

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DE SANTIAGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ABRAHAM ROBERTO SAN JUAN LÓPEZ

**PROFESOR GUÍA:
DOLORINDA DANIELE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CARLOS PARRAGUEZ DECKER
DIEGO MORATA CÉSPEDES**

SANTIAGO DE CHILE

2015

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DE SANTIAGO

En esta memoria se presentan los resultados hidrogeoquímicos para la Cuenca de Santiago utilizando la base de datos de la Dirección General de Aguas (DGA), disponible en forma pública en su sitio internet. La información seleccionada corresponde a los parámetros físico-químicos para los años 2001, 2006 y 2010 de las estaciones de aguas subterráneas ubicadas en la Cuenca de Santiago. A la vez, se han considerado datos de aguas superficiales para compararlas con las subterráneas.

Con el uso de diagramas Piper y Stiff, relaciones iónicas, análisis estadísticos y mapas de distribución, aplicados a los datos de aguas subterráneas, se han reconocido dos grupos de aguas diferentes desde el punto de vista composicional; el primero con menores concentraciones iónicas (conductividad: $< 800 \mu\text{s/cm}$) y de tipo SO_4^{2-} - HCO_3^- - Ca^{2+} y, el segundo, con mayores concentraciones (conductividad: $850\text{-}1900 \mu\text{s/cm}$) y de tipo SO_4^{2-} - Cl^- - Ca^{2+} . Además, existe una distribución espacial de los dos grupos: el primero corresponde a las estaciones ubicadas en el límite S y al E de la cuenca y, el segundo, agrupa los puntos de control situados en la zona centro y O, evidenciando un incremento de la concentración en el sentido general del flujo de las aguas subterráneas. Se observa una influencia en el quimismo asociada a la distancia al área de recarga principal, que es la Cordillera, y al recorrido por diferentes litologías en el relleno. En las áreas donde existen aguas recién infiltradas y/o el acuífero se encuentra confinado, se ubican las muestras del primer grupo.

Técnicas como el diagrama de Gibbs y las razones iónicas indican que la interacción con el relleno sedimentario y procesos de evaporación juegan un rol importante en la química de las aguas subterráneas y corroboran la presencia de dos grupos, en particular la razón $r\text{Na}/r\text{Cl}$ evidencia esta diferencia. Por otro lado, las mayores variaciones temporales de las concentraciones se dan en los iones de SO_4^{2-} , Cl^- y Ca^{2+} , en algunos casos, relacionado a actividad antrópica.

Con la utilización de gráficos de TSD versus los elementos mayores se observó que la concentración de la mayoría de éstos podría estar, en parte, influenciada por actividades antrópicas. Se identificaron valores anómalos asociados a posibles focos de contaminación relacionados a un ex vertedero, a pozos próximos a cementerios y a áreas agrícolas.

Comparando aguas superficiales y subterráneas se observa que su composición química es similar. Las pequeñas diferencias se deben a una mayor concentración de sulfatos y de elementos menores como arsénico y hierro, posiblemente relacionados a procesos naturales como disolución de yeso, presencia de yacimientos mineros y a contaminación antrópica.

Con el análisis realizado se puede concluir que la química de las aguas subterráneas se encuentra influenciada por la interacción con el relleno sedimentario y por procesos antrópicos, los que modifican las concentraciones de los componentes químicos.

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mi familia, a mis padres, Inés y Roberto, y a mis hermanos, Wilson y Natalia, ya que si no fuera por su incondicional apoyo y cariño durante todos estos años, no estaría en la situación en la que me encuentro ahora, terminando mi carrera. Muchas gracias a todos ellos, por el gran esfuerzo que han realizado en mi persona, siempre serán un gran ejemplo a seguir.

A mi profesora guía Linda Daniele, por su compromiso, motivación y paciencia en esta memoria, cualidades fundamentales que permitieron la realización de este trabajo. Le agradezco, en especial, estar siempre con la disposición a responder las numerosas dudas que se presentaron durante todos estos meses. También a los profesores Carlos Parraguez y Diego Morata por ser parte de mi comisión.

Al Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA) y, en especial, a Mauricio Muñoz que me permitieron el uso de nueva información generada por el proyecto de baja entalpia en este centro y que ha sido una ayuda en la interpretación de los datos y forma parte de los antecedentes presentados en esta memoria.

A mis amigos, los BerniLivers, por su compañía en estos años de carrera y que hicieron que estos años fueran una gran experiencia en mi vida. No olvidaré las innumerables veces con las que compartí con ustedes y espero seguir haciéndolo en el futuro. Y a todas las personas que me acompañaron en este largo camino y, que de una u otra forma, fueron claves para esta gran etapa que ya se finaliza.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Hipótesis de trabajo.....	2
1.4 Metodología de trabajo	3
2. ANTECEDENTES GENERALES.....	5
2.1 Ubicación y accesos	5
2.2 Antecedentes de trabajos previos.....	5
2.3 Clima.....	6
2.4 Geomorfología	8
2.5 Uso del suelo en la Cuenca de Santiago.....	11
3. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	13
3.1 Geología.....	13
3.1.1 Depósitos consolidados.....	13
3.1.2 Depósitos no consolidados	14
3.2 Aspectos hidrológicos e hidrogeológicos de la Cuenca de Santiago.....	17
3.2.1 Aguas superficiales	17
3.2.2 Acuífero de la Cuenca de Santiago.....	18
4. HIDROGEOQUÍMICA: Resultados y discusión	24
4.1 Recopilación bibliográfica.....	24
4.2 Clasificación de aguas y distribución espacial.....	26
4.2.1 Elementos mayores.....	26
4.2.2 Elementos trazas	28
4.2.3 pH y Temperatura.....	30
4.2.4 Conductividad eléctrica.....	32
4.3 Identificación de procesos hidrogeoquímicos	33
4.3.1 Análisis estadístico.....	33
4.3.2 Procesos de interacción agua-roca	40

4.4	Variación temporal.....	46
4.5	Elementos potencialmente contaminantes.....	48
4.5.1	Total de sólidos disueltos (TSD)	48
4.5.2	Índices de calidad.....	51
4.5.3	Potenciales focos de contaminación	55
4.6	Relación con aguas superficiales	59
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
5.1	Conclusiones.....	63
5.2	Recomendaciones.....	65
	Bibliografía.....	66
	Anexos	71

Índice de Figuras

FIGURA 1 MAPA DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. ARANEDA <i>ET AL.</i> (2010).....	5
FIGURA 2 PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN DE LOS AÑOS 2001, 2006 Y 2010. ESTACIÓN QUINTA NORMAL, DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL.....	7
FIGURA 3 PROMEDIO MENSUAL DE TEMPERATURA DE LOS AÑOS 2001, 2006 Y 2010. ESTACIÓN QUINTA NORMAL, DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL.....	7
FIGURA 4 UNIDADES MORFOESTRUCTURALES DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE. FOCK (2005).....	8
FIGURA 5 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS SEDIMENTOS QUE RELLENAN LA CUENCA DE SANTIAGO. MODIFICADO DE MUÑOZ <i>ET AL.</i> (2015).	9
FIGURA 6 MODELO GRAVIMÉTRICO DE LA PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO DEL ÁREA DE ESTUDIO, MEDIANTE LA INVERSIÓN DE UN MODELO 3D, ELABORADO POR YAÑEZ <i>ET AL.</i> (2015).	10
FIGURA 7 MAPA DE LOS USOS DE LOS SUELOS DE LA CUENCA DE SANTIAGO, CIREN; CORFO (2006-2007). COORDENADAS UTM HUSO 19S.	12
FIGURA 8 MARCO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO, ELABORADO EN BASE DE LOS TRABAJOS DE SELLÉS Y GANA (2001) Y WALL <i>ET AL.</i> (1999). COORDENADAS UTM HUSO 19S.	16
FIGURA 9 PRINCIPALES CURSOS FLUVIALES QUE RECORREN EL ÁREA DE ESTUDIO DE LA CUENCA DE SANTIAGO. COORDENADAS UTM HUSO 19S.	18
FIGURA 10 UBICACIÓN DE LOS PERFILES CC', DD' Y FF' ELABORADOS POR EL PROYECTO DE BAJA ENTALPÍA (CEGA), JUNTO CON LA POSICIÓN DE LOS SONDAJES UTILIZADOS COMO FUENTE DE DATOS. COORDENADAS UTM HUSO 19S.....	20
FIGURA 11 PERFILES DEL RELLENO SEDIMENTARIO DE LA CUENCA DE SANTIAGO ELABORADOS POR EL PROYECTO DE BAJA ENTALPÍA (CEGA). CC': SECTOR COLINA Y LAMPA. DD': SECTOR DE SANTIAGO CENTRO. FF': SECTOR DE SANTIAGO SUR. SUS UBICACIONES SE ILUSTRAN EN LA FIGURA 10.....	21
FIGURA 12 NIVEL ESTÁTICO DE LA CUENCA DE SANTIAGO. MUÑOZ <i>ET AL.</i> (2015).....	22
FIGURA 13 MAPA DE VULNERABILIDAD DEL ÁREA DE ESTUDIO. MODIFICADO DE IRIARTE (2003). COORDENADAS UTM HUSO 19S.....	23
FIGURA 14 UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES ANALIZADAS DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DE SANTIAGO. COORDENADAS UTM HUSO 19S.	25
FIGURA 15 DIAGRAMAS DE PIPER PARA LOS DATOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS AÑOS 2001 Y 2006.....	27

FIGURA 16 DIAGRAMAS DE STIFF PARA LAS ESTACIONES SUBTERRÁNEAS DE ÁREA DE ESTUDIO, AÑO 2006. COORDENADAS UTM HUSO 19S.....	28
FIGURA 17 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE FE (PPM) EN EL ÁREA DE ESTUDIO, AÑO 2006. COORDENADAS UTM HUSO 19S.	29
FIGURA 18 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE PO_4^{3-} (PPM) EN EL ÁREA DE ESTUDIO, AÑO 2006. COORDENADAS UTM HUSO 19S.....	30
FIGURA 19 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PH, AÑO 2006. COORDENADAS UTM HUSO 19S.	31
FIGURA 20 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA, AÑO 2006. COORDENADAS UTM HUSO 19S.	32
FIGURA 21 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, AÑO 2006. COORDENADAS UTM HUSO 19S.	33
FIGURA 22 DIAGRAMAS DE CAJA DE LOS ELEMENTOS MAYORES, EL PH Y LA TEMPERATURA.....	35
FIGURA 23 DENDROGRAMAS PARA ELEMENTOS MAYORES Y PH DE LOS DATOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA LOS TRES AÑOS ESTUDIADOS.....	39
FIGURA 24 DENDROGRAMA PARA LAS ESTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, DATOS AÑO 2006.....	40
FIGURA 25 DIAGRAMAS DE GIBBS QUE ILUSTRAN EL MECANISMO CONTROLADOR DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.	41
FIGURA 26 RELACIÓN DE LA RAZÓN IÓNICA R_{Ca}/R_{Mg} VERSUS EL ANIÓN R_{Cl}	42
FIGURA 27 RELACIÓN DE LA RAZÓN IÓNICA R_{Na}/R_{Cl} VERSUS EL ANIÓN R_{Cl}	43
FIGURA 28 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA RAZÓN R_{Na}/R_{Cl} EN EL ÁREA DE ESTUDIO. DATOS CORRESPONDIENTES AL AÑO 2006. COORDENADAS UTM HUSO 19S.	44
FIGURA 29 MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TIPO DE AGUA IDENTIFICADA JUNTO CON LOS PRINCIPALES DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS DE LA CUENCA DE SANTIAGO Y LAS DIRECCIONES PREFERENCIALES DEL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. COORDENADAS UTM HUSO 19S.	45
FIGURA 30 VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE IONES (MEQ/L) EN CINCO AÑOS DE CUATRO ESTACIONES DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.	47
FIGURA 31 RELACIÓN DE LOS ELEMENTOS MAYORES VERSUS LOS TSD.	50
FIGURA 32 DIAGRAMA DE SALINIDAD USSL PARA LA CLASIFICACIÓN DE AGUA PARA REGADÍO.....	52

FIGURA 33 EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS QUE REGISTRAN LAS ESTACIONES DE LA CUENCA, SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE AGUAS PARA RIEGO DE LA USSL.....	53
FIGURA 34 SECTOR DONDE SE UBICA EL POZO P5, LA LÍNEA SEGMENTADA DE COLOR AZUL CORRESPONDE AL PERÍMETRO DEL EX VERTEDERO DEL CERRO RENCA.	56
FIGURA 35 ZONA DE CONTAMINACIÓN INFLUENCIADO POR UN VERTEDERO, CURVAS REPRESENTAN EL CONTENIDO DE CLORURO EN MG/L. OBTENIDO DE PORRAS Y NIETO (1985).....	57
FIGURA 36 SECTORES DONDE SE UBICAN LOS POZOS P10 Y P9, LAS LÍNEAS SEGMENTADAS DE COLOR AZUL CORRESPONDEN AL PERÍMETRO DE LOS CEMENTERIOS DE LA ZONA.	58
FIGURA 37 RELACIÓN DE ALGUNOS IONES CON EL CLORURO SEGÚN LOS DATOS DE LAS ESTACIONES DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS.	61
FIGURA 38 DIAGRAMA DE SALINIDAD USSL PARA LA CLASIFICACIÓN DE AGUA PARA REGADÍO. DATOS DE ESTACIONES DE AGUAS SUPERFICIALES DEL AÑO 2006. SE DESTACAN LAS ESTACIONES UBICADAS EN LOS RÍOS MAPOCHO Y MAIPO.	62

Índice de Tablas

TABLA 1 ESTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES SELECCIONADAS PARA EL ESTUDIO, JUNTO CON LA ABREVIATURA ASIGNADA A CADA UNA.	24
TABLA 2 INFORMACIÓN SELECCIONADA PARA REALIZAR EL ANÁLISIS.....	26
TABLA 3 MATRICES DE CORRELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS AÑOS ESTUDIADOS.....	37
TABLA 4 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS BASADO EN LOS TSD (DAVIS Y DE WIEST, 1966).....	51
TABLA 5 COMPARACIÓN DE DATOS CON LA NORMA CHILENA NCH. 409/OF.84	54
TABLA 6 COMPARACIÓN DE DATOS CON LA NORMA CHILENA NCH 1333/OF. 78	55

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El rápido crecimiento demográfico, la industrialización y la incontrolada urbanización, son algunos de los factores que influyen en el desarrollo de un país, lo que comporta un incremento en la demanda de recursos naturales. En este sentido, los recursos hídricos representan un recurso fundamental que sustenta el crecimiento y, si no es bien gestionado, llega a limitar el desarrollo. La relación desarrollo-demanda hídrica es directa y este hecho aumenta la vulnerabilidad de los recursos hídricos ya que, en general, quedan expuestos a un mayor deterioro tanto en su calidad como en cantidad. Junto a todo lo anterior, los escenarios previstos por el panel intergubernamental del cambio climático (IPCC, 2014) señalan que la disponibilidad de agua será cada vez más limitada. Es por esto que se hace necesaria la realización de estudios que mejoren el conocimiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, y ayuden a planificar de una manera más eficiente la gestión de estos recursos, los cuales son importantes tanto para la vida como para el desarrollo y el bienestar social.

