



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

*ESTUDIO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÁNEOS DE LAS CUENCAS COSTERAS DE
QUEBRADA PACHINGO Y QUEBRADA SECA Y SU
CORRELACIÓN CON LA CUENCA DEL RÍO LIMARÍ:
IV REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.*

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

JULIA ESMERALDA MAZO MARQUES

PROFESOR GUÍA

DRA. DOLORINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

DR. DIEGO MORATA CÉSPEDES

DRA. SASKIA ROELS

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geóloga

POR: Julia Esmeralda Mazo Marques

PROFESOR GUÍA: Dolorinda Daniele

**ESTUDIO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE
LA CUENCA COSTERA DE QUEBRADA PACHINGO Y SU
CORRELACIÓN CON LA CUENCA DEL RÍO LIMARÍ: IV REGIÓN
DE COQUIMBO, CHILE.**

El tema de esta Memoria corresponde al estudio de una de las cuencas costeras presentes en la Región de Coquimbo, la cuenca de Quebrada Pachingo, la cual se ubicada entre los ríos Elqui y Limarí, aproximadamente entre los $W71^{\circ}39'18''$ y $W71^{\circ}20'16''$ Longitud Oeste y entre los $S30^{\circ}18'4''$ y $S30^{\circ}36'$ Latitud Sur. Se pretende establecer una correlación entre la cuenca anterior y la cuenca del río Limarí, estudiando la conectividad entre ambas.

La metodología consistió en una recopilación y análisis de datos publicados en otros estudios. Se han elaborados gráficos binarios con los datos hidroquímicos de las aguas subterráneas en la cuenca costera y en el río Limarí. También se han realizado perfiles esquemáticos hidrogeológicos con datos de cotas hidráulicas y las elevaciones tanto de la topografía como del basamento local.

Se ha reconocido que las muestras químicas de aguas subterráneas de la cuenca del río Limarí son más enriquecidas en calcio, sulfato y bicarbonato que las muestras de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca. Se tiene la misma tendencia para el sodio, salvo en el sector costero, donde la cuenca de Quebrada Pachingo se ve más enriquecida.

En el basamento, se ha observado depocentros de hasta 700 m.b.n.m en Quebrada Pachingo y en el río Limarí, separados entre sí por una zona alzada por sobre los 50 m.s.n.m en Quebrada Seca. Se cree que ésta fue originada por fallas inversas y que fue la causa del cambio de curso del río Limarí, dejando su camino hacia la bahía al norte para atravesar los Altos de Talinay al Oeste. Además, Se ha determinado que la divisoria de aguas superficial no coincide con el sector más elevado del basamento y que por lo tanto la cuenca hidrográfica y la cuenca hidrogeológica presentan diferencias espaciales.

Se ha observado que los niveles estáticos son relativamente someros y siguen la topografía. Además, los valores de nivel estático parecen indicar que la relación de aguas subterráneas de ambas cuencas, de existir, es menor.

Agradecimientos

Agradezco a Hidrogestión SA., especialmente a Eugenio Celedón Cariola, por el tema de este trabajo de memoria, por la oportunidad que se me ha dado y por todo lo que he aprendido a lo largo de este año de trabajo. También por la amabilidad y por la buena persona que es.

Agradezco a mi profesora guía Dra. Linda Daniele por la orientación en la elaboración de este trabajo de título, así como los miembros de la comisión, Dr. Diego Morata y a la Dra. Saskia Roels, por la buena disposición en ayudar durante el proceso. También a todos los profesores del departamento de Geología que han aportado en mi formación.

Agradezco a mi familia. Mi madre, Sandra, por el apoyo que me ha dado a lo largo de mi vida, especialmente en la etapa universitaria. Por todos los consejos, por incentivarme a hacer siempre todo aquello que consideraba imposible, por haberme enseñado una forma única de ver el mundo y entender la realidad, por haber sido una mujer fuerte y valiente en mi crianza y por todo el amor incondicional y cariño que me ha dado siempre. Agradezco a mi tío Bené por presentarme la Geología y por ser un ejemplo profesional al que siempre he admirado. Agradezco a mi hermano Daniel y a mi abuela Lolo. Agradezco a Pimpinela y Balalaika por todo el amor me que han entregado, y en harto menor medida, por sentarse en mis libros y teclados cuando más los necesitaba a lo largo de toda esta etapa universitaria.

Agradezco a mi pololo, Benjamín, quien ha sido un gran compañero y amigo durante todos estos años juntos. Por todo el apoyo y ánimo que me ha dado siempre y, sobretudo, por el gran amor que nos une.

Agradezco a mis amigos de Brasil y de Chile por la trayectoria que tenemos juntos y por el cariño. A mis compañeros del departamento de Geología por los momentos que pasamos juntos. A todas las personas que conocí en estos seis años en la facultad, alumnos y funcionarios.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
2	Hipótesis de trabajo.....	2
3	Objetivos	3
3.1	Objetivo general.....	3
3.2	Objetivos específicos	3
3.3	Trabajos previos	3
4	Metodología.....	4
5	Marco geológico e hidrogeológico	5
5.1	Geomorfología	5
5.2	Litología.....	6
5.3	Estructuras.....	8
5.4	Geodinámica	8
5.5	Geometría del Acuífero.....	10
5.5.1	Basamento.....	10
5.5.2	Topografía.....	12
5.6	Río Limarí	13
5.7	Quebrada Pachingo y Quebrada Seca	15
5.8	Clima.....	18
5.9	Precipitaciones.....	19
5.10	Nivel Estático.....	22
6	Resultados.....	24
6.1	Composición química del agua subterránea.....	25
6.2	Perfiles topográficos.....	40
7	Discusiones	47
8	Conclusiones.....	49
9	Recomendaciones.....	50
10	Bibliografía.....	51
11	Anexos	55
11.1	Anexo A: Gráficos binarios de las muestras químicas de Aravena (1997)	55
11.2	Anexo B: Evolución temporal de las precipitaciones de las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca costera y en sus cercanías.	60

Índice de Tablas

Tabla 5-1: Información de profundidad habilitada, espesor saturado, transmisividad y conductividad hidráulica de los pozos de la DGA ubicados en la cuenca costera en estudio.....	16
Tabla 5-2: Ubicación y precipitación promedio anual de todo el período de registro de las estaciones meteorológicas ocupadas.....	21
Tabla 6-1: Información de las muestras de agua subterráneas consideradas. Ubicación, año en el cual fueron extraídas, concentraciones de los iones mayoritarios en mg/L y el error calculado.....	26

Índice de Figuras

Figura 1-1: Ubicación de la cuenca costera en estudio (delimitada en color amarillo) con las quebradas que la conforman. En azul se muestra el sistema de drenaje de la zona, destacándose el río Limarí al sur.....	2
Figura 5-1: Mapa geológico: Modificado de Emparan y Pineda (2006) y Emparan (200X).	7
Figura 5-2 Esquema cronológico de la evolución geodinámica del sector de estudio a partir de los resultados de Le Roux et al. (2006), Le Roux et al. (2005a), Saillard et al. (2009) y Saillard et al. (2012).	9
Figura 5-3: Perfiles gravimétricos recorridos en terreno por SEGMI. Los extremos de cada perfil están en contacto con afloramientos del basamento rocoso. Modificado de Hidrogestión (2016).....	11
Figura 5-4: Mapa de elevación del basamento a partir de los datos gravimétricos medidos por SEGMI el año 2016. Modificado de Hidrogestión (2016).....	12
Figura 5-5: Mapa de elevación del sector de estudio, extraído desde ASTER DEM V2, un producto de la NASA (U.S. National Aeronautics and Space Administration) y el METI (Japan's Ministry of Economy, Trade, and Industry).	13
Figura 5-6: Cuenca hidrográfica del río Limarí. Modificado de “ <i>Información Hídrica de las Cuencas Priorizadas, Fichas Temáticas. DGA</i> ”.....	14
Figura 5-7: Ubicación de los pozos asociados a la DGA.	17
Figura 5-8: Mapa de conductividades de la cuenca costera en estudio a partir de la información de los pozos de la DGA. Modificado de Hidrogestión (2016).	18
Figura 5-9: Distribución climática en la IV Región de Coquimbo. Tomado de Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Coquimbo, 2012.....	19
Figura 5-10: Ubicación de las estaciones meteorológicas ocupadas, pertenecientes tanto a la DGA como a la DGAC.....	20
Figura 5-11: Mapa de isoyetas del sector de estudio, elaborado a partir del promedio anual de precipitaciones de las estaciones meteorológicas consideradas.....	22
Figura 5-12 Evolución en el tiempo de los niveles estáticos registrados en la estación de monitoreo Quebrada Seca 1, perteneciente a la DGA.....	23
Figura 5-13: Evolución en el tiempo de los niveles estáticos registrados en la estación de monitoreo Quebrada Seca 2, perteneciente a la DGA.....	23
Figura 5-14: Ubicación de los puntos de medición de nivel estático ocupados. Los puntos blancos corresponden a las estaciones de monitoreo de la DGA, los puntos amarillos corresponden a los pozos visitados durante el invierno de 2014 y los puntos rojos corresponden a los pozos con información de niveles estáticos de verano de 2005.	24
Figura 6-1: Ubicación de las muestras químicas ocupadas. Los puntos naranjos corresponden a las muestras de Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant (2016), los puntos verdes corresponden a las muestras de Aravena (1997) y los puntos azules corresponden a las muestras de Jofré (2010).....	25
Figura 6-2: Diagrama binario Na vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant (2016). La línea naranja corresponde a la línea de equimolaridad, mientras que la línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.	27

Figura 6-3: Diagrama binario Ca vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant (2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras	27
Figura 6-4: Diagrama binario Mg vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.	28
Figura 6-5: Diagrama binario K vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.	28
Figura 6-6 Diagrama binario SO4 vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.	29
Figura 6-7: Diagrama binario HCO3 vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras	29
Figura 6-8: Diagrama binario Ca + Mg vs SO4 de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea naranja indica la equimolaridad entre los iones.....	30
Figura 6-9: Diagrama binario Ca + Mg vs HCO3 de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea naranja indica la equimolaridad entre los iones.....	31
Figura 6-10: Diagrama binario Na vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea naranja corresponde a la línea de equimolaridad, mientras que la línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.....	32
Figura 6-11: Diagrama binario Ca vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.....	32
Figura 6-12: Diagrama binario Mg vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.....	33
Figura 6-13: Diagrama binario K vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.....	33
Figura 6-14: Diagrama binario SO4 vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.....	34
Figura 6-15: Diagrama binario HCO3 vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.....	34
Figura 6-16: Diagrama binario Ca + Mg vs SO4 de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea naranja indica la equimolaridad entre los iones.	35
Figura 6-17: Diagrama binario Ca + Mg vs HCO3 de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea naranja indica la equimolaridad éntrelos iones.	36
Figura 6-18: Perfil esquemático trazado a lo largo de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca y cruzando transversalmente a la cuenca del río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2). Las estrellas rojas indican cambios de dirección en el perfil. La profundidad de las formaciones mostradas es apenas ilustrativa, ya que no se tiene información de columnas en el sector.	41
Figura 6-19: Perfil esquemático con información de niveles estáticos, trazado de forma longitudinal al río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2). La profundidad de las formaciones mostradas es apenas ilustrativa, ya que no se tiene información de columnas en el sector.....	42

Figura 6-20: Acercamiento al sector con información de niveles estáticos del perfil esquemático longitudinal al río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2)..... 43

Figura 6-21: Perfil esquemático con información de niveles estáticos, trazado desde Quebrada Seca hasta el río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2). La profundidad de las formaciones mostradas es apenas ilustrativa, ya que no se tiene información de columnas en el sector. 44

Figura 6-22: Acercamiento al sector con información de niveles estáticos del perfil esquemático desde Quebrada Seca hasta al río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2)..... 45

Figura 6-23: Perfil esquemático entre las muestras químicas Qs2, Qs3 y ACT. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2). La profundidad de las formaciones mostradas es apenas ilustrativa, ya que no se tiene información de columnas en el sector..... 46

Figura 7-1: Mapa de las fallas inversas ubicadas en el sector de estudio, encontradas y modeladas por Heinze (2003). Modificado de Heinze (2003). 48

1 Introducción

La región de Coquimbo presenta una importante demanda de recursos hídricos, tanto para abastecimiento humano como para los diferentes sectores económicos instalados en la región. Para satisfacer tales necesidades se explotan tanto recursos superficiales como subterráneos, sin embargo la actual condición de sequía (UCN, 2015) en la zona hace más evidente la insuficiente cantidad de estos. Una posible solución para este problema reside en explorar nuevas fuentes, como las cuencas costeras de la región, las cuales podrían albergar una cantidad importante de agua, según aparece en el Mapa Hidrogeológico de Chile. Su futura explotación debe estar respaldada por estudios rigurosos en el sector, debido a que los acuíferos costeros son sistemas hidrogeológicamente complejos y su uso sustentable implica un profundo conocimiento de su geometría y funcionamiento. No obstante, actualmente los antecedentes hidrogeológicos de estas son deficientes, contando con unos pocos pozos realizados para fines particulares que apenas entregan información de columna estratigráfica o pruebas de bombeo. Bajo este contexto, la Universidad Católica del Norte ha elaborado una propuesta de levantamiento de información pertinente a la problemática actual con el fin de proveer una adecuada evaluación de los acuíferos costeros de la región y permitir la explotación sustentable de los mismos. Los estudios relacionados a la cuantificación y comportamiento de los recursos hídricos subterráneos están a cargo de HIDROGESTIÓN S.A., una empresa dedicada a la ingeniería y proyectos de obras civiles, con especialidad en el campo de las obras hidráulicas, sanitarias y de aguas subterráneas, además de obras generales de urbanización (UCN, 2015)

El tema de esta Memoria, asociado al proyecto de HIDROGESTIÓN S.A., corresponde al estudio de una de las cuencas costeras presentes en la Región de Coquimbo, las cuencas de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca, las cuales están relacionadas y se distinguen entre sí apenas por un cambio de dirección de la quebrada principal. Se ubican entre los ríos Elqui y Limarí, aproximadamente entre los $W71^{\circ}39'18''$ y $W71^{\circ}20'16''$ Longitud Oeste y entre los $S30^{\circ}18'4''$ y $S30^{\circ}36'$ Latitud Sur (Figura 1-1).



Figura 1-1: Ubicación de la cuenca costera en estudio (delimitada en color amarillo) con las quebradas que la conforman. En azul se muestra el sistema de drenaje de la zona, destacándose el río Limarí al sur.

2 Hipótesis de trabajo

En el sector de estudio, es posible observar que los depósitos fluviales asociados al río Limarí se extienden hasta Quebrada Seca por el norte, de forma independiente del curso actual del mismo río, el cual atraviesa los Altos de Talinay por el oeste. Dado lo anterior, se piensa que el río Limarí, en sus orígenes, pudo haber desembocado al mar hacia el norte en Quebrada Seca y que en algún momento adquirió su configuración actual.

En este estudio se pretende verificar lo anterior a partir de los datos hidrogeológicos disponibles tanto para las cuencas de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca, como para el río Limarí.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

El objetivo de este trabajo es evaluar la posible conectividad hidráulica del acuífero costero de las cuencas de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca con las aguas subterráneas de la cuenca del río Limarí.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar dirección de los flujos subterráneos a partir del estudio de las cotas hidráulicas en la zona de estudio.
- Mejorar el conocimiento la geometría y la relación hidráulica entre los acuíferos presentes en la zona de estudio.
- Analizar la relación hidrogeoquímica entre las aguas de Quebrada Pachingo, Quebrada Seca y el sector del río Limarí cercano a las anteriores.

3.3 Trabajos previos

El interés en determinar la conexión hídrica entre la cuenca de Quebrada Pachingo-Quebrada Seca y la del río Limarí no es reciente, debido al interés de la industria ganadera local. Meinardus (1961) realizó una campaña de prospección gravimétrica y sísmica tanto en el sector de Tongoy como en el lecho del río Limarí. Los resultados evidenciaron un horizonte con velocidad de propagación de 2600 m/s a una profundidad de 150 m, que fue interpretada como asociada a sedimentos fluviales muy consolidados depositados por el río. Según el autor, estos no serían buen material acuífero para una eventual descarga subterránea hacia la costa debido a su alto grado de cementación.

Se han identificado 5 terrazas de abrasión en los Altos del Talinay (Paskoff, 1970; Benado, 2000; Saillard et al., 2009), las cuales fueron datadas y asociadas a estadios isotópicos marinos (MIS por su nombre en inglés) por parte de Saillard et al. (2009), evidenciando la variabilidad en la tasa de alzamiento en la costa chilena durante los últimos 700 ka. Por otra parte, la bahía de Tongoy presenta terrazas marinas depositadas durante ciclos de transgresión-regresión (Paskoff, 1970; Le Roux et al., 2006). Dichas fluctuaciones en el nivel del mar fueron influenciadas por cambios eustáticos y por la tectónica tanto regional como local, asociada a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (Le Roux y Elgueta, 2000; Le Roux et al., 2004, 2005a,b). Le Roux et al. (2006) propusieron que la subducción de la dorsal de Juan Fernández provocó un alzamiento lento desde los 10.5 hasta los 6.9 Ma, seguido de una lenta subsidencia debido a su migración hacia el sureste. Los movimientos tectónicos opuestos con altas tasas de alzamiento y subsidencia que se dieron a lo largo de la Falla Puerto Aldea se asociaron al estrés diferencial generado por la misma dorsal. Finalmente, consideró el fuerte alzamiento desencadenado en 2.1 Ma como producto de la subducción de un plateau oceánico similar a la dorsal de Juan Fernández. Saillard et al. (2012) realizaron dataciones con U-Th muestras de conchas marinas recolectadas en crestas de playa ubicadas en las terrazas de la bahía de Tongoy. Según los autores, el complejo Altos de Talinay – Bahía de Tongoy se ha

comportado como un bloque rígido desde el Pleistoceno Medio (~320 – 230 ka) acompañado de un cese de la falla Puerto Aldea. Sin embargo en algún momento dentro de ese intervalo de tiempo, dicha falla acomodó un alzamiento diferencial entre la Bahía de Tongoy y la península de Altos de Talinay, con la última presentando una mayor tasa de alzamiento. Además confirmó la tendencia decreciente de la tasa de elevación a partir de ~230 ka antes del presente.

La deformación estructural del sector se ha determinado de tipo extensional en dirección E-W, con predominio de fallas normales de intraplaca con rumbo N-S o NNW-SSE, cuyo manteo principal es de 65-80° E. Lo anterior sería resultado de un reacomodo de bloques por colapso gravitatorio, asociado a la alta tasa de alzamiento producto de la flexura de la corteza en el sector costero, provocada por una subducción erosiva y la posterior acumulación de sedimentos bajo la placa Sudamericana (Benado, 2000; Heinze, 2003). De este modo, el ambiente tectónico del antearco estaría fuertemente influenciado por los procesos que se llevan a cabo en la zona de interplaca, dependiendo de la posición de la línea de costa con respecto a la fosa (Heinze, 2003).

Aravena (1997) realizó el principal estudio hidrogequímico e hidrogeológico publicado en la bahía de Tongoy, donde se propusieron unidades hidrogeológicas y se realizaron análisis químicos de aguas subterráneas y, en menor medida, superficiales. Según la autora, las aguas subterráneas son de tipo sódico-clorurado. En mayor parte exceden los valores máximos establecidos en la Norma Chilena NCh 409 en el ión Cl y sólidos disueltos. En este trabajo se descartó la posibilidad de una intrusión salina en los puntos alejados de la costa por la baja explotación del sector, y atribuyó la composición a la influencia litológica, al tiempo de permanencia, a la presencia de aguas fósiles y a la concentración del agua de lluvia. En los puntos cercanos a la costa la salinidad se ha atribuido también a la mezcla con agua marina.

Algunos autores han considerado que el río Limarí podría haber desembocado hacia el norte en la bahía de Tongoy, y que, en algún momento durante el Cuaternario, habría sido obligado a cambiar su curso, atravesando los Altos de Talinay para desembocar hacia el oeste, tal como es su configuración actual (Bruggen, 1950; Taylor, 1947; Borgel, 1961; Herm, 1969; Paskoff, 1995). La principal evidencia de lo anterior es la distribución geográfica de la Formación Confluencia, la cual se desvía a Quebrada Seca hasta encontrarse con los sedimentos marinos de Formación Coquimbo. Sin embargo, hasta la fecha lo anterior no ha sido corroborado y menos se ha encontrado una causa para dicho cambio de curso. Le Roux (2006) considera que la erosión de las rocas de los Altos de Talinay, más resistentes que los sedimentos de Formación Coquimbo, no han debido facilitar la instalación de un lecho fluvial.

4 Metodología

La metodología consistió en una recopilación y-análisis de datos levantados y publicados, y que se detalla a continuación.

1. Contexto hidrogeológico del acuífero del sector de estudio.

- i. Recopilación de estudios desarrollados anteriormente en la zona a estudiar.
 - ii. Revisión de registros de precipitaciones anuales disponible para la zona.
 - iii. Revisión de la carta geológica existente para el sector.
2. Contexto estructural del sector de estudio.
 - i. Revisión de publicaciones orientadas al comportamiento estructural y geodinámico en el sector
 - ii. Revisión de la carta geológica existente para el sector.
3. Geometría y relaciones de los acuíferos en el área de estudio.
 - i. Análisis de datos gravimétricos levantados en la zona de estudio.
 - ii. Análisis de perfiles geológicos
4. Determinar presencia y dirección de flujos a partir de las cotas hidráulicas en la zona de estudio.
 - i. Revisión de datos de niveles estáticos disponibles en la DGA y en el informe “Estudio geofísico e hidrogeológico en la cuenca del río Limarí” de GCS Ingenieros.
5. Hidrogeoquímica en Quebrada Pachingo, Quebrada Seca y en sector del río Limarí cercano a las anteriores
 - i. Revisión del seguimiento de calidad de aguas subterráneas disponible para Quebrada Pachingo, Quebrada Seca y para el río Limarí.
6. Relaciones entre el acuífero costero con el asociado al río Limarí.
 - i. Comparación entre los niveles estáticos de ambas cuencas.
 - ii. Estudio del comportamiento de los niveles estáticos de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca en función de la geometría del basamento.
 - iii. Comparación entre la química de las aguas para ambas cuencas.

5 Marco geológico e hidrogeológico

5.1 Geomorfología

En el sector occidental del área de estudio se tiene un macizo rocoso conocido como Altos de Talinay, el cual pertenece a la unidad geomorfológica de la Cordillera de la Costa y se extiende en dirección NS a lo largo de la línea de la costa. Dicho cordón montañoso es el producto de la acreción de la placa Sudamericana debido a la subducción de la placa de Nazca, presentando fallas, diaclasas y bloques basculados.

Además se caracteriza por la presencia de terrazas de abrasión debido a la acción de las olas en conjunto con el alzamiento de la península, ya sea por cambios eustáticos o por acción de la tectónica.

Inmediatamente al este de los Altos de Talinay, se encuentra una planicie central sobre la cual se encajonan varias quebradas con orientación NNW, incluyendo a Quebrada Pachingo, la cual adquiere orientación NW hacia el sur, donde pasa a llamarse Quebrada Seca. La planicie central presenta una amplia extensión, pero para efectos de este estudio se considera solamente el sector de Quebrada Pachingo, entre el río Limarí y la costa en la Bahía de Tongoy. La máxima altitud se alcanza en el sector intermedio entre Quebrada Seca y el río, donde se superan los 250 m.s.n.m.

En el sector oriental se pueden reconocer varias cadenas montañosas que reciben el nombre de Cordón Colorado y que se extienden hasta las cercanías del río Limarí.

5.2 Litología

Los Altos de Talinay está compuesto principalmente por rocas de falla del Complejo Plutónico Altos de Talinay (Trat) (Triásico superior), cataclasitas, milonitas, dioritas y monzodioritas cataclásticas y dioritas-monzodioritas con cataclasis leve. Además en dicho cordón montañoso afloran las rocas más antiguas del área de estudio, las metasedimentitas y metabasitas del Complejo Metamórfico del Choapa (Pzch) (Figura 5-1) (Devónico-Carbonífero). (Publicación N°96: Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. 2006)

En el sector oriental del área de estudio afloran los intrusivos monzodioríticos-granodioríticos del Jurásico Medio-Superior (Jmg) y los intrusivos dioríticos del Jurásico Superior (JKd) (Figura 5-1). Estos presentan sectores con rocas cataclásticas y miloníticas. En el mismo sector se encuentran, además, plutones aislados correspondientes a intrusivos granitoides del Cretácico Inferior (Kig). En contacto con lo anterior afloran rocas volcánicas y subvolcánicas continentales con escasas intercalaciones sedimentarias pertenecientes al Complejo Volcánico Agua Salada (Jas) (Jurásico). Las cuatro unidades forman parte del Cordón Colorado (Publicación N°96: Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. 2006).

En la planicie central se encuentran los depósitos sedimentarios cenozoicos, los cuales se extienden a lo largo de las quebradas y en las bahías de Tongoy y Barnes. Los más recientes (Q) corresponden a depósitos coluviales, aluvionales, eólicos, fluviales y de playas marinas, mientras que los más antiguos están representados por Formación Coquimbo (MPlcq) y Formación Confluencia (MPlc), ambas del Mioceno al Pleistoceno (Figura 5-1).

La Formación Coquimbo (MPlcq) (Mioceno-Pleistoceno) corresponde a depósitos marinos (López, 1965; Paskoff, 1970; Martínez, 1979; Martínez y Caro, 1980) depositados en las bahías de Tongoy, Barnes y Guanaqueros. Se han reconocido diferentes ambientes sedimentarios en estos, debido a los ciclos de transgresión y regresión marina que determinaron los procesos sedimentarios durante el Cenozoico (Le Roux et al., 2006). La Formación Coquimbo está compuesta por arenas finas limosas, finas laminadas, amalgamadas finas a gruesas, muy gruesas de guijarros con

bioclastos y escasas diatomitas, calizas bioclásticas matriz soportadas y clastosoportadas minoritarias, con intercalaciones de areniscas bioclásticas finas a gruesas (Publicación N°96: Geología del área Andacollo- Puerto Aldea, Región de Coquimbo. 2006). La Formación Coquimbo (MPlcq) está presente en todas las quebradas del sector, extendiéndose a lo largo de Quebrada Pachingo hasta alcanzar Quebrada Seca, donde se interdigita con Formación Confluencia (MPlc) (Figura 5-1).

La Formación Confluencia (MPlc) (Mioceno-Pleistoceno) está compuesta por conglomerados medios a muy gruesos, clastosoportados, poliologomícticos, poco consolidados, con clastos redondeados, discoidales y un 30-40% meteorizados, con matriz intersticial de arena muy fina a muy gruesa, además de brechas matriz soportadas, gruesas a muy gruesas, oligomícticas, con mediana a baja consolidación, clastos angulosos en parte orientados, con matriz que varía de limoarenosa a arenisca de guijarros (Publicación N°96: Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. 2006). Dicha formación se presenta en menor cantidad en algunas quebradas, pero se concentra principalmente alrededor del lecho del río Limarí y a lo largo de Quebrada Seca, donde se encuentra con Formación Coquimbo (Figura 5-1). Algunos estudios anteriores se refieren a Formación Confluencia (MPlc) como Formación Limarí, refiriéndose a que tiene origen en dicho río.

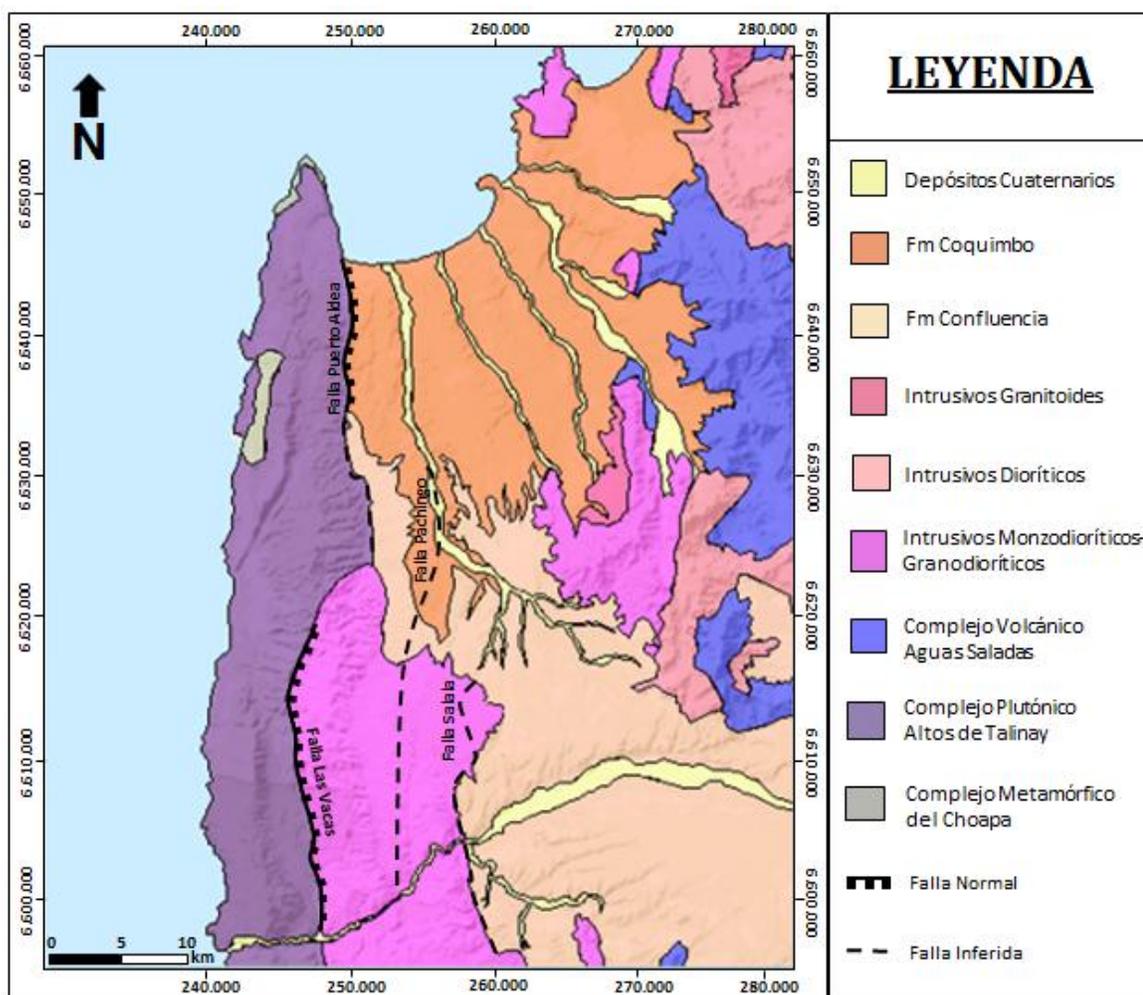


Figura 5-1: Mapa geológico: Modificado de Emparan y Pineda (2006) y Emparan (200X).

