

# Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Conceptos generales de geotermia .....	1
1.2	Propuesta de estudio .....	3
1.3	Objetivos .....	4
1.3.1	Objetivo general.....	4
1.3.2	Objetivos específicos.....	5
1.4	Metodología general.....	5
1.4.1	Caracterización química de aguas.....	5
1.4.2	Hidrogeología .....	8
1.4.3	Procesos que afectan la composición de las aguas .....	8
1.4.4	Geotermómetros.....	8
1.4.5	Modelo conceptual de sistema geotérmico.....	9
2	ANTECEDENTES GENERALES .....	10
2.1	Marco geológico y tectónico regional .....	10
2.2	Marco geológico del área de Puyuhuapi .....	11
2.2.1	Formación Traiguén - Oligoceno-Mioceno (EMt) .....	11
2.2.2	Rocas intrusivas del Batolito Norpatagónico .....	11
2.2.3	Grupo Volcánico Puyuhuapi – Holoceno (Hvp).....	12
2.2.4	Depósitos sedimentarios no consolidados.....	13
2.2.5	Mineralogía de alteración geotermal.....	15
2.2.6	Estudios estructurales .....	15
2.3	Hidrogeología.....	16
2.4	Manifestaciones termales en la zona de estudio.....	17
3	RESULTADOS.....	19
3.1	Manifestaciones termales.....	19
3.1.1	Termas de Puyuhuapi.....	19
3.1.2	Termas del Ventisquero.....	20
3.1.3	Termas El Gañote.....	20
3.1.4	Termas Queulat .....	21
3.2	Análisis geoquímico de aguas.....	21
3.2.1	Parámetros fisicoquímicos.....	22
3.2.2	Elementos mayores .....	23
3.2.3	Elementos traza.....	26
3.2.4	Isótopos estables.....	30

4	DISCUSIÓN .....	32
4.1	Caracterización y clasificación de aguas termales .....	32
4.2	Análisis estadístico.....	36
4.2.1	Análisis de conglomerados .....	37
4.2.2	Relación geológica entre componentes.....	40
4.3	Mezcla conservativas con agua de fiordo. ....	43
4.3.1	Sin mezcla en etapa 1 .....	48
4.3.2	Mezcla con agua de fiordo en etapa 1 .....	49
4.3.3	Escenarios de mezclas razonables .....	50
4.4	Geotermometría .....	55
4.4.1	Geotermómetro de sílice .....	56
4.4.2	Geotermómetros de cationes .....	58
4.4.3	Análisis de geotermómetros .....	61
4.4.4	Recurso energético en Puyuhuapi.....	63
4.5	Origen de los componentes químicos .....	64
4.6	Hidrodinámica de los fluidos .....	66
4.7	Sistema Geotermal Puyuhuapi.....	68
5	CONCLUSIONES .....	71
6	BIBLIOGRAFÍA .....	73
7	ANEXOS .....	83
7.1	Límites de detección en análisis químicos de las aguas .....	83
7.2	Datos de análisis estadístico.....	83
7.3	Cálculo de composiciones de agua residual para distintos escenarios de mezcla 87	
7.3.1	Escenario 1a.....	87
7.3.2	Escenario 1b.....	87
7.3.3	Escenario 2a.....	88
7.3.4	Escenario 2b.....	88
7.3.5	Escenario 2c.....	89

