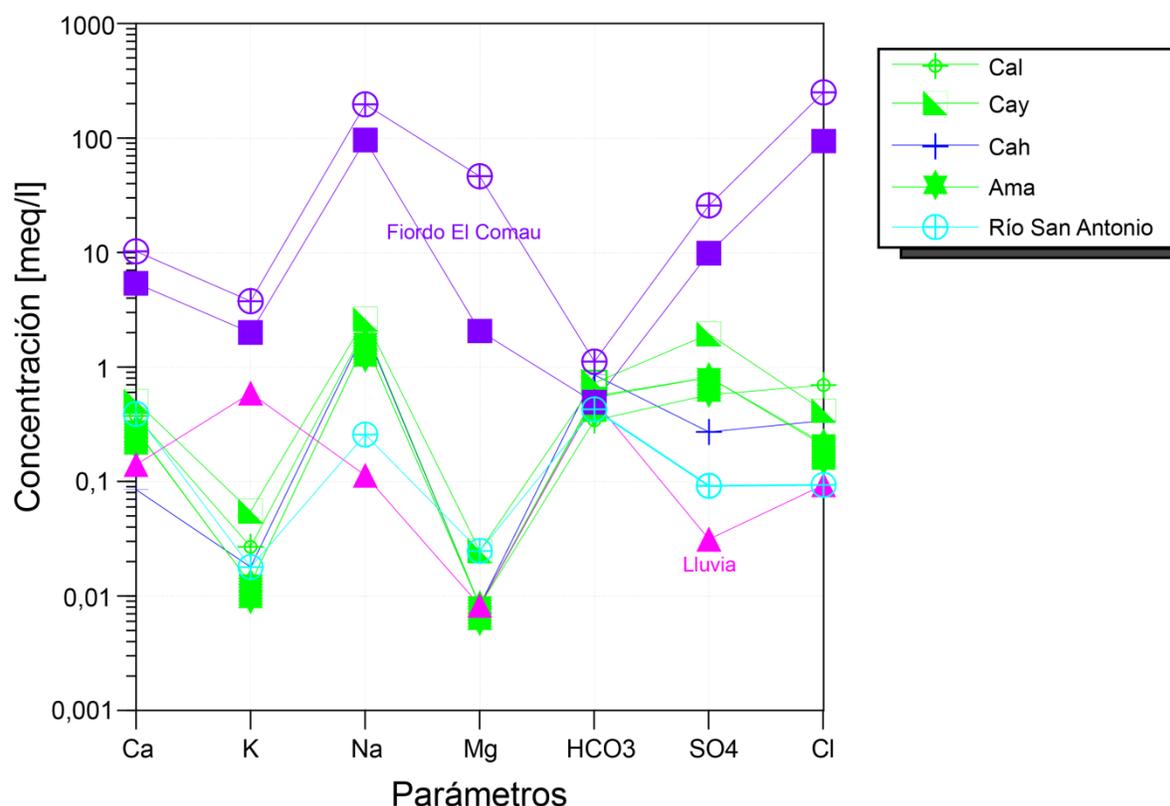


Figura 5.2: Diagramas de Schoeller comparativos entre aguas termales y superficiales cercanas. Los análisis corresponden a las aguas termales pertenecientes al Grupo 2: Cal: El Callao; Cay: Cayetúe; Cah: Cahuelmó; Ama: El Amarillo.

El aporte de las aguas superficiales, de acuerdo a la geoquímica mostrada por las aguas superficiales (Tabla 8), se puede acotar a Na y Cl, en el caso de las aguas con mezclas marinas (estuario Reloncaví y fiordo El Comau); y a HCO_3 , Na, Ca y, en menor medida Cl, en el caso de las aguas dulces.

A *priori*, se pueden inferir algunos presuntos orígenes, según menciona Vengosh (2003), mediante el uso de las concentraciones de B, Br y Cl. Esto se debe a que estos elementos se caracterizan por reaccionar de manera distinta entre sí ante el transporte hídrico: el B se define como un elemento muy volátil, cuya razón disminuye a medida que se encuentra más lejos de su fuente, tal como se utiliza en el diagrama Cl-Li-B de Giggenbach (1991). Por otro lado, el Cl y el Br corresponden a elementos conservativos, es decir que tienden a preservarse en un fluido durante su recorrido.

A partir de la Figura 5.6 se estima muy probable que los cloruros presentes en las manifestaciones que componen los grupos 1 y 2 registren orígenes principalmente hidrotermales, en mayor medida el grupo 1A, seguido por el grupo 2. Mientras que el grupo 3B presentaría probablemente orígenes marinos diluidos. Además, se puede observar que en la Figura 5.5, donde se representa el diagrama B-Cl, estos resultados concuerdan de manera directa, por lo que se puede utilizar este último para determinar el posible origen de los fluidos de los cuales no se cuenta con las concentraciones de Br. De esta manera, las aguas termales de Rollizos (Rol), pertenecientes al grupo 3A, presentarían orígenes similares a los inferidos para las termas de Sotomó (Sot), mientras que las termas de Ralún (Ral), al contener mayor razón B/Cl, se concluye un mayor aporte subterráneo, probablemente geotérmico. Del mismo modo, se establece que en el caso de las aguas que componen el grupo 1B presentarían un origen casi netamente hidrotermal, al igual que el grupo 1A.

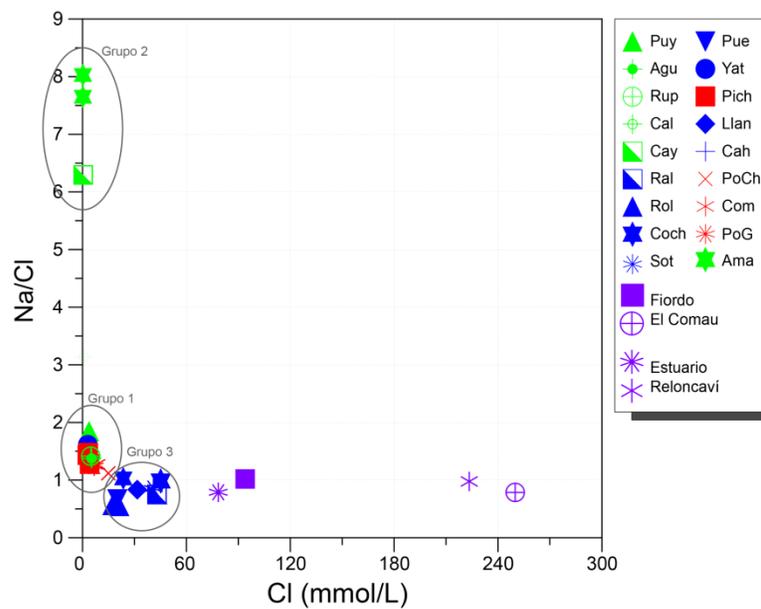


Figura 5.3: Diagrama Na/Cl versus Cl (mmol/l). En esta figura se destacan aquellas fuentes termales que presentan razones de Na muy diferentes entre sí. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

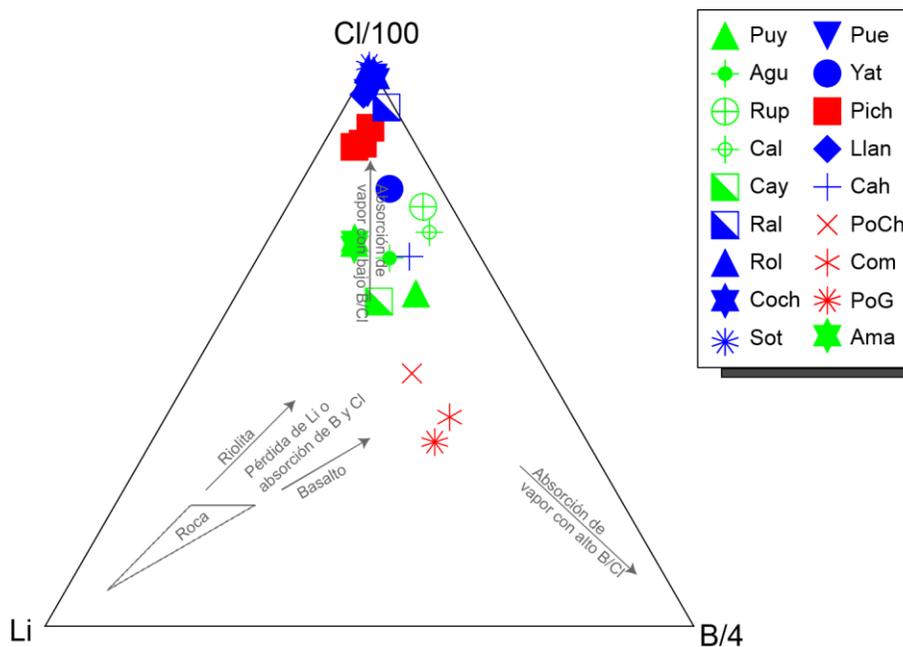


Figura 5.4: Diagrama de elementos conservativos (Giggenbach, 1988). Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

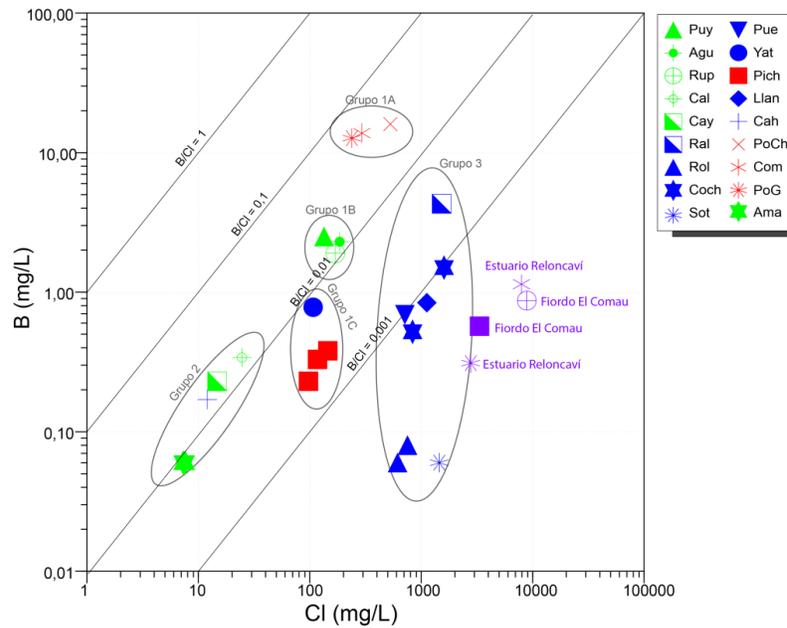


Figura 5.5: Diagrama binario que relaciona los contenidos de B y Cl⁻ de las aguas termales respecto a las aguas superficiales salinas más próximas. Se diferencian 6 grupos mencionados en el apartado Agrupación de manifestaciones termales según datos geoquímicos (página 92). Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

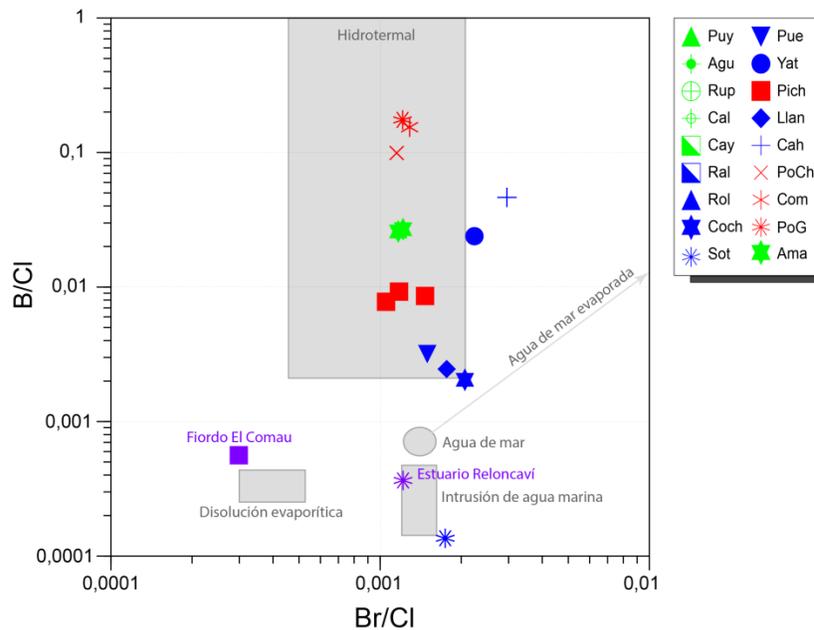


Figura 5.6: Diagrama de orígenes de cloruros según las relaciones B/Cl y Br/Cl. Modificado de Vengosh (2003). Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

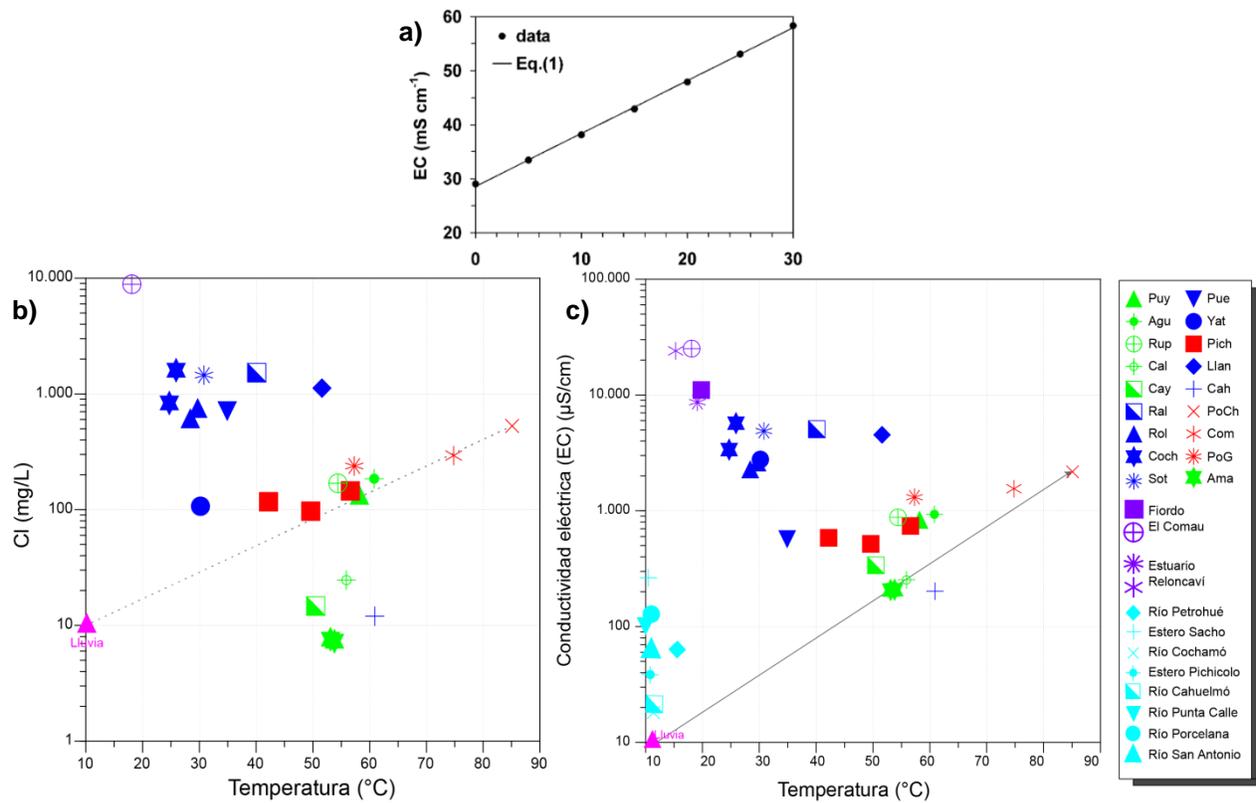


Figura 5.7: A. Diagrama de temperatura versus conductividad eléctrica correspondiente a agua marina estándar (Hayashi, 2004). B. Relación entre concentraciones de cloruros y temperaturas superficiales de las manifestaciones termales estudiadas. C. Diagrama de temperatura versus conductividad eléctrica correspondiente a Manifestaciones termales estudiadas. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

Otra característica que puede revelar la existencia de cloruros de origen externos en las aguas termales es la relación temperatura-conductividad eléctrica, la cual presenta una tendencia casi lineal tanto para aguas superficiales como subterráneas (Hayashi, 2004). Sin embargo, la distribución observada en el caso de las aguas termales analizadas para el presente estudio se presenta muy dispersa (Figura 5.7).