5.3 Estructuras

Se han reconocido una serie de fallas normales con rumbo de N-S a NNW-SSE y manteo principalmente de 65-80° hacia el E. Esto debido a una extensión generalizada en dirección E-W y NE-SW establecida durante el Plio-Pleistoceno y, en menor medida, con contracción en dirección N-S y NW-SE. También se ha identificado una componente lateral en de dichas fallas, con un desplazamiento siniestral no muy evidente. (Heinze, 2003)

La principal estructura en la zona de estudio es la falla Puerto Aldea (Figura 5-1), correspondiente a una falla oblicuo-normal siniestra con desplazamiento hacia el este, ubicada entre los Altos de Talinay y la planicie central, con orientación NS paralela a la línea de costa (Paskoff, 1970; Martínez 1979; Heinze, 2003). Dicha falla fue observada al norte en la desembocadura al mar, sin embargo hacia el sur pasa a ser solamente inferida hasta que vuelve a ser reconocida en el extremo sur del área, donde pierde su comportamiento de rumbo. La falla Puerto Aldea es responsable por la formación de un half-graben (Paskoff, 1970) cuyo basamento está formado por el Complejo Plutónico Altos de Talinay y los intrusivos monzodioríticos-granodioríticos, y que además está relleno principalmente por los sedimentos marinos de la Formación Coquimbo y en menor medida por los depósitos coluviales y aluviales de las quebradas principales y la Formación Confluencia. (Publicación N°96: Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. 2006)

La falla Pachingo (Figura 5-1) corresponde a una falla normal con desplazamiento hacia el este, ubicada en la quebrada de mismo nombre. Dicha falla es inferida y se encontraría cubierta por los sedimentos Cenozoicos y Cuaternarios de dicha quebrada. La falla Pachingo tendría participación en la geometría del half-graben mencionado anteriormente, poniendo en contacto el Complejo Plutónico Altos de Talinay con los intrusivos monzodioríticos-granodioríticos triásicos a nivel de basamento. (Publicación N°96: Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. 2006)

Otras fallas presentes corresponden a la Falla Salala ubicada entre el río Limarí y los Altos de Talinay, y la Falla Las Vacas ubicada en este último cordón montañoso (Figura 5-1). (Publicación N°96: Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. 2006)

5.4 Geodinámica

Se ha realizado una recopilación de los principales resultados de estudios orientados a esclarecer los procesos geodinámicos en el complejo bahía de Tongoy-Altos de Talinay. Éstos se presentan en orden cronológico en la Figura 5-2 y serán detallados a continuación.

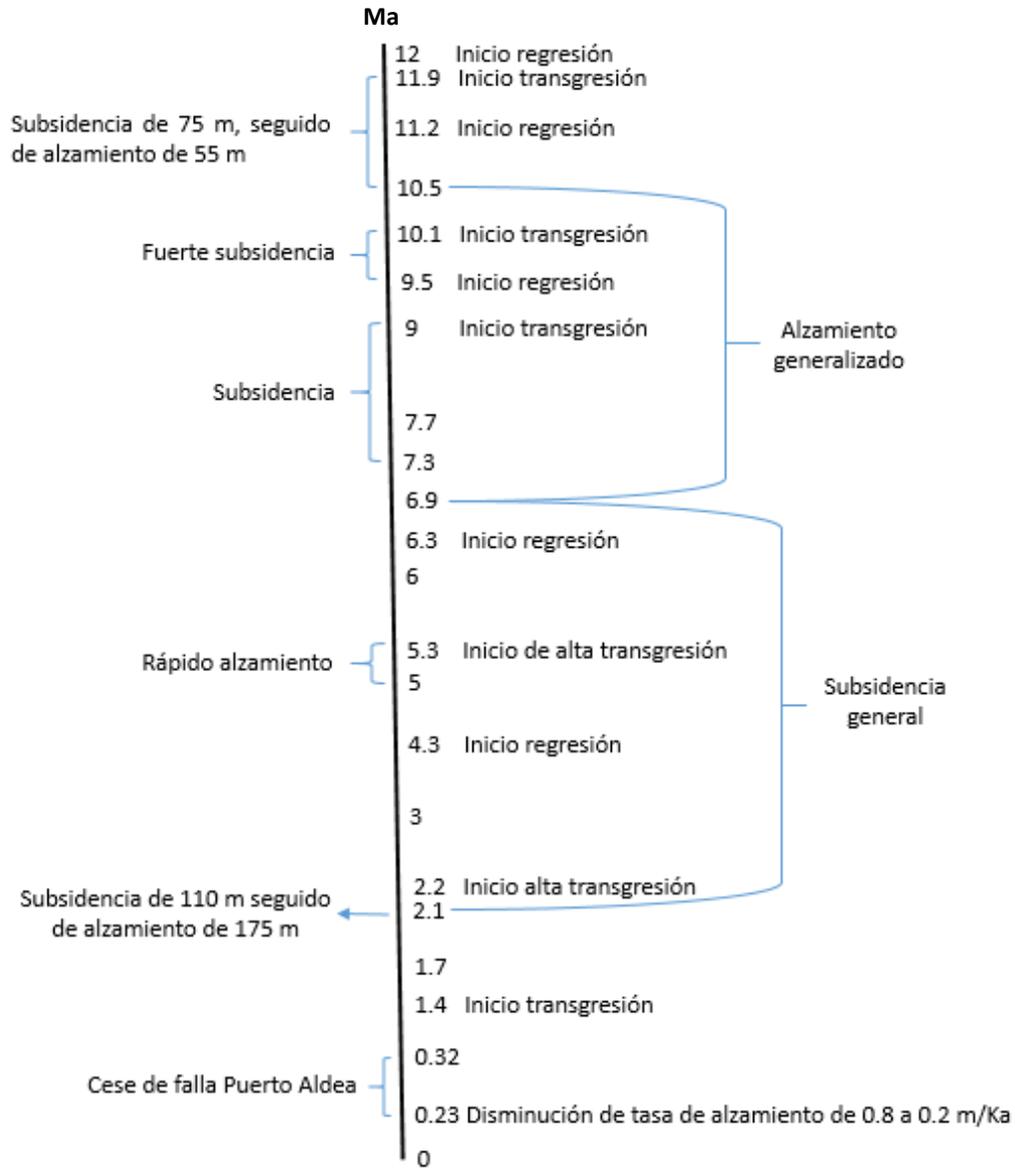


Figura 5-2 Esquema cronológico de la evolución geodinámica del sector de estudio a partir de los resultados de Le Roux et al. (2006), Le Roux et al. (2005a), Saillard et al. (2009) y Saillard et al. (2012).

Le Roux et al. (2006), identificaron una serie de ciclos de transgresión-regresión a partir de los depósitos sedimentarios de las principales quebradas de la bahía de Tongoy, teniendo registro desde los 12 Ma hasta el presente. Le Roux et al. (2005a) modelaron el comportamiento tectónico regional de la corteza, con lo cual pudo determinar eventos de subsidencia y de alzamiento a lo largo del tiempo, desde los 11.9 Ma hasta aproximadamente los 2.1 Ma. Como se puede ver en la Figura 5-2, algunos períodos de transgresión marina coinciden con eventos de subsidencia de la corteza, como es esperable, sin embargo en la mayor parte de los casos se tienen grandes intervalos de tiempo con sub-intervalos de transgresión y regresión, algunos coincidentes con

movimientos tectónicos opuestos. Por ejemplo, desde los 10.5 hasta los 6.9 Ma se tiene un período de alzamiento general, dentro del cual se observa transgresión a partir de los 10.1 Ma, regresión a partir de los 9.5 Ma y transgresión nuevamente desde los 9 Ma. Las transgresiones están asociadas a sub-eventos de subsidencia dentro del período de alzamiento generalizado. Le Roux et al. (2005a) han asociado esos movimientos tectónicos opuestos a la falla de Puerto Aldea como respuesta ante la migración de la Dorsal de Juan Fernández hacia el Sureste.

Saillard et al. (2012) han estudiado el comportamiento tectónico particular de la península y de la bahía, determinando que ambas evolucionaban de manera independiente antes del Pleistoceno medio, siendo la falla Puerto Aldea responsable de acomodar ese movimiento diferencial. Saillard et al. (2009) han determinado una edad de ~690 ka para la terraza más antigua presente en Los Altos del Talinay, la cual no se correlaciona con ninguna de las terrazas identificadas en la bahía de Tongoy, siendo todas estas más recientes. Esto significa que la tasa de alzamiento era mayor en la península que en la bahía, lo cual justifica el carácter normal de la falla Puerto Aldea. Además, según los autores entre los 320 y 230 ka ocurrió el cese de la falla Puerto Aldea, con lo cual la península y la bahía pasaron a comportarse como un bloque rígido y disminuirían su tasa de alzamiento a partir de los 230 ka.

5.5 Geometría del Acuífero

5.5.1 Basamento

Con el fin de delimitar el espesor de la capa sedimentaria en la bahía de Tongoy y el probable gradiente hidráulico a lo largo de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca, las empresas Hidrogestión SA y SEGMI (Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería) realizaron una campaña geofísica de gravimetría en mayo de 2016 con 614 estaciones de medición distribuidas a lo largo de los perfiles mapeados en la (Figura 5-3). Cada perfil fue trazado de tal manera que sus extremos estuvieran sobre afloramientos rocosos del mismo basamento.

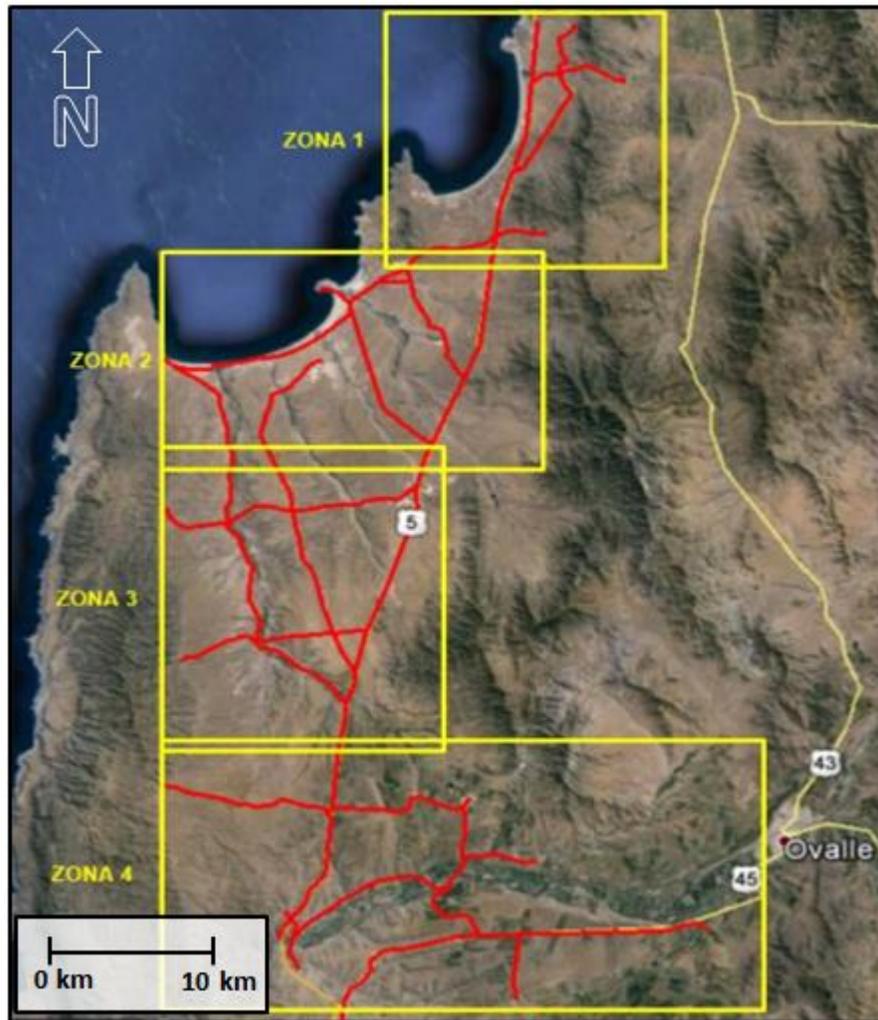


Figura 5-3: Perfiles gravimétricos recorridos en terreno por SEGMI. Los extremos de cada perfil están en contacto con afloramientos del basamento rocoso. Modificado de Hidrogestión (2016).

Para calcular la profundidad del basamento se consideró una densidad estándar de 2.6 gr/cm^3 para un granito y de 2.1 gr/cm^3 para depósitos sedimentarios. Los resultados fueron corregidos y procesados para construir un mapa de elevación del basamento, el cual se muestra en la Figura 5-4. De este se observa que Quebrada Pachingo es el sector con mayor profundidad de basamento y, por lo tanto, con el mayor espesor de capa sedimentaria. Herm et al. (1967) propusieron profundidades de basamento entre los 100 y los 360 m a lo largo de Quebrada Pachingo, las cuales son notoriamente inferiores a las expresadas en la Figura 5-4. Se observan dos depocentros, uno cercano a la costa, el cual alcanza profundidades de hasta 709 m.b.n.m, y otro a mitad de Quebrada Pachingo, el cual tiene una profundidad máxima de 619 m.b.n.m. Finalmente, se tiene un tercer depocentro en el cauce del río Limarí justo al sur de Quebrada Seca, con profundidades de hasta 616 m.b.n.m. Los espesores sedimentarios obtenidos superan

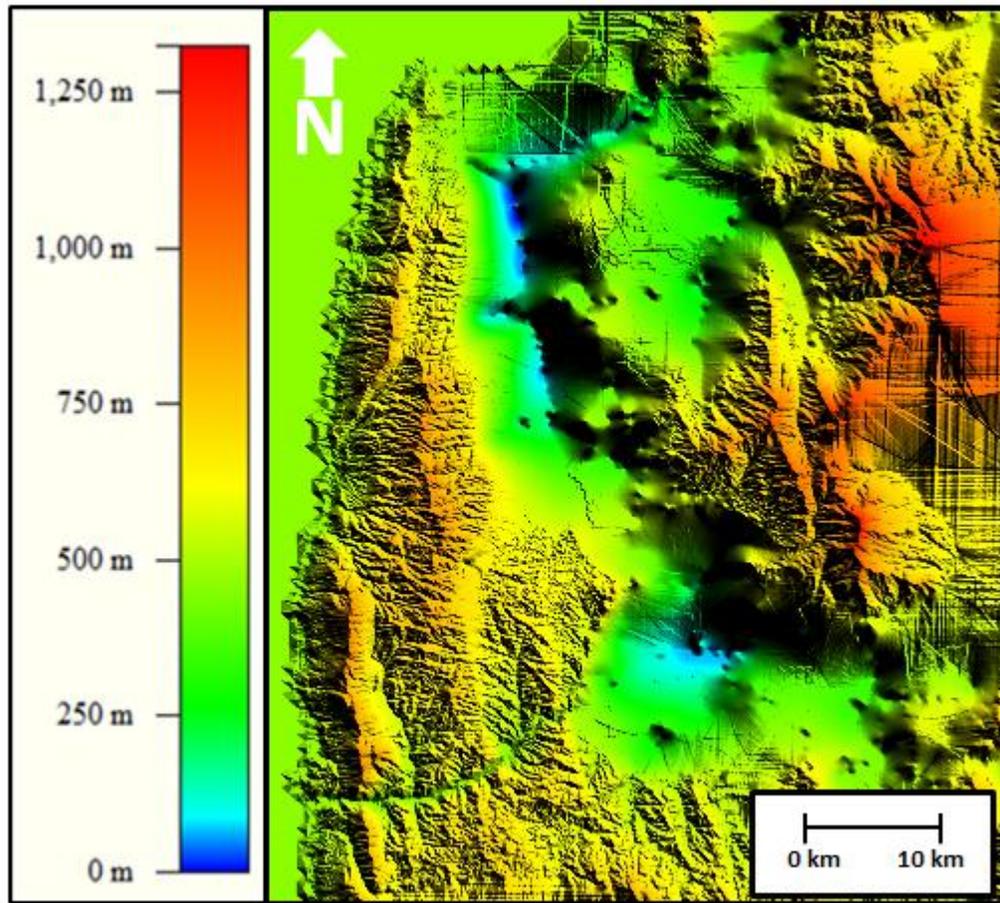


Figura 5-4: Mapa de elevación del basamento a partir de los datos gravimétricos medidos por SEGMI el año 2016. Modificado de Hidrogestión (2016).

Entre el segundo y el tercer depocentro mencionados en el párrafo anterior, el basamento se por lo menos hasta los 50 m.s.n.m en el sector medio del valle hasta aflorar en los Altos de Talinay y en el Cordón Colorado. Si se considera el basamento como una litología impermeable, es posible que esta geometría actúe como una barrera para el flujo de agua subterránea separando la cuenca del río Limarí y la de Quebrada Seca.

5.5.2 Topografía

A partir del ASTER GDEM V2 (Figura 5-5) desarrollado por la NASA (U.S. National Aeronautics and Space Administration) y el METI (Japan's Ministry of Economy, Trade, and Industry), se observa que para la cuenca costera la parte más alta está en la cabecera de Quebrada Seca, por lo que el flujo de agua superficial seguiría desde ahí hasta la desembocadura en Quebrada Pachingo. Mientras que considerando la elevación del basamento, se tiene que en Quebrada Pachingo están los espesores sedimentarios más importantes, llegando a un máximo de aproximadamente 725 m.

De forma similar al caso del basamento, existe un alto topográfico entre Quebrada Seca y el río Limarí que divide ambas cuencas hidrográficas y que supera los 240 m.s.n.m.

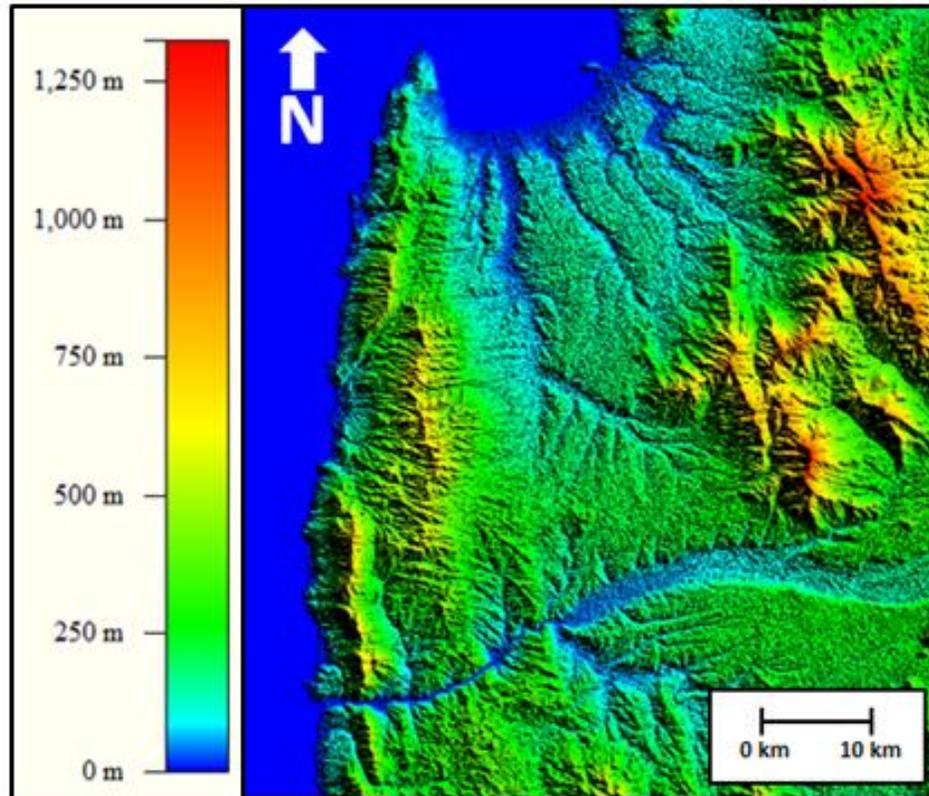


Figura 5-5: Mapa de elevación del sector de estudio, extraído desde ASTER DEM V2, un producto de la NASA (U.S. National Aeronautics and Space Administration) y el METI (Japan's Ministry of Economy, Trade, and Industry).

5.6 Río Limarí

El Río Limarí posee una hoya hidrográfica de 11.927 Km², la cual se extiende aproximadamente entre los paralelos 30°15' y 31°20' de latitud sur, colindando hacia el norte con el valle del río Elqui y hacia el sur con el valle del río Choapa. Dicho río nasce a 4 km aguas arriba de la localidad de Ovalle por la unión entre los ríos Grande y Hurtado (Figura 5-6), los que se originan en las cumbres de la Cordillera de los Andes cuya altitud puede alcanzar los 4500 m.s.n.m.

El río Grande, cuya hoya hidrográfica alcanza los 6537 km², es el afluente más importante del río Limarí y recibe aportes principalmente del río Rapel, el río Mostazal, el río Tascadero y el río Guatulame, además de otros menos relevantes como los ríos Turbio, Torca y Ponio.

El río Hurtado drena una cuenca reducida de 2600 km² ubicada más al norte, donde hay menor pluviosidad, por lo que su aporte al río Limarí no es tan significativo como el del río Grande. Sus principales afluentes son el río Ternero, la quebrada Elqui, la quebrada Rapel y el río Chacay.

Desde su nacimiento recorre aproximadamente 60 km por valles muy abiertos y repetidamente aterrizados hasta desembocar en el sector costero occidental de la región, estrechando su valle considerablemente al atravesar las rocas ígneas y

metamórficas de los Altos de Talinay, con un cauce de no más de 500 metros de ancho (Figura 5-6). Se caracteriza por tener una baja pendiente que le permite expresar patrones anastomosados. En su transcurso recibe a afluentes menores como los esteros Ingenio y Punitaqui, ambos originados en la Cordillera de la Costa.

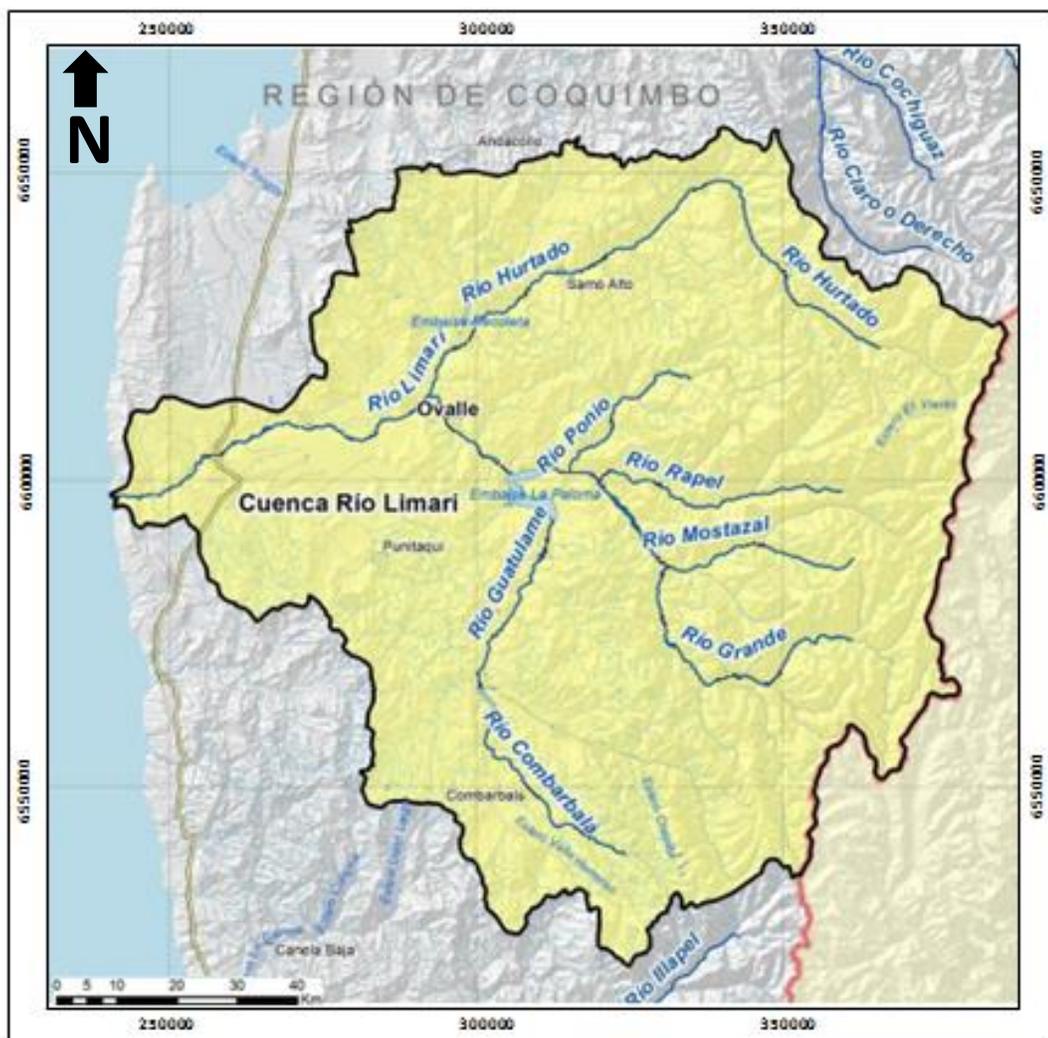


Figura 5-6: Cuenca hidrográfica del río Limarí. Modificado de “*Información Hídrica de las Cuencas Priorizadas, Fichas Temáticas. DGA*”

La parte alta de la cuenca del río Limarí se destaca por la muy baja permeabilidad de las rocas plutónicas e hipabisales que conforman el basamento. Debido a lo anterior, el agua subterránea circula por sedimentos paralelos al curso de agua. Se identifican tres acuíferos:

- Esgurrimiento paralelo al río Hurtado en dirección SW hasta las cercanías de Ovalle.
- Esgurrimiento paralelo al río Grande en dirección NWW hasta su unión con el río Hurtado.
- Esgurrimiento paralelo al río Combarbalá en dirección SN hasta el Embalse La Paloma.

Finalmente, desde el nacimiento del río Limarí el escurrimiento adquiere dirección SWW a través de un lecho de depósitos no consolidados hasta alcanzar las rocas ígneas y metamórficas de los Altos de Talinay. (DGA, 2004)

Se han identificado dos unidades hidrogeológicas en rellenos sedimentarios no consolidados, a las cuales se le otorga alta y mediana permeabilidad. (DGA, 2008)

La unidad de alta permeabilidad está conformada principalmente por bolones, gravas, arenas y sedimentos finos en menor cantidad, presentando altas conductividades hidráulicas (1 a 10^{-2} cm/s). Se encuentra en los depósitos fluviales actuales a lo largo de los cauces, en conos aluviales, coluviales y terrazas fluviales subactuales, con espesores que varían entre 6 y 30 m. En dicha unidad se desarrollan mayoritariamente acuíferos libres. (DGA, 2008)

La unidad de permeabilidad media está constituida por mezclas de arenas, gravas y limos, con una cantidad variable de arcilla, pudiendo ser clasto o matriz soportada. La permeabilidad varía dependiendo de la proporción entre sedimentos gruesos y finos, en particular de la cantidad de arcilla presente. Los valores de conductividad hidráulica registrados varían entre 10^{-2} y 10^{-6} cm/s. Se encuentra en los depósitos de terrazas aluviales, los cuales debido a su edad (miocena a holocena) y a sus condiciones de deposición presentan una mayor cantidad de materiales finos que los depósitos más recientes. Los acuíferos asociados a estos materiales son, en mayor medida, acuíferos libres, no obstante pueden existir acuíferos semiconfinados y confinados en aquellos sectores con mayor proporción de limos y arcillas. (DGA, 2008)

5.7 Quebrada Pachingo y Quebrada Seca

Quebrada Pachingo y Quebrada Seca están emplazadas en la planicie central, esculpiéndose por los depósitos sedimentarios de Formación Coquimbo y Formación Confluencia, respectivamente. Forman parte de una misma cuenca hidrogeológica, difiriéndose entre sí apenas por su ubicación y orientación. Ambas quebradas suman aproximadamente 30 km de extensión en total y abarcan un área aproximada de 421.3 km², siendo las más importantes en el sector.

Quebrada Pachingo se ubica en proximidad de la costa en la cuenca hidrogeológica y se extiende desde los 30°18' S hasta los 30°29' S con orientación NNW. Como continuación de la anterior, Quebrada Seca se extiende desde los 30°29' S hasta los 30°36' S con orientación NW, emplazándose sobre el alto topográfico que las separa del río Limarí.

El flujo superficial en las quebradas es esporádico y depende de las precipitaciones. El alto topográfico mencionado anteriormente corresponde a la divisoria de aguas entre la hoya hidrográfica de Quebrada Seca y la del río Limarí.

En cuanto a las aguas subterráneas de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca, se tiene una unidad acuífera más somera que corresponde a los sedimentos fluviales depositados a lo largo de las quebradas. Esta unidad en la parte alta de Quebrada Seca alcanza un ancho de 250 m y un espesor de 25 m, mientras que en la parte terminal en

Quebrada Pachingo tiene valores cercanos a 600 m y 45 m respectivamente. (Aravena, 1997)

Una unidad acuífera más profunda corresponde a los sedimentos marinos y continentales antiguos (Formación Coquimbo), la cual se encuentra parcialmente saturada y alcanza espesores considerables, sobre todo hacia la desembocadura. A partir de la información estratigráfica obtenida del sondaje CORFO 421 perforado en los años 70 aproximadamente 5 km de la línea de la costa, se conoce que existe una intercalación de niveles de permeabilidad media e impermeables que formarían acuíferos semiconfinados. (Aravena, 1997)

Otras unidades acuíferas menores corresponden a los depósitos coluviales y los depósitos eólicos. Los primeros se presentan como conos de deyección principalmente en las partes altas y medias en las dos quebradas y los segundos se encuentran en el sector costero. Ambos funcionan como vías de descenso para las aguas meteóricas. (Aravena, 1997)

La DGA tiene información de cinco pozos ubicados en Quebrada Seca (Figura 5-7). En la Tabla 5-1 se muestran los detalles relevantes publicados en los expedientes de dichos pozos. Se observa que los mayores valores de conductividad hidráulica y de transmisividad están asociados a los pozos más someros.

Tabla 5-1: Información de profundidad habilitada, espesor saturado, transmisividad y conductividad hidráulica de los pozos de la DGA ubicados en la cuenca costera en estudio.