Chile está experimentando un rápido crecimiento y Santiago es el motor de éste. La ciudad es la capital y el principal núcleo urbano del país, concentrando más de un tercio de la población total de la nación y cerca del 80% de la actividad industrial. La región presenta suelos fértiles, ricos en materia orgánica y de buena textura, por lo cual la agricultura también es un sector económico a considerar. Desde la perspectiva climática la zona presenta un clima semiárido, con precipitaciones anuales de 300 mm/año (DGAC, *online* 2014). En este contexto y, recordando los escenarios esbozados por el IPCC (2014), se hace evidente que el agua es vital para su sustento y su crecimiento.

La existencia de literatura científica que aborde la situación de los recursos hídricos de la zona de estudio es limitada. Si bien existen estudios hidrogeológicos realizados en los sectores norte y poniente de la Cuenca de Santiago (Falcon y Matutano, 2000; Iriarte, 2003) los cuales relacionan la presencia de contaminantes con las áreas urbanas, sumado a informes de planificación del ministerio de obras públicas y estudios realizados por la CONAMA (1999), no existen trabajos específicamente orientados a conocer las características geoquímicas de estos recursos.

Teniendo presente estos antecedentes, la finalidad del proyecto es realizar una caracterización hidrogeoquímica de la Cuenca de Santiago, a partir de datos puestos a disposición por la Dirección General de Aguas (DGA) para su uso público. Mediante esta información se trabajará para intentar identificar las propiedades fisicoquímicas de las aguas y los procesos hidrogeoquímicos que controlan el quimismo de las aguas de la zona. Se determinarán las propiedades químicas en el espacio y en el tiempo, se analizará la presencia de posibles contaminantes y se determinará, en los casos posibles, su origen.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El principal objetivo de esta memoria es realizar una caracterización y evaluación hidrogeoquímica de los recursos hídricos de la Cuenca de Santiago, estableciendo los procesos físico-químicos que controlan la composición de las aguas subterráneas de la zona, mediante datos generados y proporcionados por la Dirección General de Agua (DGA), disponibles en el sitio web www.dga.cl.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. Determinar los tipos de aguas presentes en la cuenca y analizar la distribución de los parámetros químicos estudiados.
- b. Determinar los principales procesos hidrogeoquímicos de las aguas en la Cuenca de Santiago como: procesos de interacción agua-roca, mezclas de aguas (superficiales-subterráneas) y presencia de elementos contaminantes (contaminación antrópica/natural).
- c. Identificar el comportamiento y evolución de los parámetros analizados (variación de los datos y presencia de valores atípicos).
- d. Realizar una caracterización espacio-temporal de la cuenca para identificar posibles variaciones de concentración de ciertos elementos.
- e. Analizar la presencia de focos potenciales de contaminación para determinar si existen sectores o áreas específicas que excedan la concentración límite establecida por las normas nacionales.

1.3 Hipótesis de trabajo

En el área de estudio se concentra gran parte de las actividades industriales y de la población de Chile, por lo cual es probable que los recursos hídricos reflejen en mayor o menor medida la presión a la cual están sometidos.

La identificación de procesos hidrogeoquímicos y su distribución espacial en el área de estudio permitirán interpretar la composición química de las muestras analizadas y, si es el caso, identificar áreas donde las diferentes actividades antrópicas que se están llevando a cabo afecten a las concentraciones iónicas. En sectores donde el impacto del desarrollo es menor se espera identificar los procesos más naturales que se dan en la Cuenca de Santiago, como la interacción de las aguas con la litología por la cual pasan.

1.4 Metodología de trabajo

La metodología usada para la realización de esta memoria comprendió las siguientes etapas:

- **Recopilación bibliográfica**

Corresponde a la recopilación de los datos disponibles en los reportes de calidad de aguas de la Dirección General de Aguas para la identificación de las estaciones ubicadas en la zona de estudio y, para la selección de los años y parámetros que se utilizaron en el análisis. Las técnicas de medición utilizadas en los análisis químicos de aguas se muestran en el Anexo A. También, en esta etapa se realizó la investigación de los antecedentes relativos a la información geológica e hidrogeológica del lugar.

- **Identificación de procesos hidrogeoquímicos**

Durante esta etapa, en primer lugar, se clasificaron los tipos de aguas presentes y se observó la distribución de los iones mayoritarios en la zona de estudio, mediante la elaboración de diagramas de facies hidrogeoquímicas como Piper y Stiff, con los datos de aguas subterráneas disponibles. También, se analizaron las características físico-químicas que presentan las aguas subterráneas correspondientes al pH, la temperatura y la conductividad eléctrica. Los datos empleados fueron tratados con herramienta GIS para evaluar su distribución en el territorio.

Luego, con los datos recopilados, se realizó un análisis exploratorio de datos y un análisis multivariante, con el objetivo de estudiar el comportamiento de los parámetros en evaluación. Con el fin de identificar la distribución de los valores de cada parámetro y la correlación entre ellos, se han elaborado diagramas de caja (*box plots*), matrices de correlación y dendrogramas.

Posteriormente, con el uso de gráficos y técnicas hidrogeoquímicas (diagrama de Gibbs y razones iónicas), se realizó un análisis para tratar de identificar los principales procesos hidrogeoquímicos que ocurren en las aguas subterráneas de la Cuenca de Santiago analizando, a la vez, la distribución de los tipos de agua y su relación con las litologías del área de estudio.

- **Análisis espacio-temporal**

A partir de los años seleccionados en el análisis, junto a dos adicionales, se realizó un estudio de la variabilidad de los parámetros en el tiempo en cada una de las estaciones de monitoreo de aguas subterráneas, para identificar cambios y/o variaciones en las concentraciones de los iones estudiados.

- **Determinación de contaminantes**

Para esta etapa se comenzó analizando la calidad de las aguas de la zona mediante el uso de diferentes técnicas e índices de calidad. También, se compararon los datos con la actual norma chilena (NCh 409 y NCh 1333). Mediante la observación de las concentraciones atípicas de determinados iones, se identificaron potenciales focos de contaminación en el área de estudio, así como las posibles causas antrópicas o naturales relacionadas con esa situación.

- **Relación con aguas superficiales**

Finalmente, se comparó la información obtenida de las aguas subterráneas con los datos de las estaciones de las superficiales, con el objetivo de identificar procesos de interacción entre ellas y similitudes o diferencias en sus características químicas.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Ubicación y accesos

La Cuenca de Santiago se encuentra en la Región Metropolitana de Santiago, entre los 33°10' y 33°51' Latitud Sur y los 70°28' y 71°05' Longitud Oeste (Figura 1), con una superficie de, aproximadamente, 2440 km². Presenta una alta densidad de población (470 habitantes/km² aprox.), por lo que es una de las unidades geomorfológicas más habitadas de Chile. El acceso desde el Norte y Sur se hace principalmente a través de la carretera Panamericana (ruta 5), mientras que desde la costa se realiza mediante a las rutas 68 y 78, a través de éstas se logra llegar a las vías urbanas y rurales de la zona.

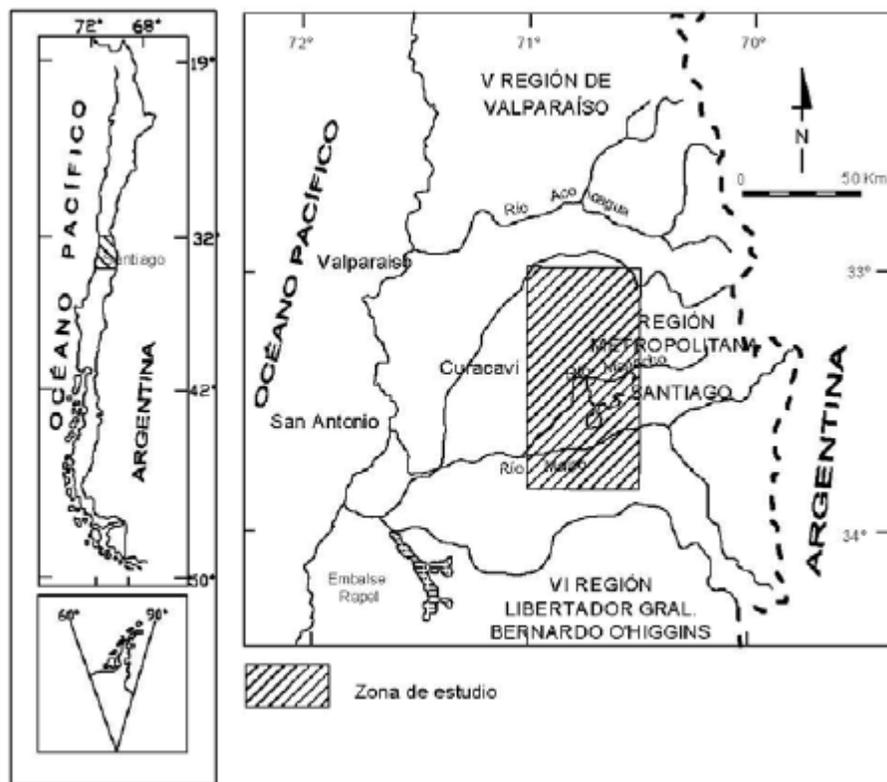


Figura 1 Mapa de ubicación del área de estudio. Araneda *et al.* (2010).

2.2 Antecedentes de trabajos previos

El primer estudio hidrogeológico integral de la Cuenca de Santiago fue realizado por Falcon *et al.* (1970), en éste se hace una estimación aproximada de los factores que condicionan la existencia, escurrimiento, almacenamiento y calidad química del agua subterránea de la zona. Estos autores realizaron el análisis del relleno de la cuenca, identificando las unidades que lo componen y sus respectivas

permeabilidades, junto con ello, presentaron un modelo aproximado del basamento. Con respecto a las características químicas de las aguas subterráneas, señalan que es bastante constante y que los sectores de menor salinidad se ubican en la parte norte de la cuenca.

Falcón y Matutano (2000) realizaron un análisis de la contaminación de nitratos en las aguas subterráneas del sector poniente de la Cuenca de Santiago mediante el estudio de 4 pozos situados en las comunas de Maipú, Cerrillos y Estación Central. En el estudio se determinó la estratigrafía del lugar donde se reconocieron depósitos ignimbríticos, aluviales y fluviales, y se indicó que el acuífero se encontraba contaminado por nitratos debido a que las muestras de aguas de los pozos presentaron valores de concentración sobre el límite que establece la Norma Nch 409 que es de 10 mg/l.

Morales (2002) elaboró un estudio que formó parte del proyecto llamado Modelo de Simulación Hidrológico Operacional-Cuencas Río Maipo-Mapocho para la DGA. En este trabajo se estimó la geometría y las características hidráulicas de los principales acuíferos presentes en el relleno sedimentario de la cuenca del río Maipo, llegando a definir 3 unidades hidrogeológicas caracterizadas por diferentes potencias y permeabilidades. Además, realizó un análisis en las unidades geomorfológicas de la superficie, con el objetivo de identificar cuál de ellas presentaba un buen potencial para constituir acuíferos, concluyendo que la segunda unidad (desde la superficie hacia abajo) es la que presenta las características hidráulicas adecuadas.

Posteriormente, Iriarte (2003) desarrolló un estudio en el sector norte de la ciudad de Santiago con el objetivo de determinar el impacto de la recarga urbana, producto de aguas derivadas de infraestructura civil y actividad humana a las aguas subterráneas. Se concluye que la recarga urbana influye en el nivel de aguas, en la dirección de flujo y en la calidad de las aguas subterráneas de la zona de estudio. También, elaboró un mapa para zonificar la vulnerabilidad de los acuíferos del área de la Cuenca de Santiago.

Finalmente, Araneda *et al.* (2010), ocupando estaciones de gravedad, elaboran un modelo estructural preliminar de la Cuenca de Santiago y lo relacionan con la hidrogeología del sector. Con respecto a la hidrogeología, calcula el volumen de aguas subterráneas embalsadas (31,000 millones de m³ aproximadamente) y el espesor del acuífero saturado, donde señala que los mayores espesores (sobre los 200 m) se encuentran en zonas en el que el basamento impermeable es más profundo.