5.2. Geotermometría

A continuación se presentan distintos geotermómetros con el fin de ver efectivamente cuáles son las aguas termales que se encuentran sobre o subvaloradas debido a la acción de mezclas de aguas superficiales u otros procesos.

Geotermómetro de Na⁺/K⁺

Este geotermómetro se basa en el equilibrio representado por las concentraciones de albita y feldespatos potásico (Giggenbach, 1988):



Las ecuaciones de las cuales pueden obtenerse valores estimados de temperatura para distintas fuentes termales analizadas a partir de muestras superficiales, corresponden a las siguientes:

$$T [^\circ\text{C}] = \frac{1390}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + 1,75} - 273,15 \quad (4)$$

(Giggenbach, 1988)

$$T [^\circ\text{C}] = \frac{1289}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + 1,615} - 273,15 \quad (5)$$

(Verma & Santoyo, 1997)

$$T [^{\circ}\text{C}] = \frac{883}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + 0,908} - 273,15 \quad (6)$$

(Díaz-González *et al.*, 2008)

Su uso está orientado, en particular, a aguas cloruradas, con valores de pH neutro a alcalino, mientras que presenta un rango de error amplio para sistemas geotérmicos con temperaturas inferiores a 160°C (Díaz-González *et al.*, 2008), por lo cual tiende a generar resultados sobreestimados para sistemas de baja a media entalpía como es el caso de la mayoría de las fuentes termales analizadas en la región.

En la Figura 5.8 se muestran las fuentes termales del área de estudio con sus respectivas razones de Na^+/K^+ y sus temperaturas medidas en superficie.

Geotermómetro de K-Mg

Este método se basa en el equilibrio entre las fases minerales feldespato potásico, moscovita, clorita y cuarzo, respecto a las condiciones de temperatura presentes en el reservorio, básicamente a partir del comportamiento excepcional del Mg respecto a su relación inversa entre solubilidad y temperatura, donde se observa que su concentración disminuye a medida que la temperatura es mayor en el reservorio (D'Amore & Arnórsson, 2000), al contrario de lo que ocurre con las concentraciones del K. De este modo, existe una correlación positiva entre la razón K/Mg y las temperaturas estimadas mediante este geotermómetro, para las cuales se utiliza la (7) y la (8).

$$T [^{\circ}\text{C}] = \frac{4410}{13,95 - \log\left(\frac{\text{K}^2}{\text{Mg}}\right)} - 273,15 \quad (7)$$

(Giggenbach *et al.*, 1983)

$$T [^{\circ}\text{C}] = \frac{2330}{7,35 - \log\left(\frac{\text{K}^2}{\text{Mg}}\right)} - 273,15 \quad (8)$$

(Fournier, 1991)

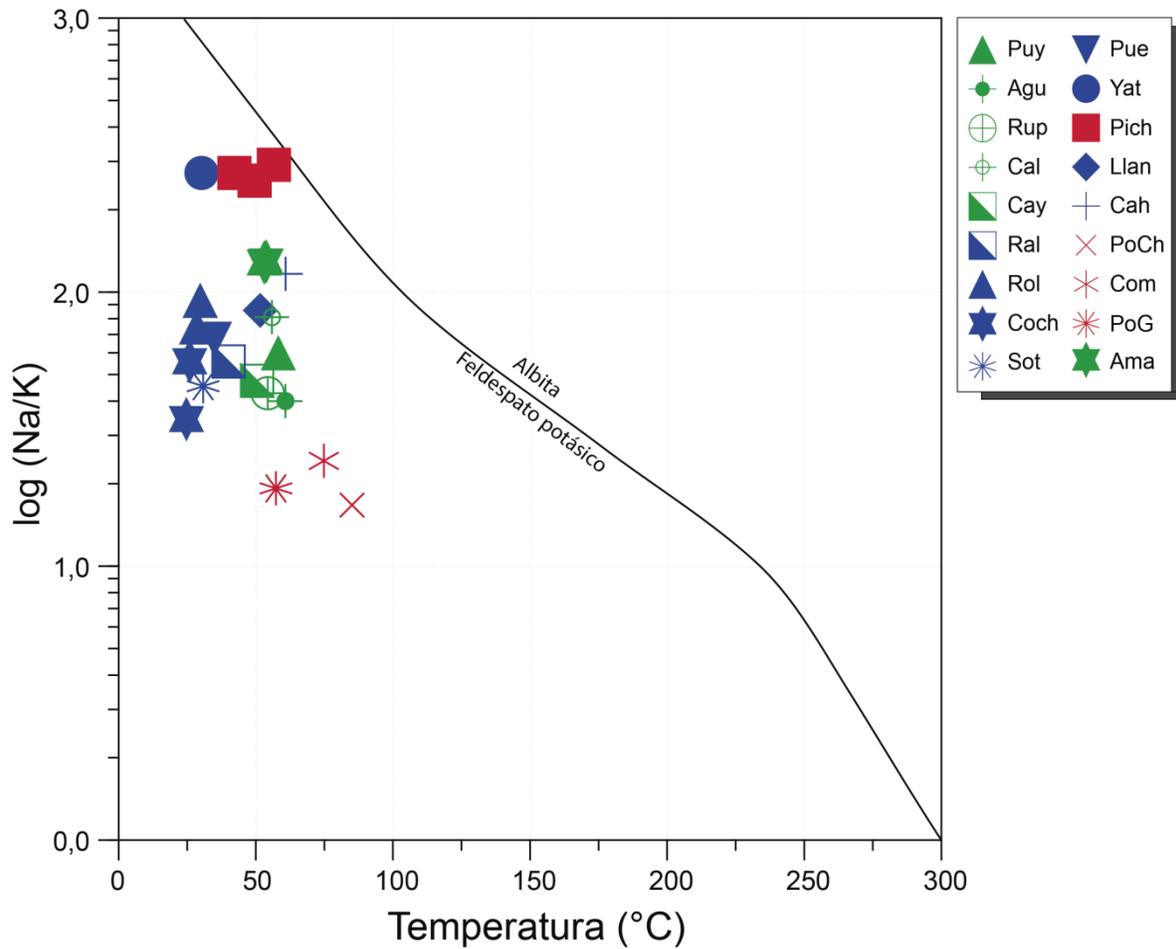
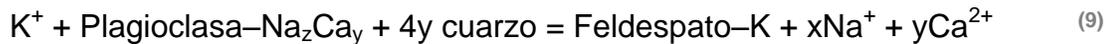


Figura 5.8: Diagrama perteneciente al geotermómetro de Na^+/K^+ (Giggenbach, 1988), respecto a las aguas termales estudiadas. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

Geotermómetro Na-K-Ca

Las temperaturas estimadas mediante este método tienden a presentar un mejor acercamiento a los valores obtenidos de manera experimental en pozos cercanos (Fournier & Truesdell, 1973; Fournier, 1977), lo que se relaciona a la corrección que significa la adición del componente cálcico en estos análisis, debido a su participación en la alteración de plagioclasas sódico-cálcicas en feldespatos potásicos, liberándose cationes de Na^+ y Ca^{2+} , como se explica en la (9).



A partir de la definición de la constante de equilibrio, se estiman las temperaturas existentes en subsuperficie utilizando la (10).

$$T[^\circ\text{C}] = \frac{1647}{\log \frac{\text{Na}}{\text{K}} + \beta \cdot \left(\log \frac{\sqrt{\text{Ca}}}{\text{Na}} + 2,06 \right) + 2,24} - 273,15 \quad (10)$$

(Fournier, 1977)

Con:

$$\beta = \frac{4}{3}$$

Ya que en todos los casos:

$$\log \frac{\sqrt{\text{Ca}}}{\text{Na}} + 2,06 \geq 0 \quad (11)$$

Geotermómetro de sílice

El geotermómetro de sílice se basa en la correlación existente entre la presencia de calcedonia o cuarzo de acuerdo a la estabilidad que estos minerales presentan a diferentes rangos de temperatura; donde la calcedonia se encuentra de manera más abundante en aguas con temperaturas inferiores a 200°C, en las cuales se encontraría en equilibrio por última vez con el sistema geotermal en profundidad.

La reacción básica a la que se hace referencia, es la correspondiente a la que controla la solubilidad de los polimorfos de sílice ((12).



Las ecuaciones utilizadas corresponden a las indicadas a continuación:

$$T[^\circ\text{C}] = \frac{1112}{4,91 - \log(S)} - 273,15 \quad (13)$$

(Arnórsson *et al.*, 1983)

$$T[^\circ\text{C}] = \frac{1000}{4,55 - \log(S)} - 273,15 \quad (14)$$

(Giggenbach, 1991)

$$T[^\circ\text{C}] = C_1 + C_2 \cdot S + C_3 \cdot S^2 + C_4 \cdot \log(S) \quad (15)$$

Con:

$$C_1 = -44,119; C_2 = 0,24469; C_3 = -1,7414 \cdot 10^{-4}; C_4 = 79,305$$

(Verma & Santoyo, 1997)

Este método ha sido ocupado ampliamente para sistemas de aguas con presencia de mezclas (Giggenbach, 1991) y se ha utilizado la ecuación adaptada

para sistemas con temperaturas entre 20 y 210°C y concentraciones de sílice que no superen los 295 ppm.

Las distintas temperaturas obtenidas para los sistemas geotermiales estudiados se resumen en la Tabla 12, donde se pueden observar importantes diferencias entre estos valores. Sin embargo, es importante recalcar que los geotermómetros de Na/K presentan una tendencia a sobreestimar estos valores para sistemas con temperaturas menores a 160°C (Díaz-González *et al.*, 2008); mientras que también es relevante señalar que los geotermómetros de sílice utilizados no presentan corrección alguna respecto al pH afectado por la producción de H_3Si_4^- a partir de la hidrólisis del ácido silícico (H_4SiO_4^0), de modo que en ambos casos se debe mantener precaución acerca de la exactitud. Mas, a pesar de ello, se consideran como los geotermómetros más confiables para este estudio (Verma & Santoyo, 1997) junto con el de la razón Na/K (Díaz-González *et al.*, 2008).

Tabla 12: Resumen de temperaturas (°C) estimadas para los sistemas termales estudiados, determinados a partir de diversos geotermómetros.

Fuente termal	Medida en superficie	SiO ₂ ^(c)	SiO ₂ ^(f)	SiO ₂ ^(g)	K-Mg ^(a)	K-Mg ^(e)	Na-K-Ca ^(b)	Na/K ^(d)	Na/K ^(g)	Na/K ^(h)
Puyehue	58,2	100,6*	109,2*	129,1*	82,2	127,8	117,7	148,6	134,7	86,7
Aguas Calientes	60,8	96,0*	103,9*	124,6*	82,4	128,3	115,3	172,1	158,4	114,1
Rupanco	54,4	98,6*	106,9*	127,2*	77,5	116,8	108,1	168	154,2	109,3
El Callao	55,9	81,9*	87,6*	111,0*	68,5	96,3	57,4	132,4	118,4	68,4
Cayetué	50,5	83,5*	89,5*	112,5*	72,4	105	75,2	161,9	148	102,1
Ralún	40,1	70,3*	74,3*	99,6*	108,8	198	109,9	152,4	138,5	91
Rollizos	29,7	56,0*	58,1*	85,5*	69,9	99,3	54	125,5	111,4	60,7
	28,4	56,0*	58,1*	85,5*	109,2	199	55,5	136,8	122,8	73,3
Cochamó	25,9	58,4*	60,9*	87,9*	70,3	100,2	201,2	152,3	138,4	91
	24,7	29,3	28,4	57,8	95,3	160,8	166,3	181,7	168,2	125,7
Puelo	30,8	19,4	17,4	46,9	92,1	152,4	140,5	164,5	150,7	105,2
El Yate	34,9	41,9	42,3	71,1	84,2	132,6	70,8	141,9	127,9	79
Sotomó	30,2	64,1	67,3	93,5	41	40,1	55	78,4	64,4	10,6
Pichicolo	42,2	53,4	55,3	82,9	41	40,1	41	78,4	64,4	10,6
	49,6	41,9	42,3	71,1	36,6	31,9	35,2	80,9	66,9	13,2
	56,6	50,8	52,3	80,2	45	47,7	39,4	75,7	61,7	7,9
Llancahué	51,6	48,0	49,1	77,4	73,1	106,6	96,5	129,4	115,4	65,1
Cahuelmó	60,9	75,9	80,7	105,1	59,4	76,7	74,7	114,5	100,3	48,6
Porcelana Chico	85,1	153,5	172,0	180,7	164,8	398,5	176,6	233,8	221,3	191,6
El Comau	74,8	-	-	-	129	260,5	126,9	205,6	192,5	155,2
Porcelana Grande	57,3	108,1	117,93	136,33	129	260,5	126,5	222,8	210	177,2
El Amarillo	53,8	66	69,47	95,4	52,3	62	39,9	109,7	95,6	43,5
	53,1	68,2	71,97	97,57	52,3	62	39,6	110	95,9	43,9

Referencias: (a) Fournier & Truesdell, 1973. (b) Fournier, 1977. (c) Arnórsson *et al.*, 1983. (d) Giggenbach, 1988. (e) Fournier, 1991. (f) Giggenbach, 1991. (g) Verma & Santoyo, 1997. (h) Díaz-González *et al.*, 2008. (*) En base a datos obtenidos por Pérez (1999).