Expediente	Profundidad Habilitada (m)	Espesor Saturado H (m)	T (m ² /día)	K (m/día)
ND-0402-1030	36	36	5.66	0.16
ND-0402-394 (1)	11.4	2.8	937.50	334.82
ND-0403-159	6	4.41	793.65	179.97
ND-0402-133 (2)	70	53.38	65.36	1.22
ND-0402-133 (3)	68	44.07	79.45	1.80

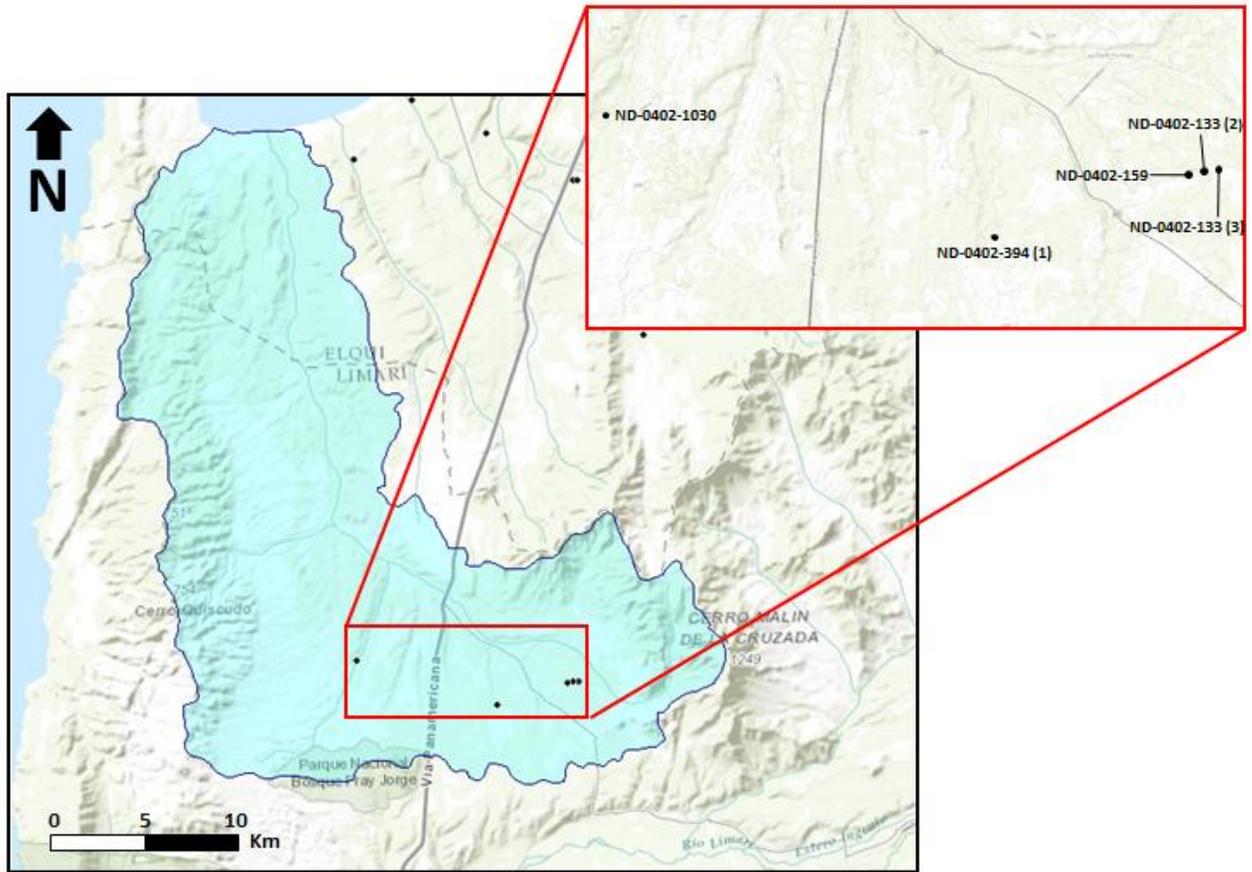


Figura 5-7: Ubicación de los pozos asociados a la DGA.

En la Figura 5-8 se muestra un mapa de conductividades hidráulicas para las cuencas de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca (Hidrogestión, 2016), elaborado a partir de la información de los expedientes de pozos de la DGA y los valores propuestos por Aravena (1997). Debido a la escasez de pozos perforados en el sector de estudio, la forma y extensión de las unidades mapeadas fueron estimadas según las características geológicas observables vía imágenes satelitales (Google Earth).

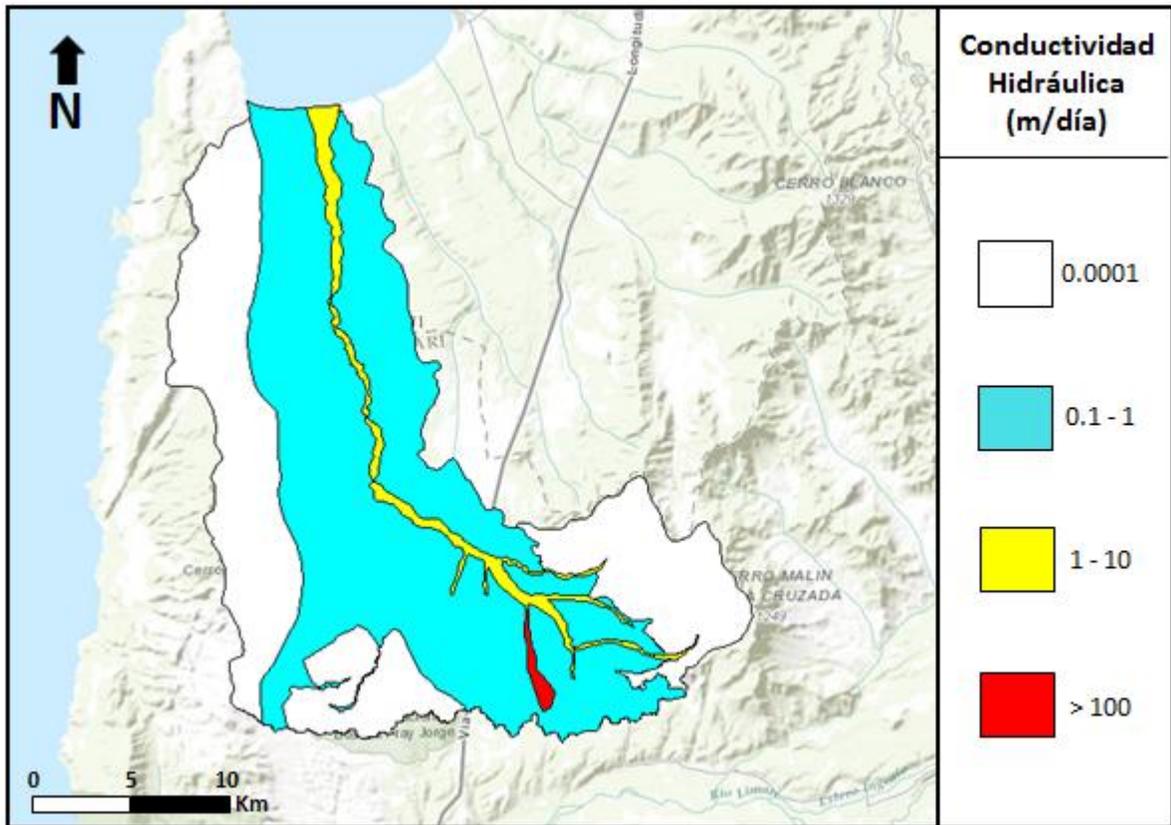


Figura 5-8: Mapa de conductividades de la cuenca costera en estudio a partir de la información de los pozos de la DGA. Modificado de Hidrogestión (2016).

La mayor parte de las cuencas de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca presenta conductividades hidráulicas entre mala a moderada, la cual está relacionada a los pozos más profundos del sector. Las zonas con los mayores valores de conductividad hidráulica corresponden a los sedimentos actuales.

5.8 Clima

La Región de Coquimbo es considerada una zona de transición entre el clima desértico característico del norte del país y el clima templado mediterráneo presente a grandes rasgos en el centro-sur del mismo (Figura 5-9). En el sector costero, donde se encuentra la desembocadura del río Limarí y también las varias quebradas que drenan hacia la Bahía de Tongoy, se tiene un clima de estepa con nubosidad abundante. Ya en sectores más lejanos a la costa, en las proximidades de Ovalle, el clima cambia a estepa templada marginal. (*Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Coquimbo, 2012*)

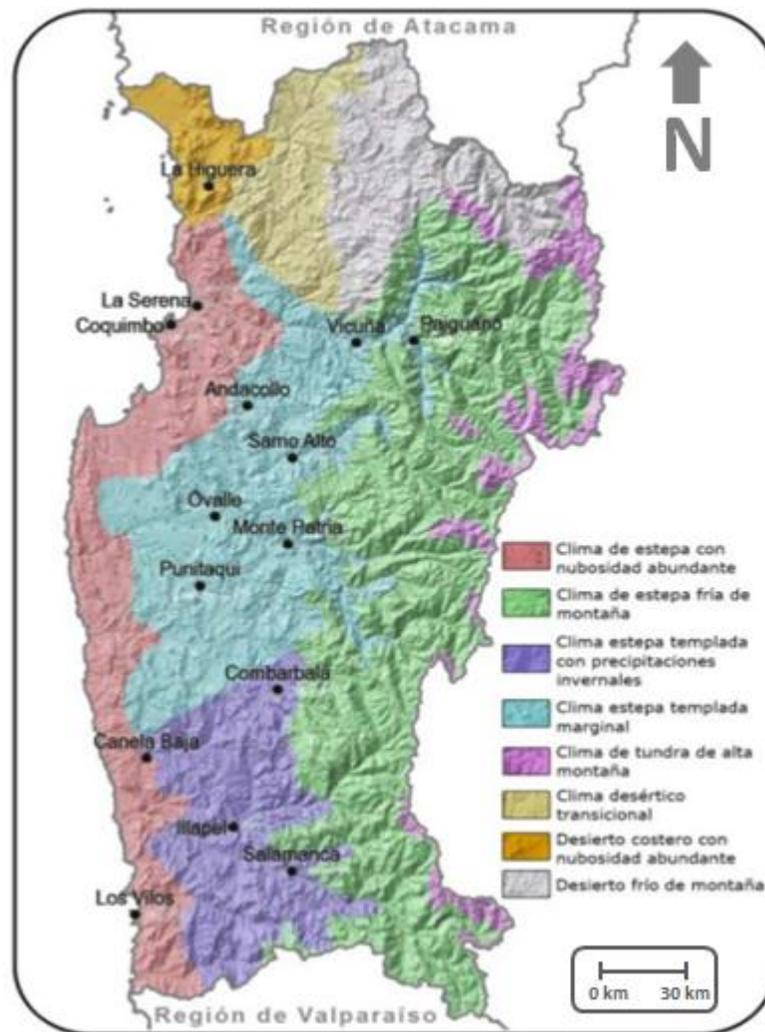


Figura 5-9: Distribución climática en la IV Región de Coquimbo. Tomado de Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Coquimbo, 2012

5.9 Precipitaciones

Se realizó una recopilación de los registros de precipitación mensual de las estaciones pluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección General Aeronáutica de Chile (DGAC) desde 1920 hasta 2015, rellenando los períodos sin registros mediante una correlación lineal simple. Se consideraron todas las estaciones de la IV Región de Coquimbo cuyo registro supera los 10 años. En la Figura 5-10 se muestran las estaciones pluviométricas ocupadas. Aquellas ubicadas al interior de la cuenca estudiada corresponden a: El Tangué Hda, Tranque Recoleta, Pachingo Fundo, San Isidro, Santa Cristina, Cerrillos de Tamaya y Los Peñones. Ésta última no se encuentra adentro de la cuenca en sí, pero está lo suficientemente cerca de Quebrada Seca como para ser considerada.

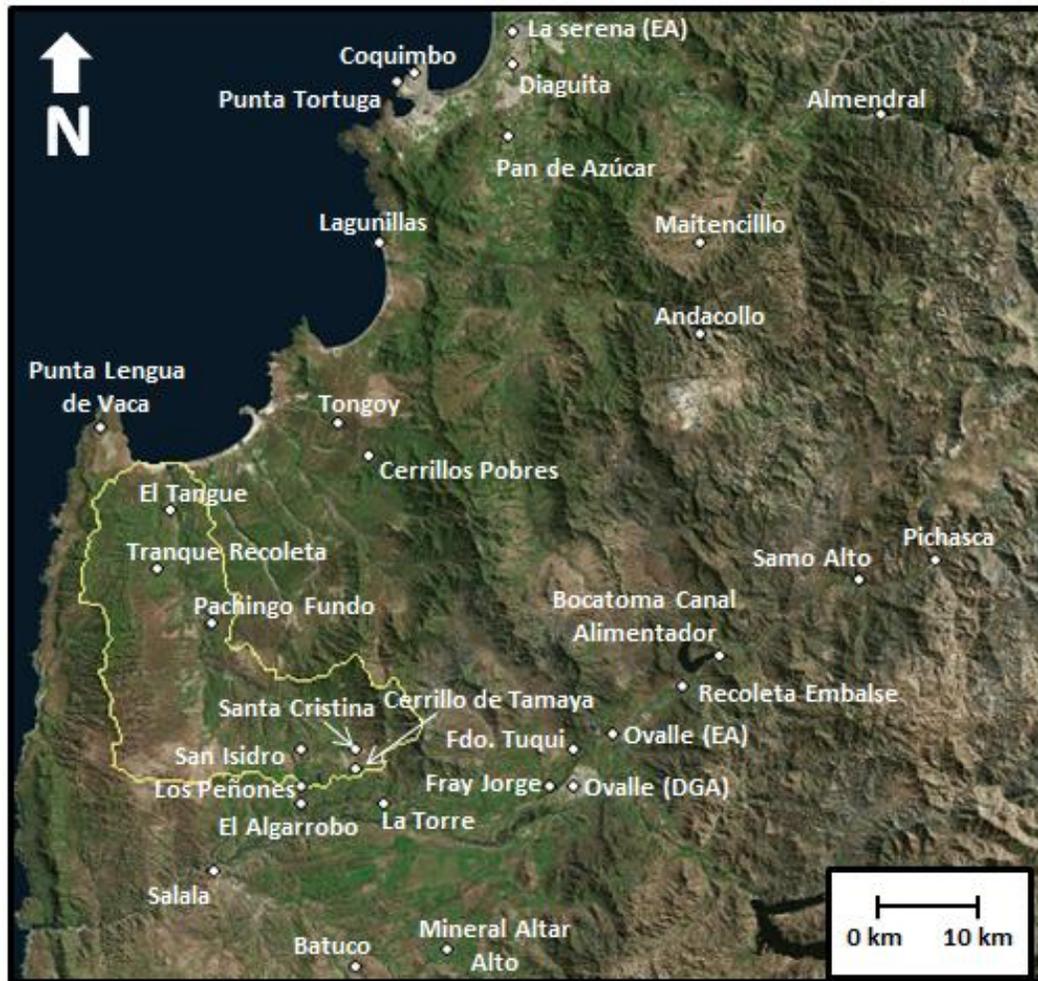


Figura 5-10: Ubicación de las estaciones meteorológicas ocupadas, pertenecientes tanto a la DGA como a la DGAC.

Para cada estación se calculó el promedio anual de todo el período de registro (Tabla 5-2), con el fin de aminorar el efecto de la variación climática. Estos datos fueron utilizados para la construcción de un mapa de isoyetas, el cual se muestra en la Figura 5-11. Se observa que en las cuencas de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca la precipitación es más bien escasa, variando de Este a Oeste en la primera, mientras que en la segunda el promedio anual de las precipitaciones se mantiene relativamente constante. En las cercanías de las cuencas las precipitaciones también son escasas, habiendo un máximo de 160 mm en el sector NE del mapa.

La baja precipitación general en el sector implica que la recarga por precipitaciones no es muy significativa, por lo que aquellas cuencas cuyos recursos subterráneo derivan principalmente de las lluvias requerirán un mayor intervalo de tiempo para recargarse. Si las cuencas de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca no reciben un aporte subterráneo desde la cuenca del río Limarí, entonces la explotación de sus recursos subterráneos debiera considerar el tiempo de recarga natural del acuífero para poder utilizar el recurso de manera sustentable.

Tabla 5-2: Ubicación y precipitación promedio anual de todo el período de registro de las estaciones meteorológicas ocupadas.

Estación Pluviométrica	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)	Precipitación Promedio Anual (mm)
Almendral	314896	6681587	95
Andacollo	299415	6659065	175
Batuco	270293	6593795	126
Bocatoma	301612	6626098	144
Cerrillos de Tamaya	269858	6614120	119
Cerrillos Pobres	270322	6645906	145
Coquimbo	272012	6684126	95
Diaguítas	282167	6686152	86
El Algarrobo	265143	6610321	146
El Tangué	252845	6640049	125
Fdo. Tuqui	289005	6616360	122
Fray Jorge	286984	6612542	126
La Serena	282214	6689432	98
La Torre	272404	6610458	128
Lagunillas	270885	6667748	112
Los Peñones	265102	6612169	117
Maitencillo	299247	6668303	137
Mineral Altar Alto	278195	6595813	142
Ovalle (DGA)	289070	6612553	121
Ovalle (EA)	292404	6617916	104
Pachingo Fundo	256736	6628622	149
Pan de Azúcar	282075	6678770	110
Pichasca	320546	6636222	137
Punta Lengua de Vaca	246562	6648383	101
Punta Tortuga	273574	6685072	96
Recoleta Embalse	298493	6623114	115
Salala	257615	6603264	115
Samo Alto	313772	6634199	108
San Isidro	265022	6615864	148
Santa Cristina	269819	6615968	140
Tongoy	267509	6649193	140
Tranque Recoleta	251807	6634057	107

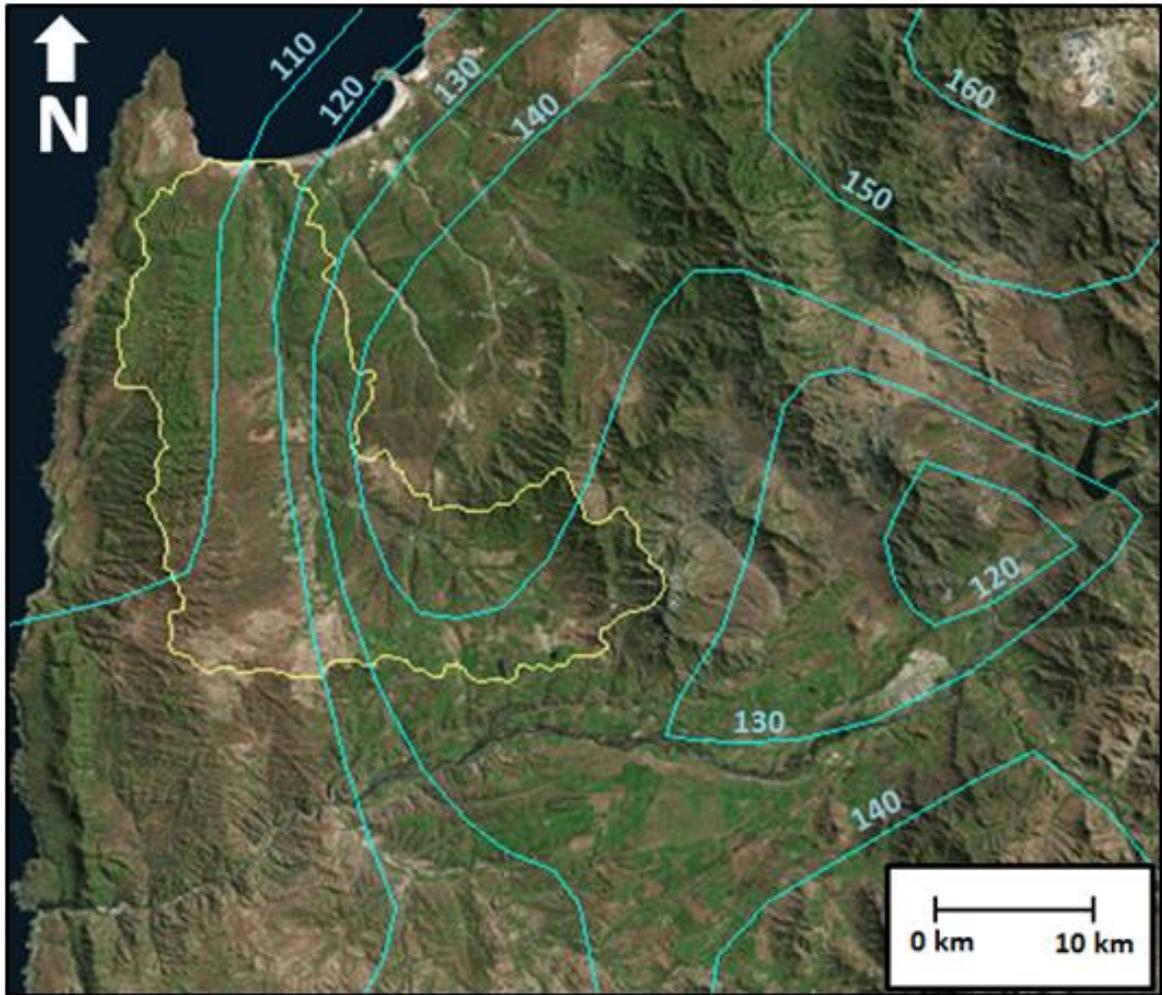


Figura 5-11: Mapa de isoyetas del sector de estudio, elaborado a partir del promedio anual de precipitaciones de las estaciones meteorológicas consideradas.

Para cada una de estas estaciones ubicadas dentro de la cuenca costera de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca, se graficó la evolución temporal de sus registros medidos, dejando de lado aquellos datos obtenidos de la correlación lineal (ver anexos). Cabe destacar que algunas estaciones cuentan con un registro más amplio que las otras, aunque todas presentan meses o incluso años enteros sin datos. Es por eso que se observan grandes intervalos de tiempo con precipitación nula. Además, no se cuentan con datos actuales para estas estaciones ya que se encuentran inactivas.

5.10 Nivel Estático

En la cuenca de Quebrada Seca se encuentran dos estaciones de monitoreo de niveles estáticos pertenecientes a la DGA: estación Quebrada Seca 1, ubicada a 221 m.s.n.m, y estación Quebrada Seca 2, ubicada a 188 m.s.n.m (FIGURA). El período de registro empieza en el año 1982 y termina en 1988, por lo que no se dispone de datos más recientes. Asimismo, a partir de los gráficos de evolución del nivel estático en el tiempo para cada estación (Figura 5-12 y Figura 5-13), se puede afirmar que estos son someros, alcanzando los 4 metros de profundidad como máximo. En los meses de invierno, entre junio y octubre aproximadamente, se registran los valores de niveles

estáticos más cercanos a la superficie, que muestran así el efecto de la recarga en la zona..

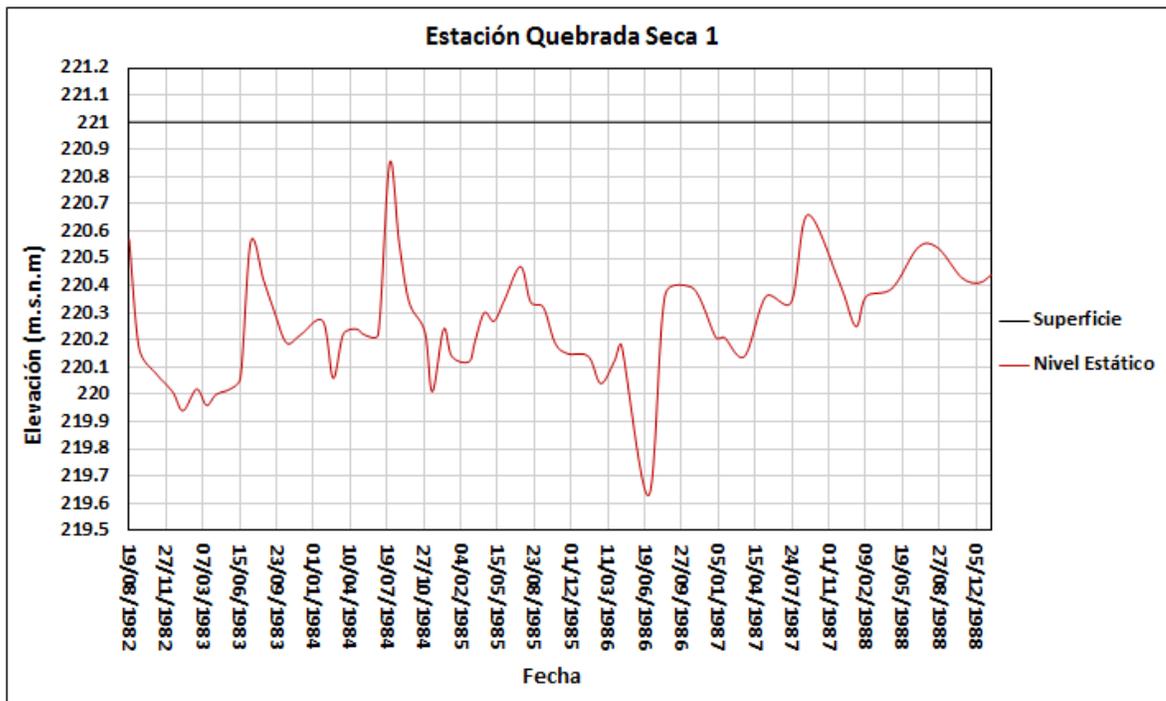


Figura 5-12 Evolución en el tiempo de los niveles estáticos registrados en la estación de monitoreo Quebrada Seca 1, perteneciente a la DGA.

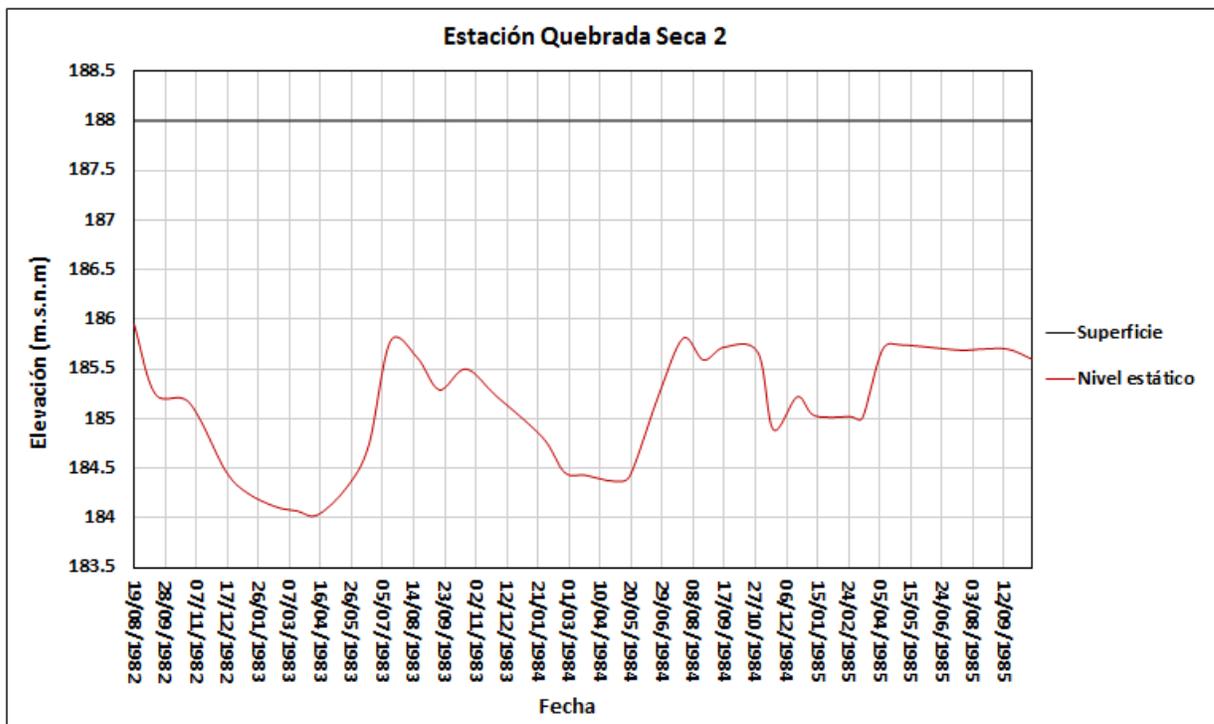


Figura 5-13: Evolución en el tiempo de los niveles estáticos registrados en la estación de monitoreo Quebrada Seca 2, perteneciente a la DGA.

Entre los años 2013 y 2014, se realizó, por parte de la empresa GCF Ingenieros, un levantamiento de datos en las captaciones subterráneas de la IV Región, en la cual se recopilaron los valores del nivel estático para cada una. En la Figura 5-14 se presentan las estaciones de monitoreo de nivel estático de la DGA (puntos blanco), los pozos visitados durante el invierno de 2014 (puntos amarillos) y también los pozos con información de niveles estáticos de verano de 2005, los cuales fueron ocupados en el mismo estudio (puntos rojos). Dichos grupo de captaciones fueron las únicas con pozos ubicados en el límite entre la cuenca hidrográfica de Quebrada Seca y la del río Limarí.

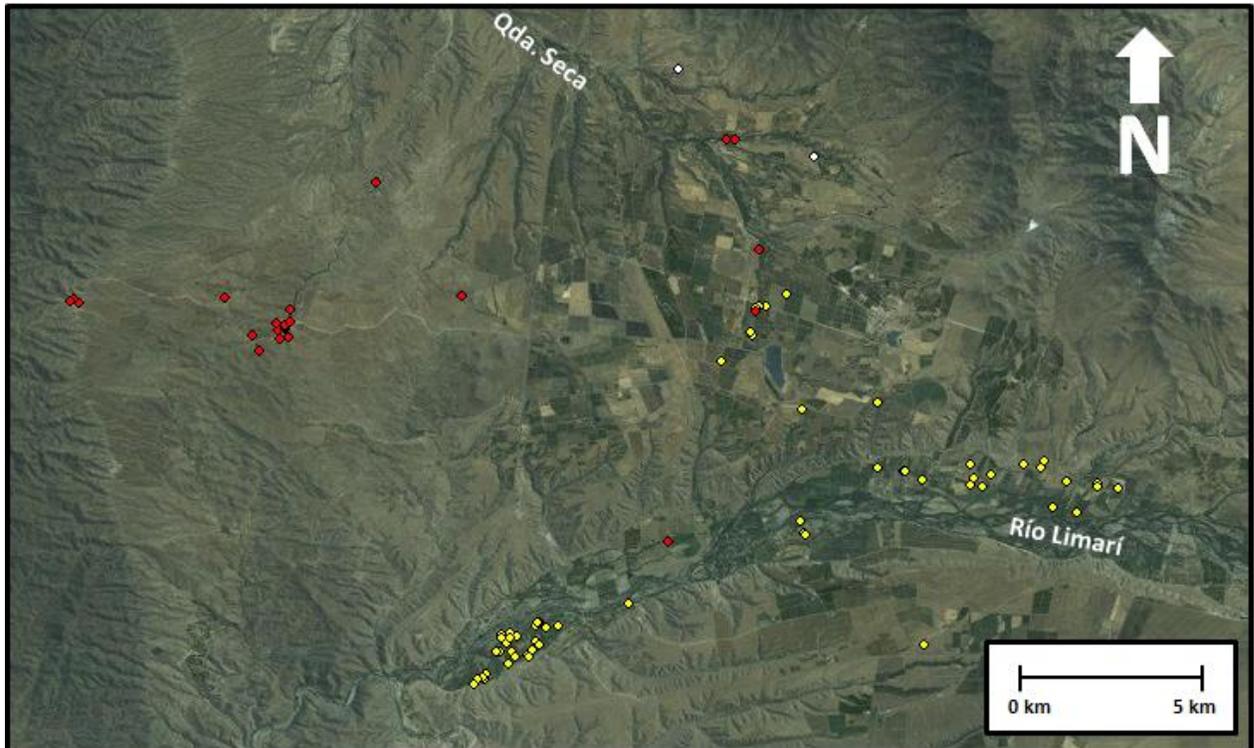


Figura 5-14: Ubicación de los puntos de medición de nivel estático ocupados. Los puntos blancos corresponden a las estaciones de monitoreo de la DGA, los puntos amarillos corresponden a los pozos visitados durante el invierno de 2014 y los puntos rojos corresponden a los pozos con información de niveles estáticos de verano de 2005.