## Índice de Figuras

Figura 1-1 - Modelo conceptual para un sistema geotermal tectónico alojado en un ambiente extensional. Las temperaturas se presentan en °C. Tomado de Goff y Janik (2000).....	2
Figura 1-2 - Modelo conceptual de un sistema geotérmico ígneo alojado en un estratovolcán andesítico. La profundidad típica de un reservorio es <1,5 km, mientras que la profundidad de las intrusiones varía de 2 a 10 kilómetros; la dimensión lateral del depósito y del outflow puede superar los 20 km. Tomado de Goff y Janik (2000). .....	3
Figura 1-3 - A la izquierda, geología regional del sur de Chile entre los 44°-47°S, con traza de falla Liquiñe Ofqui y volcanes en la zona (Modificado de Cembrano y Lara, 2009).A la derecha, cuadrángulo de estudio con Carretera Austral cruzando de norte a sur. ....	4
Figura 1-4 - Mapa de ubicación de aguas de este estudio. Se incluyen las muestras analizadas por Hauser (1989-1997), SERNAGEOMIN-GORE Aysén (2011) y las tres campañas de terreno realizadas por el CEGA. ....	7
Figura 2-1 - Marco tectónico regional de los Andes del Sur. A la derecha, se muestran los lineamientos Noreste, paralelos a la fosa, correspondientes a la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (LOFZ). Las flechas pequeñas representan los vectores de convergencia entre la placas de Nazca y de Sudamérica para el último 48 Ma. (Modificado de Cembrano et al., 2002; Pardo-Casas y Molnar, 1987; Cembrano et al., 1996; Bourgois et al., 1996; Somoza, 1998). ....	10
Figura 2-2 - Geología Puerto Puyuhuapi. Modificado de Mella y Duhart, 2011.....	14
Figura 2-3 – Direcciones de esfuerzo principal $\sigma_1$ en distintos sitios, para fallas prepliocenas (rojas), pliocenas (verde agua) y cuaternarias (azules). Se muestran los lineamientos principales de la zona (amarillo). Se indica la edad de las rocas y el valor R para los distintos tensores. R=Rumbo; T=Transpresión; Cu=Compresión uniaxial; Cr=Compresión radial. (a) Arancibia et al., 1999 (b) Lavenu y Cembrano, 1999. ....	16
Figura 3-1 – A la izquierda, ubicación de pozos muestreados: enero P2, junio P3 y P4, agosto P5 y P6; imagen tomada de Google Earth. A la derecha, poza de muestreo de muestra P2 (fotografía A. Negri).....	19
Figura 3-2 - A la izquierda, ubicación del pozo de donde fueron tomadas las muestras V1 y V2 (Google Earth). A la derecha, fotografía del pozo de 43m de profundidad del cual se obtuvo las muestras de agua (fotografía A. Negri).....	20
Figura 3-3 - Ubicación termas El Gañote y termas del Ventisquero.....	20
Figura 3-4- A la izquierda, ubicación termas El Gañote. A la derecha, surgencia a orilla del fiordo, represada artificialmente para evitar mayor mezcla con agua fría del fiordo (enero 2015, toma de muestra G1; fotografía Angello Negri).....	21
Figura 3-5 - Gráfico de conductividades eléctricas (izq) y potencial redox (der) vs. temperatura en aguas termales y no termales. Para más detalles, ver Tabla 3-1.....	23
Figura 3-6 - Concentraciones en las 13 muestras de agua termal consideradas en el estudio. P: Puyuhuapi (gama de rojos), V: Ventisquero (gama de verdes), G: Gañote (gama de anaranjados) y Q: Queulat (gama de celestes). ....	25
Figura 3-7.- Diagrama de Schoeller para elementos traza en aguas de fiordo (F1 y F3) y aguas superficiales (S2 y S3).....	26
Figura 3-8 - Concentraciones promedio* de las aguas termales de Puyuhuapi, Ventisquero, El Gañote y Queulat y las aguas superficiales y de fiordo. *Se utiliza la concentración promedio debido a que no todos los elementos fueron medidos en todas	