Habiéndose obtenido los resultados presentados en la Tabla 12, se presentan diagramas de relación entre las temperaturas medidas en superficie y las estimadas por medio de cada geotermómetro (Figura 5.9). Por ende, la mayor dispersión se atribuye a mayor influencia externa sobre las composiciones involucradas en los cálculos geotermométricos.

Entonces, dado lo observado en la Figura 5.9, para este estudio se considerará el geotermómetro de SiO₂ como el geotermómetro más confiable.

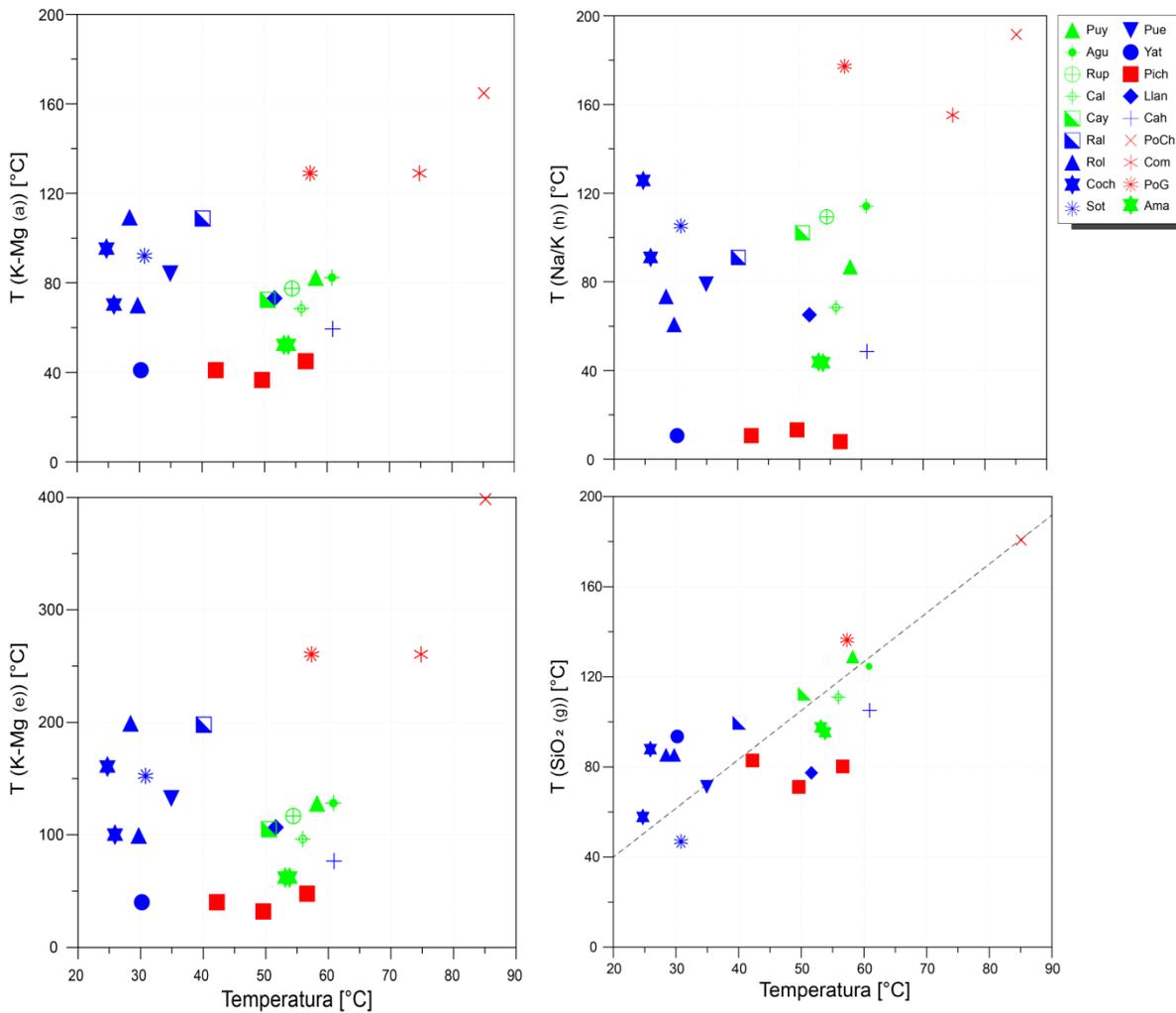


Figura 5.9: Diagramas de correlación entre los geotermómetros indicados en la Tabla 12 y las temperaturas medidas en superficie para cada agua termal. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetú. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo. Referencias: (a) Fournier & Truesdell, 1973. (e) Fournier, 1991. (g) Verma & Santoyo, 1997. (h) Díaz-González *et al.*, 2008.

5.3. Mapa de índices de favorabilidad geotérmica

Parte de este estudio deriva en la generación del mapa de favorabilidad geotérmica con los antecedentes presentados. Para ello, se utilizó el método desarrollado por Aravena (2012), que ocupa la ponderación de aspectos que favorecen el desarrollo de sistemas geotermiales, como se explica en el capítulo 1.1. Este modelo se desarrolla mediante el *software* ArcMap versión 10.1, utilizando los siguientes factores:

- i. *Volcanismo*: La existencia de fuentes de calor que dan origen a un sistema geotermal está relacionada directamente a la presencia de intrusiones magmáticas jóvenes en la corteza, que aún se encuentren transmitiendo calor de manera no despreciable; este caso es muy bien representado por los sistemas volcánicos, alrededor de los cuales, mediante la herramienta *buffer*, se considera un radio <7 km como un sector de gran favorabilidad geotérmica (Sanyal *et al.* 2002), entre 7 y 15 km de favorabilidad intermedia, mientras que a una distancia >15 km se determina una zona de favorabilidad nula.
- ii. *Geología local*: Es muy importante conocer qué tipo de rocas se encuentran en la zona de estudio dado que pueden estar albergando un posible reservorio; sin embargo, en este caso es válido acotar el análisis considerando los afloramientos de lavas jóvenes, del Plioceno, Pleistoceno y Holoceno (Noorollahi *et al.* 2007), pues representan actividad volcánica reciente, la que genera fuentes de calor en la forma de intrusivos y lo transmite principalmente mediante conducción.
- iii. *Permeabilidad*: El tipo de permeabilidad que más se destaca en las zonas donde existen manifestaciones es la secundaria debido a la alta frecuencia de estructuras (fallas y fracturas) presentes producto del SFLO y del SFLA, las que se distribuyen principalmente dentro de rocas del BNP y del CMBM.

De este modo, se trabaja con un mapa de densidades de estructuras, generado por la herramienta *density*, que involucran fallas normales (relacionadas a los *grabens* existentes en la Depresión Central (más detalle en el apartado 0)), inversas, de cizalle y plegamientos.

- iv. *Frecuencia sísmica:* La microsismicidad también se encuentra estrechamente relacionada a la existencia de sistemas geotermales, ya que se asocian a volcanismo activo o bien a fracturamientos generados por la dinámica de fluidos geotermales, por lo que se ponderan aquellos con epicentros ubicados a menos de 10 km. Sin embargo, no se cuenta con suficientes registros de este tipo de sismos dentro de la Región de Los Lagos (*International Seismological Centre, 2014*), por lo que en este estudio no se utiliza para calcular la favorabilidad geotérmica.
- v. *Alteraciones hidrotermales:* Dado que la existencia de fluidos, calor, permeabilidad y una roca con riesgo de ser lixiviada genera la aparición de minerales de alteración, estos son comúnmente encontrados en las áreas de manifestaciones geotermales. Pero, como se explica en el capítulo 2.2.3.2, el clima de esta zona del país se caracteriza por ser altamente lluvioso, por lo que se observa poca presencia de minerales de alteración, los que son fácilmente removidos en este tipo de ambientes. Por ello se prescinde de este factor para el presente estudio.
- vi. *Manifestaciones termales:* Este factor es el más ponderado para obtener la favorabilidad geotérmica de la región, puesto que corresponde a la principal evidencia de la existencia de sistemas geotermales en zona sur del país. Por ello, este método utiliza la temperatura superficial medida en las manifestaciones (manantiales, pozas de barro y géiseres) trazando áreas radiales del mismo modo en el que se aplica para los sistemas volcánicos. Los radios utilizados se clasifican del siguiente modo: 5 km: muy favorable,

y 5-10 km moderadamente favorable (1 km adicional a lo indicado por Noorollahi *et al.* (2007)).

Las ponderaciones se distribuyen de la siguiente manera:

$$\text{Geología (40\%)} + \text{Geofísica (10\%)} + \text{Geoquímica (50\%)} = 100\% \quad (16)$$

Con:

$$\text{Geología} = \text{Litología (16\%)} + \text{Volcanes (16\%)} + \text{Estructuras (8\%)} \quad (17)$$

Geofísica = Microsismicidad (sismos de profundidades menores a 10 km)

Geoquímica = Temperatura superficial de fuentes termales + alteraciones hidrotermales

Dado que no se cuenta con suficientes datos de microsismicidad, en este trabajo se utiliza la ponderación mostrada en la (18, donde el 10% otorgado anteriormente a la densidad de sismos someros se reparte entre la geología (40+5%) y la geoquímica (50+5%).

Por otra parte, a la geoquímica se le agregan los datos obtenidos por dos diferentes geotermómetros, los que reciben una mayor ponderación debido a que indican de mejor manera las condiciones y características del sistema geotermal en profundidad; sin embargo, es importante señalar que estos valores fueron otorgados de manera arbitraria, al igual que el desglose de los porcentajes observados en las Ecuaciones (19, (20 y (21.

$$\text{Geología (45\%)} + \text{Geoquímica (55\%)} = 100\% \quad (18)$$

Con:

$$\text{Geología} = \text{Litología (15\%)} + \text{Volcanes (20\%)} + \text{Estructuras (10\%)} \quad (19)$$

$$\text{Geoquímica} = \text{Geotermómetros (45\%)} + \text{Temperatura superficie (10\%)} \quad (20)$$

A su vez:

$$\text{Geotermómetros} = \text{T(SiO}_2\text{)} (25\%) + \text{T(Na/K)} (20\%) \quad (21)$$

A cada rango de temperatura (Tabla 13 y Tabla 14), ya sea superficial o calculada mediante geotermometría (ver capítulo de Geotermometría), se le asigna 2 áreas para determinar su factor de favorabilidad: un radio <5km se considera muy favorable y uno de 5-10km medianamente favorable.

Este método utiliza una escala del 1 al 9 para cada índice de favorabilidad, los cuales se promedian mediante la intersección de las capas que se generan para cada factor, ocupando la herramienta de *weighted overlay* de ArcMap 10.1.

Tabla 13: Calificación de cada rango de temperaturas superficiales medidas *in situ*:

T superficial medida [°C]	Calificación
<40	Baja
40-70	Media
>70	Alta

Tabla 14: Calificación de cada rango de temperaturas obtenidas mediante los geotermómetros de sílice y Na/K:

T obtenida mediante geotermómetro [°C]	Calificación
<80	Baja
80-150	Media
>150	Alta

5.3.1. Índices de corrección de aporte externo (ICAE)

A partir de los análisis obtenidos mediante los diagramas generados tanto para aguas termales como superficiales, se procede a la determinación de un índice de influencia relativa de las fuentes de recarga en las estimaciones geotermométricas de las manifestaciones estudiadas.

Los geotermómetros que se utilizan para analizar sus sobre o subestimaciones corresponden al geotermómetro sílice de Verma & Santoyo (1997) y el de Na/K de Díaz-González *et al.* (2008), debido a que se encuentran corregidos y adaptados

para sistemas geotermales con rangos de temperatura media-baja (más detalles en el Capítulo de Geotermometría).

Tabla 15: Diferencias entre temperaturas calculadas mediante geotermómetros SiO₂ y Na/K y sus respectivos índices de corrección establecidos por presuntos aportes externos (ICAE).

$\Delta T = T(\text{SiO}_2) - T(\text{Na/K})$ [°C]	ICAE
Sobreestimación ($\Delta T < 0$)	
0 - 10	1
10 - 30	0,8
30 - 50	0,5
50 - 100	0,2
Subestimación ($\Delta T > 0$)	
0 - 10	1
10 - 30	1,5
30 - 50	2
50 - 100	4

A continuación, se resumen los índices de influencia externa (ICAE) correspondientes a cada rango de diferencia entre temperaturas calculadas por medio de los geotermómetros (Tabla 16), donde el posible aporte externo de cationes participantes en estos cálculos sería, probablemente, el principal responsable de las grandes diferencias entre estas, como se muestran en la Tabla 12.

Tabla 16: Orígenes de fuentes termales inferidos para cada grupo definido en el apartado de Agrupación de manifestaciones termales según datos geoquímicos, con sus respectivas diferencias de temperatura entre el geotermómetro de sílice y el de Na/K; a partir de los cuales se asigna una influencia relativa (Índice de Corrección de Aporte Externo (ICAE)).

Grupo	Orígenes principales inferidos	Promedio ΔT [°C] $T(\text{SiO}_2)^{(g)} - T(\text{Na/K})^{(h)}$	ICAE
1A	Hidrotermal, volcánico, litológico	-25,9	0,8
1B	Hidrotermal, volcánico, litológico	23,6	1,5
1C	Hidrotermal, acuífero (B1), litológico	77,6	4
2	Hidrotermal, volcánica, litológico	43,02	2
3A	Hidrotermal, mar	10,4	1,5
3B	Mar, litológico	-36,6	0,5

Referencias: (g) Verma & Santoyo, 1997. (h) Díaz-González *et al.*, 2008.

5.3.2. Aplicación de índices de corrección

Para desarrollar el mapa de favorabilidad se debe tomar en cuenta que este pondera las zonas cercanas a las manifestaciones termales de acuerdo a sus temperaturas superficiales, por lo que también se considerarán factores de ponderación relacionados a las temperaturas obtenidas con cada geotermómetro (de sílice (Verma & Santoyo, 1997) y de Na/K (Díaz-González *et al.*, 2008)). Estos factores serán multiplicados por los ICAE con el fin de reducir la dispersión de las temperaturas obtenidas para una misma manifestación.

Se agrupan las manifestaciones en distintos rangos de temperatura y, para cada caso, se definen las áreas que las rodean, cada una con un factor de ponderación distinto. De esta manera, se obtienen 3 grupos de manifestaciones, los cuales describen sistemas de baja, media y alta temperatura, tal como se realiza con las temperaturas medidas en superficie. Los rangos de temperatura se especifican en la Tabla 17, indicando si corresponden a sistemas de alta, media o baja temperatura.

Tabla 17: Rangos de temperaturas obtenidas mediante los geotermómetros de sílice y Na/K y su calificación como bajas, medias o altas:

T obtenida mediante geotermómetro [°C]	Calificación
<80	Baja
80-150	Media
>150	Alta

Al momento de sumar los factores favorables presentes en la región de estudio para obtener un mapa que ilustre comparativamente zonas de distintas favorabilidades geotérmicas de manera comparativa, estos se ponderan según su importancia asignada en este trabajo. Así, en la Tabla 18 se muestra el desglose del factor de ponderación (FP) asignado a las áreas con presencia de manifestaciones termales (determinado como un 55% respecto a los otros factores relacionados a la favorabilidad geotérmica), fijado de acuerdo a las temperaturas

obtenidas mediante los dos geotermómetros mencionados en este capítulo, quedando distribuido de la siguiente forma:

Tabla 18: Tabla de factores de ponderación (FP) de cada parámetro de temperatura perteneciente a las fuentes termales.