6 Resultados

En esta sección se darán a conocer los principales resultados de este trabajo, obtenidos a partir del análisis de datos recopilados en la literatura y que ha sido empleados para la realización de perfiles hidrogeológicos esquemáticos y gráficos binarios construidos a partir de la información química de muestras de aguas subterráneas. Cabe destacar que este trabajo de memoria no contó con salida a terreno, por lo que también los datos químicos ocupados fueron obtenidos de la literatura.

6.1 Composición química del agua subterránea

Se recopiló información de la composición química de aguas subterráneas a lo largo de Quebrada Pachingo (Barraza y Manque, 2016; Briceño y Marchant, 2016), Quebrada Seca (Aravena, 1997) y el río Limarí (Jofré, 2010). En la Figura 6-1 se muestra la ubicación de cada punto de muestreo y la publicación de la cual procede.

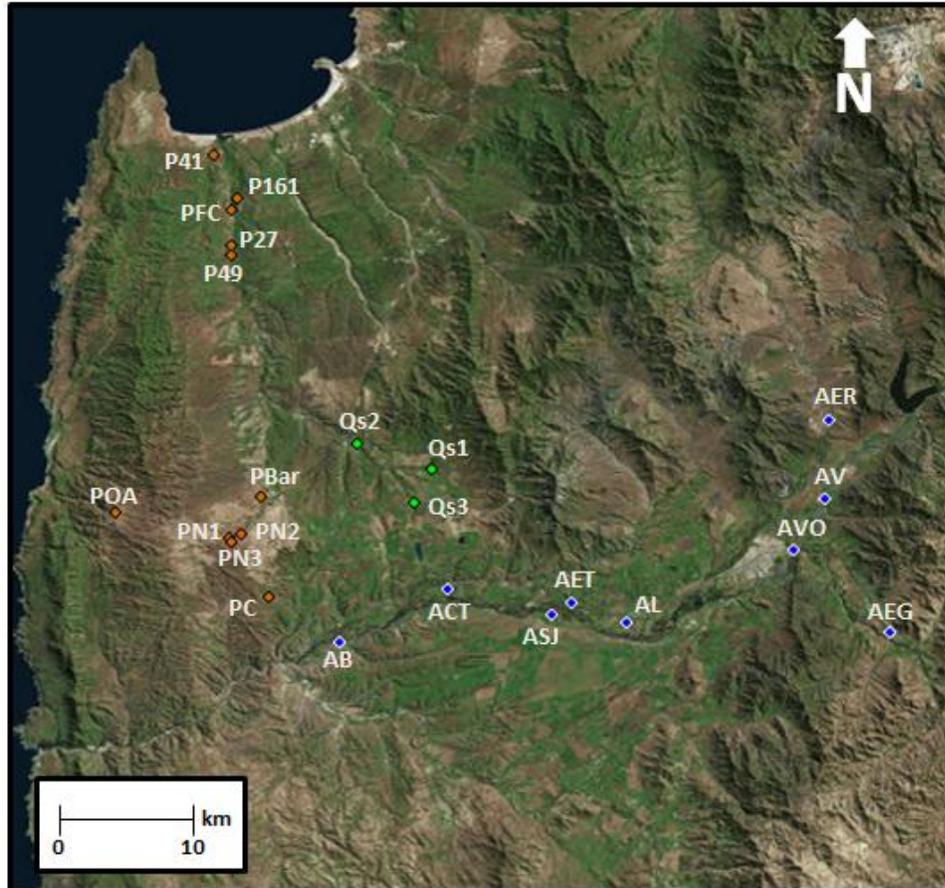


Figura 6-1: Ubicación de las muestras químicas ocupadas. Los puntos naranjos corresponden a las muestras de Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant (2016), los puntos verdes corresponden a las muestras de Aravena (1997) y los puntos azules corresponden a las muestras de Jofré (2010)

Es necesario considerar que las muestras proceden de fuentes distintas y son de años diferentes, además hay que considerar que pueden haber sido analizadas en laboratorios diferentes. De hecho, el análisis químico de los datos de Quebrada Pachingo y de las cercanías de los Altos de Talinay, fue realizado en el laboratorio *Actlabs Ltda* (Barraza y Manque, 2016; Briceño y Marchant, 2016), ubicado en la Región de Coquimbo. El grupo de muestras ubicados en Quebrada Seca fue analizado en el Laboratorio Ambiental de la Dirección General de Aguas (Aravena, 1997). Finalmente, el análisis químico de las muestras de aguas subterráneas pertenecientes al río Limarí se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis Químico de la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

Se ha realizado un balance iónico para cada muestra con el fin de corroborar la validez del análisis. Para determinar un rango de error aceptable, se consideró la sumatoria de aniones de cada muestra (Crites y Tchobanoglous, 2000) y el valor de la conductividad eléctrica (Custodio y Llamas, 1976). En la Tabla 6-1 se muestran las concentraciones de los iones en mg/L determinada por los laboratorios mencionados, el error calculado y los detalles de cada punto muestreado.

Tabla 6-1: Información de las muestras de agua subterráneas consideradas. Ubicación, año en el cual fueron extraídas, concentraciones de los iones mayoritarios en mg/L y el error calculado.

Nombre Muestra	Coordenada Este (m)	Coordenada Norte (m)	Año	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	HCO3 (mg/L)	SO4 (mg/L)	Cl (mg/L)	Error (%)
P41	252207	6643279	2016	366,5	93,49	490	25,43	174,4	1.171,6	618,45	3,51
P161	253909	6639888	2016	74	37,35	258,1	8,74	137,2	191,17	369,82	4,47
PFC	253502	6638946	2016	87,1	44,87	128,4	3,79	197,9	123,8	290,43	-1,05
P27	253645	6636341	2016	70,4	59,91	137,5	4,58	181,6	110,97	334,54	-0,64
P49	253597	6635450	2016	72,1	59,16	97,22	4,78	165,2	90,79	300,05	-0,96
Pbar	256081	6616901	2016	37,7	33,38	67,76	2,84	187,7	40,49	112,74	3,69
POA	246279	6615443	2016	16,6	11,47	27,53	1,99	82,6	21,49	25,7	8,88
PN1	254030	6613678	2016	49	39,36	55,02	4,49	184,6	34,33	116,41	7,65
PN2	254759	6614002	2016	28,4	20,41	44,24	3,41	140,8	26,23	66,34	3,87
PN3	254118	6613260	2016	39,9	26,81	59,18	4,9	173,4	26,59	101,29	4,88
PC	256787	6609058	2016	25,9	21,22	49,13	3,09	167,3	19,55	68,78	1,57
QS1	267450	6619184	1997	522,8	314,4	699,2	6,2	571,1	510,1	2.140,8	1,34
QS2	262410	6621124	1997	240,48	86,31	337,47	14,86	451,49	292,99	717,12	0,66
QS3	266291	6616571	1997	104,21	99,81	229,89	1,96	219,65	160,42	566,82	1,14
AER	293943	6623568	2010	55,6	41,9	77,1	5,2	286	146	57,5	1,84
AV	293741	6617488	2010	95,8	16,9	37,4	2,3	225	142	29,2	2,55
AL	280633	6607688	2010	96	22,9	89,4	3,7	318	142	58,3	4,13
AEG	298327	6607296	2010	69,4	15,9	35,6	2,1	237	68	19,2	4,36
ASJ	275647	6608113	2010	171,5	34	203	5	361	256	251	5,16
AET	276942	6609064	2010	153	53	187	4,3	369	245	281	2,97
ACT	268730	6610044	2010	251	115	323	7,4	516	370	681	1,2
AB	261532	6605799	2010	194	73	265	7,3	317	331	465	4,19
AVO	291744	6613456	2010	82,2	18,5	60,8	2,2	246	116	43,5	4,07

A continuación se presentan los gráficos binarios construidos para cada grupo de muestras.

1) Quebrada Pachingo y Quebrada Seca (2016)

Los siguientes gráficos fueron elaborados a partir de las muestras del año 2016, ubicadas en Quebrada Pachingo y Quebrada Seca.

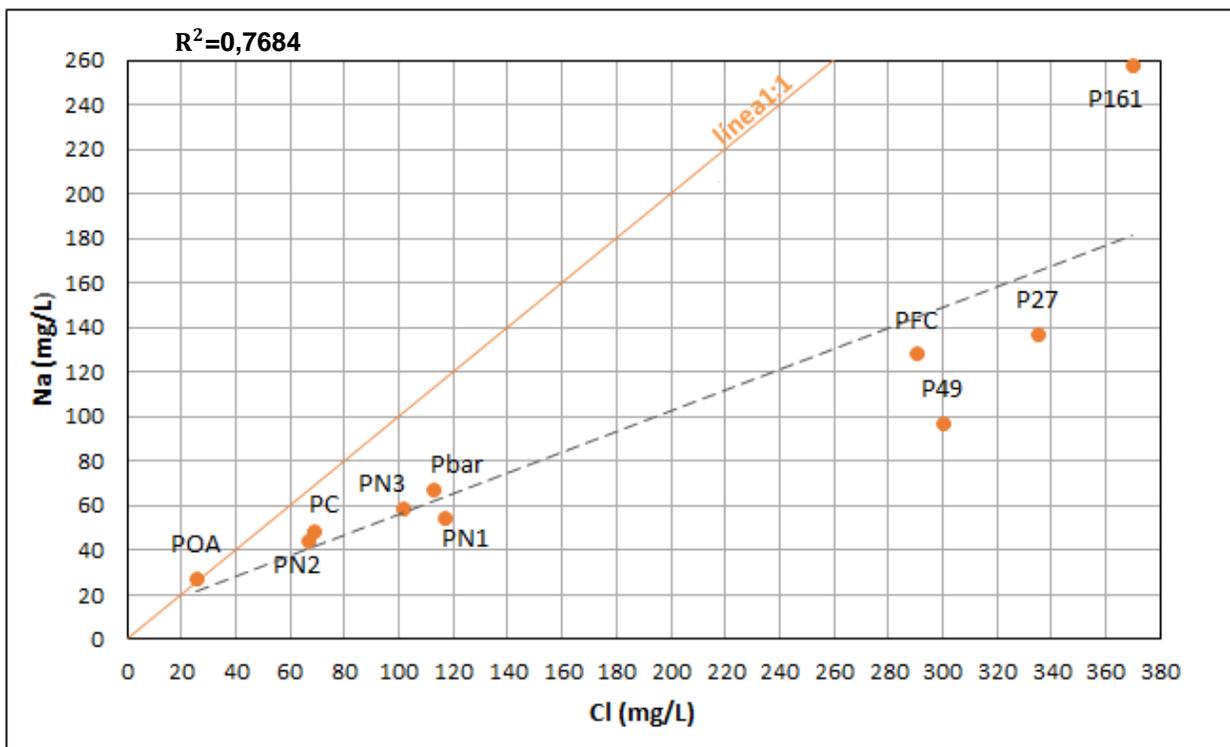


Figura 6-2: Diagrama binario Na vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant (2016). La línea naranja corresponde a la línea de equimolaridad, mientras que la línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

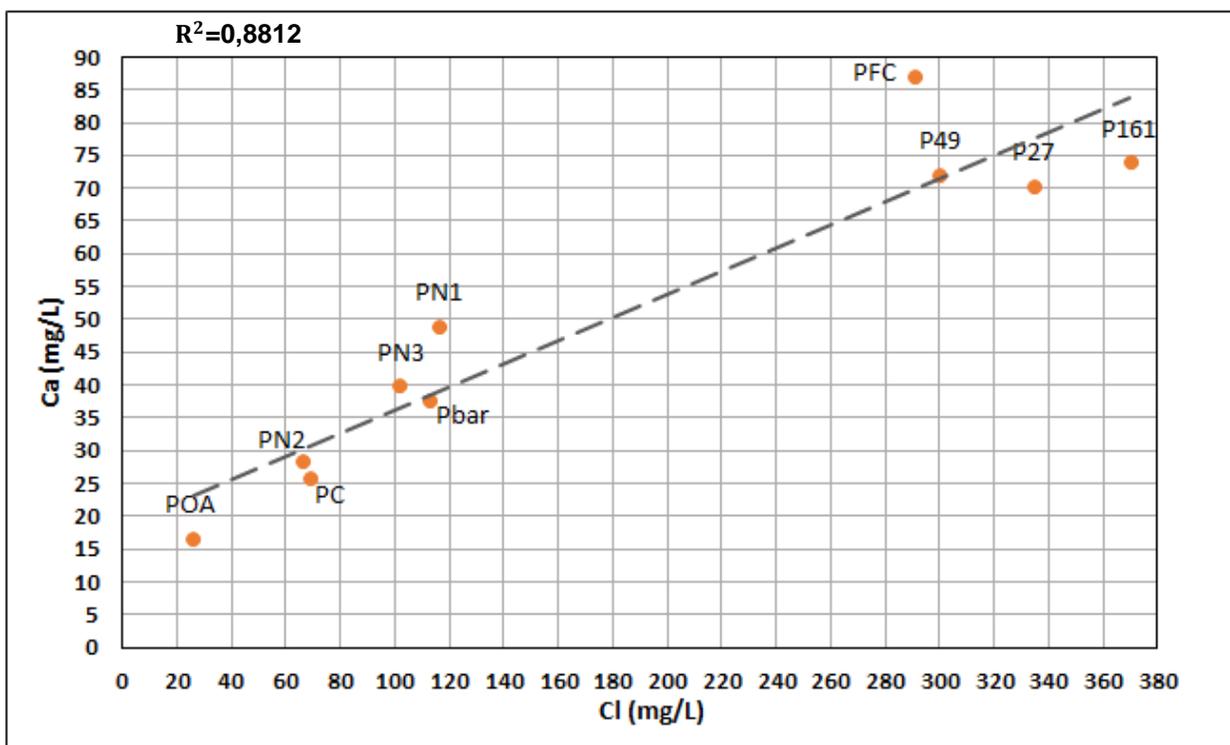


Figura 6-3: Diagrama binario Ca vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant (2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras

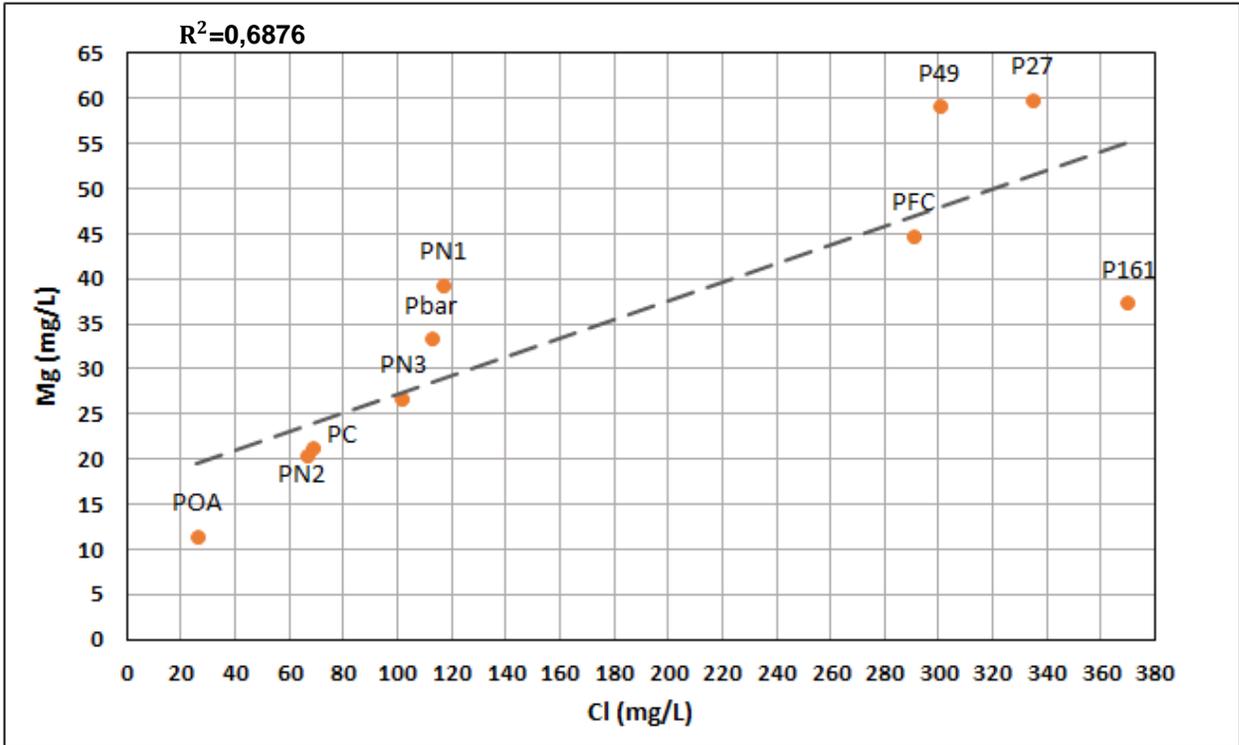


Figura 6-4: Diagrama binario Mg vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

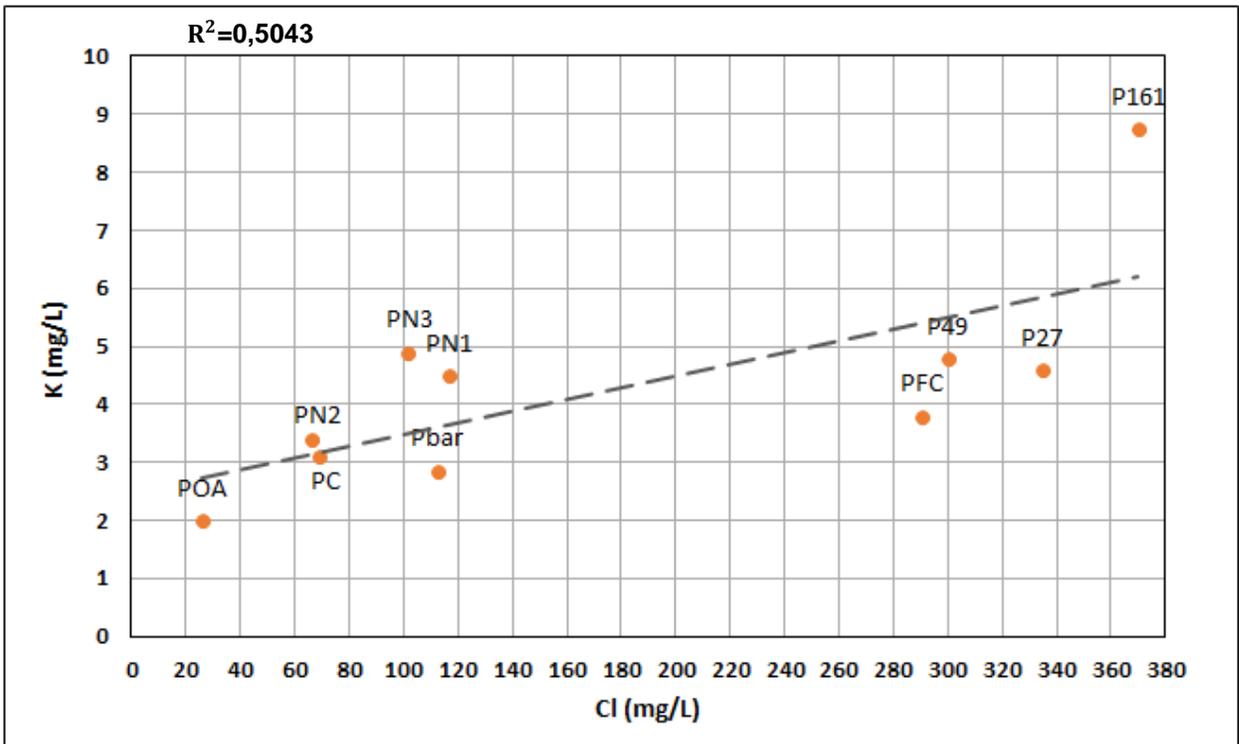


Figura 6-5: Diagrama binario K vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

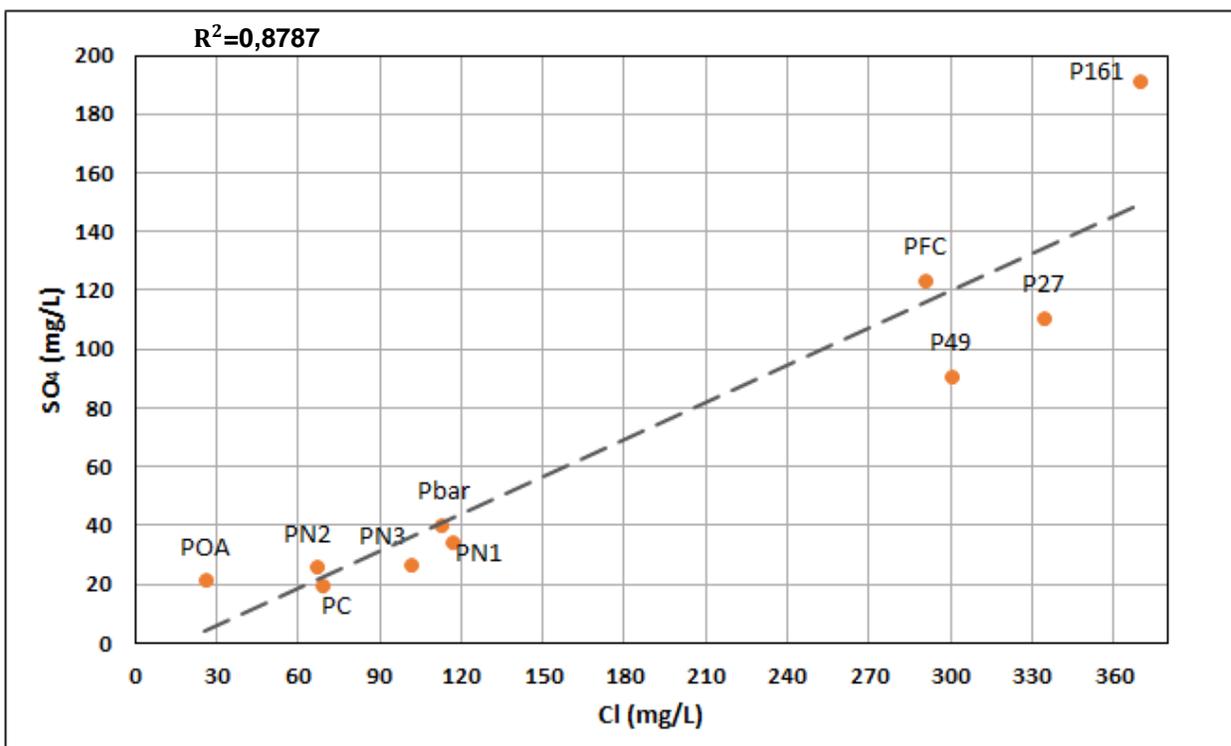


Figura 6-6 Diagrama binario SO₄ vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

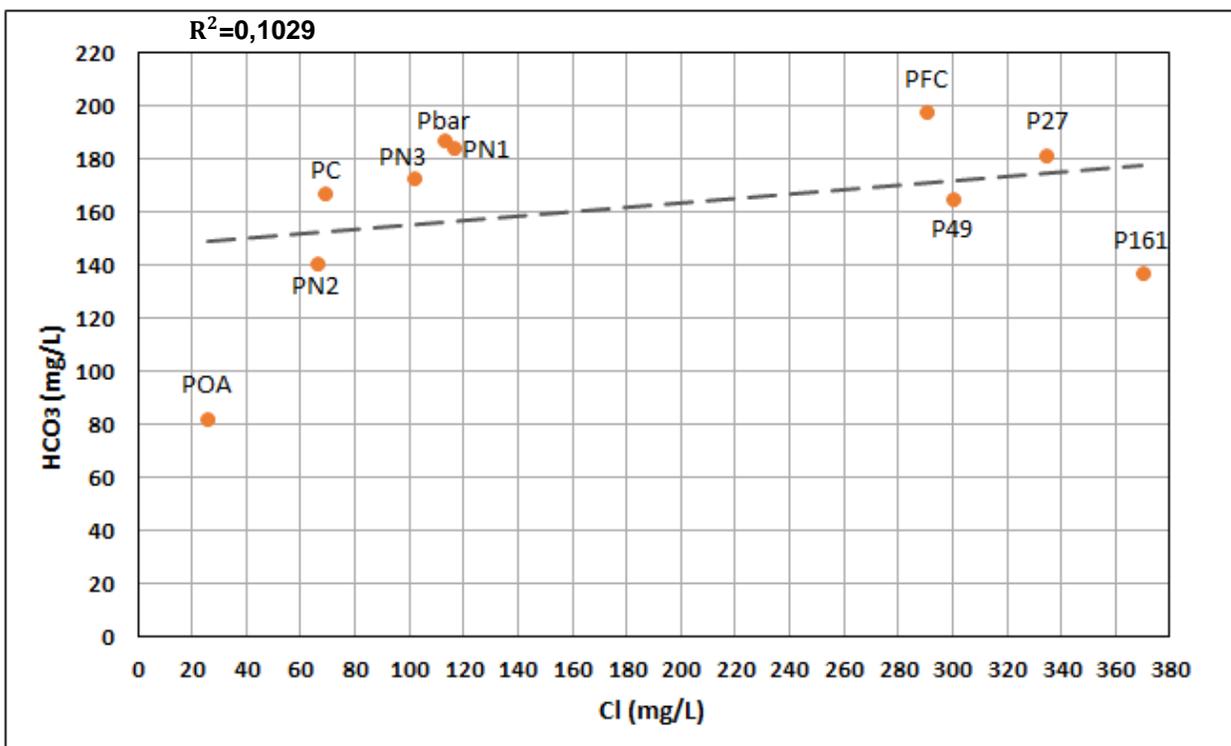


Figura 6-7: Diagrama binario HCO₃ vs Cl de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras

En los gráficos anteriores se observa que el contenido en cloruro permite diferenciar dos grupos de aguas: el primero con contenidos de cloruro inferiores a 200 mg/L formado por las muestras ubicadas en la cabecera de la quebrada (POA, PN1, PN2, PN3, Pbar y PC), el segundo con concentraciones de cloruro superiores a los 250 mg/L formado por las muestras ubicadas en el sector medio de la quebrada (P FC, P49, P27 y P161). Destaca la muestra P41 ubicada en la zona costera que presenta un contenido en cloruro superior a 600 mg/L y que ha sido omitida de los gráficos para no dificultar la visualización de las demás muestras. En general se observa una buena correlación entre todos los iones analizados y un enriquecimiento en iones desde la cabecera hasta la costa debido a la interacción con los sedimentos del agua de recarga con la Formación Coquimbo.

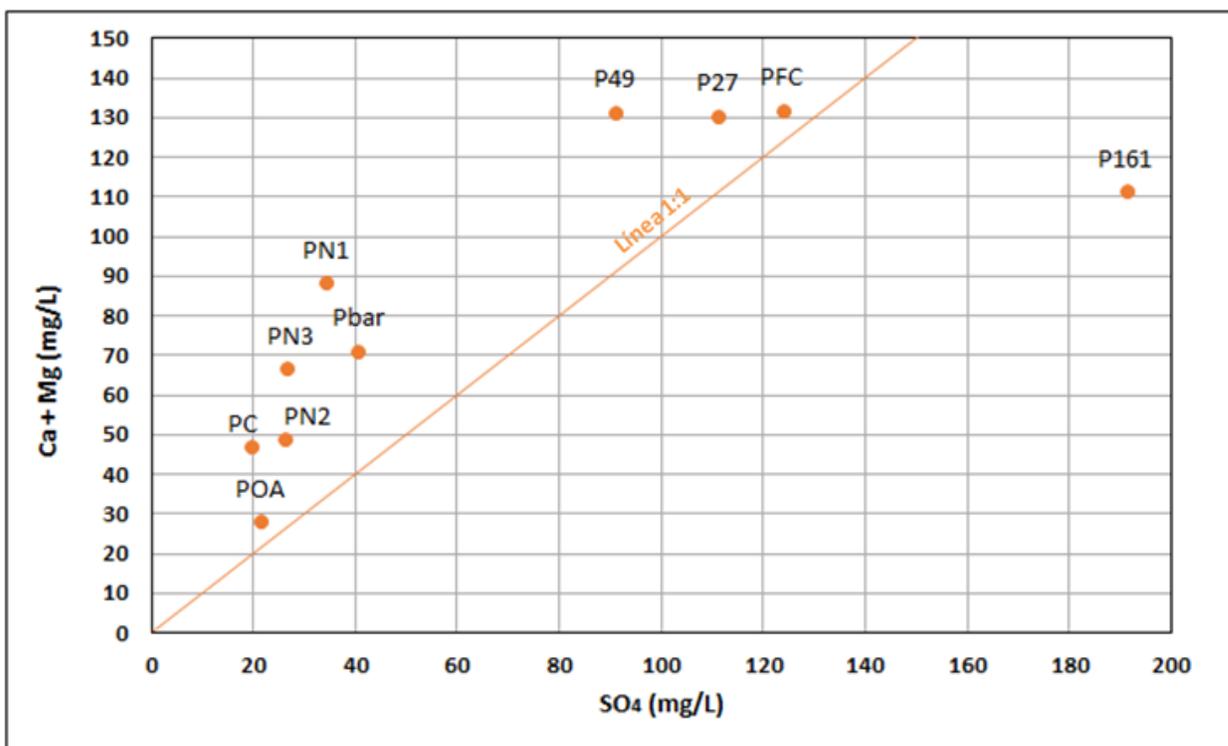


Figura 6-8: Diagrama binario Ca + Mg vs SO₄ de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea naranja indica la equimolaridad entre los iones.