2.3 Clima

El clima en esta región del país se define como templado mediterráneo con estación seca prolongada, caracterizado por presentar una estación seca extensa y un invierno acentuado, cuyas temperaturas máximas y mínimas pueden superar los

30°C en verano y llegar a los 0°C en invierno, respectivamente. La temperatura media anual registrada en Santiago es de 14,5°C.

Las precipitaciones se concentran principalmente en invierno y están controladas por el relieve de la zona. En la Cuenca de Santiago la precipitación media anual es de 300 mm/año (Estación Quinta Normal), en sectores más elevados (San José de Maipo), donde nacen la mayoría de los cursos de agua que llegan a la Depresión Central, el valor aumenta, llegando a los 536 mm/año. En las Figuras 2 y 3 se puede observar el promedio mensual de las precipitaciones y temperaturas de los años seleccionados a estudiar.

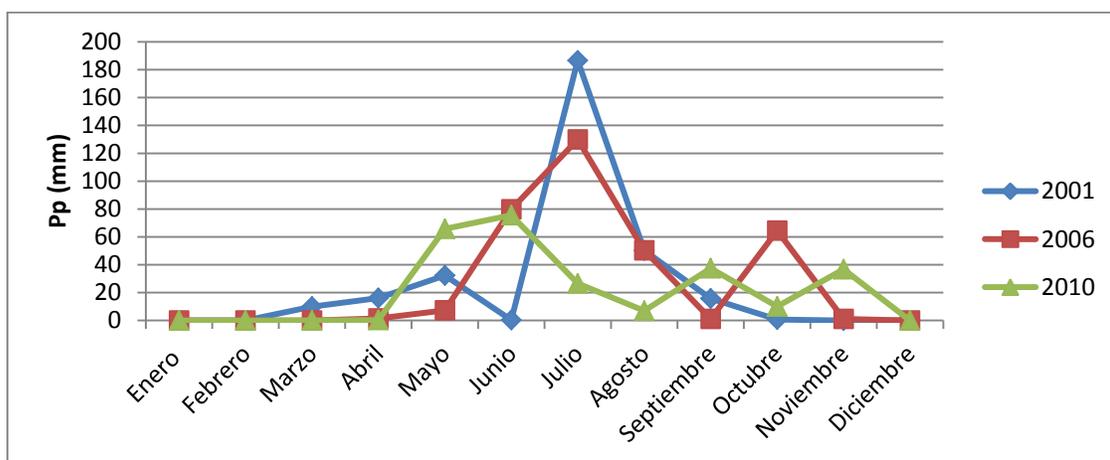


Figura 2 Promedio mensual de precipitación de los años 2001, 2006 y 2010. Estación Quinta Normal, Dirección General de Aeronáutica Civil.

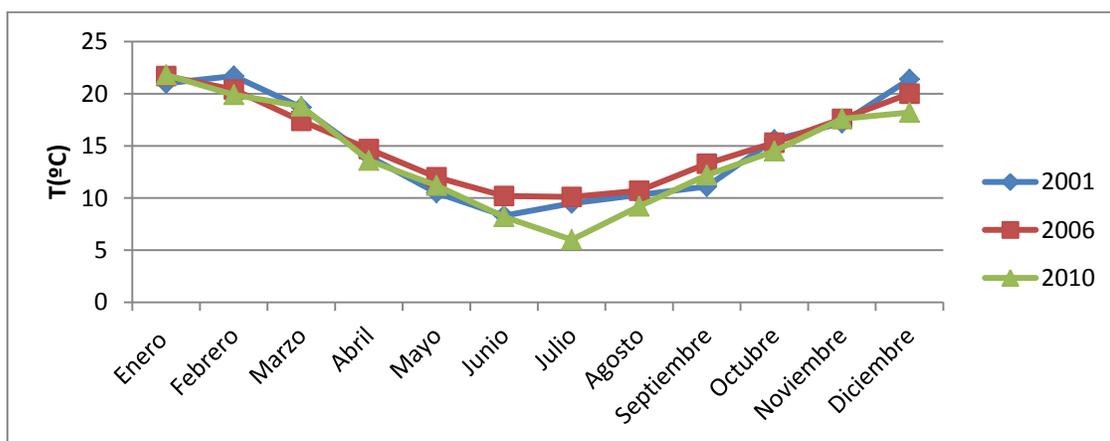


Figura 3 Promedio mensual de temperatura de los años 2001, 2006 y 2010. Estación Quinta Normal, Dirección General de Aeronáutica Civil.

2.4 Geomorfología

En el sector de la Región Metropolitana, al igual que gran parte de la zona central de Chile, se reconocen tres grandes unidades morfoestructurales: la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y la Cordillera Principal (Figura 4). A continuación se señalan las principales características de cada una de ellas:

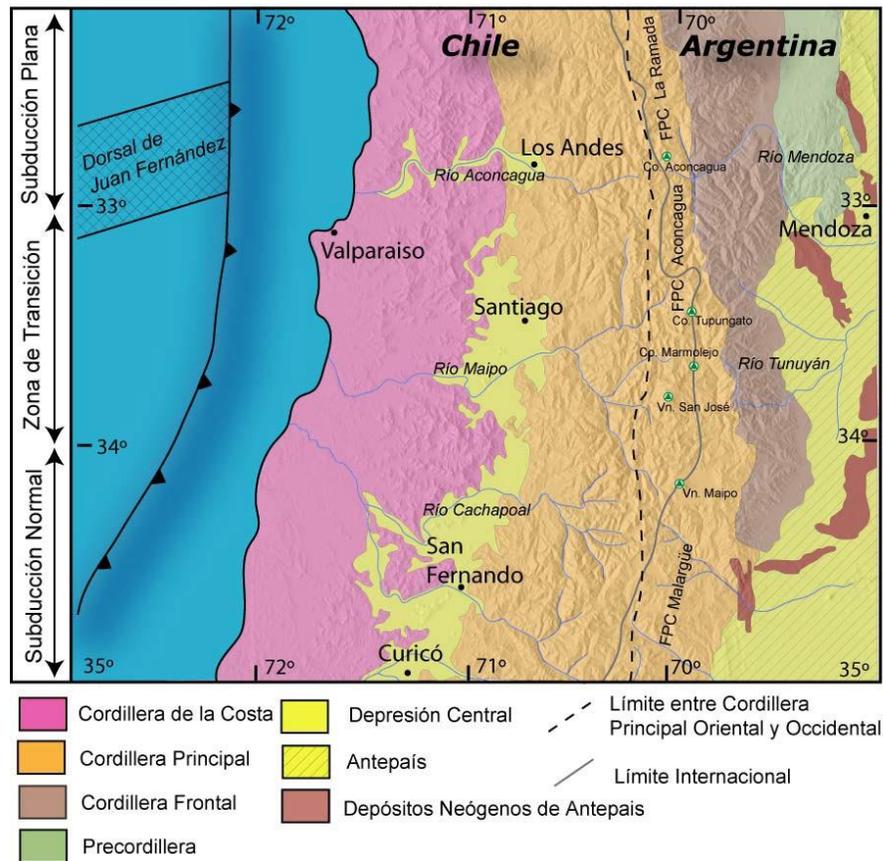


Figura 4 Unidades morfoestructurales de la zona central de Chile. Fock (2005).

Cordillera de la Costa: cordón rocoso que se compone, principalmente, de secuencias volcánicas del Cretácico Inferior, siendo la más antigua la formación Lo Prado. Es de menor altura que la Cordillera Principal, alcanzando los 2000 m en el sector oriental del cordón.

Depresión Intermedia: Corresponde a un relleno sedimentario del Plioceno-Cuaternario, el cual está limitado al norte por el cordón de Chacabuco, al sur por el Cordón de Paine, al este por la Cordillera Principal y al oeste por la Cordillera de la Costa. Se puede dividir en dos zonas, una pequeña al norte la cual limita al sur con el Cordón del Manzano y otra de mayor extensión que termina en el cordón de Paine, la que corresponde al área de estudio.

La Cuenca de Santiago, en particular, se encuentra constituida por sedimentos aluviales, fluviales, lacustres, coluviales y laháricos (Figura 5). También se distinguen depósitos piroclásticos correspondiente a cenizas vítreas las cuales se concentran en la franja occidental de la cuenca. El abanico aluvial correspondiente al río Maipo es el más importante de la zona ya que cubre casi el 50% del área. Está formado principalmente por depósitos de gravas y gravas arenosas fluviales. Con una menor extensión se tienen los abanicos aluviales del río Mapocho y de los esteros Colina, Lampa y Angostura.

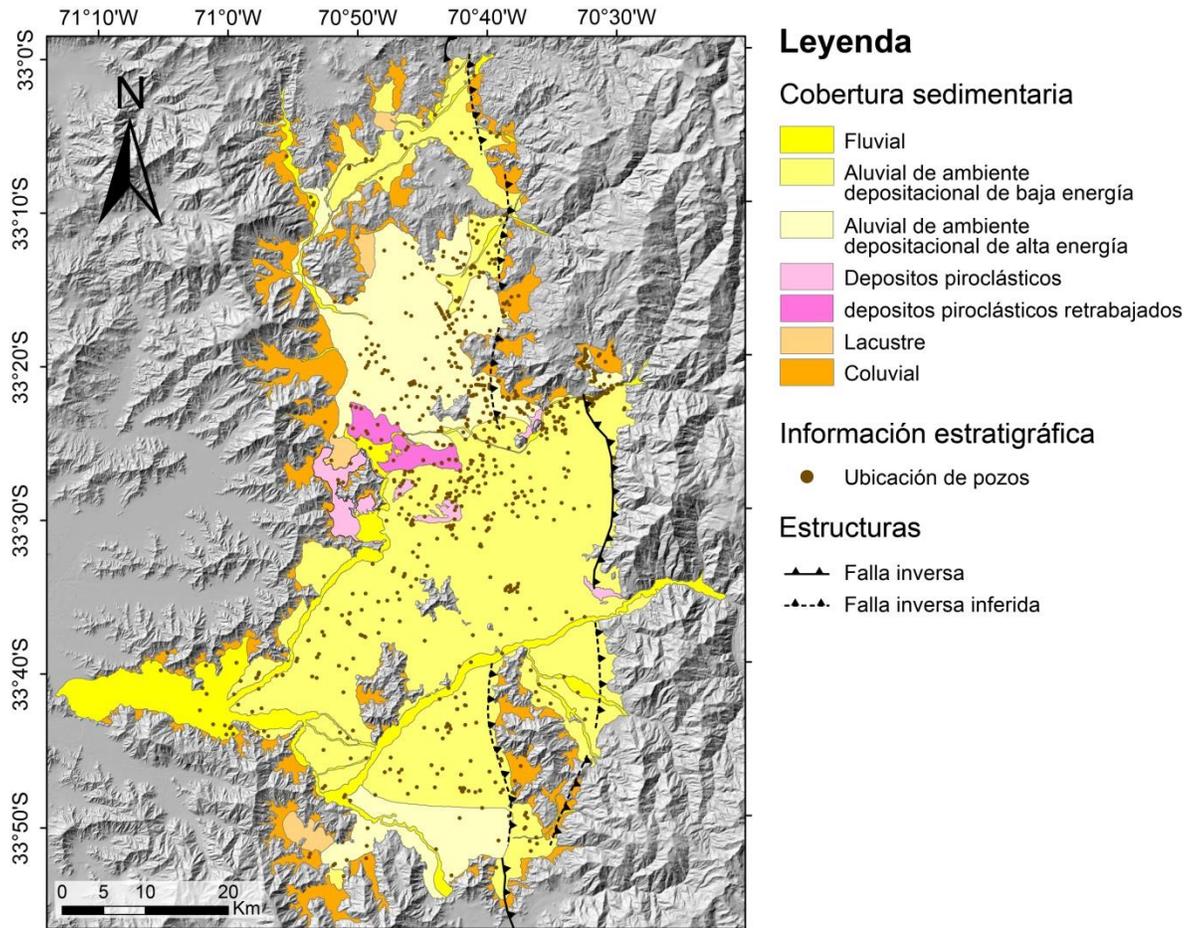


Figura 5 Mapa de distribución de los sedimentos que rellenan la Cuenca de Santiago. Modificado de Muñoz *et al.* (2015).

Diversos estudios se han realizado para tener una estimación del espesor del relleno de la Cuenca de Santiago (Falcon *et al.* 1970; Araneda *et al.* 2010; Yañez *et al.* 2015). Yañez *et al.* (2015) elaboraron un modelo gravimétrico de la profundidad del basamento (Figura 6), el cual indica la presencia de una cuenca parcialmente somera, con una profundidad promedio de 250 m, y tres subcuencas con espesores que superan los 500 m, pero que no representan más del 30% de la Cuenca de Santiago. Además, distinguieron tres dominios característicos en la profundidad del basamento, un dominio en el norte en las localidades de Lampa, Batuco y Colina, donde la profundidad de la cuenca no supera los 150 m, otro dominio en la zona centro-oriental, en los sectores de Pirque, Chicureo y la ciudad de Santiago, con

promedio de 300 m de profundidad y un dominio en la zona sur-poniente, en las localidades de Peñaflor, Paine, Talagante, Buin y Melipilla, las que presentan en promedio una profundidad que supera los 350 m.