Temperatura	FP (%)
T(SiO ₂)	
Alta	12
Media	8
Baja	5
T(Na/K)	
Alta	10
Media	6
Baja	4
Superficial	
Alta	5
Media	3
Baja	2
Total	55

Considerando los factores de ponderación determinados en la Tabla 18, la (21) queda descrita de la siguiente forma:

$$\text{Geotermómetros} = \sum(\text{FP}_i \cdot a_i) \quad (22)$$

Donde:

$$\sum \text{FP}_i = 0,55$$

$\text{FP}_i = \text{FP}(T_i)$, donde $T_i = [T(\text{SiO}_2)]_i \cdot \text{ICAE}$ o $T_i = [T(\text{Na/K})]_i \cdot \text{ICAE}$

$T(\text{SiO}_2)$: temperatura obtenida mediante el geotermómetro de sílice (Verma & Santoyo, 1997)

$T(\text{Na/K})$: temperatura obtenida mediante el geotermómetro de Na/K (Díaz-González *et al.*, 2008)

$a_i = [1, 5, 9]$, dependiendo del radio de cercanía a la fuente termal (ver página 110).

Finalmente, se utiliza la (22 al momento de realizar la suma ponderada de los factores favorables mediante la herramienta *weighted overlay* de ArcMap 10.1.

El mapa de favorabilidad resultante se muestra en la Figura 5.11.

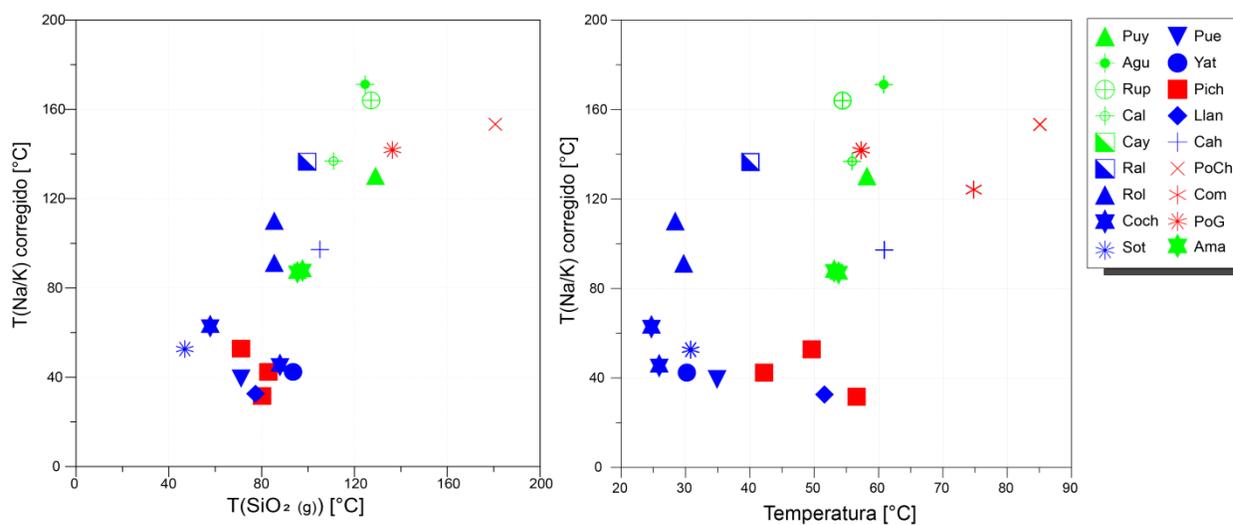


Figura 5.10: Diagramas de relación entre temperaturas obtenidas mediante la aplicación de los índice de corrección versus (a la izquierda) las temperaturas calculadas mediante el geotermómetro de SiO₂ (g): Verma & Santoyo, 1997); y (a la derecha) las temperaturas obtenidas *in situ* en las manifestaciones superficiales. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

A través de los diagramas de la Figura 5.10 es posible observar que la relación entre los valores corregidos de las temperaturas obtenidas con los geotermómetros y las temperaturas medidas en superficie presentan una gran dispersión, pudiendo deberse a la ocurrencia de procesos de desequilibrio que no están siendo considerados.

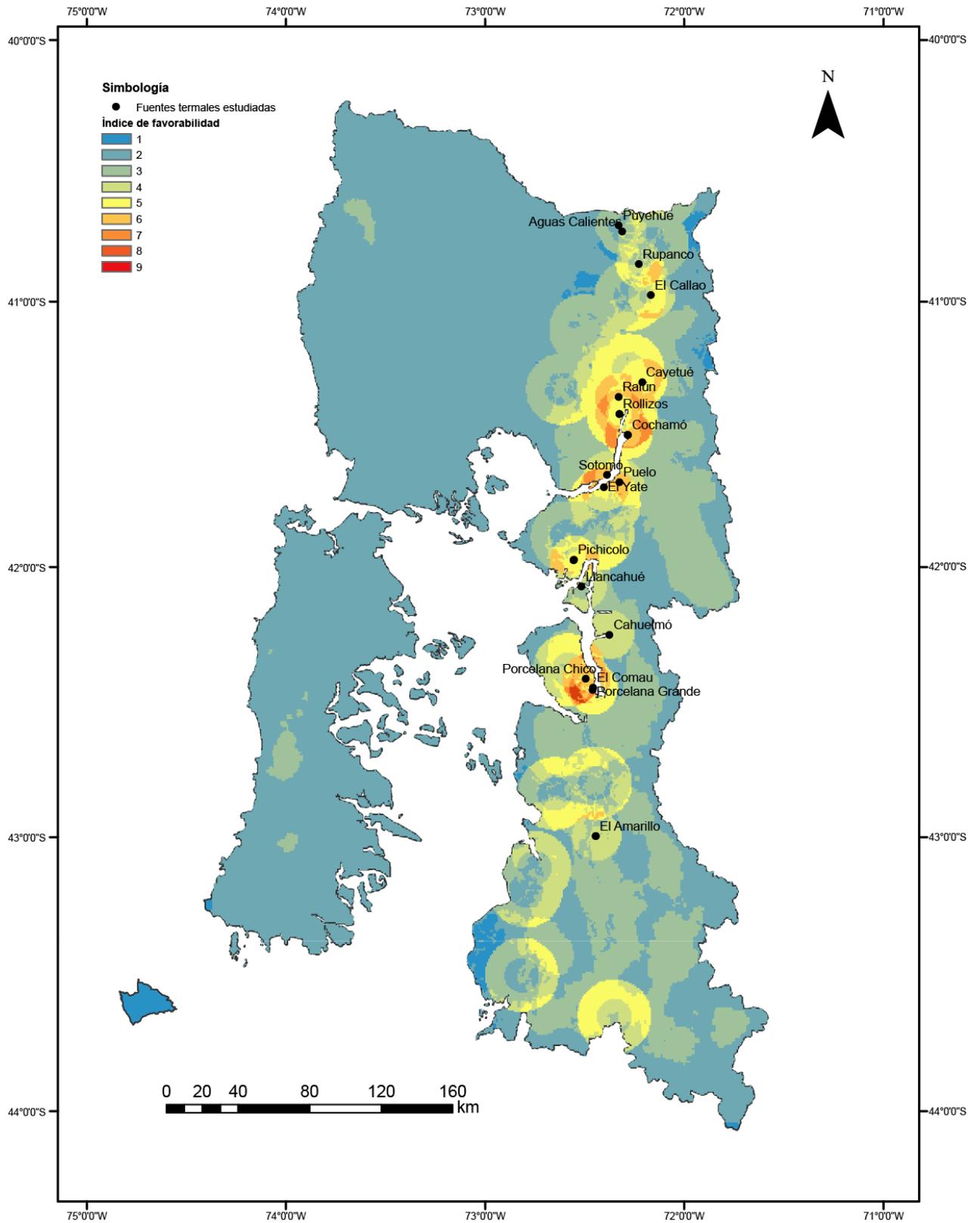


Figura 5.11: Mapa de favorabilidad geotérmica de la X Región de Los Lagos, generada a partir del estudio de 18 de 36 manifestaciones catastradas.

6. Discusiones

En la Región de Los Lagos se identifican numerosas manifestaciones termales, de las cuales 18 fueron estudiadas en el presente trabajo. La existencia de zonas con gran densidad de estructuras conforma un factor relevante al proponer modelos de sistemas geotermales, destacándose dos grandes grupos: el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO) y el Sistema de Fallas de Larga-vida oblicuas al Arco (SFLA), los cuales generarían distintas direcciones de flujo para los fluidos geotermales de los sistemas albergados en ellos. Por otra parte, la presencia de aguas salinas en fiordos y estuarios provoca confusión acerca de la geoquímica representativa de los reservorios existentes en la zona, de modo que los análisis químicos de las fuentes termales y de las aguas frías superficiales aledañas son fundamentales para plantear las siguientes hipótesis:

- i. En la mayoría de las aguas termales presentes en la Región de Los Lagos no habría interacción con aguas salinas provenientes de fiordos o estuarios, puesto que en ninguno de los diagramas se observan tendencias de mezcla con agua marina, a excepción de las termas de Rollizos, Cochamó, Sotomó y El Yate, que muestran una leve desviación respecto a la Línea Meteórica Mundial (Figura 4.7).
- ii. Existen múltiples procesos de interacción agua-roca evidenciados por un enriquecimiento de cationes, especialmente de sodio (aguas termales menos cloruradas: Grupo 2) y de calcio (aguas termales más cloruradas: Grupo 3) (ver Capítulo 5.1). Esto podría deberse a la interacción con granitoides y dioritas del Batolito Norpatagónico, puesto que todas estas aguas termales afloran en rocas de esta unidad, mediante fracturas pertenecientes al SFLO.
- iii. Las aguas termales localizadas en la Península de Huequi (Porcelana Chico, El Comau y Porcelana Grande) se encuentran sobre estructuras sinistralas pertenecientes al SFLA, lo que podría indicar un transporte de fluidos principalmente lateral en estos casos (Sánchez, 2010;

Sánchez *et al.*, 2013) y, por ende, un aporte volcánico considerable (Figura 6.2). Esto se corrobora por las altas razones B/Cl mostradas en la Figura 5.4 y en la Figura 5.5; y podría relacionarse con sus concentraciones de Na no tan elevadas sobre los niveles de mezcla homogénea, como ocurre con otras aguas termales, lo que podría mostrar un menor intercambio catiónico causado por una menor interacción con la roca caja respecto a la interacción con fluidos volcánicos.

- iv. Las interacciones entre los fluidos geotermales y las rocas se manifiestan también en las temperaturas estimadas mediante geotermómetros, especialmente en el geotermómetro de Na/K (Figura 5.9), donde casi todas las aguas termales muestran una gran dispersión, en especial Rollizos, Cochamó, Sotomó, El Yate y Pichicolo, las que parecieran estar enriquecidas en Na; sin embargo, eso no se observa en la Figura 4.4 (diagrama de Na versus Cl), por lo que podría deberse a un empobrecimiento de K (Figura 6.1), generado también por intercambios catiónicos con rocas del BNP. También, a partir de esto, se puede establecer al geotermómetro de sílice (Verma & Santoyo, 1997) como el más confiable, puesto que también muestra una mejor correlación con las temperaturas superficiales de las fuentes termales (Figura 5.9).
- v. Respecto a las termas de Pichicolo, se observa una contradicción entre las altas concentraciones de sodio (Figura 4.4) respecto a las existentes en las coladas de lavas pertenecientes al volcán Hornopirén (Plv) (Watt *et al.*, 2011), que son inusualmente empobrecidas en este elemento respecto al contexto regional; por lo que en este caso en particular se puede descartar una interacción prolongada entre las aguas de este sistema geotermal y las lavas pertenecientes al volcán Hornopirén, incluso puede ser presumida la no ocurrencia de esta interacción.
- vi. La dispersión observada en el diagrama de temperaturas superficiales versus conductividad eléctrica (CE) (Figura 5.7C), a diferencia de la tendencia lineal positiva presentada para aguas superficiales y

subterráneas (Hayashi, 2014), indicaría la existencia de variaciones de los factores que alteran la CE del agua, en especial de las concentraciones de cloruros (con un índice de correlación de Pearson de 0,928 respecto a la CE). De esta manera, se determina que las concentraciones de cloruros controlan casi completamente la conductividad, aumentando en las aguas del fiordo El Comau y del estuario Reloncaví, al igual que de las termas de Rollizos, Cochamó, Sotomó y El Yate (Figura 5.7B). Sin embargo, nuevamente se debe tener en consideración que el origen de estos cloruros se relaciona a aguas marinas diluidas (fiordos y estuarios) solamente en estos 4 casos, mientras que para el resto de las termas estos cloruros probablemente tengan una génesis estrechamente relacionada con los procesos de transporte geotermal, específicamente volcánico en el caso de Porcelana Chico, El Comau y Porcelana Grande (Figura 6.2).

- vii. A pesar de que en el desarrollo de los índices de favorabilidad geotérmica los factores de corrección (ICAE) y los porcentajes de ponderación son determinados de manera arbitraria, basándose únicamente en las diferencias observadas entre las temperaturas calculadas con los geotermómetros de sílice (Díaz-González et al., 2008) y Na/K (Verma & Santoyo, 1997); se puede considerar de igual manera a la península de Huequi como una zona de gran importancia para el estudio de la geotermia, pues esta zona presenta el mayor índice de favorabilidad (Figura 5.11), lo que se condice tanto con las temperaturas medidas en terreno como con las temperaturas estimadas en profundidad (ambas las más altas de la Región de Los Lagos), siendo además congruente con los resultados del diagrama de orígenes de los cloruros de la Figura 5.6 (Vengosh, 2003) pertenecientes a las termas de Porcelana Chico, El Comau y Porcelana Grande, donde a sus sales se le atribuye casi netamente un origen geotermal. Por ello, se baraja la posibilidad de que se trate del sector con mayores probabilidades de presentar condiciones de alta entalpía.

Considerando los porcentajes obtenidos de los balances iónicos (BI) ((1) para los análisis químicos de las manifestaciones termales y las aguas superficiales aledañas, es importante recalcar que en general estos son menores a 5%, a excepción de los dos análisis realizados a las termas de El Amarillo, los cuales alcanzan valores de 9 y 10%, por lo que no se pueden tomar como datos confiables. Sin embargo, su uso en este trabajo se justifica debido a la semejanza con datos químicos de estudios anteriores, los cuales presentan porcentajes de BI de 0,72 y 0,43% (Hauser, 1997).