las muestras de cada tipo de agua; así el promedio se obtiene a partir de los datos medidos.....	30
Figura 3-9 - Isótopos de oxígeno e hidrógeno en las distintas muestras de agua del estudio.....	31
Figura 4-1 - Diagrama ternario de aniones mayores para aguas analizadas. Se incluyen aguas termales, superficiales y de fiordo. ....	33
Figura 4-2 - Diagramas de dispersión de sulfato y bicarbonato respecto a cloruro para aguas termales y no termales. Se indican líneas de mezcla entre aguas superficiales y de fiordo (línea punteada) .....	34
Figura 4-3 - Diagrama ternario para cationes mayores para termas analizadas. Se incluyen aguas superficiales y de fiordo para comparación con aguas termales. ....	34
Figura 4-4 - Diagramas de dispersión de cationes mayores respecto a cloruro. Se indica la línea de mezcla (línea punteada) entre aguas superficiales y agua de fiordo. ....	35
Figura 4-5 - Diagrama de Durov para clasificación de aguas.....	36
Figura 4-6 - Dendograma de aguas termales, superficiales y de fiordo en el sector de Puyuhuapi, considerando datos de elementos mayoritarios y traza (datos químicos en Tabla 7-4, sección anexos) .....	39
Figura 4-7 - Dendograma de componentes químicos en las aguas termales, superficiales y de fiordo en el sector de Puyuhuapi (datos químicos en Tabla 7-4 , sección Anexos).....	39
Figura 4-8 – Diagrama ternario de Li-Rb-Cs (Giggenbach, 1990). Se muestran las muestras termales, una muestra de agua de fiordo (F3) y un agua superficial (S3).*Las muestras en el eje Li-Cs solo muestran relación Li-Cs; análisis de elementos traza sin Rb (sin dato).....	41
Figura 4-9 - Diagrama ternario Li-B-Cl para aguas termales, no termales y rocas promedio de distinto tipo. Triángulos rojos y azules: aguas termales y no termales muestreadas en enero y junio 2015 (CEGA), respectivamente; Cuadrados calipso: composición roca promedio.....	42
Figura 4-10 - Diagramas de dispersión de Litio (izquierda) y Boro (derecha) con respecto al Cl. ....	42
Figura 4-11 - Diagramas binarios de Mo, Ge y Co con sílice. ....	43
Figura 4-12- Relación de cloruros con temperatura y con concentración de sílice para las aguas analizadas.....	44
Figura 4-13 – Relación entre bromuro y cloruro para aguas termales de Chile (asteriscos azules y rojos oscuros, aguas del sur y norte de Chile; Risacher et al., 2011) y de la zona de estudio. Se muestra la línea de dilución de agua de mar (SWDL, a partir de Risacher et al., 2011) y las muestras del Fiordo Puyuhuapi. ....	45
Figura 4-14 - Diagramas de Schoeller para las cuatro termas estudiadas. Se muestran las aguas de fiordo (azul discontinua), un agua superficial de estero (morado), el agua de la terma (línea continua) y la composición teórica a partir de la mezcla (línea punteada). ....	46
Figura 4-15 – Diagrama esquemático de procesos de mezcla con agua de fiordo o meteórica (1 y 3) e interacción con roca albergante (2) de las aguas, desde un agua meteórica (0) hasta el agua termal (4) aflorando en superficie. Los números indican orden temporal de las distintas etapas.....	47
Figura 4-16 - Resumen de escenarios con mezclas posibles para las termas consideradas. *Para referencia de etapas 1 y 3, ver Figura 4-15.....	51

Figura 4-17 - Solubilidad de polimorfos del sílice en el agua. A= sílice amorfa, B=ópalo-ct, C=cristobalita alfa, D=calcedonia y E=cuarzo. Tomado de Fournier, 1991. ....	56
Figura 4-18 - Triángulo de Giggenbach (1988) para validación de geotermómetros. Las líneas punteadas unen los rangos de mezcla para un escenario y una misma terma. ..	60
Figura 4-19 - Rango de temperaturas para distintos escenarios con geotermómetros de sílice y catiónicos. (F)=Fournier; (T)=Truesdell; (G)=Giggenbach. ....	61
Figura 4-20 - Resumen de temperaturas calculadas con geotermómetros de sílice y catiónicos para los distintos escenarios de mezcla con agua de fiordo y meteórica, para las cuatro termas consideradas. ....	62
Figura 4-21 - Diagrama de Lindal con rango de temperaturas de las cuatro termas analizadas en este estudio. Modificado de sitio web Geothermal Energy. ....	63
Figura 4-22 - Isótopos de Oxígeno e Hidrógeno para las aguas muestreadas en las campañas de enero, junio y agosto 2015. Modificado de Baker et al., 2001. ....	64
Figura 4-23.- Modelo esquemático de un sistema de aguas termales con una fuente de calor desconocida y mezclas superficiales dentro de un sistema de permeabilidad interconectada. Las letras muestran discontinuidades por las cuales pueden circular los fluidos. Las zonas punteadas corresponden a acuíferos; sin embargo, en la zona de estudio deben corresponder a zonas fracturadas o de discontinuidades por donde pueda circular el fluido. Los colores de las flechas muestran diferentes temperaturas del fluido, según la cercanía al cuerpo caliente (Modificado de Fournier y Truesdell, 1974). ....	67