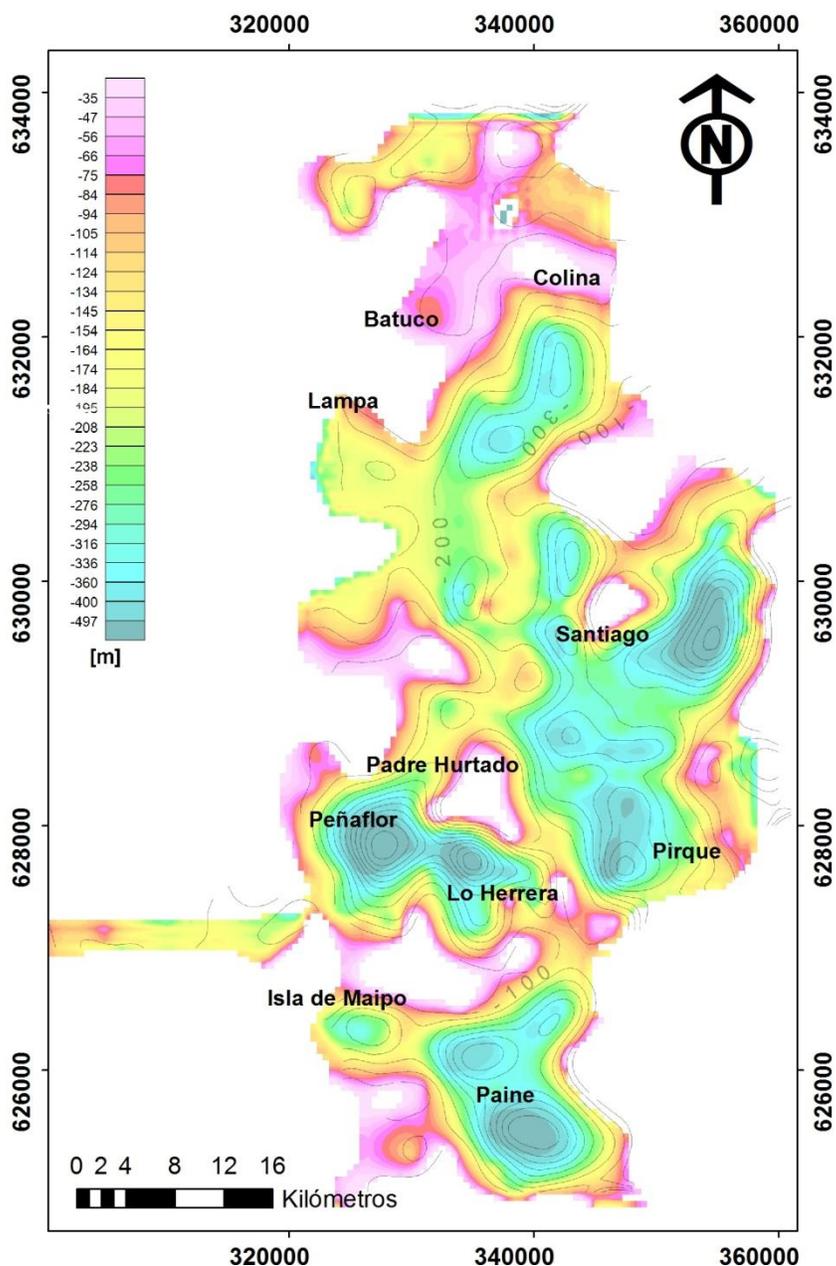


Figura 6 Modelo gravimétrico de la profundidad del basamento del área de estudio, mediante la inversión de un modelo 3D. Modificado de Yañez *et al.* (2015).

Cordillera Principal: cordón rocoso de mayor altura que la Cordillera de la Costa (sobre 6000 m), se ubica principalmente al lado oriental de la cuenca y corresponde a la unidad morfológica de la región con mayor extensión. Su parte oeste se encuentra formada por secuencias cenozoicas que presentan una importante deformación en el flanco occidental, donde se exponen pliegues asimétricos y en

algunos sectores, como en el cerro San Francisco, la secuencia se ve afectada con fallas inversas de vergencia occidental. Cabe señalar que de esta zona proceden la mayor parte de los sedimentos que rellenan la Depresión Intermedia.

2.5 Uso del suelo en la Cuenca de Santiago

Los suelos de la Cuenca de Santiago se han visto expuestos a diversas modificaciones en las últimas décadas, entre las que se encuentran la pérdida por erosión, cambio de uso y sellado por actividad urbana, y la contaminación.

La Región Metropolitana ha sufrido un gran aumento en su población, en el periodo 1992-2002 el crecimiento demográfico ha sido de un 15,3% (INE, 2003). Esto ha conllevado una extensión horizontal de la ciudad de Santiago, principalmente en las zonas sur y sur poniente, ampliando, considerablemente el número de hectáreas urbanizadas a través de los años (SINIA, *online* 2014). Entre las consecuencias de este fenómeno se encuentran la degradación del suelo y la reducción de la cobertura vegetal y biodiversidad (CONAF, 2000). Junto a esto, las áreas donde se realiza actividad agrícola se ven cada vez más reducidas.

En la Figura 7 se observa que la concentración de las zonas urbanas se encuentra en el sector oriente de la zona de estudio, donde se ubica la ciudad de Santiago. Los terrenos destinados a la agricultura se emplazan, principalmente, al suroeste y norte de la cuenca, en zonas donde, en su mayoría, el nivel freático de las aguas subterráneas se encuentra a menos de 20 metros de profundidad. Finalmente, los sectores donde se ubican praderas, matorrales y bosques son generalmente en los límites de la cuenca, cerca de las laderas de los cerros pertenecientes a la Cordillera Principal y la Cordillera de la Costa.

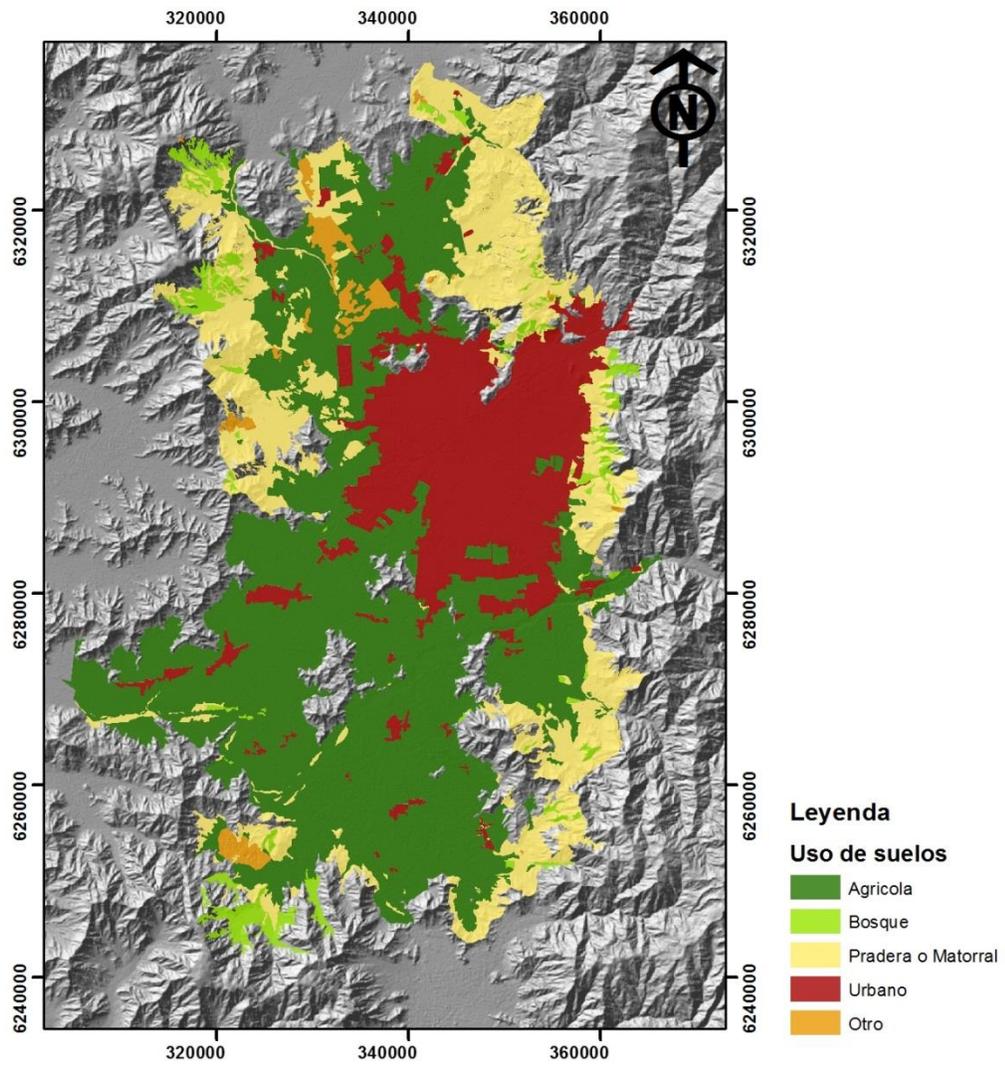


Figura 7 Mapa de los usos de los suelos de la Cuenca de Santiago, CIREN; CORFO (2006-2007).
 Coordenadas UTM Huso 19S.

3. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

3.1 Geología

El mapa diseñado (Figura 8) se ha elaborado en base a los trabajos realizados por Sellés y Gana (2001) y Wall *et al.*, (1999).

3.1.1 Depósitos consolidados

3.1.1.1 Rocas Estratificadas

Formación Lo Prado (Barresiano-Hauteriviano): Secuencia volcánica con intercalaciones sedimentarias marinas, que aflora en la Cordillera de la Costa. Subyace concordantemente a la Formación Veta Negra y se encuentra intruida por plutones cuyo contacto genera extensas aureolas de metamorfismo de contacto y alteración hidrotermal (Sellés y Gana, 2001).

Formación Veta Negra (Barremiano?-Aptiano?) (Thomas, 1958): Secuencia de lavas, subvolcánica y piroclástica, de composición intermedia a ácida, con escasas intercalaciones sedimentarias. Se dispone concordantemente sobre la formación Lo Prado y subyace en discordancia angular a la Formación Las Chilcas (Sellés y Gana, 2001).

Formación Las Chilcas (Aptiano?-Albiano) (Thomas, 1958): Secuencia volcánica y sedimentaria continental, de aproximadamente 3.000 m de espesor. Se dispone en discordancia sobre la Formación Veta Negra, subyace en discordancia de erosión a la Formación Lo Valle (Wall *et al.*, 1999) y, en las laderas del Cerro Challay, a la Formación Abanico (Sellés, 2000a).

Formación Lo Valle (Maastrichtiano-Paleoceno?) (Thomas, 1958): Secuencia piroclástica de composición andesítica a riolítica con intercalaciones de lavas y rocas sedimentarias continentales las cuales llegan a los 1800 m de espesor. Cubre en discordancia de erosión a la Formación Las Chilcas, y subyace a la Formación Abanico.

Estratos del Cordón Los Ratones (Cretácico Superior?-Eoceno?): Unidad informal, compuesta por una secuencia volcánica y subvolcánica, con intercalaciones sedimentarias continentales. Aflora en el cordón de cerros del mismo nombre, al sur del río Maipo y en pequeños cerros islas al sur de esta localidad. Se infiere una relación de discordancia con la suprayacente Formación Abanico (Sellés *et al.*, 2000).

Formación Abanico (Eoceno Superior?-Mioceno Inferior): Secuencia volcánica andesítica a basáltica, con intercalaciones piroclásticas y sedimentarias continentales, con un espesor total de ca. 2000 m. (Wall *et al.*, 1999). Aflora principalmente al este de la cuenca y presenta dos niveles estratigráficos. La franja occidental de la Formación Abanico se encontraría, ya sea en contacto por falla con

la Formación lo Valle, o concordante presentando un hiatus de 35 Ma. (Gana *et al.*, 1997). En el sector de Angostura de Paine, los depósitos de la Formación Abanico se disponen en discordancia de erosión sobre las rocas de la Formación Las Chilcas (Sellés *et al.*, 2000).

3.1.1.2 Rocas Intrusivas

Intrusivos hipabisales andesíticos y dacíticos (Mioceno Inferior-Mioceno Medio): “Stocks” y diques andesíticos y dacíticos de anfíbola de hasta 4 km² de superficie, que intruyen a la formación Lo Valle en cerro Las Tórtolas, a los Estratos del Cordón Los Ratones y al nivel inferior de la Formación Abanico (cerro Grande de Chacabuco y cerro Manquehue respectivamente).

Intrusivos hipabisales Intermedios-Básicos (Eoceno Superior-Mioceno Inferior): “Stocks”, filones manto, cuellos volcánicos y diques, que forman cuerpos de tamaño inferior a 8 km² y afloran, preferentemente, en el sector centro-oriental de la zona cubierta por el mapa. Intruyen a la Formación Abanico, los Estratos del Cordón los Ratones y la Formación Las Chilcas en la localidad de Angostura. Alguno de estos intrusivos son referidos como Unidad Intrusiva II (Thiele, 1980).

Intrusivos hipabisales dacíticos (Paleoceno-Eoceno): Conjunto de “stocks” y domos de composición dacítica que intruyen a las formaciones Las Chilcas, Lo Valle, a los plutones cretácicos en el lado norte del área de estudio (Wall *et al.*, 1999) y a los Estratos del Cordón Los Ratones por el lado sur-este (Sellés *et al.*, 2000).

Intrusivos Cretácicos: Corresponden a diferentes unidades ubicadas, en su mayoría, en la Cordillera de la Costa, las que van de intrusivos hipabisales a plutones. Composicionalmente presentan una gran variación, desde gabros a granodioritas. Entre éstos se encuentran los granitoides del Cordón Caleu-Alto de Lipangué y el Plutón del Cordón Mallarauco.