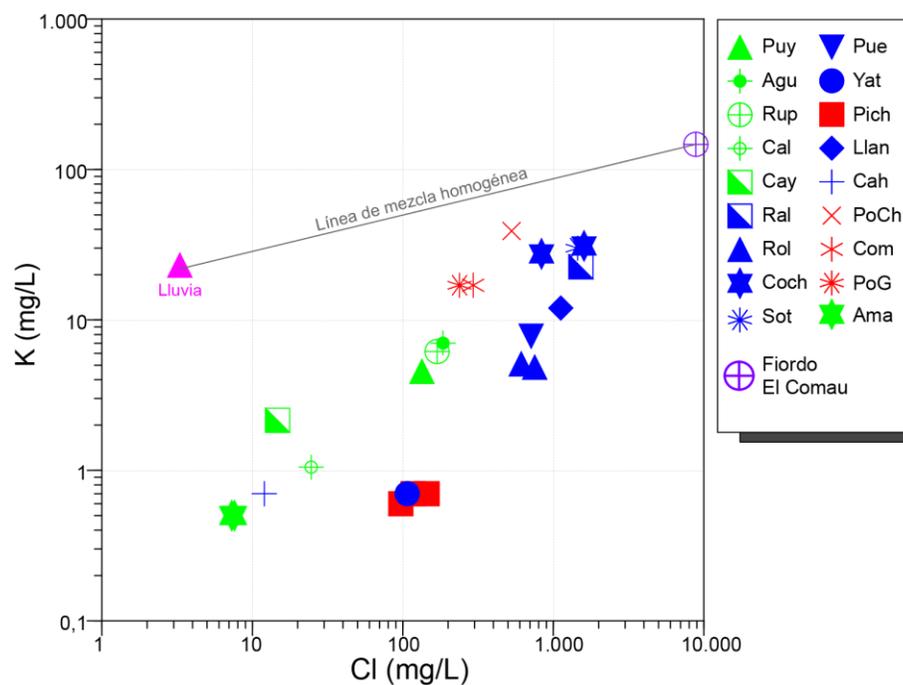


Figura 6.1: Diagrama de K versus Cl', correspondiente a las concentraciones de las fuentes termales analizadas en el presente estudio. Se observa un empobrecimiento general en las concentraciones de K relativo al agua de lluvia obtenida. Las aguas termales más empobrecidas en K corresponden a Rollizos, Cochamó, Sotomó, El Yate y Pichicolo. Abreviaciones: Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetué. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

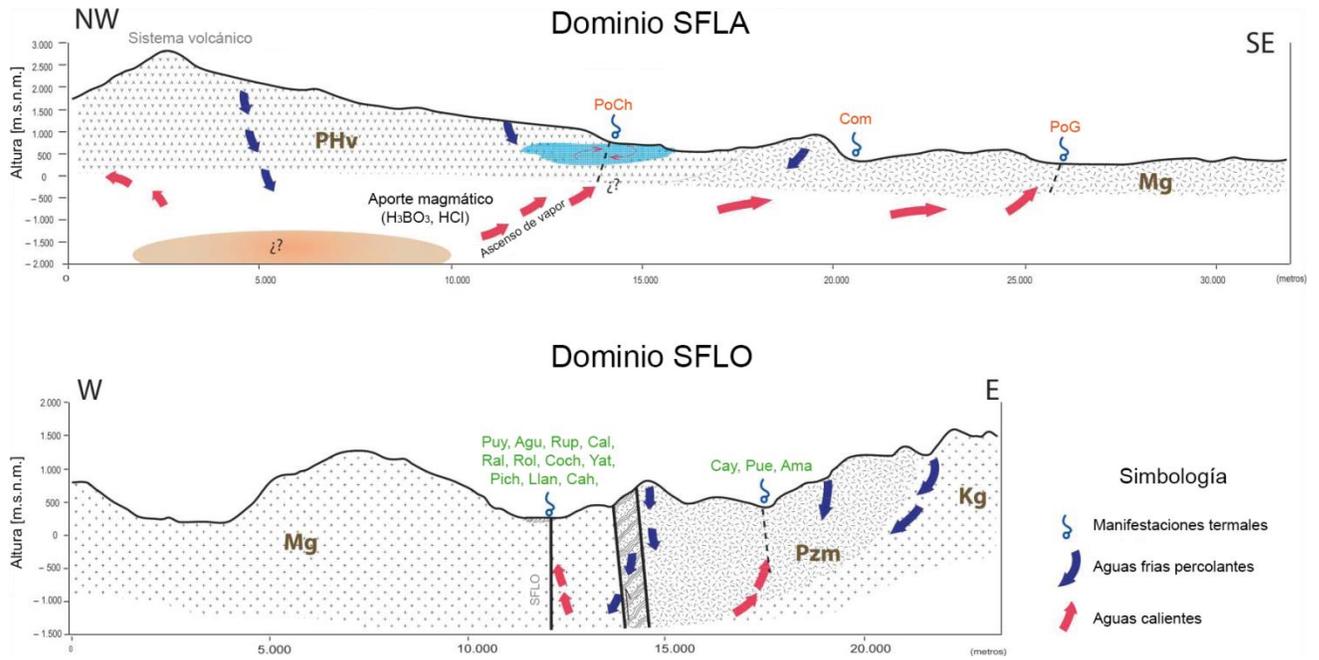


Figura 6.2: Esquema generalizado de los sistemas estructurales involucrados en la formación y localización de las manifestaciones (Modificado de Sánchez *et al.*, 2013; unidades litológicas son solo de referencia). Abreviaciones: SFLA, Sistema de Fallas de Larga-vida oblicuas al Arco. SFLO, Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui. Puy, Puyehue. Agu, Aguas Calientes. Rup, Rupanco. Cal, El Callao. Cay, Cayetú. Ral, Ralún. Rol, Rollizos. Coch, Cochamó. Sot, Sotomó. Pue, Puelo. Yat, El Yate. Pich, Pichicolo. Llan, Llancahué. Cah, Cahuelmó. PoCh, Porcelana Chico. Com, El Comau. PoG, Porcelana Grande. Ama, El Amarillo.

7. Conclusiones

La décima Región de Los Lagos se ubica en la Zona Volcánica Sur, con una alta presencia de estructuras y sistemas volcánicos vinculados, por lo que es muy interesante el estudio de los sistemas geotermales existentes en la zona, en especial por la abundancia de manifestaciones termales encontradas.

De un total de 36 manifestaciones catastradas (Flores, 2011), se analizaron 18, todas ubicadas sobre estructuras y en rocas intrusivas y metamórficas fracturadas. Las estructuras están agrupadas en los el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO) y el Sistema de Fallas de Larga-vida oblicuas al Arco (SFLA), de los cuales depende el tipo de interacción entre los fluidos geotermales y las rocas (Sánchez, 2010; Sánchez *et al.*, 2013). De este modo, las manifestaciones estudiadas se han dividido en dos principales grupos de acuerdo al sistema estructural sobre el que se ubican:

Dominio SFLA:

- i. Porcelana Chico
(géiseres de Porcelana)
- ii. El Comau
- iii. Porcelana Grande

Dominio SFLO:

- i. Puyehue
- ii. Aguas Calientes
- iii. Rupanco
- iv. El Callao
- v. Cayetúe
- vi. Ralún
- vii. Rollizos
- viii. Cochamó
- ix. Sotomó
- x. Puelo
- xi. El Yate
- xii. Pichicolo
- xiii. Llancahué
- xiv. Cahuelmó
- xv. El Amarillo

Las aguas involucradas en estos sistemas carecen de influencia marina, a excepción de las termas Rollizos, Cochamó, Sotomó y El Yate, las cuales tendrían bajos aportes salinos provenientes del estuario Reloncaví y el fiordo El Comau, por lo que en estos casos es altamente difícil realizar análisis químicos, para cualquier tipo de estimación (condiciones fisicoquímicas en profundidad, orígenes de las aguas, reacciones de equilibrio, etc.).

Las reacciones de reequilibrio químico desarrolladas durante el transporte de los fluidos, desde las zonas de recarga hasta las fuentes de agua termal, generan intercambio iónico en todas los fluidos, donde en algunos se evidencia mediante la variación de las temperaturas estimadas con el uso de distintos geotermómetros. En algunos casos, específicamente en las termas de El Callao, Cayetué, Cahuelmó y El Amarillo, se presentan concentraciones de sodio mayores a las correspondientes a la línea de mezcla homogénea, a partir de lo cual se presume que estos aumentos son generados por la interacción con rocas albergantes.

Algo similar ocurre con las concentraciones de calcio y de potasio, las cuales se muestran aumentadas y disminuidas, respectivamente, cuyo estudio se propone abarcando un análisis químico de las rocas presentes en las áreas que rodean estas aguas. Estas variaciones químicas se ven reflejadas en la sobre o subestimación de las condiciones calóricas del reservorio en subsuperficie.

Las correcciones de las temperaturas calculadas mediante el geotermómetro de Na/K (Díaz-González *et al.*, 2008) respecto a los datos obtenidos con el geotermómetro de sílice (Verma & Santoyo, 1997) generan una mejor correlación entre ambos conjuntos de valores y respecto a las temperaturas medidas *in situ*, lo que permite obtener una estimación de las zonas más favorables desde el punto de vista geotérmico; concluyéndose que el área con la mayor cantidad de factores favorables corresponde a la Península de Huequi, donde se ubican las termas de Porcelana Chico (Géiseres de Porcelana), El Comau y Porcelana Grande, coincidiendo con el hecho de que estas son las manifestaciones que presentan las mayores temperaturas superficiales; las que mantendrían un estrecho contacto

con fluidos volcánicos pertenecientes a los volcanes Huequi Porcelana y Barranco Colorado.

8. Bibliografía

- Adriasola, A. C. 2003. Low temperature thermal history and denudation along the Liquiñe-Ofqui Fault Zone in the Southern Chilean Andes (41–42°S). PhD thesis, Ruhr-Universität Bochum, pp 1–119.
- Adriasola, A. C.; Thomson, S. N.; Brix, M. R.; Hervé, F.; Stöckhert, B. 2006. Postmagmatic cooling and late Cenozoic denudation of the North Patagonian Batholith in the Los Lagos region of Chile, 41°– 42° 15' S. *International Journal of Earth Sciences*, 95(3), pp. 504-528.
- Aguirre, L.; Levi, B. 1964. Geología de la Cordillera de los Andes de las provincias de Cautín, Valdivia, Osorno y Llanquihue, *Inst. Invest. Geol. Bol.*, v. 17, pp. 1–37.
- Alam, M. A.; Sánchez, P.; Parada, M. A. 2010. Interplay of Volcanism and Structural Control in Defining the Geothermal System(s) along the Liquiñe-Ofqui Fault Zone, in the South-Central Chile. *GRC Transactions*, v. 34, pp. 747-750.
- Alam, M. A. & Parada, M. A. 2013. A note on “Origin of components in Chilean thermal waters” by. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Albers, C. 2012. Coberturas SIG para la enseñanza de la Geografía en Chile. Universidad de La Frontera. Temuco. [En línea] www.rulamahue.cl/mapoteca.
- Angermann, D.; Klotz, J.; Reigber, C. 1999. Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector. *Earth and Planetary Science Letters*, 171(3), pp. 329-334.
- Aravena, D. 2012. Desarrollo de metodología para la estimación de potencial geotérmico explotable en la Región del Maule, Zona Volcánica Sur, Chile.

- Memoria de Geólogo. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 157 p.
- Arnórsson, S.; Stefánsson, A.; Bjarnason, J. Ö. 2007. Fluid-fluid interactions in geothermal systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65(1), pp. 259-312.
- Arnórsson, S.; Gunnlaugsson, E.; Svavarsson, H. 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(3), pp. 567-577.
- Astroza, G.; Duhart, P. 2005. Catastro Termal, área comprendida entre Rollizos y Llancahué. Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile.
- Bertrand, S.; Castiaux, J.; Juvigné, E. 2008. Tephrostratigraphy of the late glacial and Holocene sediments of Puyehue lake (southern volcanic zone, Chile, 40 S). *Quaternary Research*, 70(3), pp. 343-357.
- Cande, S. C. & Leslie, R. B. 1986. Late Cenozoic tectonics of the southern Chile trench. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 91(B1), 471-496.
- Celis, R. 2012. Caracterización geoquímica del sistema geotermal Termas de Puyehue-Aguas alientes, Región de los Lagos, Chile. 96 p.
- Casertano de Lorenzo, L. 1963a. Catalogue of the active volcanoes of the world including solfatara fields. Part 15. Edited by the International Volcanological Association, 55 p.
- Casertano de Lorenzo, L. 1963b. General characteristics of active Andean volcanoes and a summary of their activities during recent centuries. *Seismological Society of America, Boletín*, Vol. 53, No. 6, pp. 1415-1433.
- Celis, R. 2012. Caracterización geoquímica del sistema geotermal Termas de Puyehue-Aguas alientes, Región de los Lagos, Chile. Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Geología. 85 p.

- Cembrano, J. & Lara, L. 2009. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics*, 471(1), pp. 96-113.
- Cembrano, J., Hervé, F.; Lavenu, A. 1996. The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 259(1), pp. 55-66.
- Cembrano, J.; Schermer, E.; Lavenu, A.; Sanhueza, A. 2000. Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the Liquiñe–Ofqui fault zone, southern Chilean Andes. *Tectonophysics*, 319(2), pp. 129-149.
- Cembrano, J.; Lavenu, A.; Yáñez, G; Riquelme, R.; García, M.; González, G.; Hérail, G. 2007. Neotectonics. *The geology of Chile* (Moreno, T; Gibbons, W.; editors). The Geological Society, London, pp. 231-261.
- Cembrano, J. & Moreno, H. 1994. Geometría y naturaleza contrastante del volcanismo cuaternario entre los 38 S y 46 S: Dominios compresionales y tensionales en un régimen transcurrente. En: Congreso Geológico Chileno. 7, pp. 240-244.
- Chandrasekharam, D. & Bundschuh, J. 2008. Low-enthalpy geothermal resources for power generation. Taylor & Francis Group, London, UK, 172 p.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *The geology of Chile* (Moreno, T.; gibbons, W.; editors). The geological Society, 21-114.
- Corbella, H. & Lara, L. E. 2008. Late Cenozoic Quaternary volcanism in Patagonia and Tierra del Fuego. *Developments in Quaternary Sciences*, 11, pp. 95-119.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), pp. 1702-1703.