## Índice de Tablas

Tabla 1-1 - Códigos de identificación para distintas aguas. ....	6
Tabla 1-2 - Error admisible en balance iónico según la conductividad eléctrica (Custodio y Llamas, 1976).....	8
Tabla 3-1 - Parámetros fisicoquímicos medidos en las aguas termales, de fiordo, de lluvia y superficiales analizadas. ....	22
Tabla 3-2 - Balance iónico para muestras consideradas en este estudio y condición de validez, según Custodio y Llamas (1976).....	24
Tabla 3-3 - Datos químicos para sílice, aniones y cationes mayores en las muestras de agua analizadas. Unidades en mg/l. ....	27
Tabla 3-4 - Datos químicos de elementos traza en las muestras de agua analizadas (primera parte). Unidades en ppb.....	28
Tabla 3-5 – Datos químicos de elementos traza en las muestras de agua analizadas (segunda parte). Unidades en ppb. ....	29
Tabla 4-1 - Tipo de relación según coeficiente de correlación entre dos componentes. ....	36
Tabla 4-2 - Matriz de correlación entre muestras de agua termal, de fiordo y superficiales. Se muestran en rojo, amarillo y verde las correlaciones muy buenas, buenas y regulares respectivamente; rangos determinados arbitrariamente (ver Tabla 4-1). Las correlaciones entre las aguas superficiales se muestra en anexos (Tabla 7-2). ....	38
Tabla 4-3 - Razones de mezcla entre agua de fiordo (F1) y agua meteórica (S4) para las termas de Puyuhuapi (P), Ventisquero (V), El Gañote (G) y Queulat (Q) considerando Cl-. Se incluye contenido de Br <sup>-</sup> teórico (Br <sub>t</sub> ) según la mezcla calculada y el contenido real de bromuro en las termas (Br <sup>-</sup> ). El contenido de Br <sup>-</sup> del agua superficial se consideró igual al límite de detección 0,01 mg/l. ....	45
Tabla 4-4 - Escenarios de mezcla con combinaciones según ocurrencia en etapa 1 o etapa 3 de Figura 4-15. ....	48
Tabla 4-5 - Composición agua residual de escenario 1a. En verde se muestran las concentraciones negativas de los distintos componentes químicos considerados. ....	52
Tabla 4-6 - Concentraciones en profundidad del fluido (en mg/l) para escenario 1b (mezcla con agua de fiordo en etapa 1 y meteórica en etapa 3; Figura 4-15). Los valores de x e y corresponden a los porcentajes de mezcla con agua de fiordo y meteórica, respectivamente (detalles de cálculos en sección 7.3.2). En negrita se destacan los valores de mezcla fijados en el cálculo; en rojo, aquellos % de mezcla <0, en verde, concentraciones químicas negativas y en naranja, concentraciones de SiO <sub>2</sub> > 350 mg/l (ver texto). ....	52
Tabla 4-7 - Concentraciones en profundidad del fluido (en mg/l) para escenario 2b (mezcla con agua de fiordo en etapa 1 y 3; Figura 4-15). x <sub>1</sub> y x <sub>2</sub> corresponden a los porcentajes de mezcla con agua de fiordo en etapas 1 y 3, respectivamente. En negrita, el valor de mezcla fijado en el cálculo; en rojo, porcentajes de mezcla negativos; en verde, concentraciones menores a 0; en naranja, concentraciones de sílice mayores a la cota de 350 mg/l impuesta (ver texto); en sombreado gris, mezclas con composición razonable de acuerdo a los criterios considerados. ....	53
Tabla 4-8 - Concentraciones en profundidad del fluido (en mg/l) para escenario 2c (mezcla con agua de fiordo en etapa 1 y con aguas meteóricas en etapa 3; Figura 4-15). Los valores de x e y corresponden a los porcentajes de mezcla con agua de fiordo y meteórica, respectivamente; en negrita se destaca el valor me mezcla fijado en	