3.1.2 Depósitos no consolidados

Depósitos de remoción en masa (Pleistoceno-Holoceno): Depósitos procedentes de flujos de detritos, flujos de barro, deslizamientos, desprendimientos de bloques y hundimiento (Wall *et al.*, 1999). En general son macizos, matriz soportado, polimícticos y mal seleccionados. Se ubican en su mayoría a los pies de la Cordillera Principal y en laderas de altas pendientes (Sellés y Gana, 2001).

Depósitos fluviales (Pleistoceno-Holoceno): Sedimentos no consolidados, relacionados a cursos fluviales activos. Constituidos principalmente por gravas y gravas arenosas clasto-soportadas, con matriz arenosa. Incluyen lentes arenosas con estratificación plana-horizontal y cruzada, junto a escasos niveles de limos, finamente laminados, depositados durante los periodos de bajo caudal (Wall *et al.*, 1999).

Depósitos fluviales antiguos (Pleistoceno-Holoceno): Sedimentos no consolidados, genéticamente vinculados a cursos fluviales abandonados, constituidos por ripio, gravas, gravas arenosas, arenas y limos. Dentro de los depósitos fluviales antiguos se reconocen dos niveles principales: depósitos fluviales aterrizados y depósitos ubicados a poca altura del cauce actual donde son inundados en tiempos de crecida (Wall *et al.*, 1999).

Depósitos coluviales (Pleistoceno Superior-Holoceno): Sedimentos pobremente consolidados o no consolidados, ubicados en las faldas y al pie de los cerros, a la salida de quebradas y en pequeños valles intermontados. Formados, principalmente, por clastos y bloques mal seleccionados y escasa matriz de arena y grava (Sellés y Gana, 2001).

Depósitos aluviales de piedemonte (Pleistoceno Superior-Holoceno): Sedimentos no consolidados, ubicados en la desembocadura de quebradas mayores, formando abanicos aluviales de estructura radial. Se encuentran constituidos por una alternancia de depósitos de remoción en masa, depósitos fluviales y mantos de crecida, que se interdigitan, y en parte se propagan sobre los depósitos aluviales y la Ignimbrita Pudahuel (Selles y Gana, 2001).

Depósitos aluviales (Pleistoceno Medio-Pleistoceno Superior): Sedimentos estratificados y moderadamente consolidados, que rellenan gran parte de la Cuenca de Santiago. Forman parte de extensos abanicos aluviales coalescentes de 2 a 10 km de radio, con suave pendiente hacia el oeste, provenientes de las hoyas hidrográficas principales ubicadas en la Cordillera Principal. Hacia sus cabeceras, los depósitos se interdigitan con depósitos coluviales y aluviales de piedemonte, mientras que hacia el oeste, gradan a depósitos lacustre (Wall *et al.*, 1999). Dentro de los diferentes sistemas que se logran reconocer, el más extenso corresponde a los depósitos aluviales del río Maipo (abanico de 10 km de radio).

Depósitos lacustres (Pleistoceno-Holoceno): Sedimentos no consolidados, impermeables, formado por limos, arcillas y arenas limosas, finamente laminados o macizos, ubicados en zonas deprimidas o aflorando en superficie, formando lagunas (Sellés y Gana, 2001).

Ignimbrita Pudahuel (Pleistoceno Medio) (Wall *et al.*, 1996): Depósito de flujo piroclástico macizo, cuyos afloramientos ocupan un área de aproximadamente 60 km² en el sector de Pudahuel. Hacia el oeste, se extiende hasta Maipú y limitan con la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa. Afloramientos aislados se ubican en el cerro Apoquindo y al este de Peñalolén, mientras que en la parte sur se observan en los lomajes entre Angostura y San Francisco de Mostazal. Cubre depósitos aluviales de los ríos Mapocho y Maipo y del estero Lampa, y está cubierta por los depósitos fluviales del estero Lampa y del río Mapocho. Los depósitos se exhiben moderadamente a bien consolidados, y se encuentran constituidos, principalmente, de ceniza vítrea, fragmentos de cristales y pómez, además de líticos accidentales.

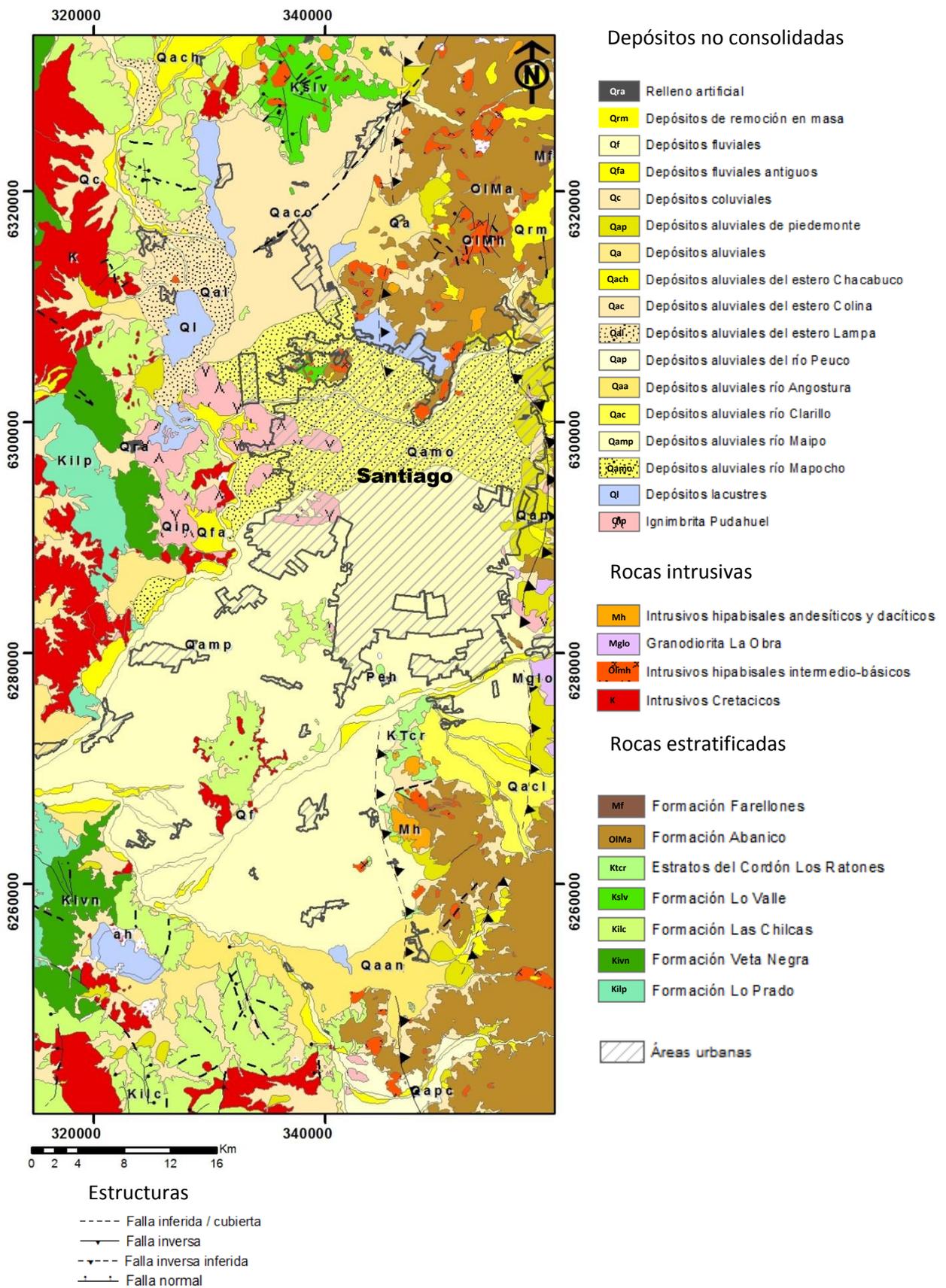


Figura 8 Marco geológico de la zona de estudio, elaborado en base de los trabajos de Sellés y Gana (2001) y Wall et al. (1999). Coordenadas UTM Huso 19S.

3.2 Aspectos hidrológicos e hidrogeológicos de la Cuenca de Santiago

3.2.1 Aguas superficiales

La Cuenca de Santiago forma parte de la cuenca hidrográfica del río Maipo, la cual cubre una superficie de aproximadamente 14.707 km², desde sus divisorias de aguas en la Cordillera Principal hasta la desembocadura en el Océano Pacífico, en la localidad de San Antonio.

En la Figura 9 se pueden observar los principales cursos fluviales del área de estudio. Los dos cursos de agua más importantes de la zona corresponden al río Maipo y el río Mapocho. Poseen los mayores caudales de la zona y transportan gran parte de los sedimentos que rellenan la Cuenca de Santiago, aunque es el río Maipo el de mayor relevancia ya que drena una superficie de, aproximadamente, cinco veces mayor a la del río Mapocho (Morales, 2002).

En la Cordillera Principal los principales afluentes del río Maipo corresponden a los ríos Volcán, Yeso y Colorado. Al ingresar a la Depresión Central, en el sector de Puente Alto, recibe al estero Clarillo, más al poniente se une el río Angostura, al sur y antes de atravesar la Cordillera de la Costa, confluye con el río Mapocho que proviene desde el norte. Al oeste, en su curso inferior, fuera de la zona de estudio, recibe las aguas del estero Puangue. Según Iriarte (2003) el río Maipo posee un caudal medio anual superior a los 110 m³/s, con máximos en los meses de primavera debido a los deshielos cordilleranos. Además, cabe señalar que el río Maipo atiende cerca del 70% de la demanda de agua potable y, aproximadamente, el 90% de las demandas de regadío (SINIA, *online* 2014).

Por otro lado, el río Mapocho tiene una superficie de aproximadamente 2.300 km² y una descarga anual de 6 m³/s. A pesar de ser de menor extensión que el río Maipo, recibe una gran cantidad de residuos ya que gran parte de su recorrido discurre por zonas urbanas.

Los esteros y ríos que fluyen por la Cuenca de Santiago atraviesan las diferentes formaciones y unidades que afloran en el sector. El río Maipo recorre rocas graníticas ubicadas en la Cordillera Principal, el río Mapocho cruza la formación Abanico, el estero Colina las formaciones Abanico y Lo Valle, el estero Lampa la formación Las Chilcas y el estero Angostura las formaciones Abanico y Las Chilcas. Todos con una escasa infiltración, la que se daría principalmente por fracturas de poca profundidad (Morales, 2002).

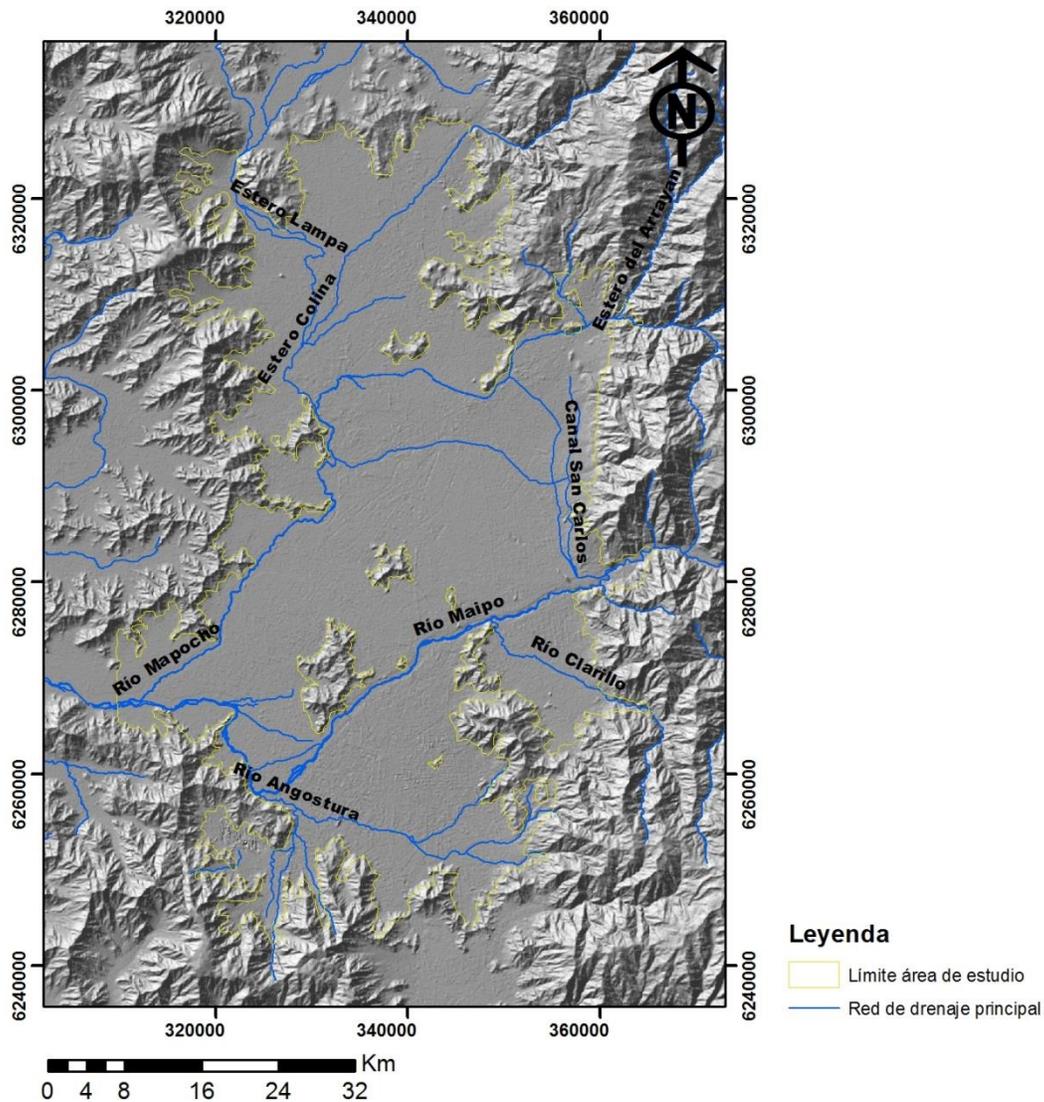


Figura 9 Principales cursos fluviales que recorren el área de estudio en la Cuenca de Santiago. Coordenadas UTM Huso 19S.