- Custodio, E. & Llamas, M.R. 1983. Hidrología subterránea. Ed. Omega, Barcelona. 2 vols, 2350 p.
- D'Amore, F. & Arnórsson, S. 2000. Geothermometry, in Arnórsson, S. (ed.), Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Exploration, Development and Use: Vienna, International Atomic Energy Agency, pp. 152–199.
- Darwin, C. 1838. On the formation of mould. *Journal of the Franklin Institute*, 25(5), pp. 349-351.
- DeMets, C.; Gordon, R. G.; Argus, D. F.; Stein, S. 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research letters*, 21(20), pp. 2191-2194.
- Dewey, J. F. & Lamb, S. H. (1992). Active tectonics of the Andes. *Tectonophysics*, 205(1), 79-95.
- Díaz-González, L.; Santoyo, E.; Reyes-Reyes, J. 2008. Tres nuevos geotermómetros mejorados de Na/K usando herramientas computacionales y geoquimiométricas: aplicación a la predicción de temperaturas de sistemas geotérmicos. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(3), pp. 465-482.
- Dirección Meteorológica de Chile. Precipitaciones máximas en 24 horas para distintos períodos de retorno en las principales ciudades de Chile. Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada. 36 p.
- Dirección Meteorológica de Chile. 2014. Mapas Climatológicos Mensuales. [En línea] <http://164.77.222.61/climatologia/>.
- Duhart, P.; McDonough, M.; Muñoz, J.; Martin, M.; Villeneuve, M. 2001. El Complejo Metamórfico Bahía Mansa en la cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39° 30'-42° 00'S): geocronología K-Ar, 40Ar/39Ar y U-

- Pb e implicancias en la evolución del margen sur-occidental de Gondwana. *Revista geológica de Chile*, 28(2), pp. 179-208.
- Flores, V. 2011. Ordenamiento de bases de datos del catastro nacional de fuentes termales y actualización de datos geográficos, sección dedicada a la VI región. Servicio Nacional de Geología y Minería, v.1, 34 p.
- Fournier, R. O. 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5(1), pp. 41-50.
- Fournier, R. O. 1991. Water geothermometers applied to geothermal energy. *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*, Ed Franco D'Amore. Unitar/UNDP, pp. 37-69.
- Fournier, R. O. & Truesdell, A. H. 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5), pp. 1255-1275.
- Giggenbach, W. F. 1988. Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et cosmochimica acta*, 52(12), pp. 2749-2765.
- Giggenbach, W.F. 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. In: F. D'Amore (Ed), *Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*, UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Rome, pp. 119–142.
- Giggenbach W. F.; Gofiantini R.; Jangi B. L.; Truesdell A. H. 1983. Isotopic and chemical composition of Parbati Valley geothermal discharges, NW-Himalaya, India. *Geothermics*, 12, pp. 199- 222.
- Goff, F. & Janik, K. J. 2000. Geothermal Systems. En: *Encyclopedia of Volcanoes*, Ed. Academic Press, 817-834.
- González-Ferrán, O. 1995. *Volcanes de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 635 p.

- Gupta, H.K. & Roy, S. 2007. Geothermal energy – An alternative Resource for the 21st century. Elsevier publications, 292 p.
- Hamza, V. M. & Muñoz, M. 1996. Heat flow map of South America. *Geothermics*, 25(6), pp. 599-646.
- Hauser, A. 1997. Catastro y Caracterización de las Fuentes de Aguas Minerales y Termas de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 50, 89 p.
- Hayashi, M. 2004. Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion. *Environmental monitoring and assessment*, 96(1-3), pp. 119-128.
- Heusser, C. J.; Heusser, L. E.; Hauser, A. 1992. Paleocology of late Quaternary deposits in Chiloé continental, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 65, pp. 235-245.
- International Seismological Centre. 2014. IASPEI GT reference events: catalogue search. [En línea] <http://www.isc.ac.uk/gtevents/search/catalogue/>.
- Jordán, T. E.; Isacks, B. L.; Allmendinger, R. W.; Brewer, J. A.; Ramos, V. A.; Ando, C. J. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin*, 94(3), pp. 341-361.
- Kappes, R. 2012. Determinación de zonas de amenaza para la cadena volcánica Osorno-Puntiagudo y complejo Antillanca. Informe final de práctica profesional. Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Geografía. 51 p.
- Kato, T. T. & Godoy, E. 1995. Petrogenesis and tectonic significance of Late Paleozoic coarse-crystalline blueschist and amphibolite boulders in the Coastal Range of Chile. *International Geology Review*, 37(11), pp. 992-1006.

- Klaus, D. 2003. Hydrogeologische Untersuchungen der Geothermalfelder von Puyehue und Cordón Caulle, Chile. Tesis de Doctorado. Munich, Ludwig-Maximilians-Universität München, Facultad de Ciencias de la Tierra. 190 p.
- Lahsen, A. 1988. Chilean geothermal resources and their possible utilization. *Geothermics*, v.17(2), 401-410.
- Lahsen, A., Muñoz, N., Parada, M. A. 2010. Geothermal development in Chile. En: *Proceedings World Geothermal Congress*. V. 25. 7 p.
- Lahsen, A.; Sepúlveda, F.; Rojas, J.; Palacios C. 2005. Present Status of Geothermal Exploration in Chile. En: *Proceedings World Geothermal Congress*, 9 p.
- Lange, D.; Cembrano, J.; Rietbrock, A.; Haberland, C.; Dahm, T.; Bataille, K. 2008. First seismic record for intra-arc strike-slip tectonics along the Liquiñe-Ofqui fault zone at the obliquely convergent plate margin of the southern Andes. *Tectonophysics*, 455(1), pp. 14-24.
- Lara, L. E. 2009. The 2008 eruption of the Chaitén Volcano, Chile: a preliminary report. *Andean Geology*, 36(1), pp. 125-129.
- Lara, L. E.; Lavenu, A.; Cembrano, J.; Rodríguez, C. 2006. Structural controls of volcanism in transversal chains: resheared faults and neotectonics in the Cordón Caulle–Puyehue area (40.5 S), Southern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(1), pp. 70-86.
- López-Escobar, L.; Cembrano, J.; Moreno, H. 1995. Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37-46 S). *Andean Geology*, 22(2), pp. 219-234.
- López-Escobar, L.; Kilian, R.; Kempton, P. D.; Tagiri, M. 1993. Petrography and geochemistry of Quaternary rocks from the Southern Volcanic Zone of the Andes between 41 30' and 46 00'S, Chile. *Andean Geology*, 20(1), pp. 33-55.

- Lopez-Escobar, L.; Parada, M. A.; Moreno, H.; Frey, F. A.; Hickey-Vargas; R. L. 1992. A contribution to the petrogenesis of Osomo and Calbuco volcanoes, Southern Andes (41° 00'-41° 30'S): comparative study. *Andean Geology*, 19(2), pp. 211-226.
- Lowell, T. V.; Heusser, C. J.; Andersen, B. G.; Moreno, P. I.; Hauser, A.; Denton, G. H.; Heusser, L. E.; Schlüchter, C.; Marchant, D. R. 1995. Interhemispheric symmetry of paleoclimatic events during the last glaciation. *Science*, 269, pp. 1541-1549.
- Martin, C. 1917. Los volcanes activos de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, Año V, pp. 242-250.
- Martin, M. W.; Kato, T. T.; Rodriguez, C.; Godoy, E.; Duhart, P.; McDonough, M.; Campos, A. 1999. Evolution of the late Paleozoic accretionary complex and overlying forearc-magmatic arc, south central Chile (38°–41° S): Constraints for the tectonic setting along the southwestern margin of Gondwana. *Tectonics*, 18(4), pp. 582-605.
- Marini, L. 2000. Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy. Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università degli Studi di Genova Genova, Italy. 105 p.
- Marini, L. 2001. Geochemical Techniques for the Exploration and Exploitation of Geothermal Energy. Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università degli Studi di Genova Genova, Italy, 82 p.
- Mella, M.; Muñoz, J.; Vergara, M.; Klohn, E.; Farmer, L.; Stern, C. R. 2005. Petrogénesis del Grupo Volcánico Pleistoceno Tronador, Zona Volcánica Sur de los Andes. *Revista geológica de Chile*, 32(1), pp. 131-154.
- Mercer, J. 1972. Chilean glacial chronology 20.000-11.000 carbon-14 years ago: some global comparison. *Science*, 176, pp. 1118-1120.

- Mercer, J. 1976. Glacial history of Southern South America. *Quaternary Research*, 6, pp. 125-166.
- Mpodozis, C. & Ramos, V.A., 1989, The Andes of Chile and Argentina, in Ericksen, G.E., Cañas Pinochet, M.T. and Reinemud, J.A., eds, *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources*, Circumpacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences Series, v. 11, pp. 59-90.
- Muñoz, M. 1999. Tectonophysics of the Andes region: relationships with heat flow and the thermal structure. *International Symposium on Andean Geodynamics No. 4*, pp. 532-534.
- Naranjo, J. A. & Stern, C. R. 2004. Holocene tephrochronology of the southernmost part (42°30'-45° S) of the Andean Southern Volcanic Zone. *Revista geológica de Chile*, 31(2), pp. 224-240.
- Noorollahi, Y.; Itoi, R.; Fujii, H.; Tanaka, T. 2007. GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan. *Computers & Geosciences* 33, pp. 1008–1021.
- Ordóñez, A. 2000. Origen del oro detrítico de la Cordillera de la Costa y la Depresión Intermedia entre 41-41°45'S, X Región, Chile. En: IX Congreso Geológico Chileno. Vol. 2, p. 140.
- Ordóñez, A & Crignola, P. 2003. Depósitos metalíferos, anomalías geoquímicas, rocas y minerales industriales y recursos energéticos del sector sur de la región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 21, 34 p.
- Otero, J. 2013. Basalt and Andesite Magma Storage and Evolution in Puyehue Volcano (40.5° S), Chile. Tesis de Magíster. Uppsala, Uppsala Universitet, Departamento de Ciencias de la Tierra, 75 p.

- Pang, Z. & Reed, M. 1998. Theoretical chemical geothermometry on geothermal waters: Problems and methods. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 6, pp. 1083-1091.
- Pankhurst, R.J.; Hervé, F.; Rojas, L.; Cembrano, J. 1992. Magmatism and tectonics in continental Chiloé, Chile (42°–42°30'S). *Tectonophysics*, 205, pp. 283–294.
- Pankhurst, R.J.; Weaver, S.D.; Hervé, F.; Larrondo, P. 1999. Mesozoic-Cenozoic evolution of the North Patagonian Batholith in Aysén, southern Chile. *J Geol Soc, London*, 156, pp. 673–694.
- Pardo-Casas, F. & Molnar, P. 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, 6(3), pp. 233-248.
- Pérez, Y. 1999. Fuentes de Aguas Termales de la Cordillera Andina del centro – sur de Chile (39- 42° Sur). Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 54, 65 p.
- Pérez, Y.; Troncoso, R.; Milovic, J.; Helms, F.; Toloczyki, M. 2003. Geología Ambiental del área de Osorno, X región, Chile. Uso Actual del Territorio. Escala 1:100000. Informe registrado IR-00-19. Servicio Nacional de Geología y Minería. 9 mapas. 48 p.
- Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25, pp. 914-928.
- Porter, S.C. 1981. Pleistocene Glaciation in the Southern Lake District of Chile. *Quaternary Research*, 16, pp. 263-292.
- Reed, M. & Spycher, N. 1984. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7), pp. 1479-1492.

- Risacher, F. & A. Hauser, 2008. Catastro de las principales fuentes termales de Chile. Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería - Institut de Recherche pour le Développement. 81 p.
- Rosenau, M. 2004. Tectonics of the Southern Andean Intra-arc Zone (38° - 42°S). Tesis de Doctorado en Ciencias Naturales. Berlín. Freie Universität Berlin, Departamento de Ciencias de la Tierra. 154 p.
- Rosenau, M.; Melnick, D.; Echtler, H. 2006. Kinematic constraints on intra-arc shear and strain partitioning in the southern Andes between 38° S and 42° S latitude. *Tectonics*, 25(4).
- Saldivia, M. 2011. Barreras de entrada a la geotermia en Chile. Taller de Memoria: Instrumentos para la elaboración de una política energética sustentable. Santiago, Universidad de Chile, 50 p.
- Sánchez, P. 2010. Rol de las distintas fuentes de Calor en las aguas termales del área Villarrica-Chihuido, 40°15'S y 39°15'S, Zona Volcánica Sur, Chile. Memoria de Geólogo. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 120 p.
- Sánchez, P.; Pérez-Flores, P.; Arancibia, G.; Cembrano, J; Reich, M. 2013. Crustal deformation effects on the chemical evolution of geothermal systems: the intra-arc Liquiñe–Ofqui fault system, Southern Andes. *International Geology Review*. 17 p.
- Sanyal, S. K.; Henneberger, R. C.; Klein, C. W.; Decker, R. W. 2002. A methodology for Assessment of geothermal Energy Reserves Associated with Volcanic Systems. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 26, pp. 22-25.
- Seipold, U. 1998. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks—a general law. *Tectonophysics*, 291(1), pp. 161-171.

- Sellés, D. & Moreno, H. 2011. Geología del volcán Calbuco, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 1 mapa escala 1:50.000. 38 p.
- Sepúlveda, F. 2006. El sistema geotérmico de Cordón Caulle, Sur de Chile: Caracterización geológica y geoquímica. 192 p.
- Sepúlveda, F.; Dorsch, K.; Lahsen, A.; Bender, S.; Palacios, C. 2004. Chemical and isotopic composition of geothermal discharges from the Puyehue-Cordon Caulle area (40.5 S), Southern Chile. *Geothermics*, 33(5), pp. 655-673.
- SERNAGEOMIN. 2000. Mapa geológico de Chile, escala 1:1.000.000. [En línea] <http://geoarcgis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/geoportal/GeologiaBase/MapServer?f=lyr&v=9.3>
- SERNAGEOMIN. 2013. Catastro de concesiones geotérmicas. [En línea] <http://www.sernageomin.cl/mineria-geotermia.php>.
- SERNAGEOMIN-BRGM. 1995. Carta Metalogénica X^a Región Sur, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Informe Registrado IR-9505, 4 Tomos, 10 Vols. 95 mapas diferentes escalas. Santiago, Chile.
- Somoza, R. 1998. Updated azca (Farallon)—South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(3), pp. 211-215.
- Stern, C. R. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*, 31(2), p.161-206.
- Stern, C. R.; Moreno, H.; López-Escobar, L.; Clavero, J. E.; Lara, L. E.; Naranjo, J. A.; Parada, M.A.; Skewes, M. A. 2007. Chilean volcanoes. *The geology of Chile*, 147-178.

- Tebbens, S. F.; Cande, S. C.; Kovacs, L.; Parra, J. C.; LaBrecque, J. L.; Vergara, H. 1997. The Chile ridge: A tectonic framework. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 102(B6), pp. 12035-12059.
- Vengosh, A. 2003. Salinization and saline environments. *Treatise on geochemistry*, 9, pp. 333-365.
- Verma, S. P. & Santoyo, E. 1997. New improved equations for NaK, NaLi and SiO₂ geothermometers by outlier detection and rejection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79(1), pp. 9-23.
- von Wolf, F. 1929. *Der Vulkanismus*. Ferdinand Enke, Vol. 2, pp. 426-760.
- Watt, S. F.; Pyle, D. M.; Naranjo, J. A.; Mather, T. A. 2009. Landslide and tsunami hazard at Yate volcano, Chile as an example of edifice destruction on strike-slip fault zones. *Bulletin of volcanology*, 71(5), pp. 559-574.
- Watt, S. F.; Pyle, D. M.; Naranjo, J. A.; Rosqvist, G.; Mella, M.; Mather, T. A.; Moreno, H. 2011. Holocene tephrochronology of the Hualaihue region (Andean southern volcanic zone, ~42° S), southern Chile. *Quaternary International*, 246(1), pp. 324-343.
- Yáñez, G. A.; Ranero, C. R.; Huene, R.; Díaz, J. 2001. Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32–34 S): The role of the Juan Fernández Ridge in the late Tertiary evolution of the margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 106(B4), pp. 6325-6345.