En la Figura 6-8, se observa que las muestras ubicadas en Quebrada Seca, próximas a Altos de Talinay, se encuentran alejadas de la línea de equimolaridad, enriquecidas en calcio y magnesio en comparación con el sulfato. Por otro lado, en dirección hacia la costa, la proporción cationes/sulfato se va igualando, hasta alcanzar un enriquecimiento sulfato en relación a los cationes, expresado en la muestra P161.

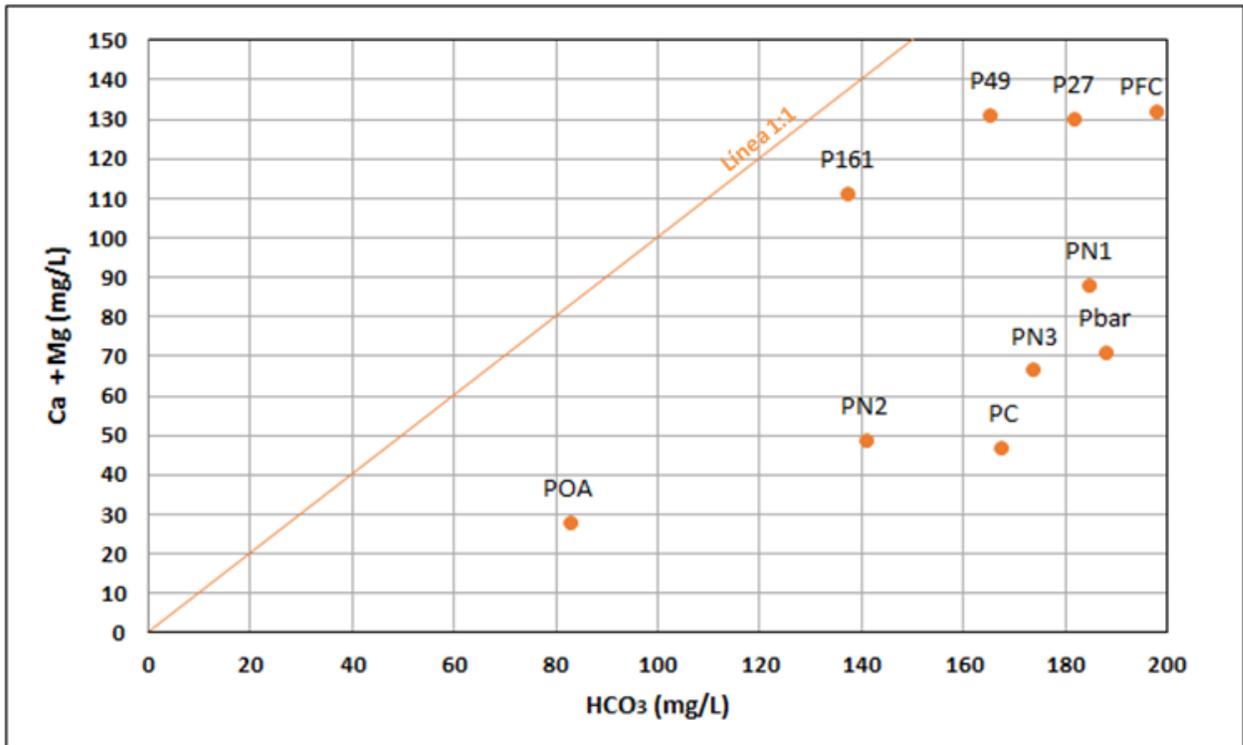


Figura 6-9: Diagrama binario $\text{Ca} + \text{Mg}$ vs HCO_3 de las muestras tomadas por Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016). La línea naranja indica la equimolaridad entre los iones.

En la Figura 6-9 se observa un enriquecimiento de bicarbonato generalizado en la cuenca costera. Todas las muestras se encuentran alejadas de la línea de equimolaridad.

2) Quebrada Seca (1997)

Este grupo de datos de 1997, ubicados en Quebrada Seca, corresponde a solamente 3 muestras. Dado que esta cantidad es insuficiente para observar una tendencia real en las aguas subterráneas, estos puntos sólo se muestran en gráficos comparativos con las demás muestras. Los gráficos binarios individuales para este grupo se encuentran en anexo.

Este grupo de datos se destaca de las demás muestras por su gran concentración de cloruro, la cual supera los 560 mg/L en cada punto. Por su parte, la muestra Qs1, ubicada entre Qs2 y Qs3, corresponde al punto con mayor concentración de iones en general, salvo para el potasio.

3) Río Limarí (2010)

Los siguientes gráficos fueron elaborados a partir de las muestras del año 2010, ubicadas en el río Limarí.

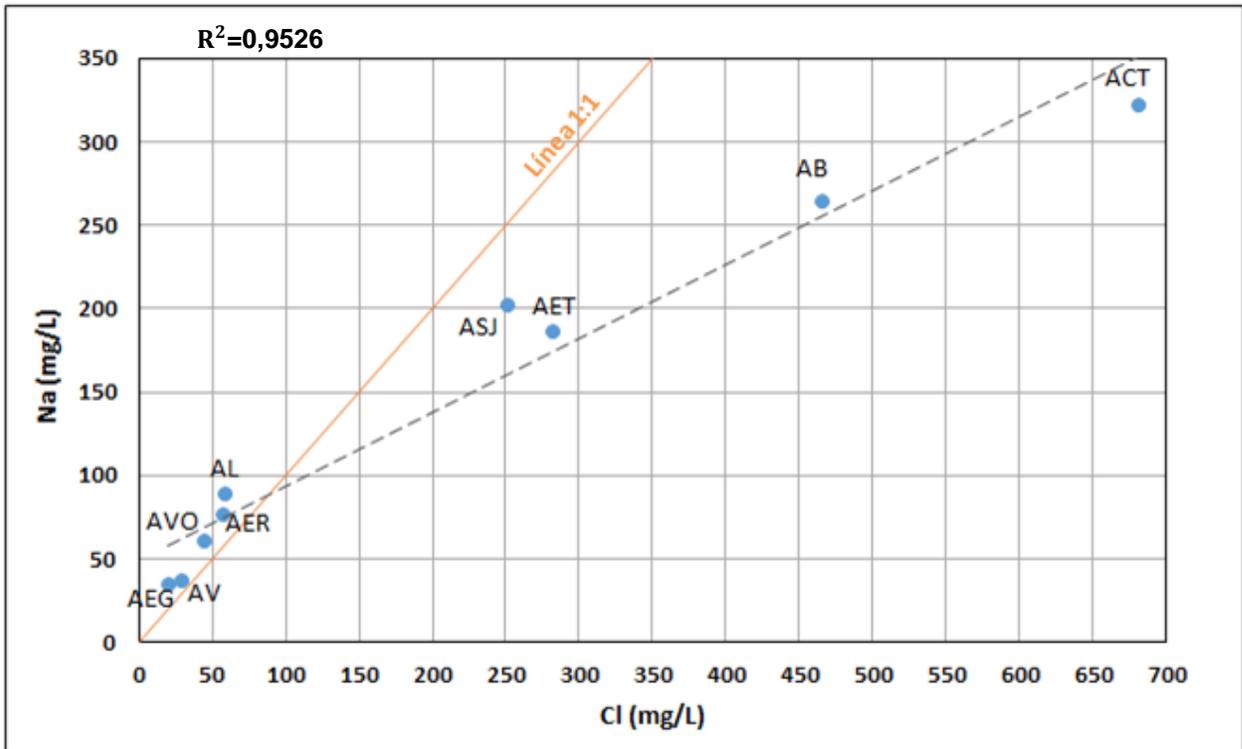


Figura 6-10: Diagrama binario Na vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea naranja corresponde a la línea de equimolaridad, mientras que la línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

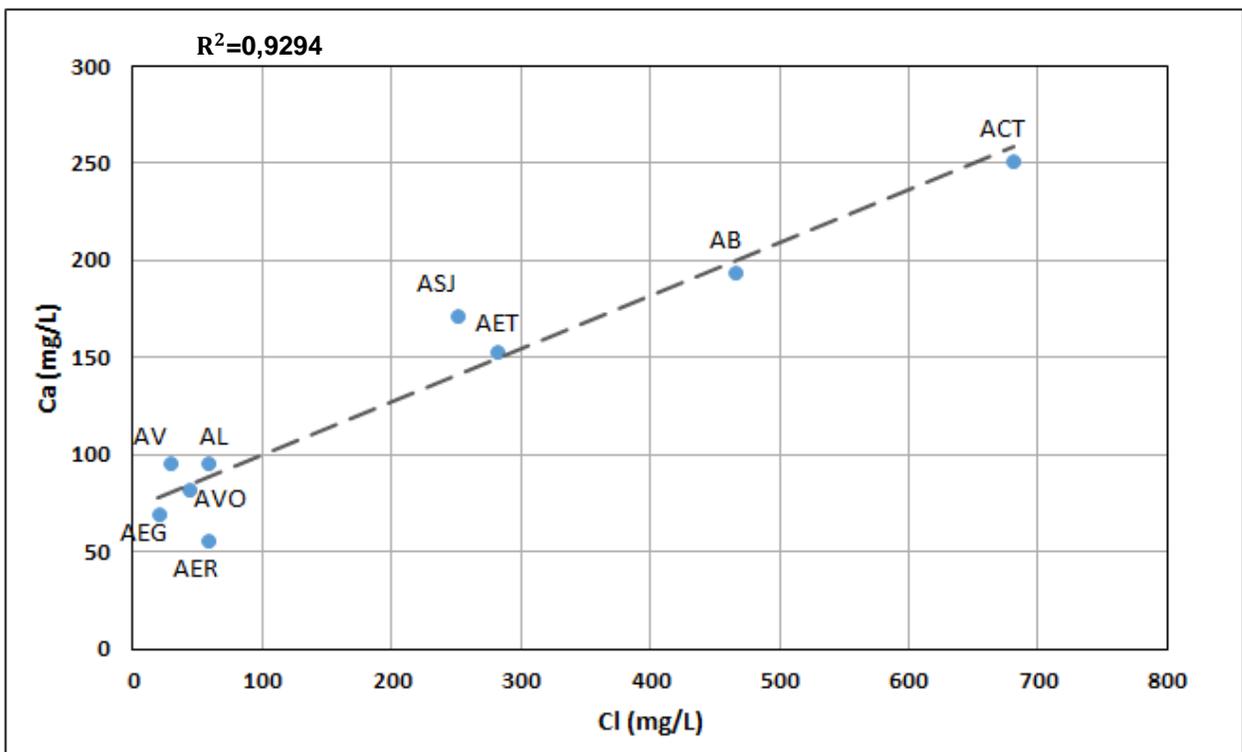


Figura 6-11: Diagrama binario Ca vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

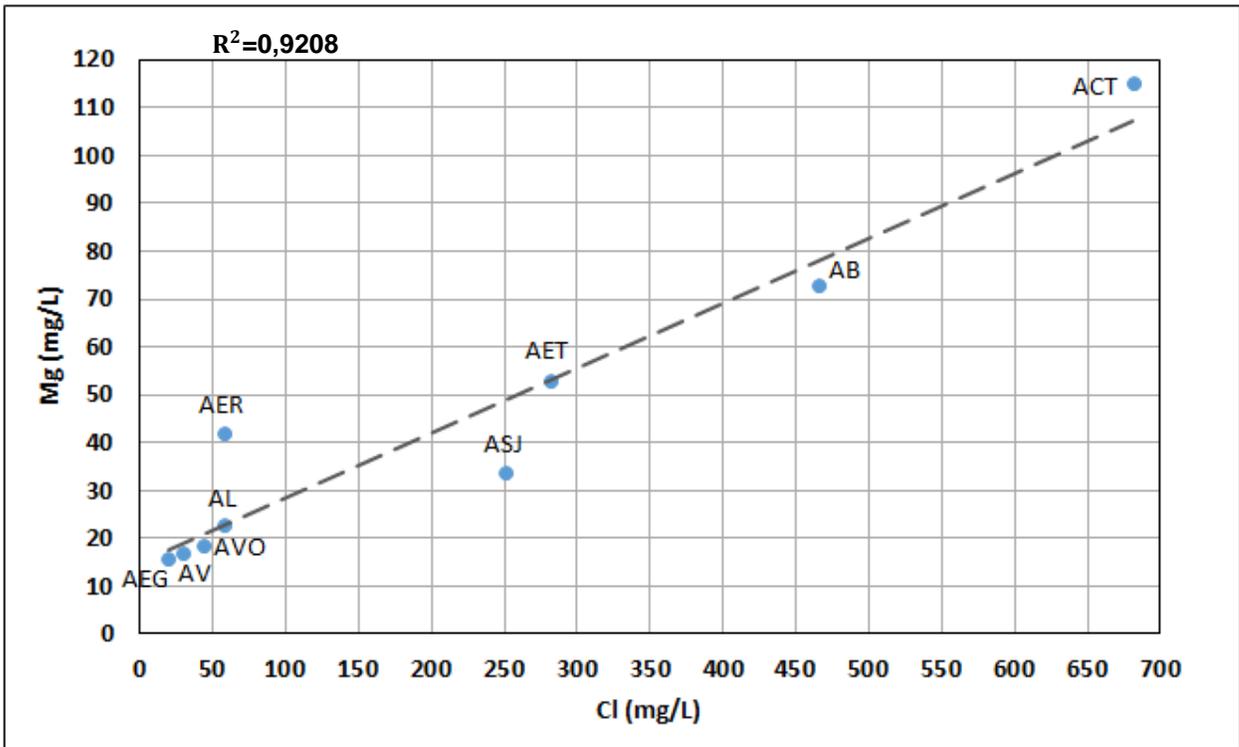


Figura 6-12: Diagrama binario Mg vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

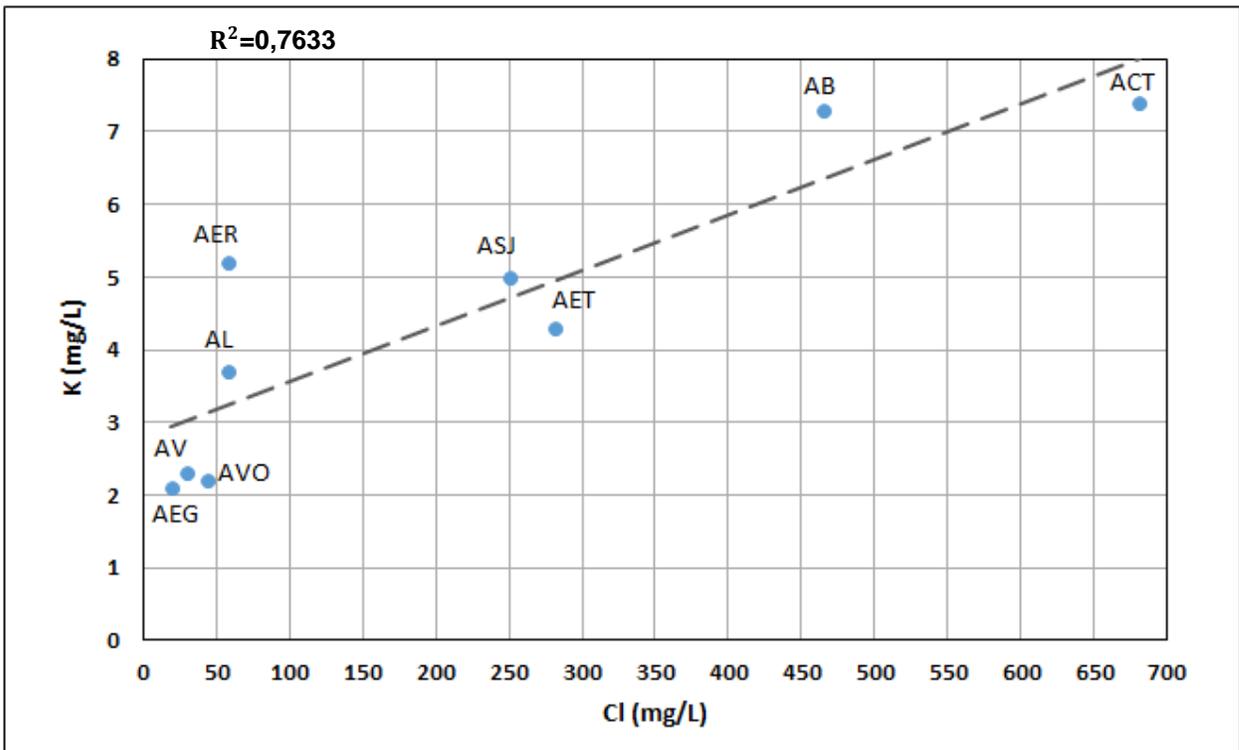


Figura 6-13: Diagrama binario K vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

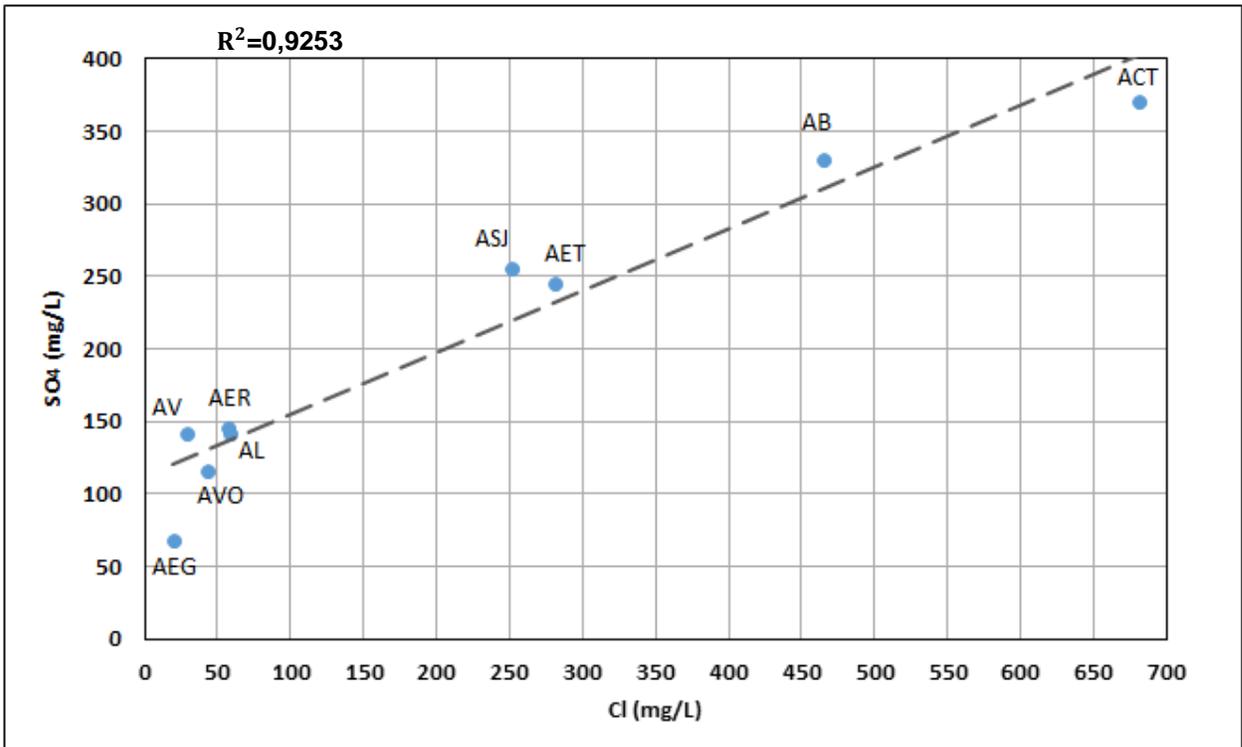


Figura 6-14: Diagrama binario SO₄ vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

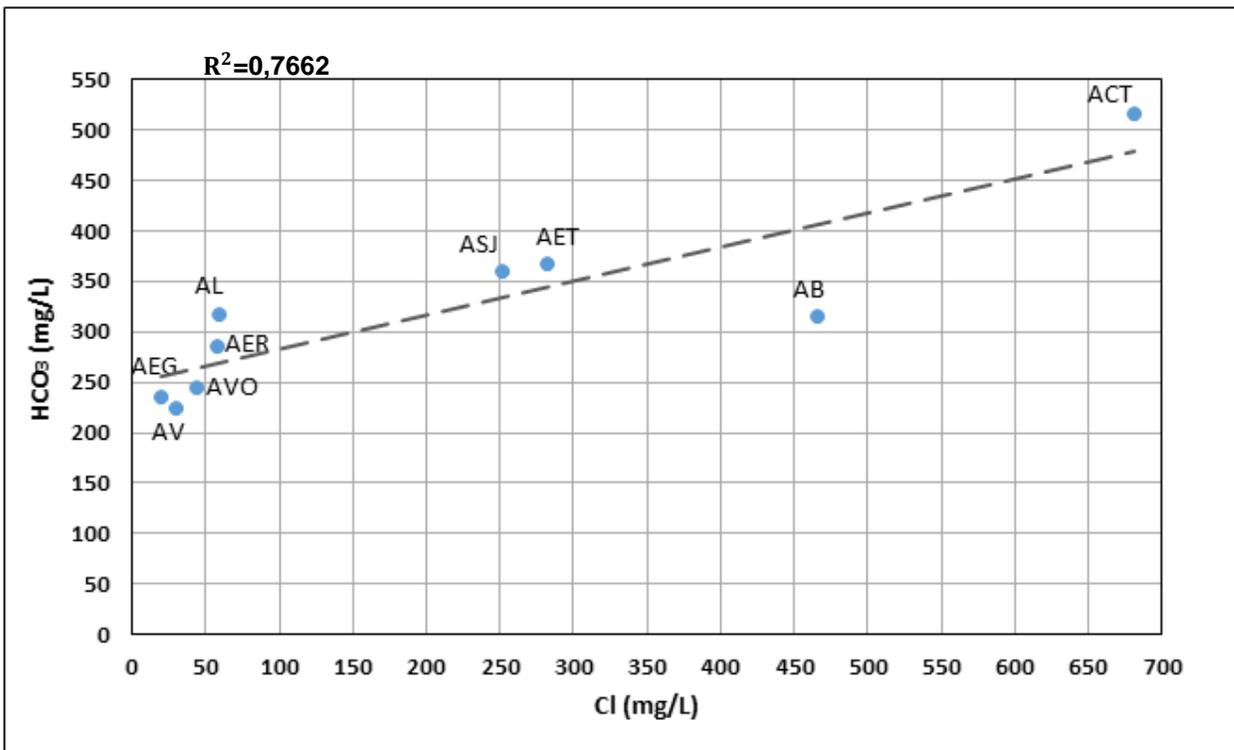


Figura 6-15: Diagrama binario HCO₃ vs Cl de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea discontinua indica el ajuste lineal entre las muestras.

Las muestras de agua subterránea de la cuenca del río Limarí presentan una cierta correlación en las concentraciones de los iones mayoritarios. Considerando el contenido en cloruro se pueden observar diferentes grupos que corresponden a muestras situadas en diferentes zonas de la cuenca. Los puntos ubicados en los afluentes al río Limarí y también en su confluencia (AEG, AL, AER, AVO y AV) presentan bajas concentraciones de sales, las muestras del sector medio de río (ASJ y AET), presentan valores entre 250 y 300 mg/L de cloruro, mientras que el punto más cercano a la desembocadura (AB) y el punto ACT, ubicado en las cercanías de Quebrada Seca presentan la mayor concentración de iones con respecto a las muestras anteriores. De forma general se tiene una tendencia creciente en la concentración de iones en la dirección del flujo.

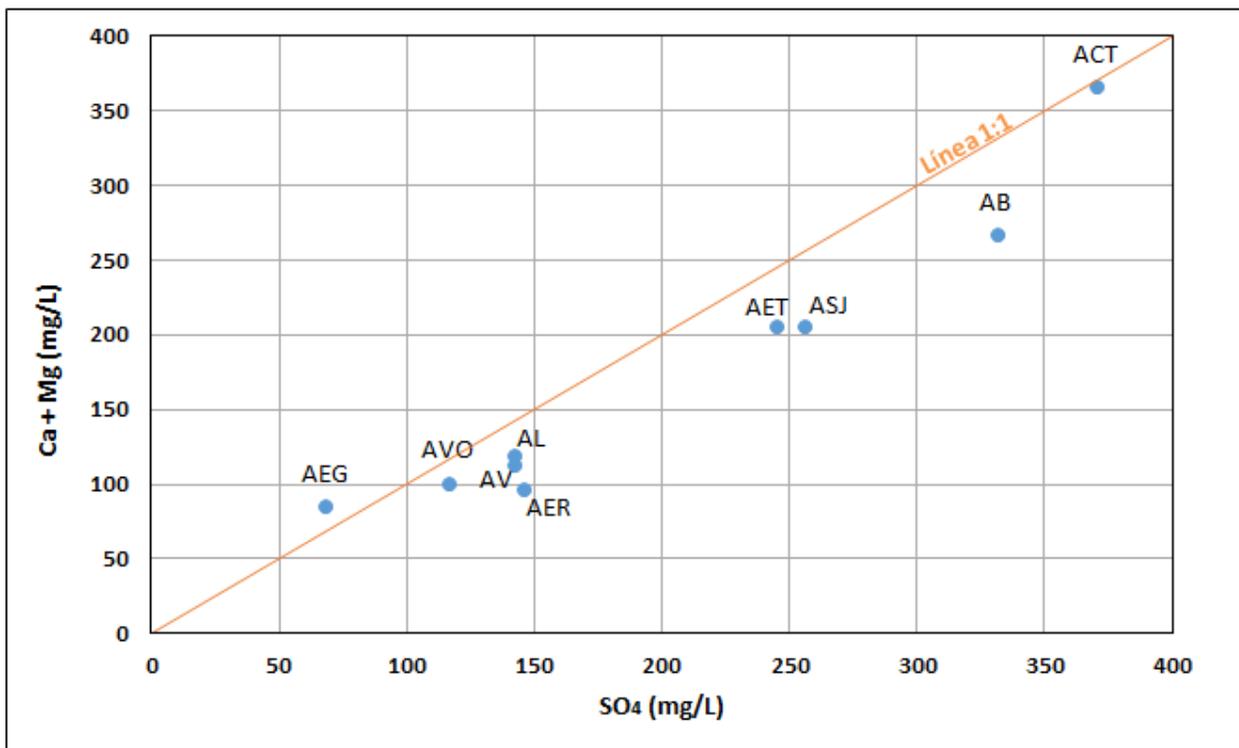


Figura 6-16: Diagrama binario Ca + Mg vs SO₄ de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea naranja indica la equimolaridad entre los iones.

En la Figura 6-16, se observa un enriquecimiento generalizado de sulfato en las aguas subterráneas de la cuenca del río Limarí. La excepción a esta tendencia es la muestra AEG ubicada en la cabecera del río. La muestra ACT presenta una proporción de cationes/sulfato cercana a la equimolaridad.

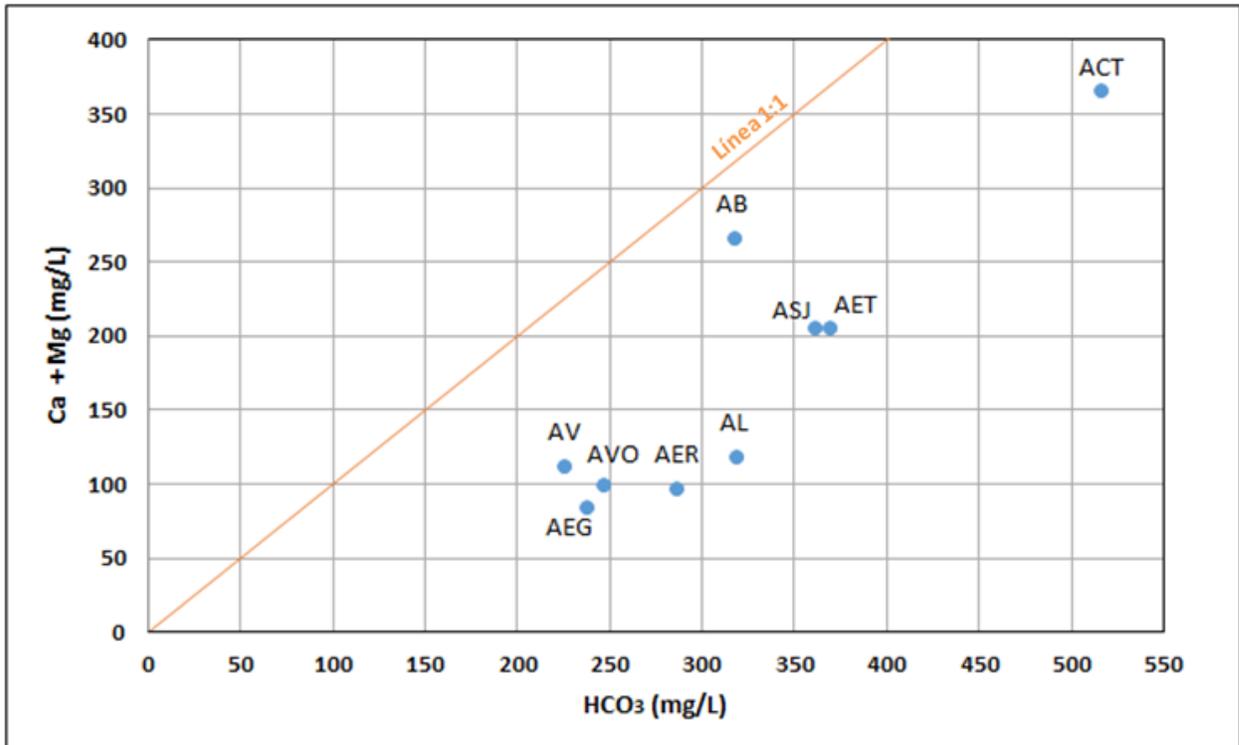


Figura 6-17: Diagrama binario Ca + Mg vs HCO₃ de las muestras tomadas por Jofré (2010). La línea naranja indica la equimolaridad entre los iones.

En la Figura 6-17, se observa que todas las muestras ubicadas en la cuenca del río Limarí están enriquecidas en bicarbonato en comparación con los cationes calcio y magnesio.

4) Comparación química entre todas las muestras:

A continuación se muestran los gráficos binarios elaborados a partir de todas las muestras recopiladas, incluyendo las de Aravena (1997) y la muestra P41 de Barraza y Manque (2016) y Briceño y Marchant(2016).