3.2.2 Acuífero de la Cuenca de Santiago

Los estudios de Falcon *et al.* (1970) y Morales (2002) lograron identificar tres unidades hidrogeológicas, las cuales se diferencian por su permeabilidad y su posición estratigráfica relativa.

Las unidades identificadas en los estudios son las siguientes:

- Unidad A:

Unidad base del relleno sedimentario y la de mayor potencia de la secuencia. Predominan materiales clásticos de tamaño limo y arcilla, mientras que en menor medida se encuentran arenas e incluso clastos gruesos de tamaño grava que son generalmente angulosos (Falcon *et al.*, 1970). Debido a sus características, como su

gran contenido de material fino y el grado de compactación que aumenta con la profundidad, se le considera como un nivel impermeable, con una estimación de permeabilidad de 10^{-4} a 10^{-6} cm/s (Morales, 2002).

- Unidad B:

Unidad intermedia que sobreyace a la anterior, constituida por depósitos fluviales y fluvioglaciares que se distribuyen en lentes de diferente granulometría y presentando dimensiones variables, lo que implica que en conjunto tenga características anisótropas (Falcon *et al.*, 1970). Está compuesta por sedimentos gruesos, principalmente arenas y gravas, con material fino en menor cantidad. Es considerado el acuífero principal de la región, cuyos espesores aumentan hacia el sur. Su permeabilidad estimada es de 10^{-2} a 10^{-4} cm/s (Morales, 2002).

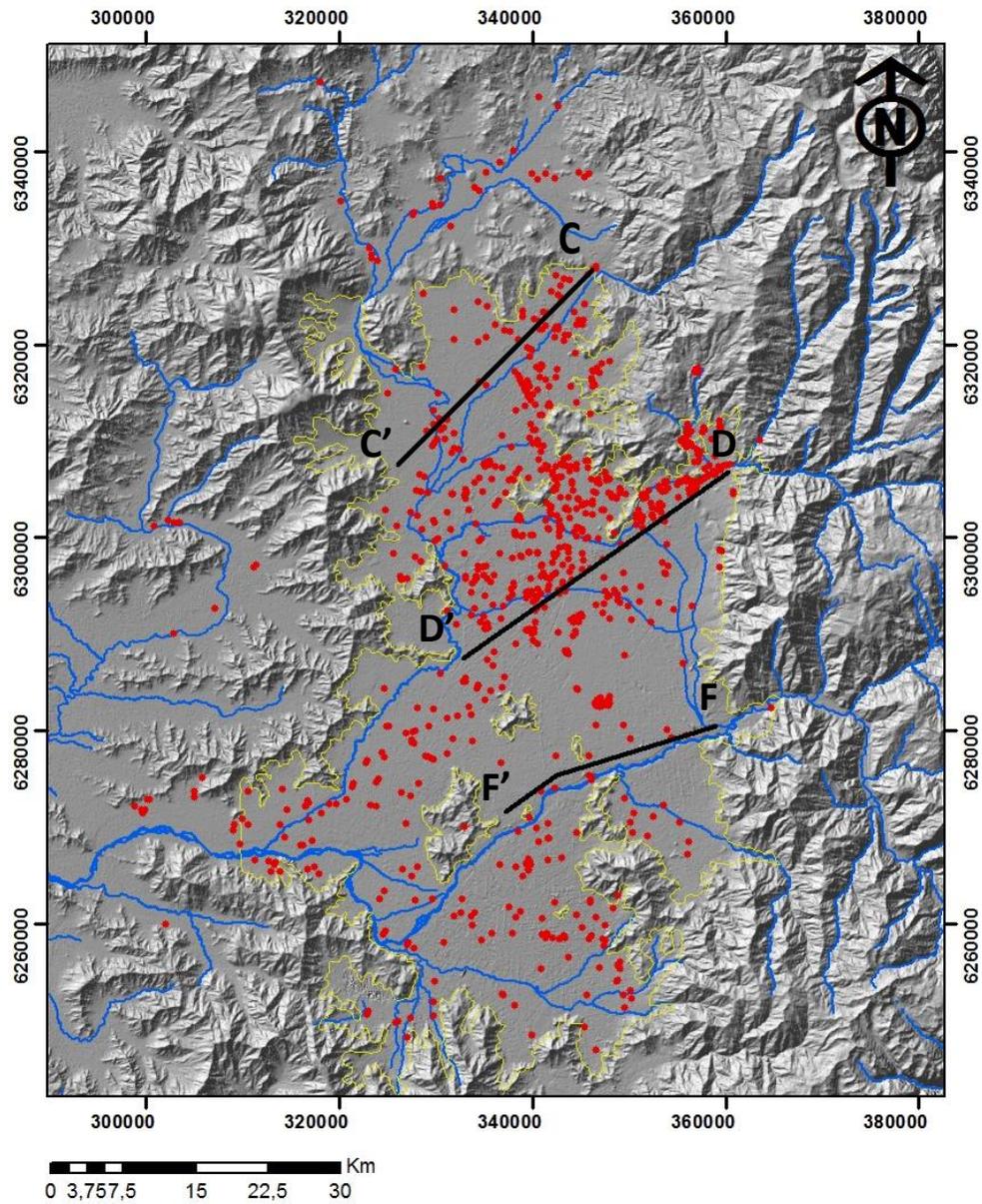
- Unidad C:

Unidad superior de la secuencia que sobreyace a la unidad B, es generalmente discontinua y está constituida por material fino. Sus depósitos corresponden, principalmente, a piroclásticos y lacustres, cuyas extensiones se presentan en forma local. Debido a sus características no es una unidad favorable para contener un acuífero ya que su permeabilidad es del orden de 10^{-3} a 10^{-5} cm/s (Morales, 2002).

Actualmente, el Proyecto de baja Entalpía del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA) se encuentra en proceso de elaboración de nuevos perfiles, de los cuales las trazas y características de tres de éstos se observan en las Figuras 10 y 11. Éstos entregan una mayor información de la disposición de las unidades que se encuentran en la Cuenca de Santiago y muestran una mayor anisotropía y heterogeneidad del relleno, lo que influenciaría en el comportamiento de las aguas subterráneas de la zona.

El perfil CC', ubicado en el sector norte del área de estudio, el cual atraviesa los depósitos de los abanicos del estero Colina y Lampa, muestra un nivel superior de limo y arcilla arenosa de gran potencia los cuales en el sector oeste presenta un lente de arena gravosa, el sondaje de mayor profundidad (Morales_LC1_7) revela que esta unidad se encuentra sobre otra con sedimentos de arena y grava. En el este se observa una unidad de mayor granulometría correspondiente a arena gravosa. El sistema hidrogeológico en esta zona corresponde a acuíferos de carácter confinado al igual que en los sectores de Batuco al noroeste, donde las transmisividades van desde los 100 a 800 m²/día (Araneda *et al.*, 2010).

Los perfiles DD' y FF' muestran que los sectores centro y sur de la Cuenca de Santiago presentan sedimentos correspondientes a gravas arenosas y gravas arcillosas en la parte superior. El perfil DD' muestra una unidad de sedimentos finos subyaciendo a los sedimentos más gruesos y que también se encuentran como lente en el lado este. En la mayoría de estos sectores el acuífero es de carácter freático donde la transmisividad puede superar los 1000 m²/día (Araneda *et al.*, 2010).



Leyenda

- Límite área de estudio
- Red de drenaje principal
- Traza de perfiles
- Fuente de datos, ubicación de sondajes

Figura 10 Ubicación de los perfiles CC', DD' y FF' elaborados por el Proyecto de baja Entalpía (CEGA), junto con la posición de los sondajes utilizados como fuente de datos. Coordenadas UTM Huso 19S.

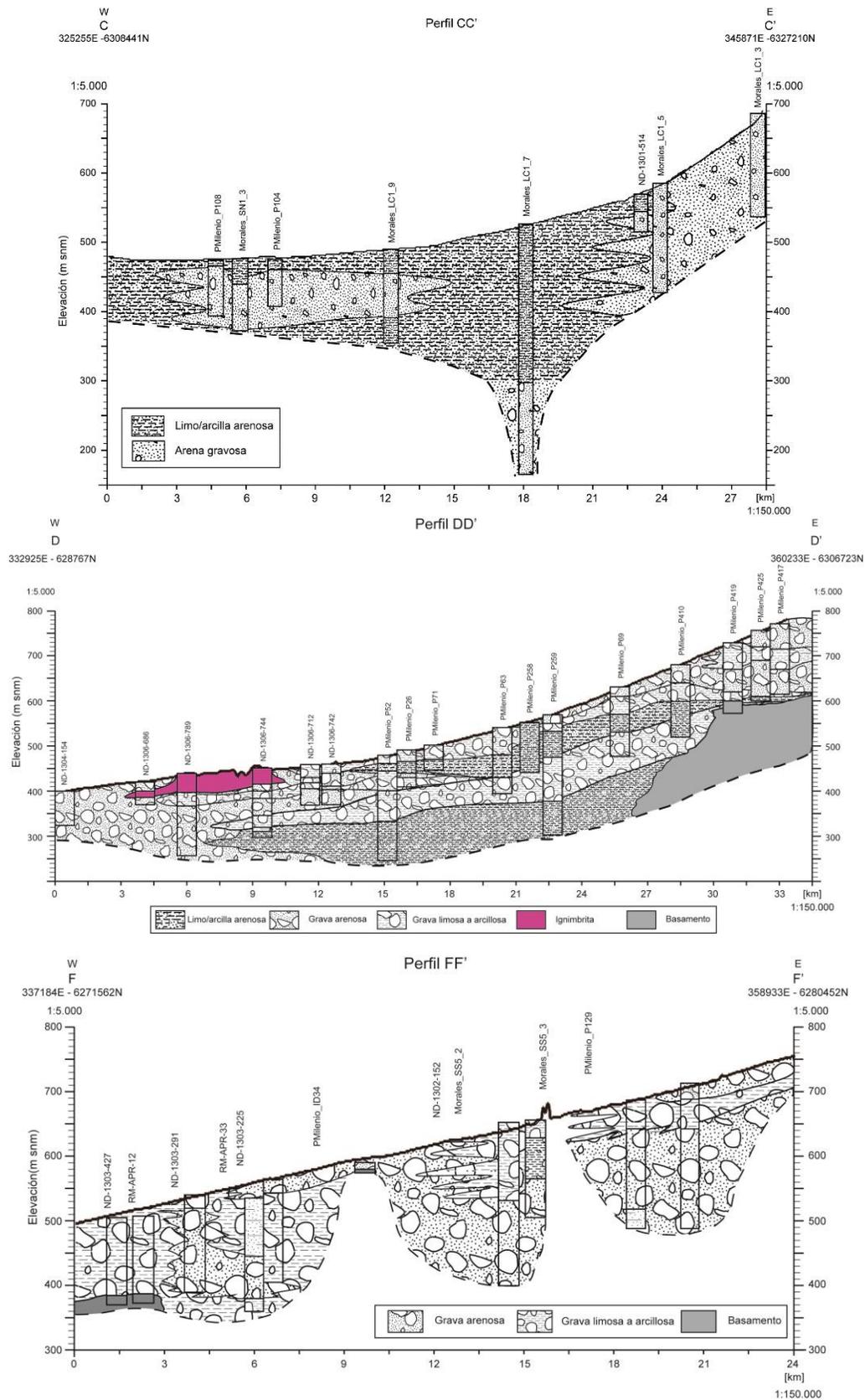


Figura 11 Perfiles del relleno sedimentario de la Cuenca de Santiago elaborados por el Proyecto de baja Entalpía (CEGA). CC': sector Colina y Lampa. DD': sector de Santiago Centro. FF': sector de Santiago Sur. Sus ubicaciones se ilustran en la Figura 10.

El nivel estático de las aguas subterráneas en la zona es variable. En la Figura 12 se observa el mapa elaborado por Muñoz *et al.* (2015), el cual muestra que las mayores profundidades del nivel estático se encuentran al este de la cuenca, al norte del río Maipo, donde llegan a los 150 m aproximadamente. En cambio en gran parte del norte, en las zonas de Colina y Lampa, junto con sectores al oeste y sur, los niveles estáticos son mayoritariamente inferiores a 30 m de profundidad, estos lugares presentan una alta actividad agrícola. La dirección del flujo de las aguas subterráneas es comparable a la de las aguas superficiales, esto es principalmente de norte a sur y de este a oeste.

La recarga del acuífero ocurre, en su mayoría, por la infiltración de cauces superficiales y, en zonas de depósitos coluviales al oriente y poniente de la cuenca, por la infiltración de precipitaciones (Araneda *et al.*, 2010). Esta última es menor en sectores con alta urbanización, como la ciudad de Santiago, donde las aguas lluvias generalmente escurren a los cauces principales de la zona (ríos Mapocho y Maipo).