Anexo: Datos de terreno

Tabla 19: Tabla de datos obtenidos en el trabajo de campo.

Nombre	Código	Tmax [°C]	Tamb [°C]	Tipo	Análisis	Tiempo	Hora	UTME	UTMN	Alt [m.s.n.m.]
El Callao	MBA-84	55,9	13,6	MC	EM-ET-COT-S-CN-IE	Parcial	18:00	738413	5459901	427
Cochamó	MBA-85	25,9	18,1	MT	EM-ET-COT-S-CN-IE	Soleado	17:30	726861	5401532	4
Rollizos	MBA-86	29,7	15,4	MT	EM-ET-COT-S-CN-IE	Nublado y precipitaciones esporádicas	12:00	723569	5410446	11
Ralún	MBA-87	40,1	16,5	PC	EM-ET-COT-S-CN-IE	Nublado	14:30	723574	5417562	4
Rupanco	MBA-88	54,4	23,7	PC	EM-ET-COT-S-CN-IE	Soleado	14:10	733718	5473169	128
Puyehue	MBA-89	58,2	11,3	MC	EM-ET-COT-S-CN-IE	Soleado	11:10	725819	5489795	337
Aguas Calientes	MBA-90	65	23,7	MC	EM-ET-COT-S-CN-IE	Soleado	12:30	727207	5487096	464
Cayetué	MBA-91	50,5	16,8	PC y PDB	EM-ET-COT-S-CN-IE	Soleado	12:30	733655	5423461	179
Vte. Ulmo	XBR-01	42,2	19,3	MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Precipitaciones intermitentes y débiles	10:30	702742	5350125	95
Vte. Arrayán	XBR-02	49,6		MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Temporal	10:15	702763	5350158	85
Puelo	XBR-03	30,2	13,2	MT	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Precipitaciones intermitentes y débiles	16:55	722704	5381914	45
Cahuelmó	XBR-04	60,9	13,8	MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Parcial	11:40	716672	5318760	2
Río Cahuelmó	XBR-05	11,7	13,8	Río	EM-ET-DO	Parcial	13:00	716672	5318760	2
Llancahué	XBR-06	51,6	22	MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Despejado	14:45	705681	5339050	0
Mar Fiordo Comau (Llanc)	XBR-07	18,1	22	Mar	EM-ET-DO	Despejado	15:30	705681	5339050	0
Vte. Chucao	XBR-08	56,6	13,9	MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Parcial	19:00	702877	5350334	83
Estero (Pichicolo)	XBR-09	10,8	13,9	Río	EM-ET-DO	Parcial	19:30	702874	5350330	75
La Nueva	XBR-10	34,9	17,7	PT	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Despejado	14:37	716152	5380099	2
Mar estuario Reloncaví	XBR-11	19,1	13,9	Mar	EM-ET-DO	Despejado	15:20	716981	5380677	0
Porcelana Chico	XBR-13	85,1	10,4	CC y MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Temporal	14:30	706312	5300883	370
Río Punta Calle	XBR-14	10	10,4	Río	EM-ET-DO	Temporal	15:30	706312	5300883	370
El Comau	XBR-15	74,8	19,9	MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Soleado	11:00	709196	5297272	21

(Continuación Tabla 19)

Nombre	Código	Tmax [°C]	Tamb [°C]	Tipo	Análisis	Tiempo	Hora	UTME	UTMN	Alt [m.s.n.m.]
Porcelana Grande	XBR-17	57,3	19,8	MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Soleado	12:30	708960	5296258	73
Mar Fiordo Comau	XBR-18	19,8	19,8	Mar	EM-ET-DO	Soleado	14:30	710859	5294831	0
Rio Porcelana	XBR-20	11	19,8	Rio	EM-ET-DO	Soleado	13:00	708933	5296263	117
Lluvia Porcelana	XBR-21			Lluvia	EM-ET-DO	Temporal	Noche	709370	5302513	42
El Amarillo 2	XBR-23	53,1	12,8	MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Nublado	11:00	708532	5236328	266
Rio San Antonio	XBR-24	10,8	13,4	Río	EM-ET-DO	Nublado	11:55	708458	5236287	251
El Amarillo 1	XBR-25	53,8	13,4	MC	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Nublado	13:00	708511	5236289	264
Mar estuario Reloncaví	XBR-26	15,3	18	Mar	EM-ET-DO	Soleado	14:45	718249	5385433	0
Sotomó	XBR-28	30,8	18	MT	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Soleado	13:00	717666	5385199	28
Cochamó	XBR-29	24,7	9,3	MT	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Soleado	10:00	726971	5401512	0
Rio Cochamó	XBR-30	11,6	11	Río	EM-ET-DO	Nublado	16:00	731290	5406002	25
Rollizos	XBR-31	28,4	18	MT	EM-ET-DO-SO-CID-COD	Soleado	12:00	723569	5410444	0
Estero Sacho	XBR-33	10,5	18	Río	EM - ET - DO	Soleado	12:40	723569	5410444	0
Rio Petrohué	XBR-34	15,4	18	Río	EM-ET-DO	Soleado	14:40	723173	5417611	5

(Continuación Tabla 19)

Nombre	Fecha (dd-mm-aaaa)	Localización	Caudal [l/s]	pH	T (pH) [°C]	pH (tira)	Eh [mV]	T (Eh) [°C]	EhH [mV]	Cond 1 [µS]	T (cond1) [°C]	Cond 2 [µS]	T (cond2) [°C]
El Callao	22-03-2013	Refugio El Callao	0,025	9	43,3	8						251	48,4
Cochamó	23-03-2013	Estuario Reloncaví	1	7,5	23,9	7						5490	25,3
Rollizos	24-03-2013	Estuario Reloncaví	5	7,9	24,7	7-8						2570	25,6
Ralún	24-03-2013	Río Petrohué	<1	7,7	30	6-7						4910	33,1
Rupanco	25-03-2013	Lago Rupanco	<1	7,4	39	7						849	47,5
Puyehue	26-03-2013	Lago Puyehue	<1	7,8	57,3	7						803	56,2
Aguas Calientes	26-03-2013	Falda occidental Vn. Antillanca	4,4	7,2	45,5	7						910	53,9
Cayetú	27-03-2013	Lago Cayetú	<0,5	7,3	44,7	7						309	45,2
Vte. Ulmo	20-01-2014	Pichicolo (km -90 de la Carretera Austral)		8,4	41,4	8	173	41,3		803	41,6	563	41,7
Vte. Arrayán	21-01-2014	Pichicolo (km -90 de la Carretera Austral)	-1	7	41,9	5,5	124	42,7		739	44,5	464	42,8
Puelo	22-01-2014	Puelo	0,5 - 1				20	30,7		3150		2810	30,5
Cahuelmó	23-01-2014	Cahuelmó	0,2			8,5	-401	58,2		377	59,7	120	60,3
Río Cahuelmó	23-01-2014	Cahuelmó	10			5	117			15,9			
Llancahué	23-01-2014	Llancahué				7,5	-283	51,4		6840	48,8	4100	51,4
Mar Fiordo Comau (Llanc)	23-01-2014	Llancahué				7	140			23700			
Vte. Chucao	23-01-2014	Pichicolo (km -90 de la Carretera Austral)	-0,2			7,5	-267	56,6		1183	54,8	702	56,6
Esterio (Pichicolo)	23-01-2014	Pichicolo (km -90 de la Carretera Austral)	50		10,8	5	82	10,8		26			
La Nueva	24-01-2014	Estuario Reloncaví	<0,1			8	33	33,9		1748	34,1	1412	33,8
Mar estuario Reloncaví	24-01-2014	Estuario Reloncaví			19,1	7	153	19,2		7450	19,1	7910	18,5
Porcelana Chico	15-03-2014	Península de Huequi	7	7,3	85,6	7-7,5	-284	85,9		5840	86,3	2290	85,8
Río Punta Calle	15-03-2014	Península de Huequi	15000										
El Comau	17-02-2014	Península de Huequi	1	7,1	74,1		-28	73,7		3600	74,8	2150	74,6

(Continuación Tabla 19)

Nombre	Fecha (dd-mm-aaaa)	Localización	Caudal [l/s]	pH	T (pH) [°C]	pH (tira)	Eh [mV]	T (Eh) [°C]	EhH [mV]	Cond 1 [µS]	T (cond1) [°C]	Cond 2 [µS]	T (cond2) [°C]
Porcelana Grande	17-02-2014	Península de Huequi	15	6,6	57,2	6-7,0	268	57,4		2260	57,3	1303	57,4
Mar Fiordo Comau	17-02-2014	Península de Huequi											
Río Porcelana	17-02-2014	Península de Huequi	30000	7,9	11					93,1	11		
Lluvia Porcelana	17-02-2014	Península de Huequi											
El Amarillo 2	18-03-2014	S de volcán Michimahuida	10	9,1	52,4	8-8,5	-191	53,4		350	53,2	213	53,4
Río San Antonio	18-03-2014	S de volcán Michimahuida	5000	7,4	10,8	5,5-6	109	10,9		48,7	11,3	63	10,8
El Amarillo 1	18-03-2014	S de volcán Michimahuida		9,1	53,4	7,5-8	-183	53,5				215	53,6
Mar estuario Reloncaví	20-03-2014	Estuario Reloncaví								18960	15,3		
Sotomó	20-03-2014	Estuario Reloncaví	<0,5	8,4	31,2	6-7,5	-134	31,6		5550	31,2	4860	31,6
Cochamó	21-03-2014	Estuario Reloncaví	0,5	8	25		-275	25,2		371	23,4	334	25,2
Río Cochamó	20-03-2014	Estuario Reloncaví	50000	7,1	11,7	5	235	11,7		12,9	11,8	16	11,7
Rollizos	21-03-2014	Estuario Reloncaví	2	7,7	28,3	7,5	-177	28,4		2390	28,4	2250	28,3
Estero Sacho	21-03-2014	Estuario Reloncaví	30							172,3	10,5		
Río Petrohué	21-03-2014	Cerca de desembocadura al Estuario	278000	7,7	15,6	7	168	15,5		50,9	15,4	64	15,6

(Continuación Tabla 19)

Nombre	SiO ₂ [mg/l]	N° fuentes	Color	Olor	Burbujeo	Vapor	Minerales de alteración
El Callao		1	Translúcida incolora	No	Débil, intermitente, CO ₂	No	No precip ni alt.
Cochamó		Zona de surgencia de 20x5 m	Translúcida amarillenta	H ₂ S, moderado	Débil, intermitente, CO ₂	No	Arcillas (Cao?)
Rollizos		1	Translúcida, muy poco amarillenta	H ₂ S, débil	Fuerte, CO ₂	No	No precip ni alt.
Ralún		5	Translúcida, muy poco amarillenta, turbia dentro de pozas	H ₂ S, moderado	Débil, CO ₂	Muy débil	No precip ni alt.
Rupanco		6	Translúcida incolora	No	No	Muy débil	No precip ni alt.
Puyehue		2 (vertiente y pozo)	Translúcida incolora	No	Débil, CO ₂	Moderado, constante	No precip ni alt.
Aguas Calientes		2, ~35 m de extensión (pozo, piscina y barros)	Translúcida incolora	No	Débil, CO ₂	Moderado	No precip ni alt.
Cayetué		1 (poza natural)	Levemente turbia	H ₂ S, moderado y descomp amb. reductor	Muy débil	Moderado	No precip ni alt.
Vte. Ulmo		piscina represada de 4x6 m	Translúcida incolora	H ₂ S, débil	Débil, intermitente, CO ₂	Muy débil	No precip ni alt.
Vte. Arrayán		piscina represada de 6,35x3,3 m, 15-20 cm profundidad	Translúcida incolora	H ₂ S, débil	Moderado, disperso	débil	No precip ni alt.
Puelo		2	Levemente turbia	H ₂ S, muy débil	No	Leve	No precip ni alt.
Cahuelmó		2	Translúcida incolora	H ₂ S, moderado	Muy débil	Moderado, constante	Arcillas (Cao?)
Río Cahuelmó			Translúcida incolora	No			No precip ni alt.
Llancahué		área: 300 m ²	Translúcida incolora	H ₂ S, moderado	Débil, intermitente, CO ₂	débil	No precip ni alt.
Mar Fiordo Comau (Llanc)			Translúcida incolora	No			No precip ni alt.
Vte. Chucao		Pozo somero excavado de 2x2 m	Translúcida incolora	H ₂ S, débil	Moderado, continuo	Débil, Continuo	No precip ni alt.
Esterio (Pichicolo)			Levemente turbia	No			No precip ni alt.
La Nueva		1	Levemente turbia	No	No	No	No precip ni alt.
Mar estuario Reloncaví			Levemente turbia	No			No precip ni alt.
Porcelana Chico	Rango bajo (<11 mg/l)	área: 300 m ²	Translúcida incolora	H ₂ S, moderado	Leve, cont	Alto, cont	CaCO ₃ (arag) y óx. Fe, arcillas (Cao)
Río Punta Calle			Translúcida incolora	No			No precip ni alt.
El Comau	Rango bajo (<11 mg/l)	Al menos 10. Extensión lineal que bordea la costa oeste del fiordo Comau (95 m de costa)	Translúcida incolora	No	No	Moderado a fuerte	Alt. Propilítica en rocas y arcillas en las zonas de alumbamiento de aguas

(Continuación Tabla 19)

Nombre	SiO ₂ [mg/l]	N° fuentes	Color	Olor	Burbujeo	Vapor	Minerales de alteración
Porcelana Grande	Rango bajo (<11 mg/l)	Extensión lineal 100 m , 10 pozas represadas naturalmente con rocas de dep. fluvial	Translúcida incolora	Inodora	No	Leve	No precip ni alt.
Mar Fiordo Comau			Translúcida incolora	No			
Río Porcelana			Translúcida incolora	H ₂ S, leve a moderado			No precip ni alt.
Lluvia Porcelana			Translúcida incolora	No			
El Amarillo 2	6	1 (se asocia a XBR-25 y a 10 vtes. más, 50 m de extensión en sentido ENE - WSW)	Translúcida incolora	H ₂ S, leve a moderado	Fuerte, poco CO ₂	Alto a moderado	No precip ni alt.
Río San Antonio			Translúcida incolora	Descomposición amb. reductor			No precip ni alt.
El Amarillo 1	Rango bajo (<11 mg/l)	1 (se asocia a XBR-25 y a 10 vtes. más, 50 m de extensión en sentido ENE - WSW)	Translúcida incolora	H ₂ S, leve a moderado	Fuerte, poco CO ₂	Alto a moderado	No precip ni alt.
Mar estuario Reloncaví			Translúcida incolora	Mar			
Sotomó		1	Translúcida incolora	H ₂ S, muy leve	Moderado, interrumpido	No	óxido en los sed. del fondo
Cochamó		Zona de surgencia de 20x5 m	Translúcida incolora	H ₂ S, fuerte	No	Moderado	Arcillas (Cao (?)), color blanco
Río Cochamó			Translúcida incolora	No			No precip ni alt.
Rollizos		1	Translúcida incolora	H ₂ S, muy leve a descomposición por amb. Reductor	No	No	No precip ni alt.
Estero Sacho			Translúcida incolora	No			No precip ni alt.
Río Petrohué			Translúcida incolora	No			No precip ni alt.