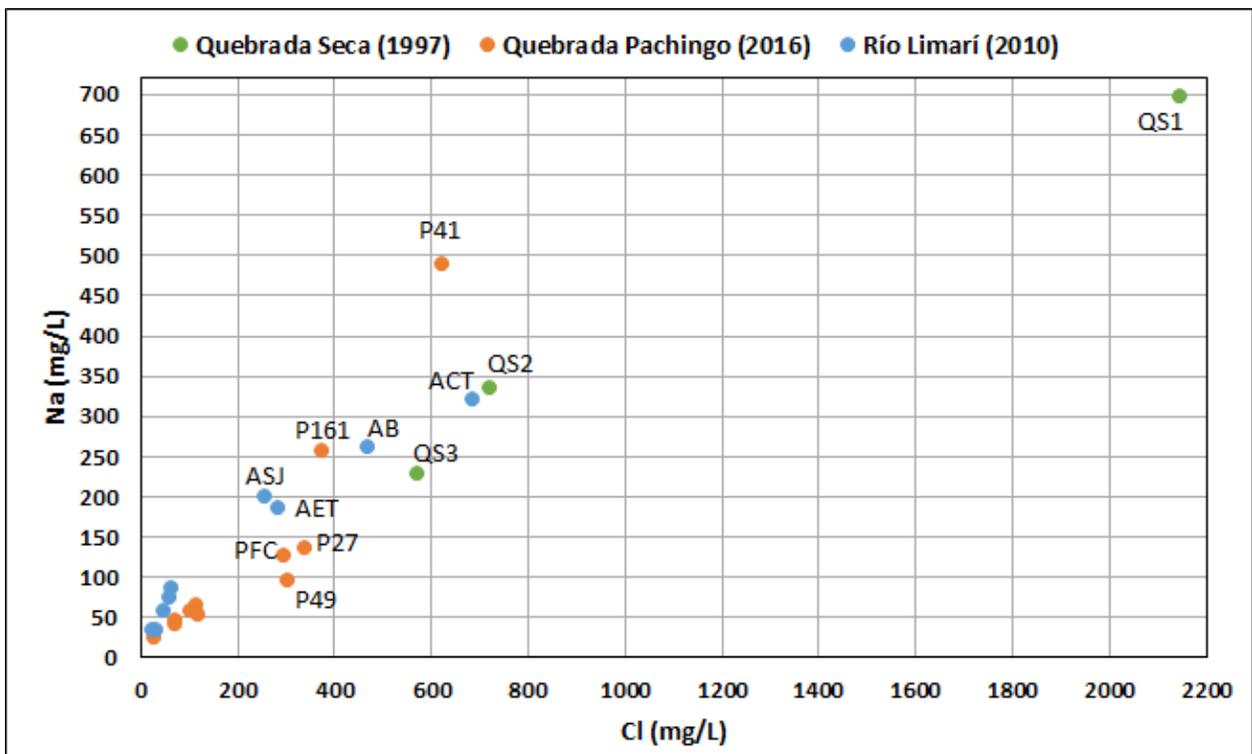


Gráfico 6-1: Diagrama binario Na vs Cl de todas las muestras químicas.

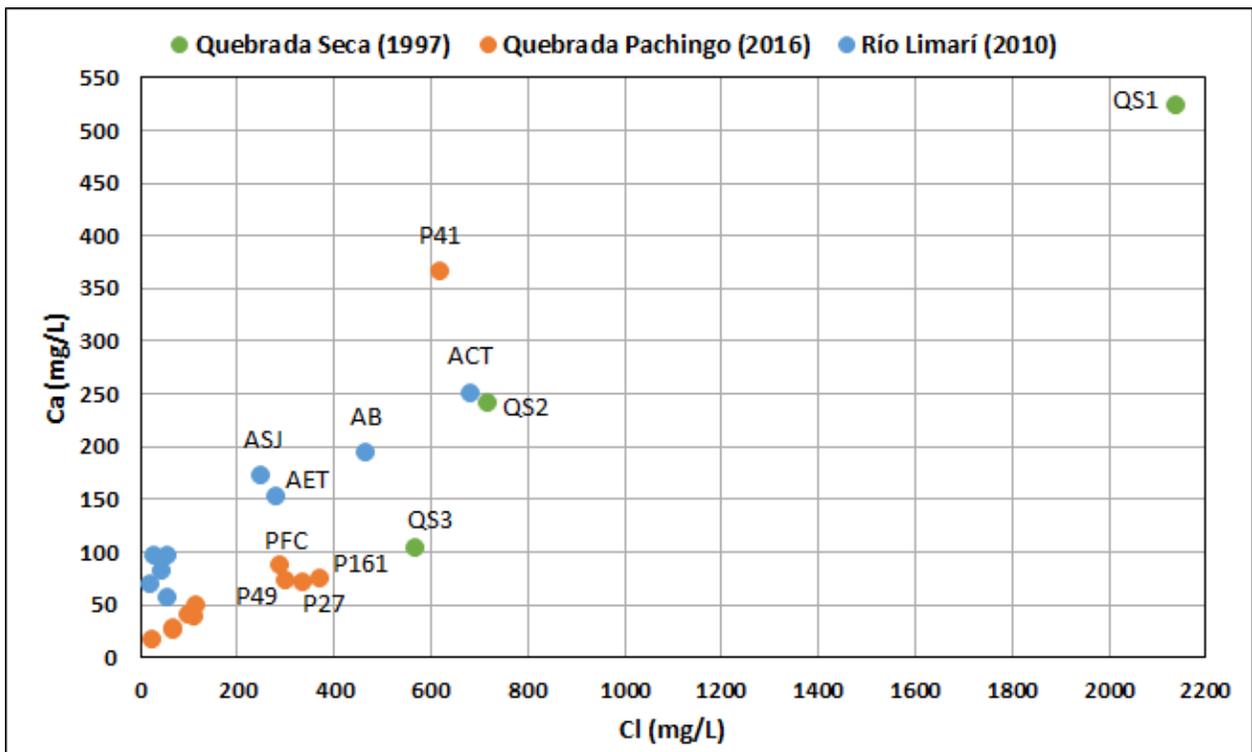


Gráfico 6-2: Diagrama binario Ca vs Cl de todas las muestras químicas.

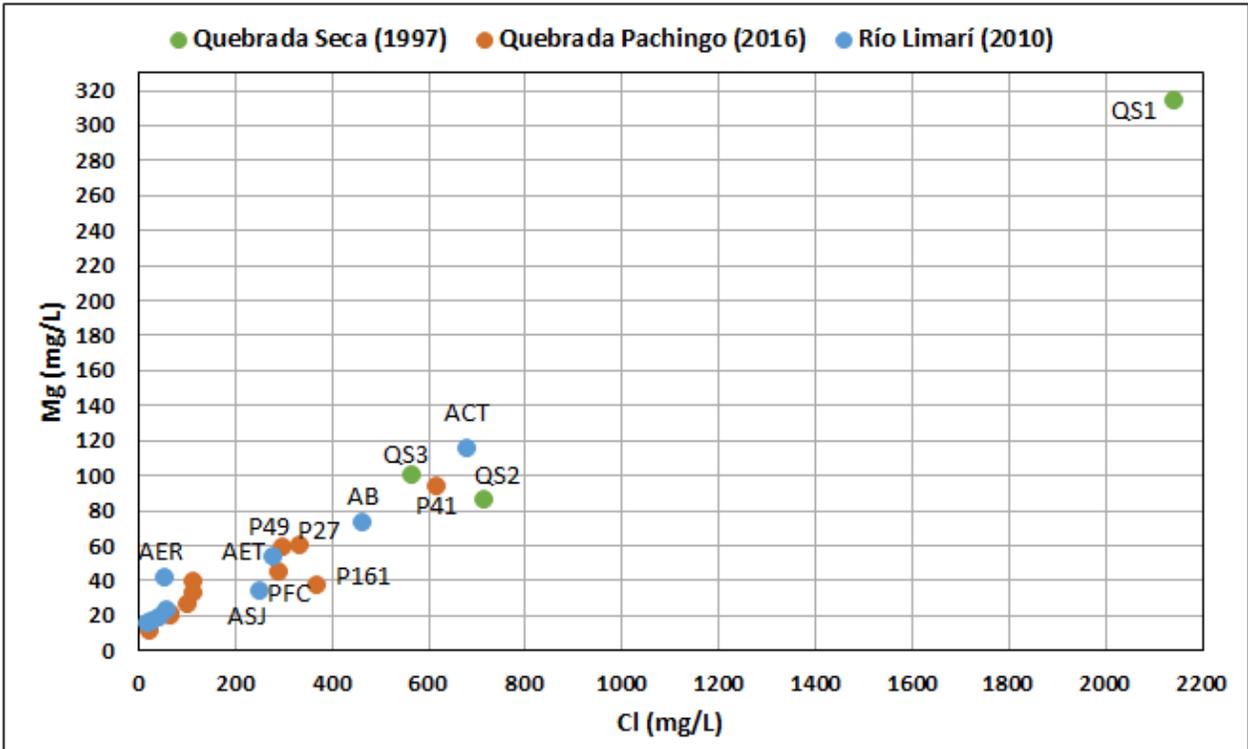


Gráfico 6-3: Diagrama binario Mg vs Cl de todas las muestras químicas.

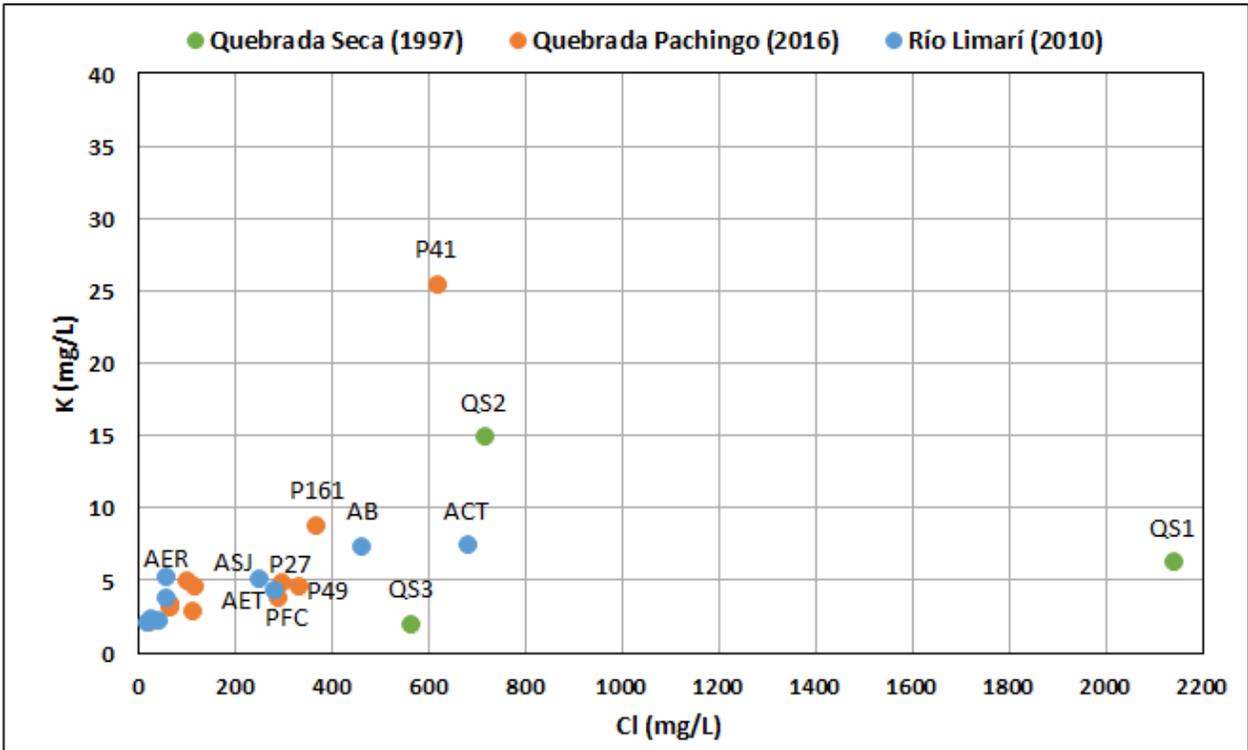


Gráfico 6-4: Diagrama binario K vs Cl de todas las muestras químicas.

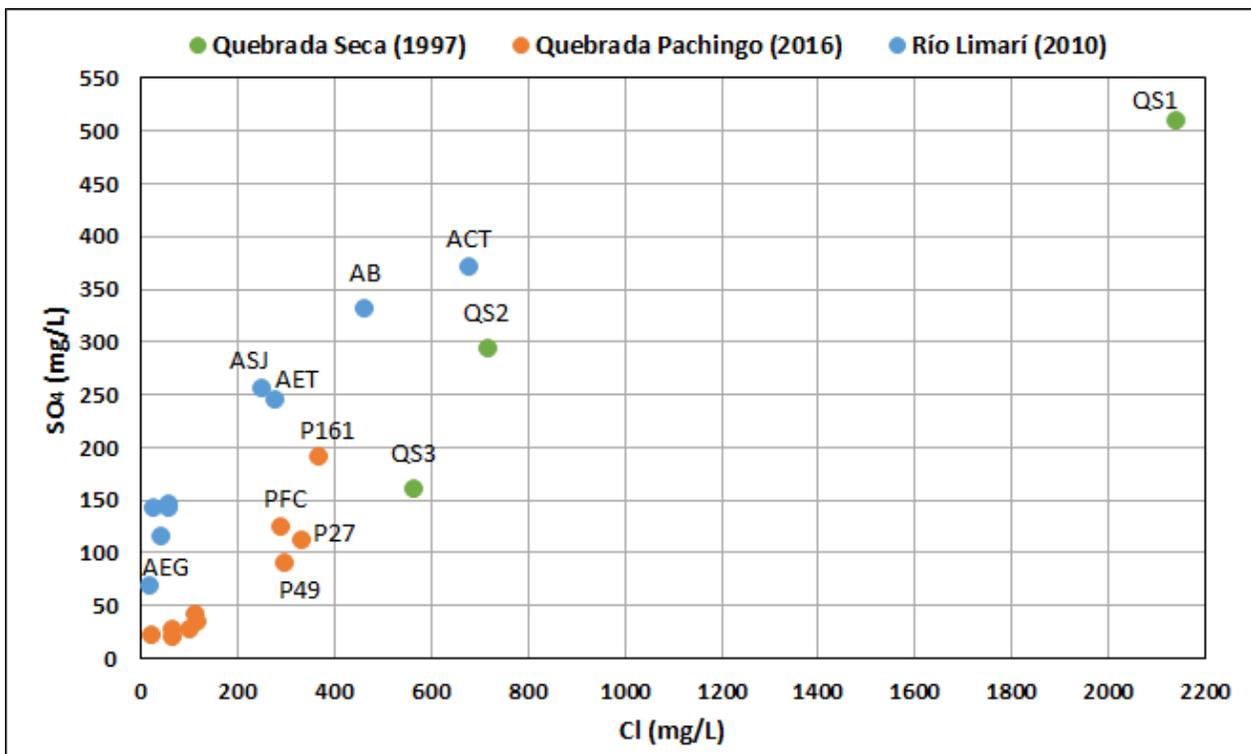


Gráfico 6-5: Diagrama binario SO₄ vs Cl de todas las muestras químicas.

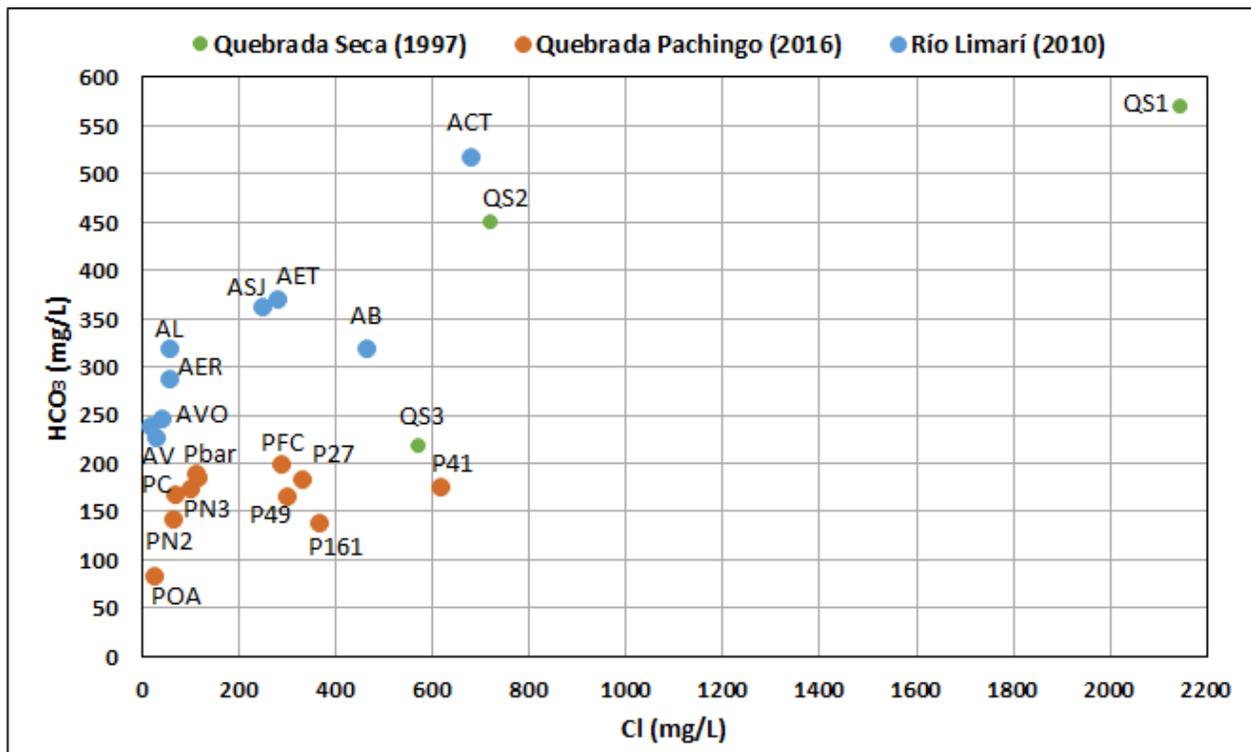


Gráfico 6-6: Diagrama binario HCO₃ vs Cl de todas las muestras químicas.

En términos generales, las muestras presentan un comportamiento químico similar. Se observa que las muestras del río Limarí son más enriquecidas en calcio, sulfato y bicarbonato que las demás, salvo por algunos puntos específicos como P41 y Qs1. En

cuanto al sodio, se observa mayores concentraciones en las muestras de la cabecera del río Limarí, mientras que hacia la desembocadura la tendencia se invierte, siendo las muestras de Quebrada Pachingo ubicadas en la costa las más enriquecidas en sodio, a excepción de la muestra Qs1. Además, se observa una similitud química entre la muestra ACT ubicada en el río Limarí y las muestras Qs2 y, en menor medida, Qs3, ubicadas en Quebrada Seca.

6.2 Perfiles topográficos

Se realizaron una serie de perfiles, considerando tanto la topografía como el basamento, para ayudar a entender las posibles geometrías de las cuencas y su relación con la información hidrogeológica antes mencionada.

La Figura 6-18 corresponde a un perfil trazado a lo largo de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca y que cruza transversalmente la cuenca del río Limarí. En este se observa que el basamento alcanza profundidades cercanas a los -700 m.s.n.m. Siguiendo el perfil, a la altura de Quebrada Seca cambia radicalmente esta tendencia, y el basamento se levanta hasta los 50 m.s.n.m. También se puede notar que el sector más elevado del basamento no coincide con el sector más elevado de la topografía. Es decir, existe una diferencia entre la cuenca hidrológica y la hidrogeológica. La divisoria de aguas superficiales no tiene una correspondencia exacta en la subsuperficie. Esto implica que las relaciones entre las dos cuencas son función de la posición de los acuíferos y de las respectivas cotas hidráulicas.

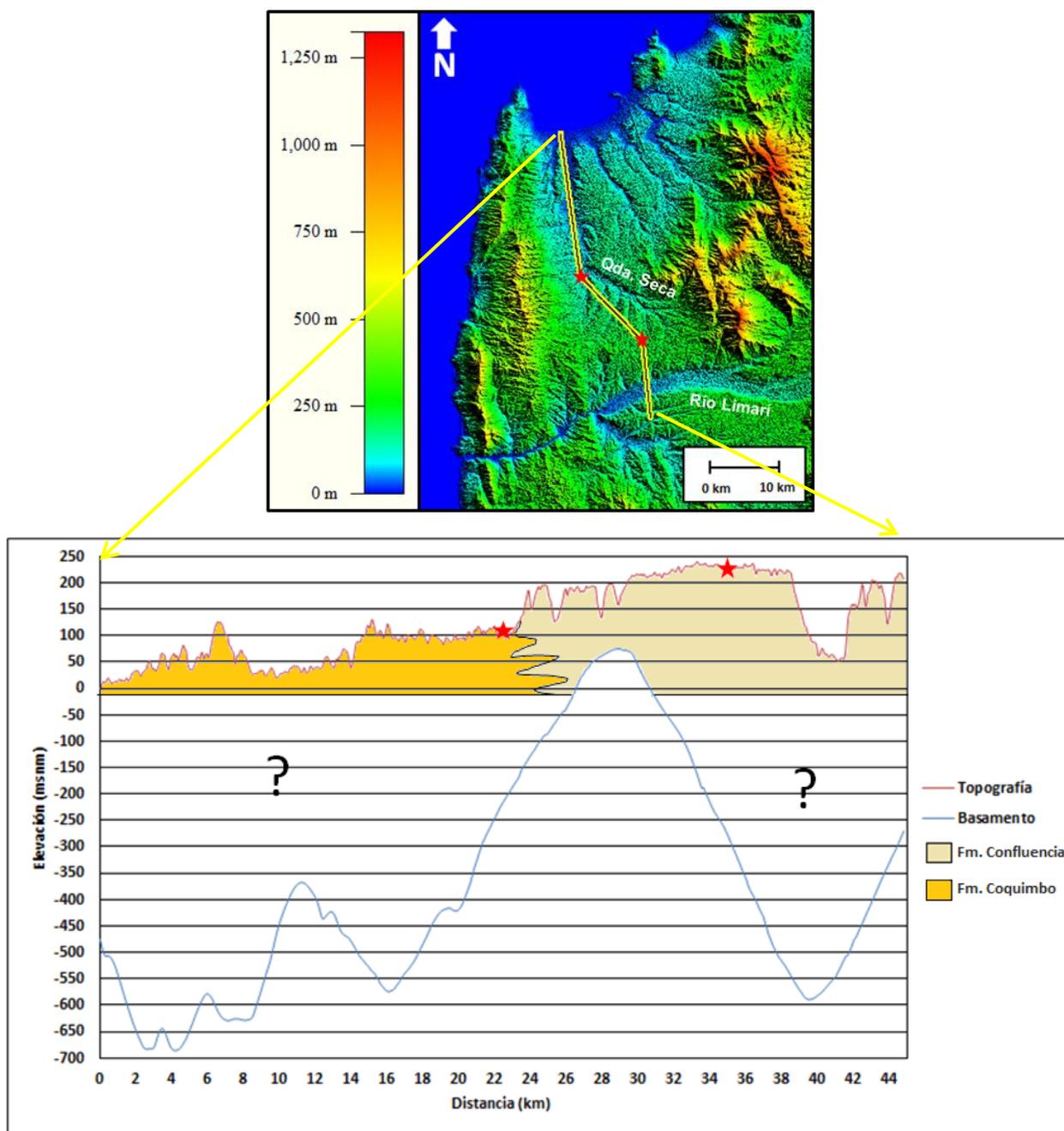


Figura 6-18: Perfil esquemático trazado a lo largo de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca y cruzando transversalmente a la cuenca del río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2). Las estrellas rojas indican cambios de dirección en el perfil. La profundidad de las formaciones mostradas es apenas ilustrativa, ya que no se tiene información de columnas en el sector.

En la Figura 6-19, se muestra el perfil longitudinal de la cuenca del río Limarí, siguiendo el curso del mismo. Se observa una depresión importante ubicada justo antes de los Altos de Talinay y en las cercanías de Quebrada Seca. No se tiene información de la geología en profundidad en el sector y, por ende, del tipo de sedimentos que rellenan este depocentro.

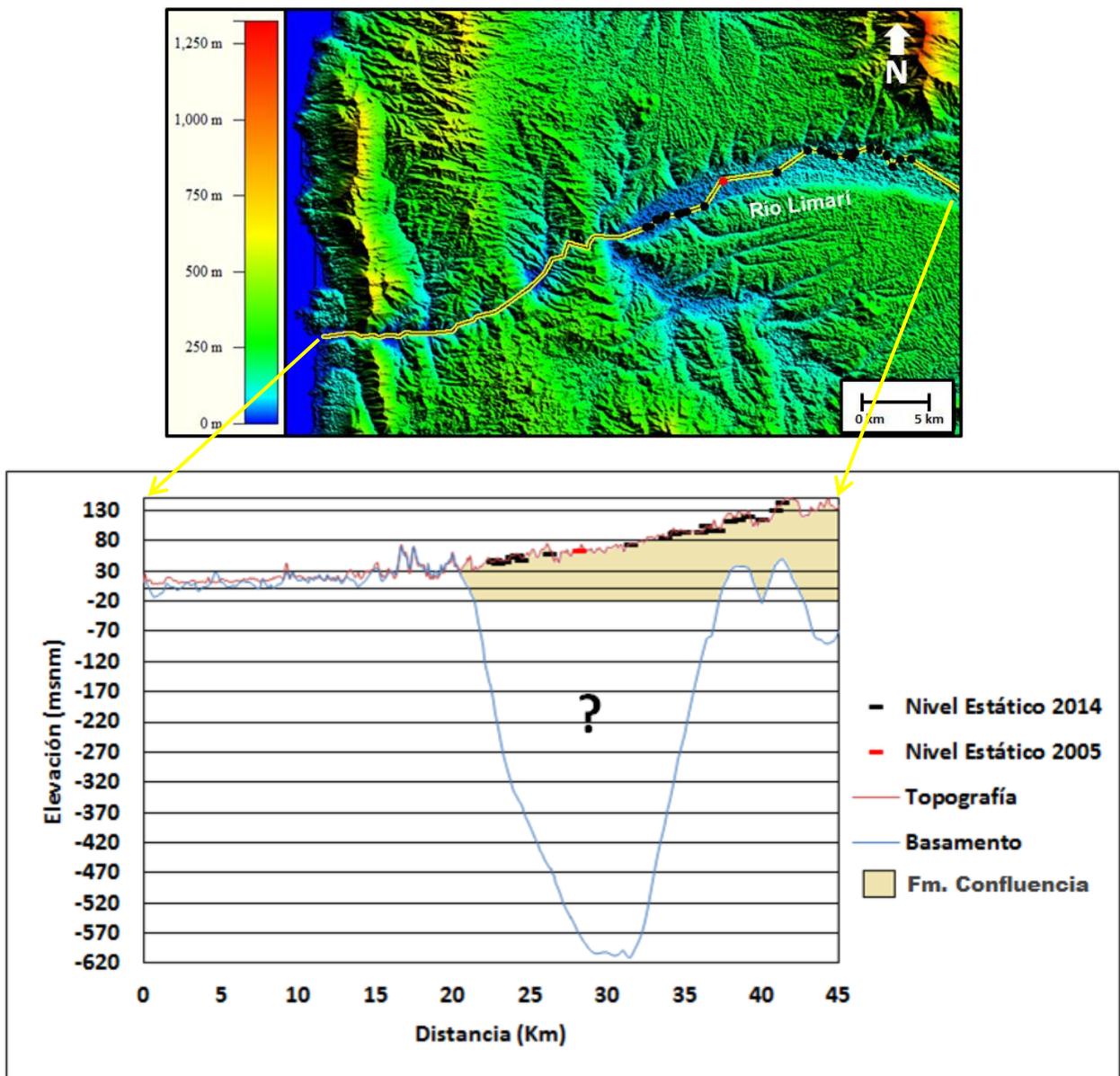


Figura 6-19: Perfil esquemático con información de niveles estáticos, trazado de forma longitudinal al río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2). La profundidad de las formaciones mostradas es apenas ilustrativa, ya que no se tiene información de columnas en el sector.

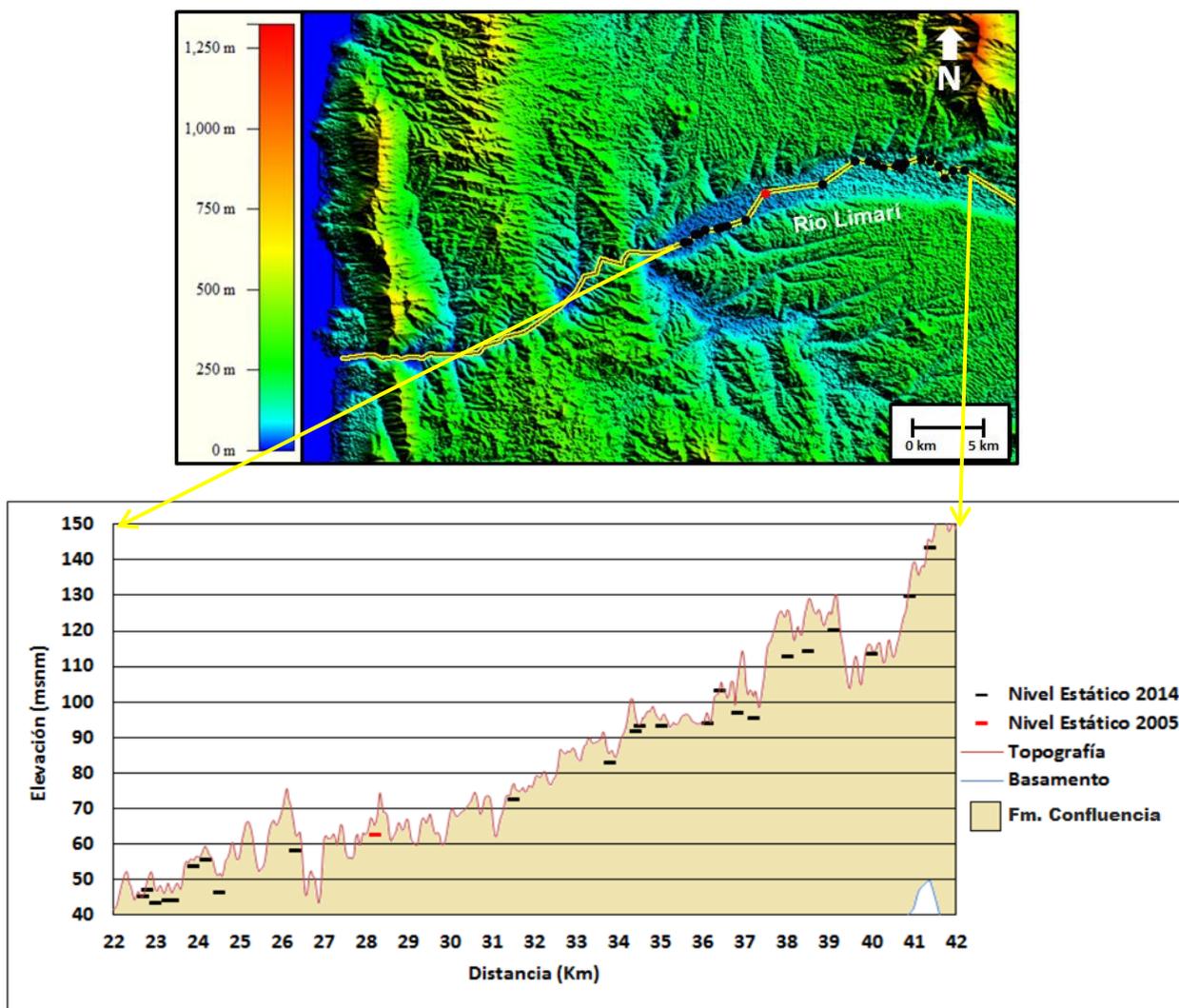


Figura 6-20: Acercamiento al sector con información de niveles estáticos del perfil esquemático longitudinal al río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2).