el cálculo. En rojo se destacan aquellos porcentajes de mezcla mayores a 100%, en verde, las concentraciones de componentes negativas y en naranja las concentraciones de sílice mayores a la cota de 350 mg/l impuesta. En sombreado gris, se destacan las mezclas con composición razonable de acuerdo a los criterios considerados.....	54
Tabla 4-9 - Geotermómetros de sílice para aguas termales de Puyuhuapi (P1 a P6), Ventisquero (V1 a V3), El Gañote (G1-G2) y Queulat (Q1-Q2). En negrita, se indican los geotermómetros más confiables, según rango de temperatura, para cada terma. Todas las temperaturas se presentan en °C y concentración de sílice en ppm. ....	57
Tabla 4-10 - Geotermómetros de sílice para escenarios realistas según criterios determinados en sección 4.3. Resultados calculados con planilla de Powell et al., 2010; se agrega geotermómetro de cristobalita alfa según la ecuación indicada anteriormente. Las temperaturas en verde se escapan del rango confiable del geotermómetro (Fournier, 1991). Se agrega temperatura medida en superficie para cada terma y la concentración de sílice en las termas (ppm). Temperaturas en °C. ....	58
Tabla 4-11 –Geotermómetros de cationes para aguas termales de Puyuhuapi, Ventisquero, El Gañote y Queulat. Se incluye corrección por Mg. Se muestran en verde aquellas temperaturas fuera del rango de validez del geotermómetro. Datos obtenidos según plantilla Powell et al., 2010. Temperaturas en °C. ....	59
Tabla 4-12 - Geotermómetros catiónicos para escenarios realistas según criterios determinados en sección 4.3. Cálculos a través de planilla de Powell et al., 2010 (F:Fournier, T:Truesdall, G:Giggenbach). Las temperaturas en verde no cumplen requisitos (geológicos) de aplicación de geotermómetros o no se encuentran en los rangos de temperatura válidos para el geotermómetro, y en naranja, la muestra no se encuentra en zonas de equilibrio parcial o total en diagrama de Giggenbach (1988) y que ya habían superado el filtro de temperatura/geología. Todas las temperaturas se entregan en °C. ....	61
Tabla 7-1.- Límites de detección (LOD) y de cuantificación (LOQ) para aniones y cationes mayores. ....	83
Tabla 7-2 - Matriz de correlación para aguas no termales: aguas de fiordo (F1 y F3) y aguas superficiales (S2 a S9). Se muestran en rojo, amarillo y verde las correlaciones muy buenas, buenas y regulares respectivamente, con una relación directamente proporcional.....	83
Tabla 7-3 - Matriz de correlación entre componentes químicos presentes en las aguas termales de este estudio. Ver Tabla 4-1 para tipo de relación (colores) según coeficiente de correlación.....	84
Tabla 7-4 - Datos químicos para análisis de conglomerados. Tabla superior e inferior con concentraciones en ppm y ppb, respectivamente. En rojo, se muestran aquellos valores correspondientes al límite de detección (LD).....	86
Tabla 7-5 - Composiciones de aguas residuales representativas de un posible peak térmico, en escenarios de mezclas realistas según criterios determinados en sección 4.3.3. ....	90