(Continuación Tabla 19)

Nombre	Rocas	Afloramientos litológicos cercanos	Volcán	Uso	Instalaciones
El Callao	Sedimentos de terraza fluvial, compuestos por arcillas volcánicas. En la ladera contraria se observan rxs ígneas leucocráticas	Faldas E del volcán Puntigudo. Ladera O del río Sin Nombre.	Puntigudo - Cordón Los Cenizos	Balneario	Entubamiento y acumulación en tinajas de madera
Cochamó	Escombros de ladera (Tonalita del Cretácico Inferior)	Contacto entre depósitos fluviales y afloramientos intrusivos.	Cuernos del Diablo	No	No
Rollizos	Depósitos fluviales	Zona intermareal, estuarial, de dominio fluvio-marino, al costado de un gran afloramiento (cerro) de lavas y dep. piroclásticos y laháticos pleistocenos.	Ralún	Balneario	Pozo, de tubería de cobre y hierro, de 27 m de prof. y plataforma de madera
Ralún	Contacto entre dep. fluviales de origen volcánico, unidad de estratovolcanes y complejos volcánicos y afloramientos de granito con cxs orientados, Mioceno.	Zona intermareal del río Petrohué (afectada por las mareas)	Ralún o Cayetúe - La Viguera	Balneario	Pozas excavadas
Rupanco	Contacto entre lavas y dep. piroclásticos pleistocenos y dep. aluviales holocenos.	Ribera norte del Lago Rupanco, zona intermareal (asociada a las aguas lacustres), dominio fluvio-lacustre.	Grupo Antillanca	Balneario	No
Puyehue	Contacto entre dep. morrénicos de la glaciación Llanquihue y glaciofluviales.	Ribera SE del Lago Puyehue.	Grupo Antillanca o Puyehue	Balneario (hotel, spa, etc.)	Pozo de recolección y mampostería. Bomba.
Aguas Calientes	Contacto entre lavas y dep. piroclásticos pleistocenos y dep. glaciofluviales del Pleistoceno Superior.	Falda occidental del vn. Antillanca. Ribera norte del río Chanleufú.	Grupo Antillanca	Balneario y calefacción	Pozo de 3 m de prof. y bomba. Piscinas de concreto.
Cayetúe	Contacto entre Unidad intrusiva (granito, granodiorita o monzodiorita) Mioceno y gravas fluviales cuaternarias.	Lago Cayetúe	Cayetúe - La Viguera	No (balneario (?))	No
Vte. Ulmo	Dep. fluviales PI-HI 1-2 m con formación de suelo y andesita	Terrazas fluviales holocenas no propensa a inundaciones, ribera izquierda del río Pichicolo	Apagado o Hualaihué	Balneario	piscinas de madera represadas
Vte. Arrayán	Relleno fluvial, andesita	Terrazas fluviales holocenas no propensa a inundaciones, ribera izquierda del río Pichicolo	Apagado o Hualaihué	Balneario	piscinas de madera represadas
Puelo	Andesitas, escombros de ladera	En falda de cerro	Yate	Balneario	No
Cahuelmó	Dioritas con cubierta de dep. morrénicos (arenas gruesas cuarcíferas con conchas recientes fragmentadas)	Terraza glaciofluvial	Hornopirén	Balneario	Pequeñas piscinas talladas en roca
Río Cahuelmó	Dioritas con cubierta de dep. morrénicos (arenas gruesas cuarcíferas con conchas recientes fragmentadas)	Quebrada contacto entre afloramiento intrusivo y depósitos glaciofluviales			No
Llancahué	Depósitos morrénicos y rocas granodioríticas	Zona intermareal, costa norte de isla Llancahué		Balneario	pozo artificial excavado y cementado, bomba agua
Mar Fiordo Comau (Llanc)	Depósitos morrénicos y rocas granodioríticas	Costa norte de isla Llancahué			No
Vte. Chucao	Relleno fluvial, andesita	Terrazas fluviales holocenas no propensa a inundaciones, ribera izquierda del río Pichicolo	Apagado o Hualaihué	No	Pozo somero excavado
Estero (Pichicolo)	Relleno fluvial, andesita	Terrazas fluviales holocenas no propensa a inundaciones, ribera izquierda del río Pichicolo			No
La Nueva	Depósitos de playa de gran tamaño, granodiorita o tonalita apreciablemente foliada	Escarpe marino	Yate	No	Barra de cemento sobre alubramiento
Mar estuario Reloncaví	Depósitos de playa, grava y bolones. Depósitos fluviales hacia tierra.				No
Porcelana Chico	Lavas y dep. piroclásticos	Por falla, planos orientados (E-W), ladera N río Punta Calle	Barrancas Coloradas	Balneario	No

(Continuación Tabla 19)

Nombre	Rocas	Afloramientos litológicos cercanos	Volcán	Uso	Instalaciones
El Comau	Esquisto-pizarra fracturada, Gabbros paleotriásicos (Depósitos de playa y escombros de ladera)	Zona intermareal, playa	Porcelana	Balneario	Piscina de concreto cerca
Río Punta Calle	Esquisto-pizarra fracturada, Gabbros paleotriásicos (Depósitos de playa y escombros de ladera)	Zona intermareal, playa	Porcelana	Balneario	Piscina de concreto cerca
Porcelana Grande	Esquistos de anf y dep. fluviales polimicticos (intrusivos y metam)	Ribera S del río Porcelana. Asoc a terraza fluvial holocena (inactiva), en contacto entre esquistos verdes paleozoicos y dep fluviales (gravas muy mal seleccionadas -2m-arena media)	Porcelana	Balneario	No
Mar Fiordo Comau				Cultivo de choritos y salmones	No
Río Porcelana	Bloques y dep. fluviales. Contacto entre el Complejo metamórfico Bahía Mansa y Lavas y dep. piroclásticos del Pleistoceno Superior			Pesca	No
El Amarillo 2	Depósitos morrénicos y fluviales , buen desarrollo de suelo	En contacto entre unidades	Michimahuida	Balneario	Pozos de concreto y tub. de PVC (volumen de agua 0,79 m³)
Río San Antonio					No
El Amarillo 1	Depósitos morrénicos y fluviales , buen desarrollo de suelo	En contacto entre unidades	Michimahuida	Balneario	Pozos de concreto y tub. de PVC (volumen de agua 0,79 m³)
Mar estuario Reloncaví				Pesca y cultivo de choritos	Caletas y mallas de cultivo de choritos
Sotomó	Intrusivos dioríticos con enclaves e intrusiones máficas, y depósitos morrénicos	Bahía que mira al norte, del borde oeste del estuario. Zona con alta presencia de fallas.	Yate	Balneario	Pozas cavadas y represamiento de madera
Cochamó	Escombros de ladera (Tonalita del Cretácico Inferior)	Contacto entre depósitos fluviales y afloramientos intrusivos.	Cuernos del Diablo	No	No
Río Cochamó	Dep. fluviales cuaternarios	Hacia el NE por contacto de distintas litologías.		Pesca	No
Rollizos	Depósitos y rocas fluviales y volcánicos de caída (arcillas rojas)	Zona intermareal, estuarial, de dominio fluvio-marino, al costado de un gran afloramiento (cerro) de lavas y dep. piroclásticos y laháricos pleistocenos.	Ralún	No	Pozo, de tubería de cobre y fierro, de 27 m de prof. Y plataforma de madera
Estero Sacho	Depósitos y rocas fluviales y volcánicos de caída (arcillas rojas)	Por fallas (cubiertas e inferidas).		No	No
Río Petrohué	Contacto entre dep. fluviales de origen volcánico, unidad de estratovolcanes y complejos volcanicos y afloramientos de granito con cxs orientados, Mioceno.	Por fallas (inferidas).		Pesca	No

(Continuación Tabla 19)

Nombre	Vegetación presente	Observaciones
El Callao	Musgo verde escaso y helechos	En la ladera contraria se observan múltiples escarpes que podrían indicar la presencia de alguna falla asociada al SFLO.
Cochamó	Juncos	Origen difuso. Se podría asociar a la Terma La Ballena, que se encuentra al norte, cerro arriba. Estas presentarían una mayor temperatura
Rollizos	Juncos	Marea alta presente. No se sabe si las posibles surgencias asociadas a puntos burbujeantes se deban a actividad geotermal o a desgasificación de los depósitos fluviales producto de la marea alta y a la P inducida por las aguas marinas.
Ralún	No	No se ve claramente cuál es la fuente de calor asociada a un contacto por estructuras.
Rupanco	Algas verdes	Extensión de pozas ~20 m, el número de alumbamientos depende de dónde se excave dentro de esta área. Presencia de conos monogenéticos hacia el NO, asociados al Grupo Antillanca.
Puyehue	Musgo verde, verde oscuro	Monedas presentes en el fondo del pozo desde donde se obtuvieron las muestras de agua.
Aguas Calientes	Musgo verde	Temperatura medida con termómetro de mercurio. Con termocupa da: 61°C.
Cayetué	Juncos y algas verde claro y oscuro	Sobre falla observada con orientación N-S. Ambiente reductor: pantanoso.
Vte. Ulmo	Algas verde y verde oscuro	Relación lineal geográfica con el resto de las termas de la región, sugiere estructuras con orientación NE-SW.
Vte. Arrayán	No, alrededor árboles y helechos	Relación lineal geográfica con el resto de las termas de la región, sugiere estructuras con orientación NE-SW.
Puelo	No, alrededor árboles y helechos	Asociado a estructura paralela a la falda del cerro (contacto de litologías distintas)
Cahuelmó	Algas verdes y naranjas	Ladera izquierda del Fiordo Cahuelmó
Río Cahuelmó	Arbustos y musgo verde	Ladera izquierda del Fiordo Cahuelmó
Llancahué	No, alrededor árboles y helechos	Correlación estructural con emanaciones submarinas de aguas termales en el extremo sur de la isla.
Mar Fiordo Comau (Llanc)	No	
Vte. Chucao	No, alrededor árboles y helechos	Relación lineal geográfica con el resto de las termas de la región, sugiere estructuras con orientación NE-SW
Estero (Pichicolo)	No, alrededor árboles y helechos	
La Nueva	Algas verdes	Se presume alta influencia de estancamiento y exposición al sol en la temperatura medida.
Mar estuario Reloncaví	No	Presencia de lanchas y botes; además de zona de cultivo de choritos.
Porcelana Chico	Algas verdes y beige	Aguas termales ~1km río abajo (ladera N río Punta Calle). Pumitas alt prop (Act+Clo+Epi+arcillas), desembocadura río Punta Calle
Río Punta Calle	No	

(Continuación Tabla 19)

Nombre	Vegetación presente	Observaciones
El Comau	Musgo verde escaso	Claro control estructural en sentido NW-SE
Porcelana Grande	Algas verdes y beige; musgo verde en rocas	(1)Se observan formas de pozones río arriba ~7m de extensión al NW. (2)Contacto por falla de distintas unidades metamórficas (?) (corroborar), perpendicular al río (N-S). (3)Alumbramientos termales en la rivera N del río con mayor T según admin.
Mar Fiordo Comau		
Río Porcelana	No	
Lluvia Porcelana		
El Amarillo 2	algas verdes y marrones	
Río San Antonio	No	Extrañamente ácido según papel pH, lo que debe ser considerado
El Amarillo 1	No	Habría un aumento de 10 cm cuando llueve
Mar estuario Reloncaví		
Sotomó	No	Sets de falla: 40/45; 45/225
Cochamó	Juncos	Origen difuso. Se podría asociar a la Terma La Ballena, que se encuentra al norte, cerro arriba. Estas presentarían una mayor temperatura.
Río Cochamó	No	
Rollizos	Juncos	
Estero Sacho	Juncos	Muestras obtenidas con marea baja.
Río Petrohué	No	Muestras obtenidas muy próximamente a playa con pequeñas embarcaciones (botes a remo).

Tabla 20: Tabla de abreviaciones para tipos de análisis químicos.

Abreviaciones	Análisis
EM	Elementos Mayores
ET	Elementos Traza
DO	Deuterio - O18
SO	S34 - O18 de sulfatos
CID	C inorgánico disuelto
COD	C orgánico disuelto
COT	C orgánico total
S	S34
CN	Cianuro
IE	Isótopos estables

Tabla 21: Tabla de abreviaciones para tipos de manifestaciones termales (Flores, 2011).

Abreviación	Descripción
MF (manantial frío)	Surgencia de escorrentía de agua (manantial), con $T^{\circ} < T$ media anual de la zona.
MT (manantial tibio)	Surgencia de escorrentía de agua (manantial), con $< T$ media anual de la zona $< T^{\circ}$ manifestación $< 40^{\circ}$ C.
MC (manantial caliente)	Surgencia de escorrentía de agua (manantial), con $40^{\circ} < T^{\circ}$ manifestación.
MH (manantial hirviente)	Surgencia de escorrentía de agua (manantial), con T° manifestación = T° ebullición (varía con la altura geográfica).
MB (manantial burbujeante)	Surgencia de escorrentía de agua (manantial), con presencia de burbujeo por emanación de gases.
PT (poza tibia)	Poza de agua sin escorrentía, con $< T$ media anual de la zona $< T^{\circ}$ manifestación $< 40^{\circ}$ C.
PC (poza caliente)	Poza de agua sin escorrentía, con 40° C $< T^{\circ}$ manifestación $< T^{\circ}$ ebullición.
PH (poza hirviente)	Poza de agua sin escorrentía, con T° manifestación = T° ebullición (varía con la altura geográfica).
PB (poza burbujeante)	Poza de agua con presencia de burbujeo por emanación de gases.
PDB (poza de barro)	Poza de barro termal, usualmente burbujeante.
PBH (poza de barro hirviente)	Poza de barro hirviente (depende de la altura geográfica).
SCV (suelo caliente con emanaciones de vapor)	Suelo termal con emanación de vapor.
CI (chorro intermitente)	Emisión de agua por sobre el nivel del suelo que presenta periodicidad.
CC (chorro continuo)	Emisión permanente de agua por sobre el nivel del suelo.
SVG (suelo vaporizante gaseoso)	Abertura en la superficie del terreno que emite vapor y gases.
SGS (suelo gaseoso sulfuroso)	Abertura en la superficie del terreno que emite gases sulfurosos que suele presentar precipitación de azufre nativo.
SG (suelo con emanaciones de gases)	Abertura en la superficie del terreno que emite sólo gases, sin vapor.