La Figura 6-20 corresponde a un acercamiento del perfil anterior (Figura 6-19), en el cual se muestra solamente el sector con los puntos de niveles estáticos medidos. Se observa que los niveles estáticos son relativamente someros a lo largo del río y que se tiene un acuífero libre. Se desconoce la hidrogeología de las capas sedimentarias más profundas del sector y, por ende, se desconoce también la existencia de algún acuífero confinado por debajo del anterior.

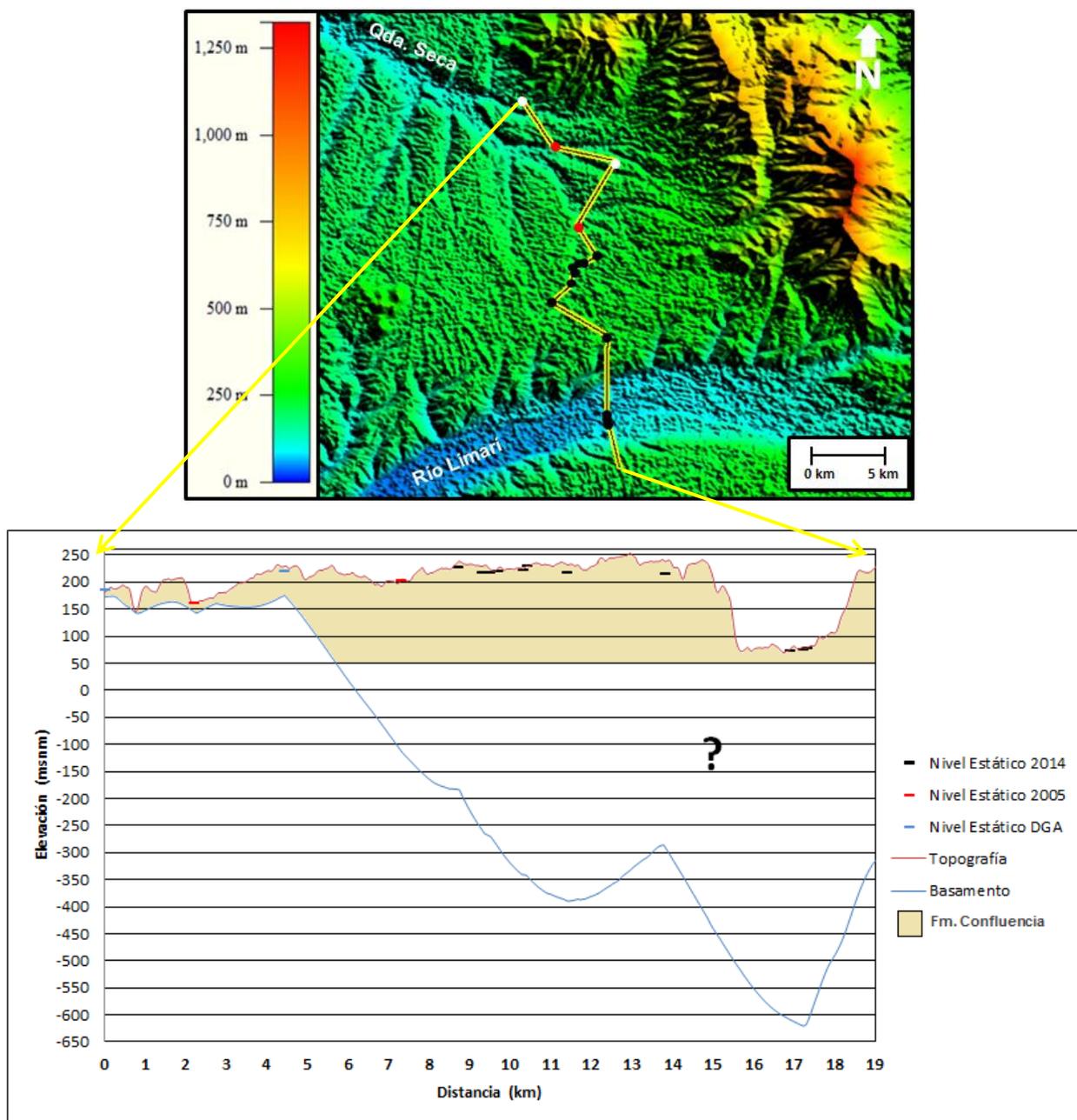


Figura 6-21: Perfil esquemático con información de niveles estáticos, trazado desde Quebrada Seca hasta el río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2). La profundidad de las formaciones mostradas es apenas ilustrativa, ya que no se tiene información de columnas en el sector.

En la Figura 6-21 se muestra el perfil topográfico que pasa por los puntos de medición de niveles estáticos ubicados entre las cuencas de Quebrada Seca y del río Limarí. En dicho perfil se tienen valores de nivel estático del año 2014, 2005 y el promedio aproximado de las mediciones de la DGA realizada en la década de los 80. Si bien no son directamente comparables entre sí, se ve que todos los grupo de niveles estáticos están relativamente cercanos a la superficie y que se tiene un acuífero libre.

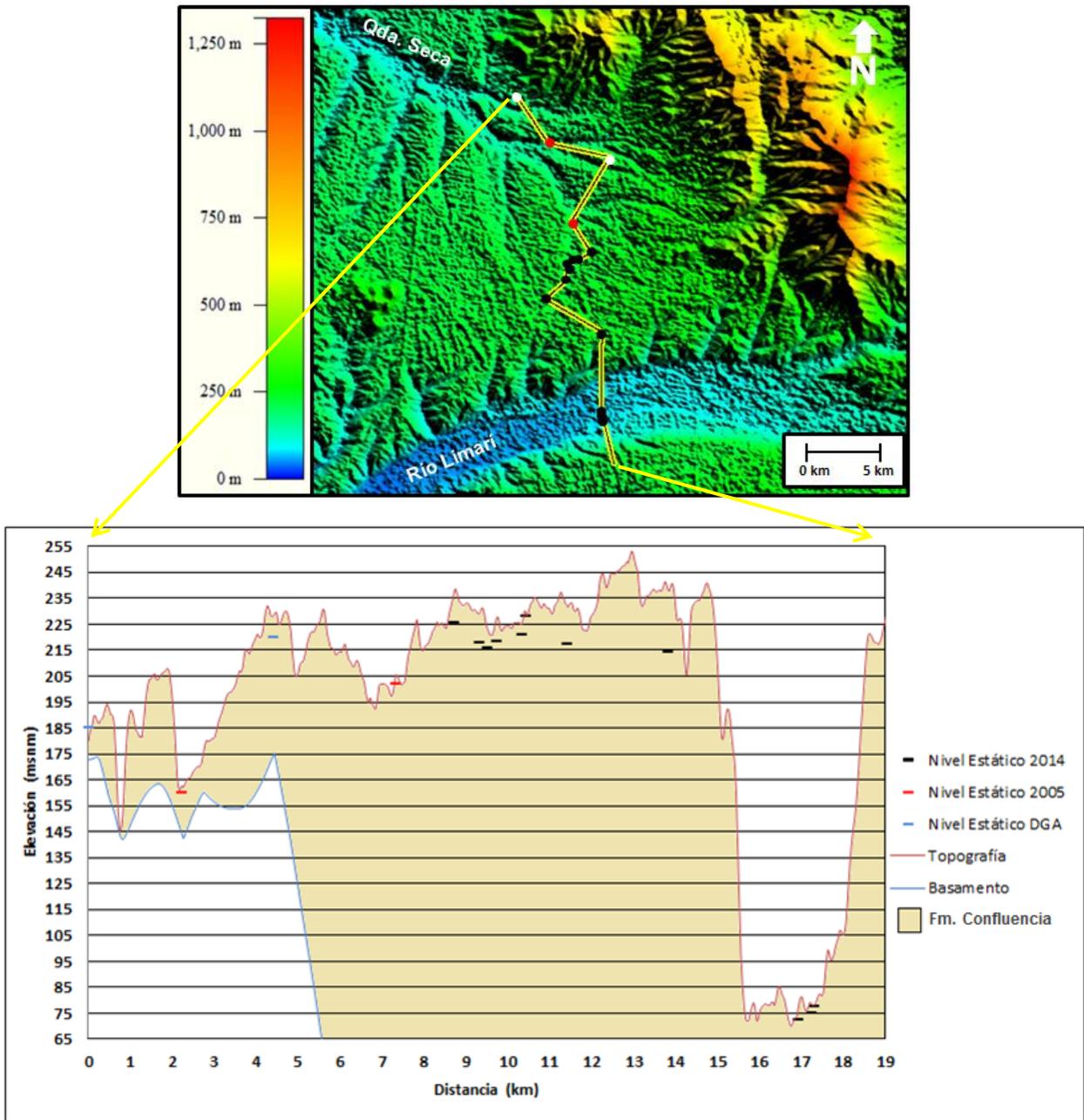


Figura 6-22: Acercamiento al sector con información de niveles estáticos del perfil esquemático desde Quebrada Seca hasta al río Limarí. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2).

La Figura 6-22 corresponde a un acercamiento del perfil anterior (Figura 6-21). Se observa que los niveles estáticos varían bastante en cortas distancias entre los 8 y 14 km de distancia del origen. Esto probablemente es debido al bombeo de los pozos cercanos, los cuales alteran el comportamiento natural de los niveles estáticos. Además se observa que a los 2 km y a los 17 km se tienen las menores cotas hidráulicas del sector, ubicadas por debajo de la elevación máxima del basamento.

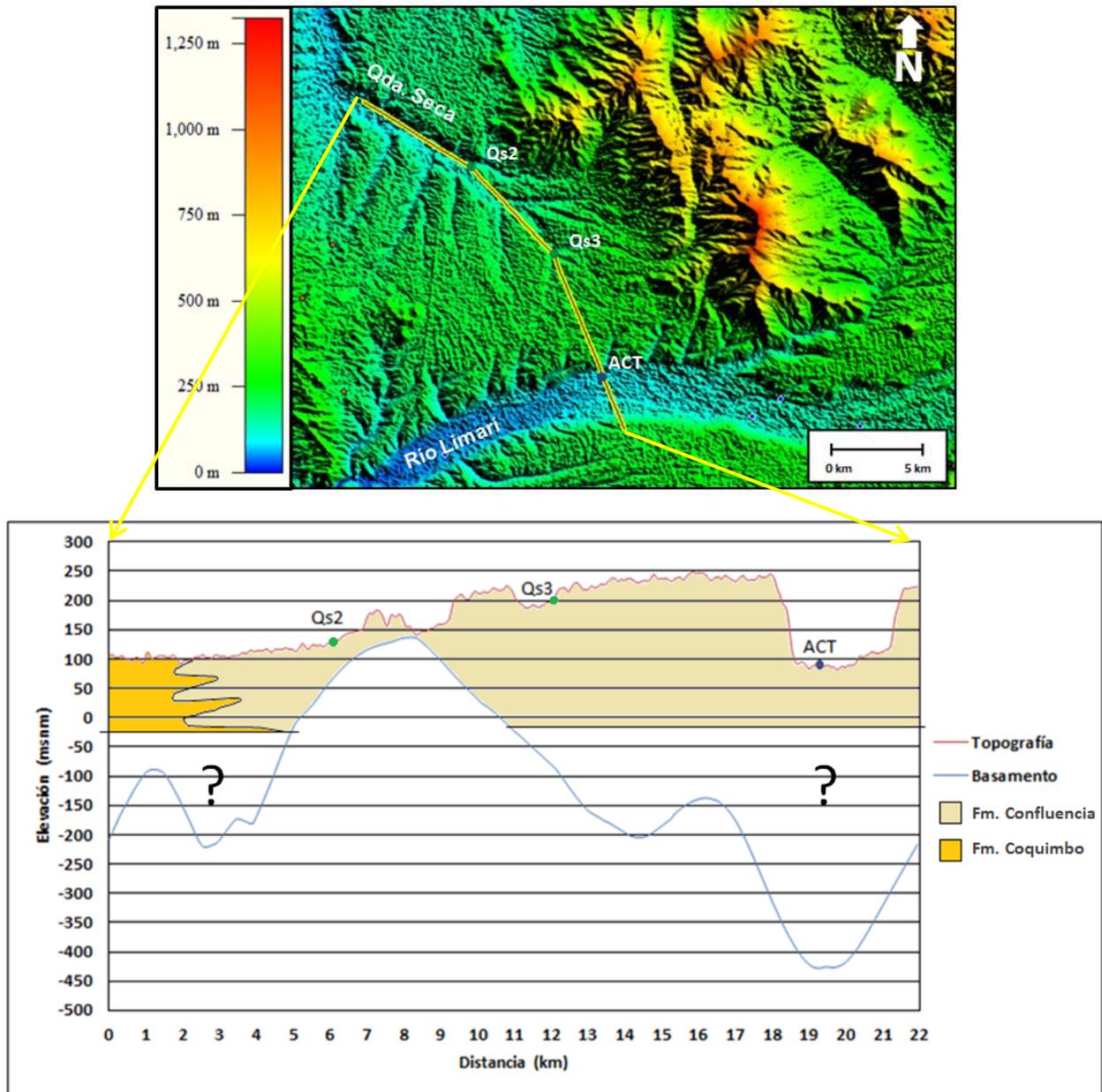


Figura 6-23: Perfil esquemático entre las muestras químicas Qs2, Qs3 y ACT. Elaborado a partir de los mapas de elevación del basamento y de la topografía (ASTER GDEM V2). La profundidad de las formaciones mostradas es apenas ilustrativa, ya que no se tiene información de columnas en el sector.

En la Figura 6-23 se muestra el perfil topográfico que pasa por sobre los puntos de muestreo químico presentados en el capítulo anterior. Como se puede ver, el punto Qs2 está aislado de los puntos Qs3 y ACT gracias a la gran elevación que alcanza el basamento en el sector. Por otro lado, los puntos ACT y Qs3 están conectados subterráneamente. La condición anterior es contraria a lo que se observa en superficie a simple vista, ya que los puntos Qs2 y Qs3 están ubicados en una misma quebrada, mientras que el punto ACT está ubicado en el río Limarí, alejado de los puntos anteriores. Esta situación se debe a que la divisoria de aguas y el sector más elevado

del basamento no coinciden en ubicación. Por lo tanto, los puntos Qs2 y Qs3 pertenecen a una misma hoya hidrográfica, pero no a una misma cuenca subterránea.

7 Discusiones

Se ha considerado que durante el Mioceno-Pleistoceno el río Limarí desembocaba hacia el norte, directamente en la bahía. Sin embargo, actualmente no se sabe la causa para el cambio de curso del río, el cual se hubiera desviado hacia el Oeste para atravesar las rocas ígneas y metamórficas de Altos de Talinay hasta su actual desembocadura al mar.

Existen varios mecanismos que pueden provocar el cambio de curso de un río. Uno de ellos es el proceso de avulsión, en el cual el flujo abandona rápidamente su cauce para formar uno nuevo. Se ha estudiado este fenómeno en varios ríos del mundo (Wells y Dorr, 1987; Smith et al., 1989; Aslam y Blum, 1999; Assine, 2005) y se cree que los cambios están asociados a la topografía de la llanura de inundación (Jerolmack y Paola, 2007; Reitz et al., 2010; Reitz y Jerolmack, 2012). Cambios naturales en los ríos meándricos como el Limarí también están asociados a la carga de sedimentos que transportan, por lo que factores climáticos, actividades antrópicas y la agricultura pueden incidir en su geomorfología (Lagasse et al., 2004; Gordon y Meentemeyer, 2006; Cserkés-Nagy et al., 2010). Por su parte, la actividad tectónica también puede influir en la geometría y distribución de un río, ya sea induciendo cambios climáticos, modificando el ambiente sedimentario, afectando la tasa de erosión del río o creando una barrera física que obligue un cambio de curso de este (Brookfield, 1998; Li y Yang, 1998; Pan et al., 2007; Babault et al., 2012; Pan et al., 2016).

Dada la magnitud del supuesto cambio de curso del río Limarí, se propone que este fue resultado de la tectónica local. Desde los 11.9 Ma hasta los 2.1 Ma aproximadamente, han habido varios eventos de alzamiento local o generalizado en la zona de estudio. Se cree que el sector más elevado del basamento fue formado por fallas inversas durante alguno de estos eventos y que luego bloqueó el paso del río hacia la bahía, obligándolo a desviar su camino hacia el Oeste y aprovechar las discontinuidades de los Altos de Talinay para erosionar su camino hacia el mar. Heinze (2003) ha encontrado y modelado algunas fallas inversas en el área de estudio (Figura 7-1), las cuales se concentran principalmente en los Altos de Talinay, pero también están presentes en la cobertura sedimentaria. De todas las fallas, la que pudiera haber provocado el alzamiento localizado en el basamento es aquella ubicada en Cordón Colorado. Sin embargo, también es posible que la falla causante esté cubierta y no haya dejado evidencia en la capa sedimentaria superior, o que simplemente no se haya encontrado en terreno.

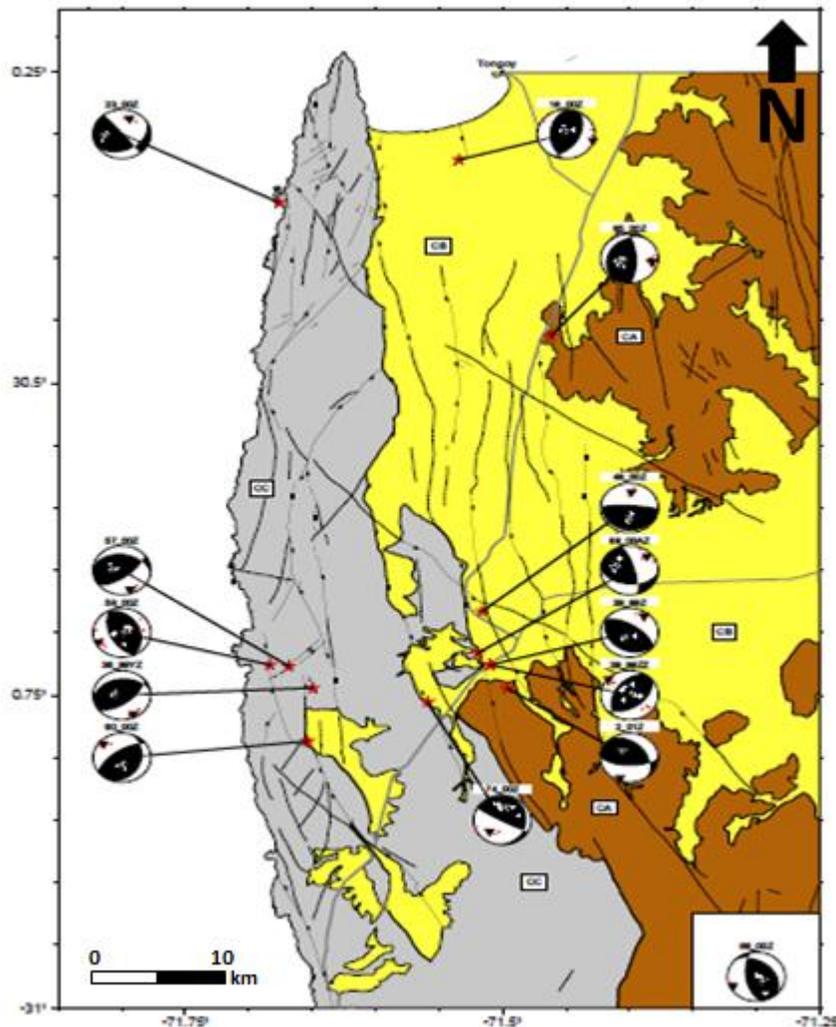


Figura 7-1: Mapa de las fallas inversas ubicadas en el sector de estudio, encontradas y modeladas por Heinze (2003). Modificado de Heinze (2003).

En estricto rigor, los datos químicos recopilados no son comparables entre sí porque las muestras fueron recolectadas en años diferentes, y la concentración de sales en un mismo punto puede variar bastante en el tiempo. Sin embargo, considerando el posible error asociado, se puede tener una idea del comportamiento químico de los diferentes sectores del área de estudio.

La información química del sector de estudio permite definir, en cada cuenca, tres dominios principales según la ubicación de las muestras: la cabecera, el sector medio y el sector costero. Se tiene tanto en las cuencas costeras como en el río Limarí un enriquecimiento de iones hacia la costa, en el sentido del flujo, quizás por el mayor tiempo de interacción agua/roca al que están sujetas las aguas. En términos generales, para dominios equivalentes, se cumple que los puntos de control de la cuenca del río Limarí tienen mayores concentraciones de iones que los puntos de Quebrada Seca y Quebrada Pachingo. A pesar de esto, entre el sector medio y la desembocadura del río, se encuentra una anomalía en la muestra ACT, ubicada a la altura de Quebrada Seca. Dicha muestra tiene mayor concentraciones de iones que la muestra AB (la más cercana a la desembocadura), y además es muy similar químicamente a las muestras

Qs2 y Qs3, ambas ubicadas en Quebrada Seca. Lo anterior podría sugerir una posible conexión subterránea entre la cuenca de Quebrada Seca y el río Limarí. Por otro lado, los perfiles topográficos muestran que el punto más elevado del basamento no coincide con la divisoria de aguas, por lo que dependiendo de los espesores saturados, la cuenca subterránea y la cuenca hidrográfica difieren entre sí. Es decir, el agua de precipitación sobre el sector más elevado de la topografía puede infiltrar dentro de la cuenca del río Limarí o puede escurrir superficialmente hasta finalmente infiltrar en la cuenca de Quebrada Seca. Dicho esto, se tiene que la muestra Qs3 está ubicada al sur del sector más elevado del basamento, en la cuenca del río Limarí. Por lo tanto, el flujo de agua entre Qs3 y ACT no indica realmente una conexión entre las dos cuencas, sino que más bien responde a la verdadera geometría de la cuenca subterránea de río. Por su parte, la muestra Qs2 está ubicada al norte del sector más elevado del basamento, en la cuenca de Quebrada Seca. No obstante, el basamento tiene prácticamente la misma elevación de la topografía en este sector, impidiendo cualquier flujo de agua entre Qs2 y ACT. Siendo así, la similitud química entre estas muestras se debe únicamente a los sedimentos que albergan el agua subterránea.

Los niveles estáticos entre Quebrada Seca y el río Limarí son relativamente someros y, a grandes rasgos, siguen la topografía. Además, se observa que los niveles estáticos varían bastante en cortas distancias, como resultado de la heterogeneidad del relleno sedimentario y/o por el bombeo de las aguas subterráneas en el sector para fines agrícolas. Se ha observado que tanto en Quebrada Seca como en la cuenca del río Limarí hay niveles estáticos inferiores a la elevación del basamento y que de existir un flujo entre ambas cuencas, este sería menor.

Según los datos de niveles estático con los que se cuenta y la geometría del basamento, es posible suponer que las cuencas costeras presentan una difícil conexión con la cuenca del río Limarí. Para corroborar esta afirmación, es necesario tener información de la geología en profundidad tanto en Quebrada Seca y Quebrada Pachingo, como en la cuenca del río Limarí, para determinar la existencia de capas impermeables que puedan controlar el comportamiento efectivo del flujo subterráneo.

8 Conclusiones

A partir del mapa de elevación de basamento, elaborado con datos gravimétricos medidos el año 2016, fue posible reconocer la geometría del basamento rocoso, la cual presenta depocentros de hasta 700 m.b.n.m en Quebrada Pachingo y en el río Limarí, separados entre sí por una zona alzada del basamento que supera los 50 m.s.n.m, la cual está ubicada en Quebrada Seca. Con los perfiles creados a partir de la topografía y del basamento, se ha determinado que la divisoria de aguas no coincide con el sector más elevado del basamento. Siendo así, en el área de estudio se tiene una cuenca hidrográfica y una cuenca hidrogeológica diferentes.

Se ha recopilado datos de niveles estáticos medidos durante invierno de 2014, verano de 2005 y durante la década de los 80, estos últimos desde estaciones de monitoreo de la DGA. A pesar del posible error asociado al comparar datos de diferentes años, se ha observado que tanto en Quebrada Seca como en la cuenca del río Limarí existen niveles estáticos inferiores a la elevación del basamento. Los demás puntos de niveles

estáticos están situados entremedio. No se cuenta con información geológica en profundidad, así que no se puede corroborar la posible existencia de capas impermeables o acuíferos confinados que afecten el comportamiento del flujo subterráneo.

Los datos químicos recopilados, al igual que los datos de niveles estáticos, fueron muestreados en años diferentes y analizados en distintos laboratorios. Por lo anterior, se debe tener en cuenta los posibles errores asociados a su uso. Se ha observado, tanto para la cuenca costera como para el río Limarí, un aumento en la concentración de iones hacia la costa, debido al mayor tiempo de interacción del agua de recarga con los sedimentos. Además, se ha observado que las muestras ubicadas en la cuenca del río Limarí son más enriquecidas en calcio, sulfato y bicarbonato que las muestras de Quebrada Pachingo y Quebrada Seca. La misma tendencia se ha observado para el sodio en las muestras ubicadas en las cabeceras, mientras que hacia el sector costero la cuenca de Quebrada Pachingo se ve más enriquecida en este catión.

A partir de los datos químicos también se ha podido determinar la similitud química entre la muestra ACT, ubicada en la cuenca del río Limarí, y las muestras Qs2 y Qs3, ubicadas en Quebrada Seca. Esta relación quiebra la tendencia observada de un aumento continuo en la concentración de iones hacia la desembocadura. Según los perfiles topográficos, las muestras Qs3 y ACT están ubicadas en la cuenca hidrogeológica del río Limarí y por eso compartirían características químicas. No obstante, la muestra Qs2 está aislada de las anteriores gracias al sector alzado del basamento. De este modo, no habría un flujo subterráneo entre Qs2 y ACT que pudiera justificar la similitud química entre ambos. Se cree que esta coincidencia química se debe principalmente a la composición de los sedimentos.

Se concluye que hay una difícil conexión hidráulica entre las cuencas costeras estudiadas y la cuenca asociada al río Limarí, la cual ha de ser corroborada con la estratigrafía del sector, para identificar posibles capas impermeables o acuíferos confinados que puedan incidir en el comportamiento del flujo subterráneo.

A partir de la información litológica, estructural y geodinámica del sector de estudio, se plantea que durante el mioceno el río Limarí desembocaba hacia el norte directamente en la bahía y que adquirió su configuración actual debido a la acción de fallas inversas, las cuales serían responsables por el alzamiento del basamento en Quebrada Seca por sobre los 50 m.s.n.m.

9 Recomendaciones

Con el fin de abordar la problemática de la sequía en la IV Región, se recomienda llevar a cabo una campaña de muestreo de aguas subterráneas en Quebrada Pachingo, Quebrada Seca y en el sector de la cuenca del río Limarí cercano a las dos anteriores. De este modo se obtendrán datos químicos temporalmente representativos de la situación de cada acuífero, reduciendo la incertidumbre de los resultados.

Por otra parte, dada la escasez de información acerca de las cuencas costeras de la bahía de Tongoy, se recomienda la perforación de pozos a lo largo y ancho de esta y también en el sector colindante con la cuenca del río Limarí. Sería de gran utilidad

disponer de más datos de bombeo, columnas estratigráficas y mediciones de niveles estáticos para una administración sustentable de estos nuevos acuíferos.

10 Bibliografía

ARAVENA, S., 1997. Hidrogeología y evaluación del riesgo de intrusión salina en las cuencas costeras del sector de Tongoy. Memoria, Depto. De Geología, Universidad de Chile, Santiago, 116 pp.

ASLAN, A., BLUM, D., 1999, Contrasting styles of Holocene avulsion, Texas Gulf coastal plain, USA, in Smith, N.D., and Rogers, J., eds., Fluvial sedimentology VI: International Association of Sedimentologists Special Publication 28: Oxford, U.K., Blackwell Publishing Ltd., p. 193–209

ASSINE, M.L., 2005, River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil: Geomorphology, v. 70, p. 357–371

BABAULT, J., DRIESSCHE, J.V.D., TEIXELL, A., 2012. Longitudinal to transverse drainage network evolution in the High Atlas (Morocco): the role of tectonics. Tectonics 31, 1-15.

BENADO, D. E., 2000. Estructuras y estratigrafía básica de terrazas marinas en sector costero de Altos de Talinay y Bahía de Tongoy: Implicancia neotectónica. Memoria, Universidad de Chile, Santiago, 78 pp.

BORGEL, R. 1961. El interfluvio Elqui-Limarí. Descripción morfométrica y morfográfica del sector litoral. Instituto de Geografía, Universidad de Chile, Santiago de Chile.

BRUGGEN, J. 1950. Fundamentos de la Geología de Chile. Imprenta Instituto Geográfico Militar, Santiago de Chile

BROOKFIELD, M.E., 1998. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: rivers draining southwards. Geomorphology 22 (3), p. 285-312.

CUSTODIO, EMILIO: M. LLAMAS (directores de edición). 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.

CRITES, R., TCHOBANOGLIOUS, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Editorial McGraw-Hill. Bogotá (Colombia).

CSEKÉSZ-NAGY, Á., TÓTH, T., VAJK, Ö., SZTANÓ, O., 2010. Erosional scours and meander development in response to river engineering: middle Tisza region, Hungary. Proc. Geol. Assoc. 121, p. 238–247.

DGA: Dirección General de Aguas. CADE-IDEPE consultores en ingeniería, (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Limarí. Recuperado de www.sinia.cl

DGA: Dirección General de Aguas, (2008). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Limarí. Informe Técnico N° 94. S.D.T N° 268. Recuperado de www.dga.cl

EMPARAN, C., PINEDA, G., 2006. Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No.96, 85 p. 1 mapa escala 1:100.000., Santiago de Chile.

EMPARAN, C., 200X, Geología Área Ovalle-Peñablanca, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. XXX, XX p. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago de Chile.

GCF INGENIEROS, INNOVACHILE CORFO Subdirección de Entorno para la Innovación. (2015). Estudio geofísico e hidrogeológico en la cuenca del río Limarí. Informe Final. Documento interno.

GORDON, E., MEENTEMEYER, R.K., 2006. Effects of dam operation and land use on stream channel morphology and riparian vegetation. *Geomorphology* 82, p. 412–429.