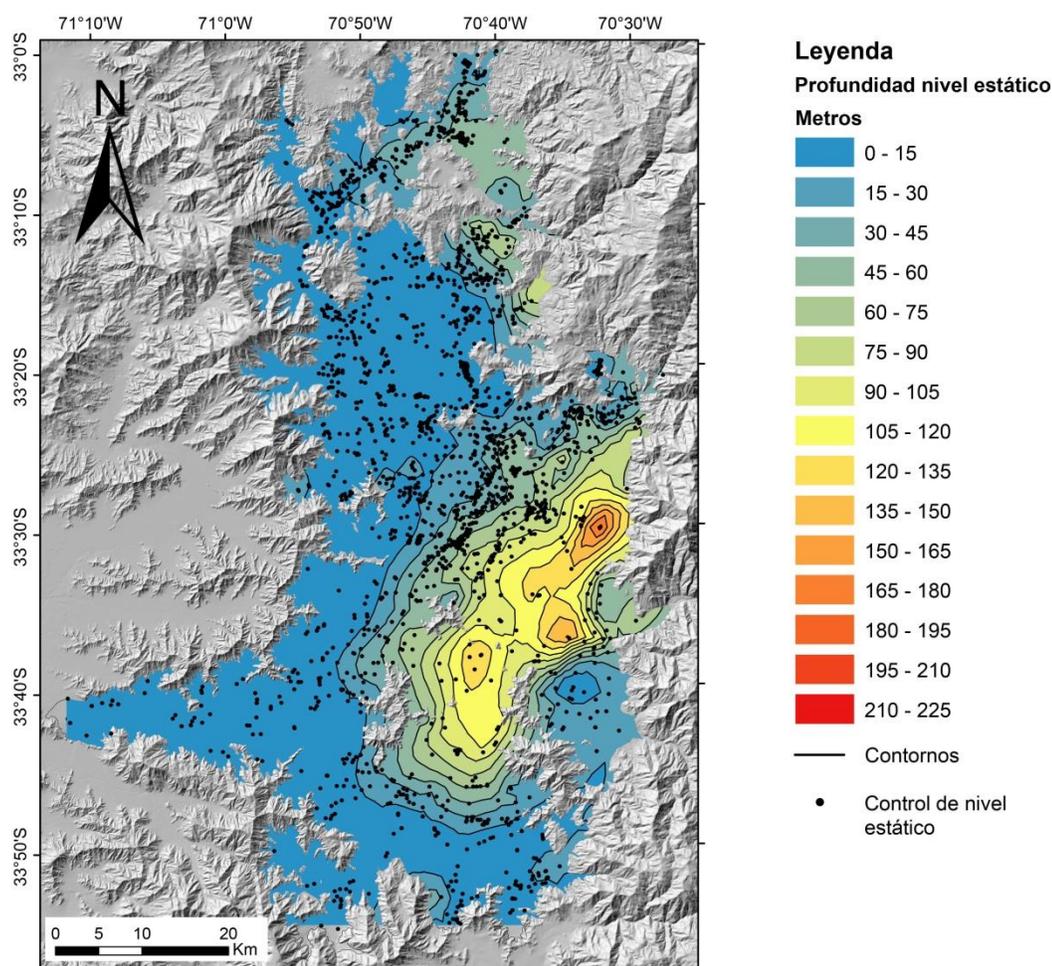


Figura 12 Nivel estático de la Cuenca de Santiago. Muñoz *et al.* (2015).

3.2.2.1 Vulnerabilidad del acuífero:

Iriarte (2003) elaboró un mapa de vulnerabilidad de los acuíferos de la Cuenca de Santiago (Figura 13) simplificado según el método GOD de Foster (1987). Aunque sólo tiene una vigencia de cinco años, es una buena referencia para poder compararlo con los resultados obtenidos en este estudio. Los parámetros que utilizó fueron el tipo de acuífero presente, las características litológicas de los sedimentos o roca de la zona no saturada y el espesor de ésta. En el mapa se puede observar que el sector suroeste de la cuenca es la que presenta una vulnerabilidad alta a extrema, donde se recomienda evitar la instalación de vertederos y centros de distribución de hidrocarburos. Para sectores más al este y norte de la zona, donde hay una mayor presencia de zonas urbanas, se establece una vulnerabilidad baja a moderada. Sin embargo, en zonas como las comunas de Quilicura, Lampa y Colina, en el norte de la cuenca, existen acuíferos someros que presentan una alta vulnerabilidad a la contaminación y que se explotan para actividades agrícolas y ganaderas.

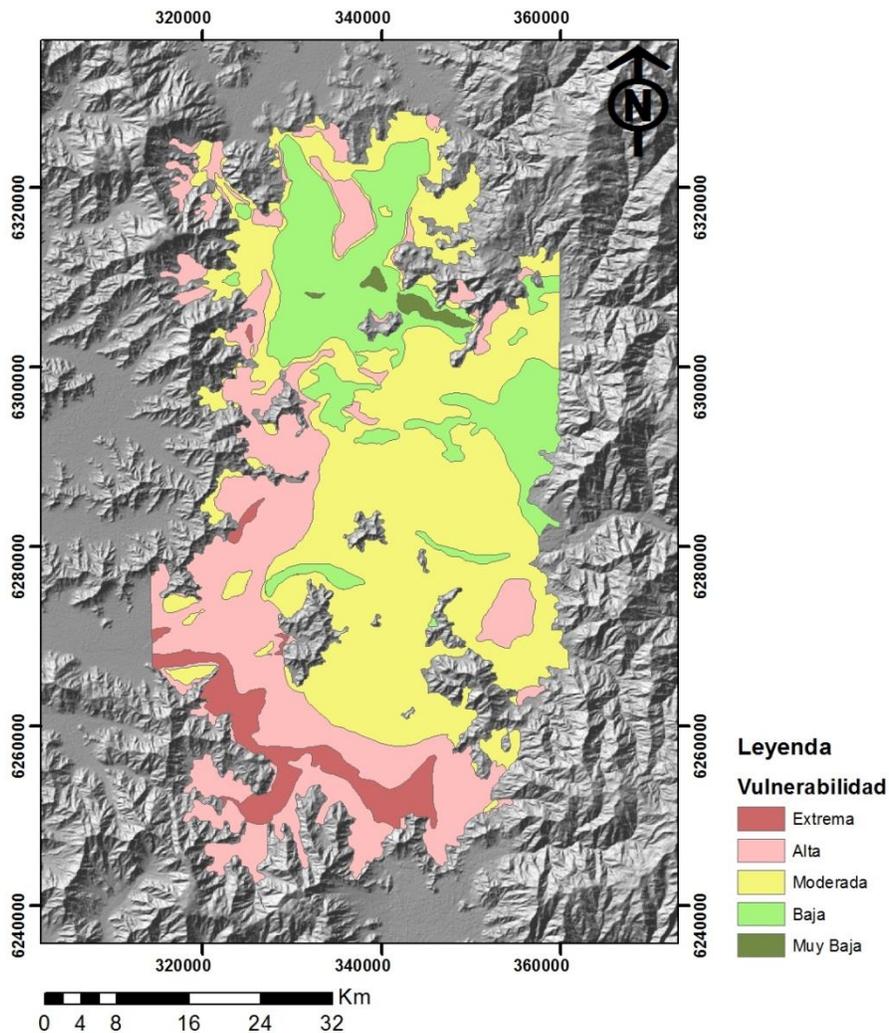


Figura 13 Mapa de vulnerabilidad del área de estudio. Modificado de Iriarte (2003). Coordenadas UTM Huso 19S.

4. HIDROGEOQUÍMICA: Resultados y discusión

4.1 Recopilación bibliográfica

Para el presente estudio se ocuparon los datos que entrega la Dirección General de Aguas en los reportes de calidad de aguas, ubicados en la sección de Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. La información disponible en la red hidrométrica nacional corresponde a mediciones tomadas en las estaciones de monitoreo que tiene el organismo alrededor de todo el país, las cuales tienen un intervalo de tiempo de aproximadamente 3 meses.

En lo que corresponde a la cuenca del río Maipo, se seleccionaron 37 estaciones de medición (22 de aguas superficiales y 15 de aguas subterráneas). Las estaciones seleccionadas para el análisis son las señaladas en la Tabla 1 y su distribución espacial se puede observar en la Figura 14. Todas las estaciones de aguas subterráneas se encuentran en la zona de la Cuenca de Santiago, mientras que las de aguas superficiales están ubicadas dentro y fuera de la zona. También se usaron datos de niveles piezométricos, numéricamente más escasos y que sólo fueron utilizados en determinados análisis.

Tabla 1 Estaciones de aguas subterráneas y superficiales seleccionadas para el estudio, junto con la abreviatura asignada a cada una.

Aguas subterráneas		Aguas superficiales	
Estación	ID	Estación	ID
POZO FUNDO EL ALGARROBAL	P1	CANAL COLINA EN COMPUERTA VARGAS	S1
POZO ASENTAMIENTO CENTRAL LO VARGAS	P2	RÍO SAN FRANCISCO ANTES ESTERO YERBA LOCA	S2
POZO FUNDO LAS CASAS ASENTAMIENTO COLO COLO	P3A	ESTERO ARRAYAN EN LA MONTOSA	S3
POZO CASAS DE COLO COLO	P3B	ESTERO YERBA LOCA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	S4
POZO CRUCERO PERALILLO	P4	RÍO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS	S5
POZO VERTEDERO CERROS DE RENCA	P5	RÍO MOLINA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	S6
POZO ESTADIO CORFO(LAS CONDES)	P6	CANAL SAN CARLOS EN DESEMBOCADURA RÍO MAPOCHO	S7
POZO CLUB DE GOLF	P7	RÍO MAPOCHO EN PTE PUDAHUEL	S8
POZO PARQUE O'HIGGINS	P8	ESTERO LAMPA ANTES RÍO MAPOCHO (CA)	S9
POZO CHACRA EL OLIVO	P9	RÍO OLIVARES ANTES JUNTA RIO COLORADO	S10
POZO CEMENTERIO METROPOLITANO	P10	ZANJON DE LA AGUADA EN PAJARITOS	S11
POZO INIA	P11	RÍO MAPOCHO RINCONADA DE MAIPU	S12
POZO AGRÍCOLA HERMANOS POBLETE	P12	RÍO COLORADO ANTES JUNTA RÍO MAIPO	S13
POZO ASENTAMIENTO MALLOCO	P13	RÍO MAIPO EN EL MANZANO	S14
POZO FUNDO CACHANTÚN	P14	RÍO CLARILLO ANTES JUNTA RÍO MAIPO	S15
POZO ASENTAMIENTO AGUILAR SUR	P15A	RÍO MAIPO EN PUENTE LOS MORROS (CA)	S16
POZO COMPLEJO ANGOSTURA	P15B	RÍO MAPOCHO EN EL MONTE	S17
		RÍO MAIPO EN NALTAHUA	S18
		RÍO YESO ANTES JUNTA RÍO MAIPO	S19
		RÍO VOLCAN ANTES RIO MAIPO (CA)	S20
		RÍO ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE	S21
		RÍO MAIPO EN LAS MELOSAS	S22

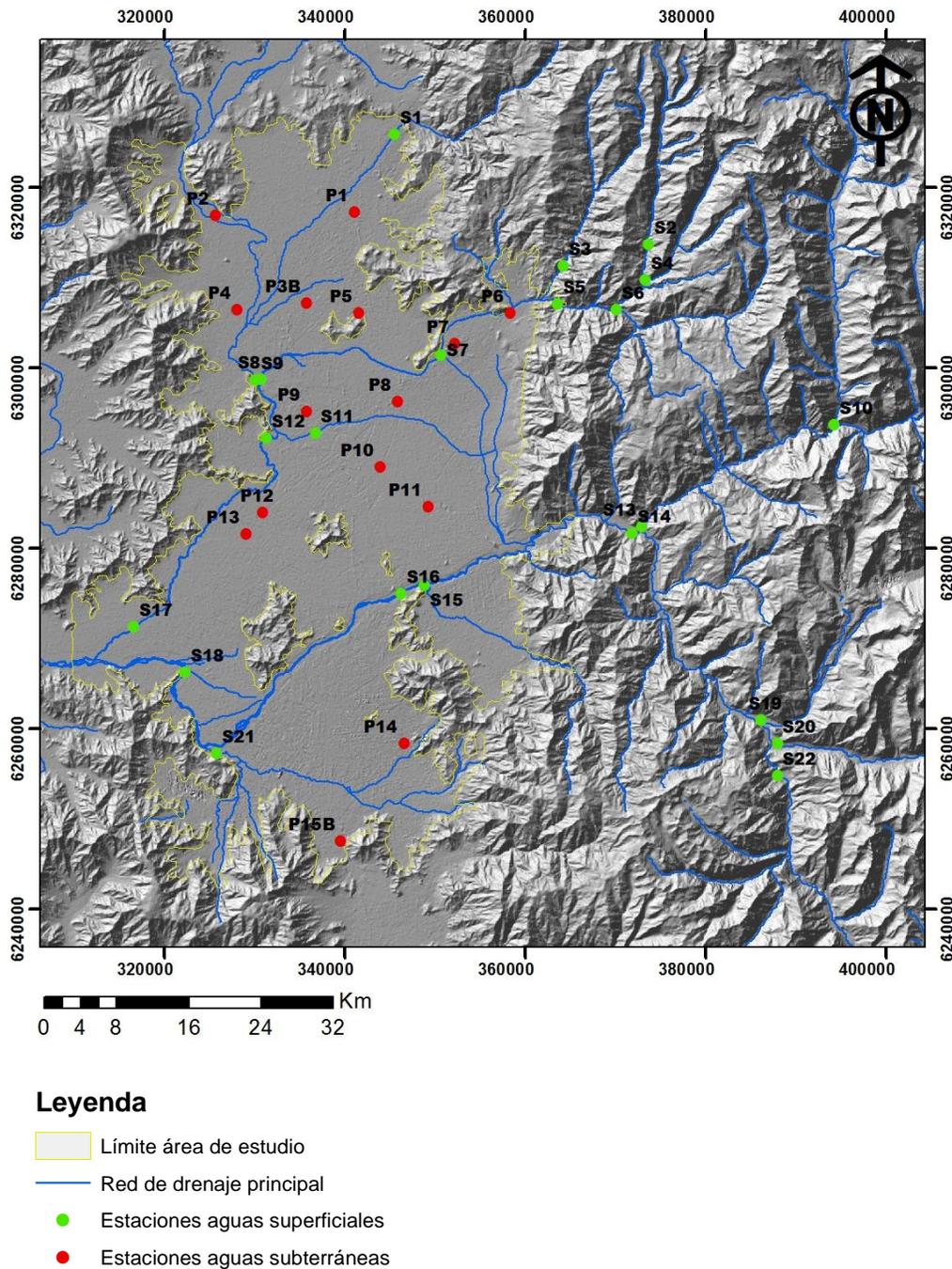


Figura 14 Ubicación de las estaciones analizadas de aguas superficiales y subterráneas en la Cuenca de Santiago. Coordenadas UTM Huso 19S.