HEINZE, B., 2003. Active Intraplate Faulting in the Forearc of North Central Chile (30°–31° S). Implications from Neotectonic Field Studies, GPS Data, and Elastic Dislocation Modeling. Scientific Technical Report, Geoforschungszentrum, Potsdam.

HERM, D., PASKOFF, R., STIEFEL, J., 1967. Première observations sur les alentours de la baie de Tongoy (Chili). *Bulletin de la Société Géologique de France* 7 série (8), p. 21–24.

HERM, D., 1969. Marines Pliozan und Pleistozan in nord- und mittel-Chile unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung der Mollusken-Faunen. *Zitteliana* 2, 1 – 159.

HIDROGESTIÓN S.A., 2016. Análisis y evaluación de los recursos hídricos subterráneos de los principales acuíferos costeros de la Región de Coquimbo. (Documento interno).

JEROLMACK, D.J., PAOLA, C., 2007, Complexity in a cellular model of river avulsion: *Geomorphology*, v. 91, p. 259–270.

JOFRÉ, E, 2011. Caracterización de la interacción agua superficial / agua subterránea poco profunda en la parte baja de la cuenca del río limarí, a través del uso de herramientas hidroquímicas e isotópicas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental. Dpto. de Ingeniería en Minas. Universidad de La Serena. Santiago, 154 pp.

LAGASSE, P.F., ZEVENBERGEN, L.W., SPITZ, W.J., THORNE, C.R., ASSOCIATES, A., COLLINS, F., 2004. Methodology for predicting channel migration, rivers. NCHRP Web-only Document 67 (Project 24–16).

LE ROUX, J.P., ELGUETA, S., 2000. Sedimentologic development of a late Oligocene-Miocene forearc embayment. Valdivia Basin Complex, southern Chile. *Sedimentary Geology* 130, p. 27–44.

LE ROUX, J.P., GÓMEZ, C.A., OLIVARES, D.M., MIDDLETON, H., 2005A. Determining the Neogene behavior of the Nazca plate by geohistory analysis. *Geology* 33, p. 165–168.

LE ROUX, J.P., GÓMEZ, C., VENEGAS, C., FENNER, J., MIDDLETON, H., MARCHANT, M., BUCHBINDER, B., FRASSINETTI, D., MARQUARDT, C., GREGORY-WODZICKI, K.M., LAVENU, A., 2005b. Neogene–Quaternary coastal and offshore sedimentation in north-central Chile: record of sea level changes and implications for Andean tectonism. *Journal of South American Earth Sciences* 19, p. 83– 98.

LE ROUX, J.P., OLIVARES, D.M., NIELSEN, S.N., SMITH, N.D., MIDDLETON, H., FENNER, J., ISHMAN, S.E., 2006. Bay sedimentation as controlled by regional crustal behaviour, local tectonics and eustatic sea-level changes: Coquimbo Formation (Miocene–Pliocene), Bay of Tongoy, central Chile. *Sedimentary Geology* 184, 133.

LI, Y.L., YANG, J.C., 1998. Tectonic geomorphology in the Hexi Corridor, north-west China. *Basin Res.* 10 (3), p. 345-352.

LÓPEZ, M. C., 1965. Estudio de los depósitos marinos de la Bahía de Tongoy. Memoria de Título. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago. 193 pp.

MARTÍNEZ, R., 1979. Hallazgo de foraminíferos miocénicos cerca de Puerto Aldea, Bahía de Tongoy, Provincia de Coquimbo, Chile. *Revista Geológica de Chile* 8, p. 65–78.

MARTÍNEZ, R., CARO, R., 1980. Microfósiles silíceos de las diatomitas de Tongoy, Provincia de Coquimbo, Chile: su significado biocronoestratigráfico, biocronológico, paleoecológico y paleogeográfico. *Revista Geológica de Chile* 10, p. 33–53.

MEINARDUS, H., 1961. Exploraciones Geofísicas en el Área de Tongoy. *Annales de Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile*, v. 18, p.206-215.

MOP: Ministerio de Obras Públicas. (2012). Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Coquimbo. Recuperado de www.dirplan.cl

NASA: United States National Aeronautics and Space Administration; METI: Ministry of Economy, Trade, and Industry, 2011, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2). Recuperado de <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

PAN, B.T., GAO, H.S., WU, G.Y., LI, J.J., LI, B.Y., YE, Y.G, 2007. Dating of erosion surface and terraces in the eastern Qilian Shan, northwest China. *Earth Surf. Process. Landforms* 32 (1), p. 143-154.

PAN, B.T., CHEN, D., HU, X., CAO, X. CHEN, J. MAO, J., 2016. Drainage evolution of the Heihe River in western Hexi Corridor, China, derived from sedimentary and magnetostratigraphic results. *Quaternary Science Reviews* 150, p. 250-263

PASKOFF, R., 1970. Recherches géomorphologiques dans le Chili semi-aride. Biscaye Freres, Bordeaux, 420 p.

PASKOFF, R., LEONARD, E., NOVOA, J., ORTLIEB, L., RADTKE, U., WEHMILLER, J., 1995. Field Meeting in the La Serena-Coquimbo Bay Area (Chile), Guidebook for a fieldtrip (Antofagasta-Iquique, 27-28 november 1995). Annual Meeting of IGCP Project 367. ORSTOM, Antofagasta, Chile, p. 69.

REITZ, M., JEROLMACK, D., AND SWENSON, J., 2010, Flooding and flow path selection on alluvial fans and deltas: Geophysical Research Letters, v. 37, L06401

REITZ, M.D., JEROLMACK, D.J., 2012, Experimental alluvial fan evolution: Channel dynamics, slope controls, and shoreline growth: Journal of Geophysical Research, v. 117, F02021

SAILLARD, M., HALL, S.R., AUDIN, L., FARBER, D.L., HÉRAIL, G., MARTINOD, J., REGARD, V., FINKEL, R.C., BONDOUX, F., 2009. Non-steady long-term uplift rates and Pleistocene marine terrace development along the Andean margin of Chile (31 S) inferred from ¹⁰Be dating. Earth and Planetary Science Letters 277, p. 50-63.

SAILLARD, M., RIOTTE, J., REGARD, V., VIOLETTE, A., HÉRAIL, G., AUDIN, L., RIQUELME, E., 2012 Beach ridges U-Th dating in Tongoy bay and tectonic implications for a peninsula-bay system, Chile. Journal of South American Earth Sciences 40, p. 77-84.

SMITH N.D., CROSS, T.A., DUFFICY, J.P., AND CLOUGH, S.R., 1989, Anatomy of an avulsion: Sedimentology, v. 36, p. 1–23

TAYLOR, G. C., 1947. The Tongoy Area. Informe inédito, Santiago de Chile.

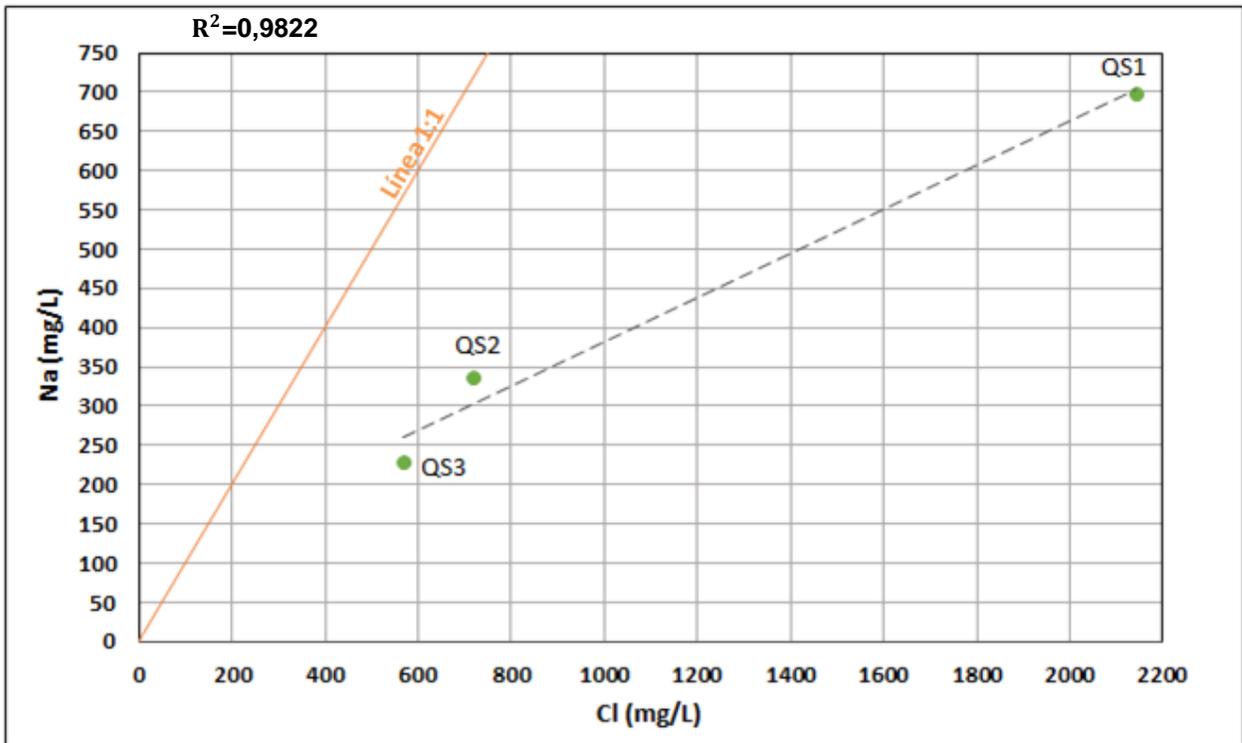
UCN: Universidad Católica del Norte. (2015). Fondo de Innovación para la Competitividad - Análisis y evaluación de los recursos hídricos subterráneos de los principales acuíferos costeros de la Región de Coquimbo. (Documento interno, resumen).

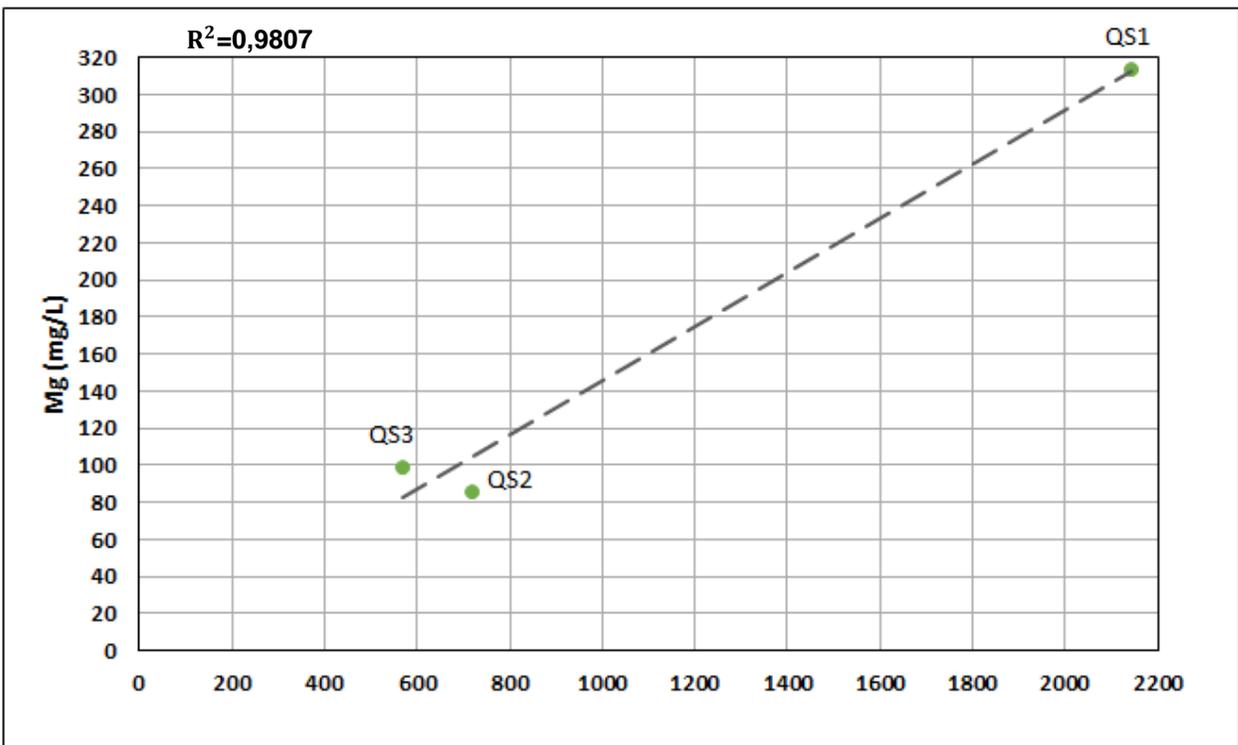
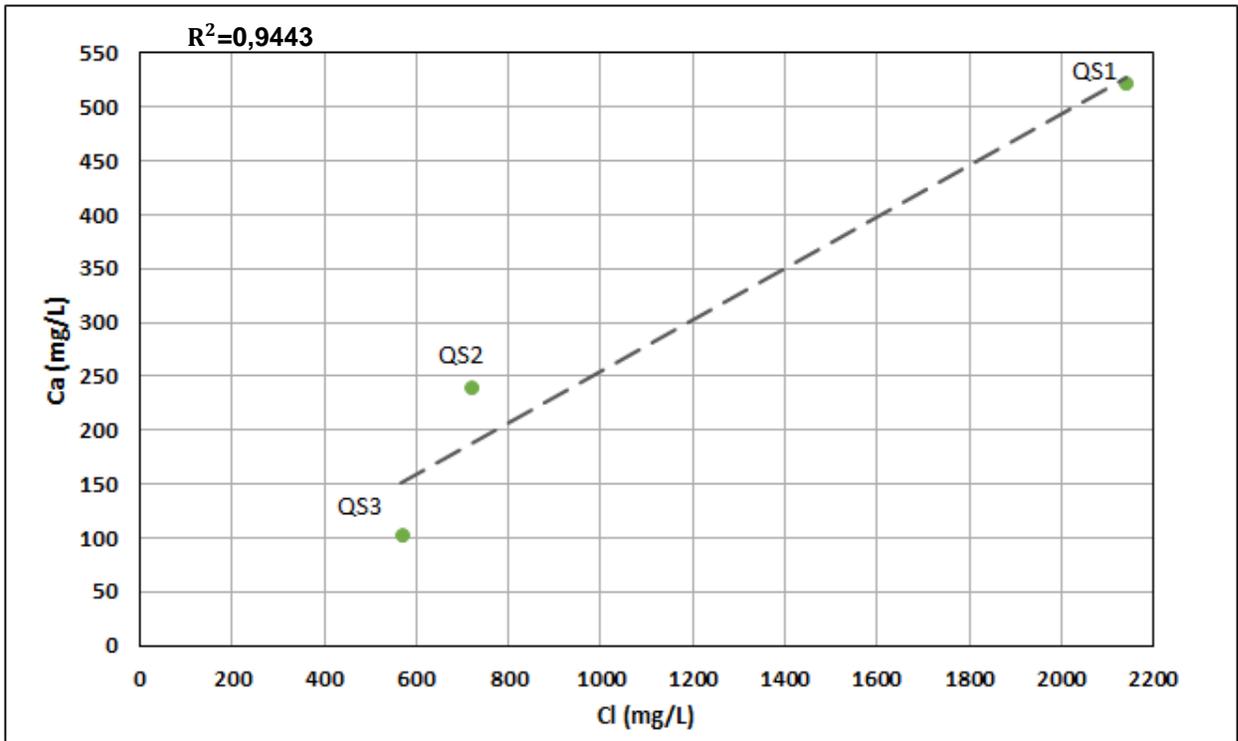
WELLS, N.A., DORR, J.A., 1987. Shifting of the Kosi River, northern India: Geology, v.15, p. 204–207

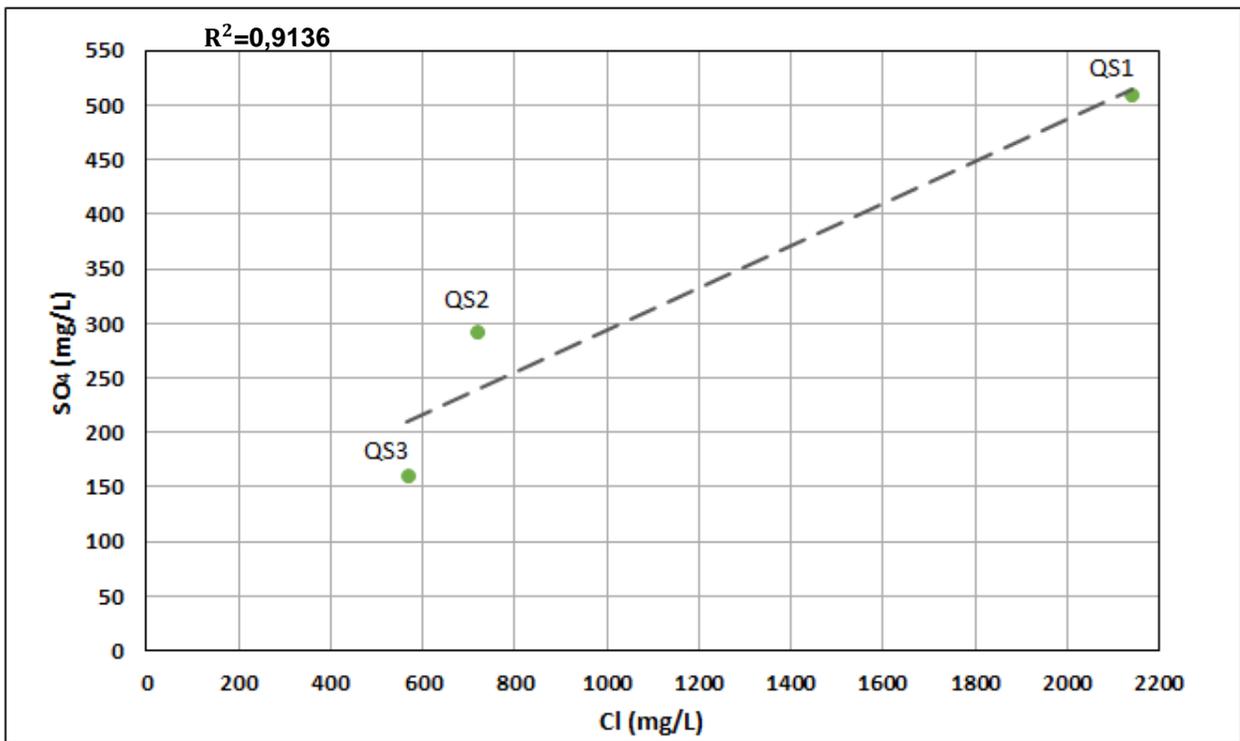
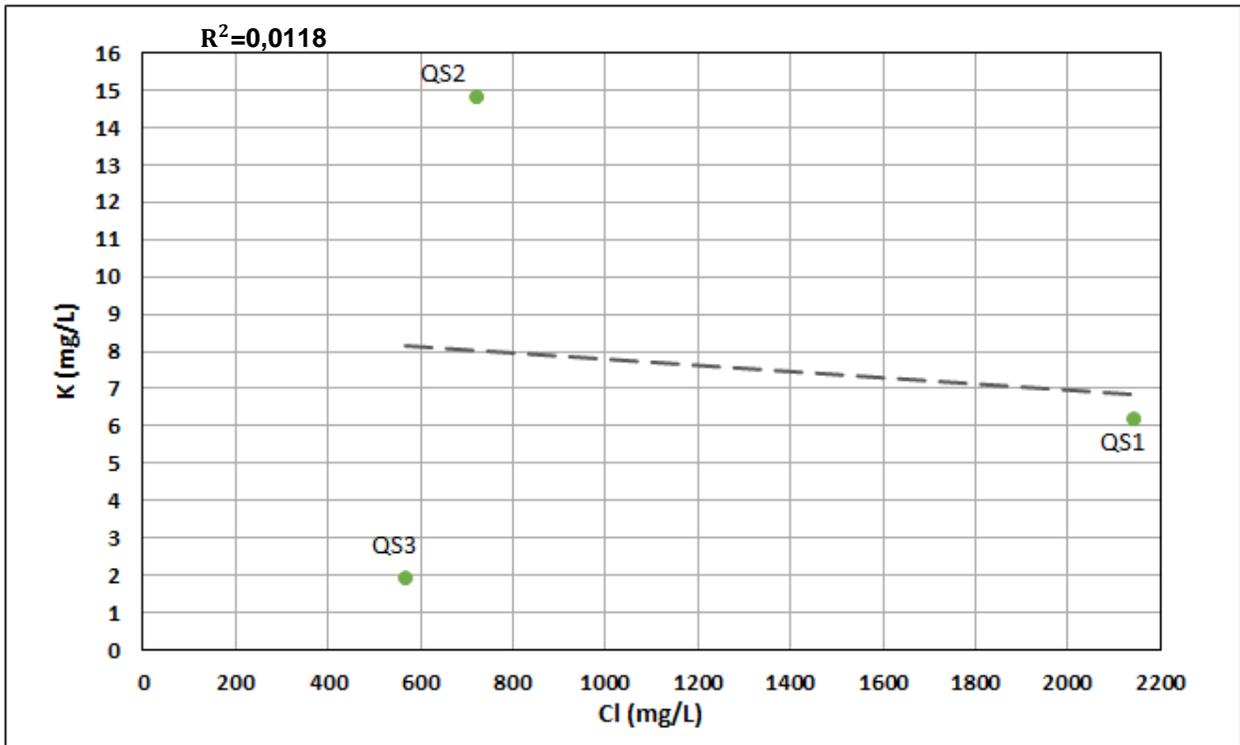
11 Anexos

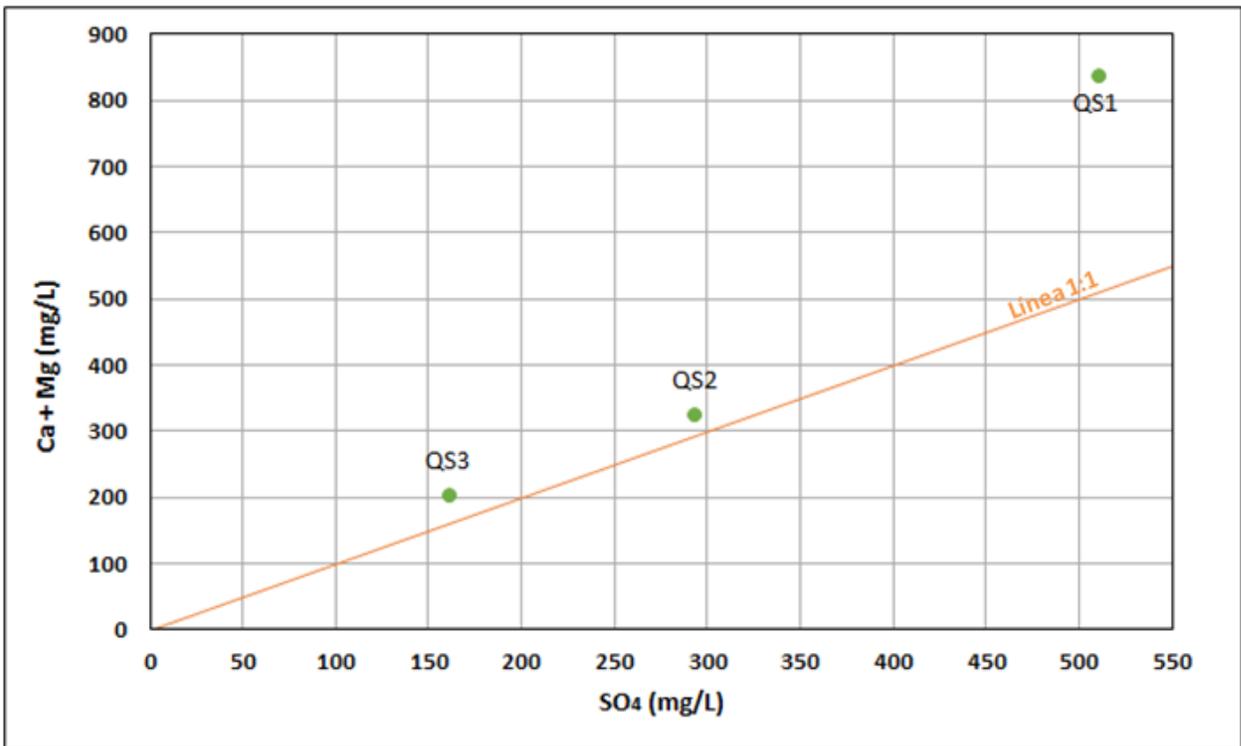
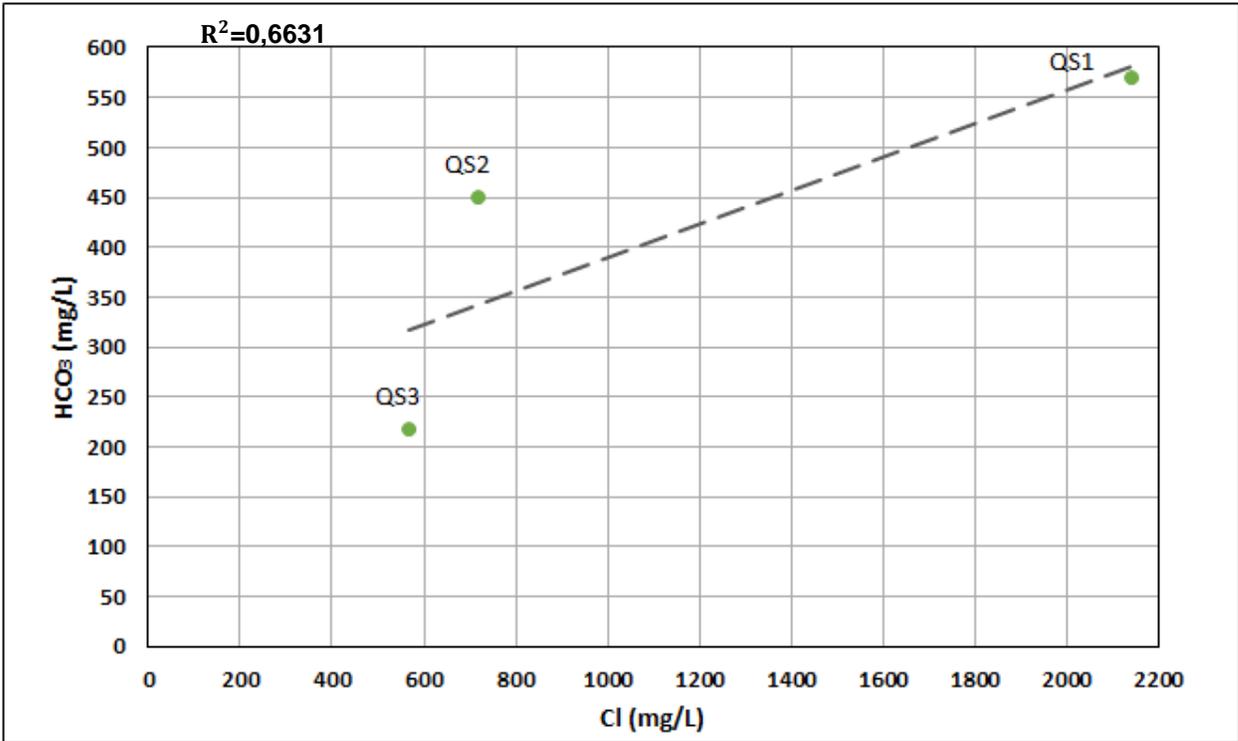
11.1 Anexo A: Gráficos binarios de las muestras químicas de Aravena (1997)

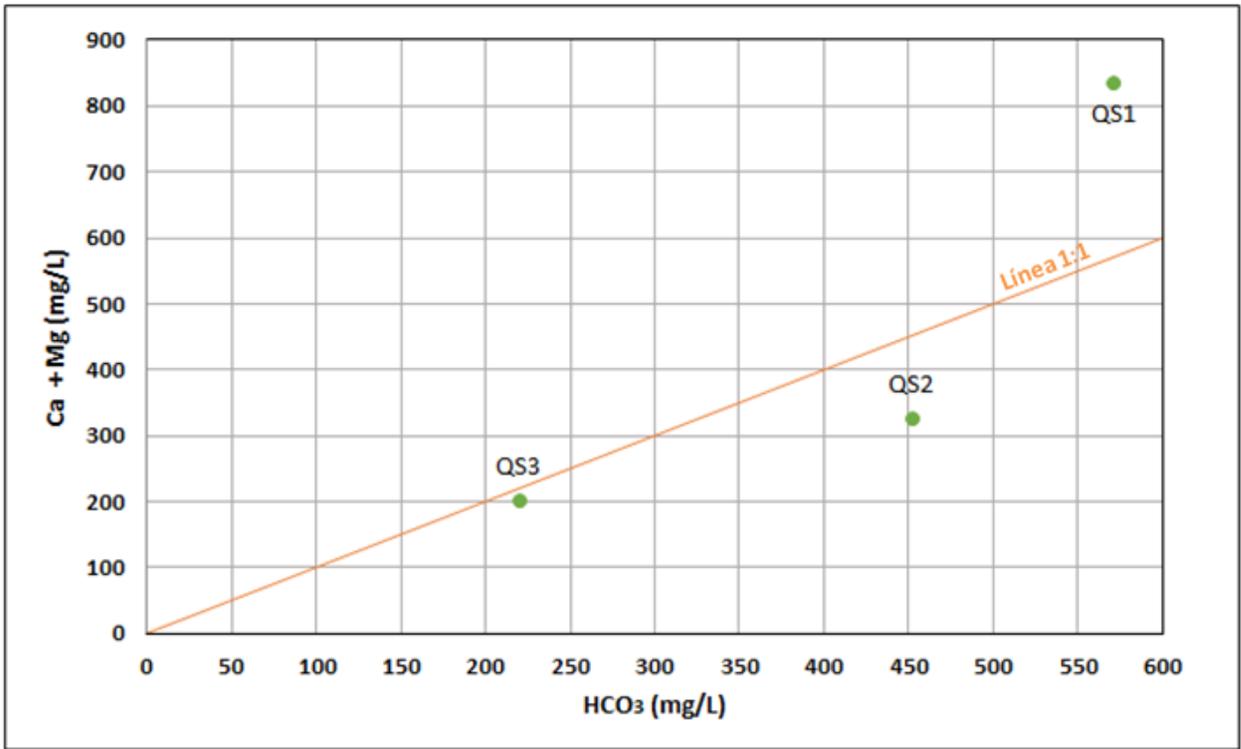
Gráficos binarios elaborados a partir de las muestras químicas Qs1, Qs2 y Qs3, ubicadas en Quebrada Seca (Aravena, 1997). La línea naranja corresponde a la línea de equimolaridad, mientras que la línea discontinua muestra el ajuste lineal entre las muestras.











11.2 Anexo B: Evolución temporal de las precipitaciones de las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca costera y en sus cercanías.