Para las estaciones seleccionadas, se escogieron datos de 3 años diferentes durante los muestreos de enero, febrero o marzo. En la Tabla 2 se observa la información escogida para el análisis. El criterio utilizado fue seleccionar el periodo en el que se contaba con la mayor cantidad de información, debido a que en algunos casos, los datos se encontraban incompletos en las planillas, lo que imposibilitaba realizar el análisis completo. En el Anexo A se pueden ver los parámetros físico-químicos medidos para cada una de las estaciones y las técnicas analíticas usadas

para su medición. En este aspecto, las limitaciones encontradas fueron que, para el caso de los elementos mayores, los datos correspondientes a los bicarbonatos sólo se encuentran disponibles hasta el año 2006. Esto conllevó que la información del año 2010, que no contiene estos valores para dicho parámetro, se ocupara en forma restringida por no poder realizar el cálculo de balance iónico. Con respecto a los elementos menores o trazas, se utilizaron sólo determinados iones, debido a que muchos de los valores medidos se encontraban por debajo del límite de detección instrumental.

Tabla 2 Información seleccionada para realizar el análisis.

Información seleccionada	
Años	2001-2006-2010
Época	Verano (Enero-Marzo)
Elementos Mayores	Cl ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , NO ₃ ⁻
Elementos Trazas	As, Al, Fe, PO ₄ ³⁻ , Mn
Parámetros Físico-químicos	pH, T°, Conductividad eléctrica.

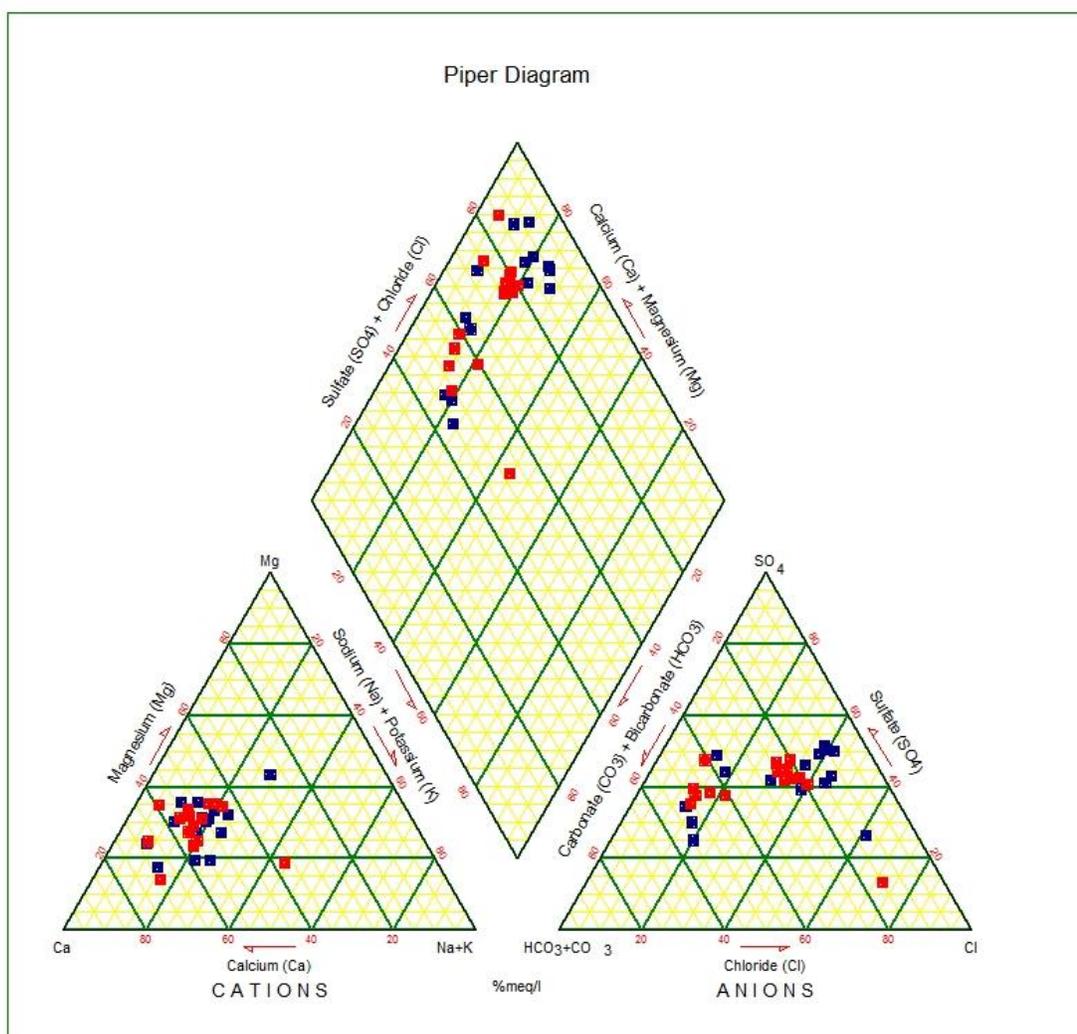
4.2 Clasificación de aguas y distribución espacial

4.2.1 Elementos mayores

La clasificación química de las aguas subterráneas analizadas se realizó usando el diagrama Piper (1944), el cual se construye utilizando los datos de las proporciones de los elementos mayores (aniones y cationes) en dos diagramas triangulares para luego ser reunidos en un cuadrilátero. En la Figura 15 se puede ver el diagrama construido para los años 2001 y 2006. En ellos se observa que la mayoría de los datos indican aguas del tipo sulfatada-cálcica. Sin embargo, existe un grupo menor de muestras (P2, P3, P4, P6, P7 y P15), las cuales se diferencian de mejor manera en el triángulo de los aniones, al presentar una mayor proporción de bicarbonatos. La estación P5, ubicada en el ex vertedero, presenta las aguas con mayor contenido de Cl⁻.

Para estudiar su distribución espacial se elaboraron diagramas de Stiff en cada estación de toma de muestras, tal como lo ilustra la Figura 16. Este diagrama está compuesto por tres ejes horizontales de igual escala, los que unen un anión con un catión, los cationes son ubicados al lado izquierdo y los aniones al lado derecho. En este estudio, se colocaron, en forma descendente el Na⁺ + K⁺ con el Cl⁻ en el primer eje, el Ca²⁺ con el HCO₃⁻ en el segundo y el Mg²⁺ con el SO₄²⁻ en el tercero, las concentraciones de cada uno se encuentran en meq/l. En los resultados correspondientes al año 2006 se puede ver que, en general, las concentraciones de los elementos aumentan a lo largo de la dirección principal del flujo de las aguas subterráneas, exceptuando la muestra obtenida en la estación ubicada en el relleno

sanitario. Con respecto a los cationes se puede observar que el Ca^{2+} es el de mayor valor, esta característica se mantiene a lo largo de toda la cuenca, sin incrementos evidentes a lo largo de las líneas de flujo. En el caso de los aniones existen cambios más notorios, donde se observa que en las estaciones ubicadas más al norte y este de la zona, junto con las que se encuentran en el límite de la cuenca, el anión de mayor concentración corresponde al HCO_3^- , mientras que en las estaciones ubicadas en el centro y oeste del área de estudio, los valores de Cl^- y SO_4^{2-} aumentan, quedando éste último como el anión de mayor concentración. Este comportamiento se relaciona a lo observado en el diagrama Piper, logrando determinar un cambio en la composición química de las aguas subterráneas, donde a medida que avanza el flujo hacia el suroeste las aguas pasan de un tipo sulfatado-bicarbonatado a uno sulfatado-clorurado.



Leyenda

- Datos año 2001
- Datos año 2006

Figura 15 Diagramas de Piper para los datos de aguas subterráneas de los años 2001 y 2006.

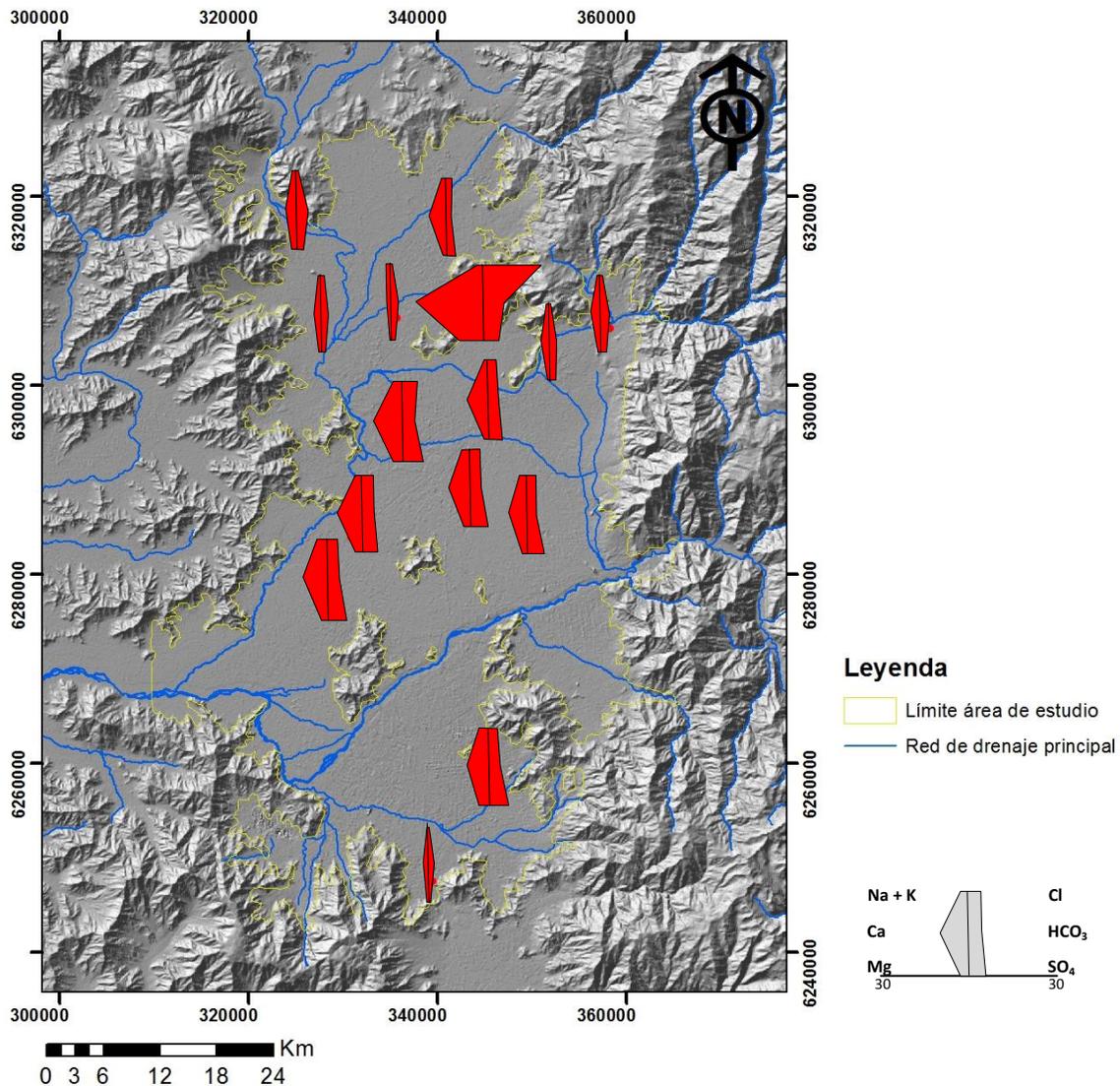


Figura 16 Diagramas de Stiff para las estaciones subterráneas de área de estudio, año 2006. Coordenadas UTM Huso 19S.

4.2.2 Elementos trazas

En la Figura 17 se pueden ver los mapas de distribución de los elementos trazas correspondientes a los iones Fe y PO_4^{3-} según los datos del año 2006. En el caso del Fe no se observa una distribución determinada para los tres años, en general, los valores más altos se encuentran en estaciones situadas en el centro de la cuenca. Con respecto al fosfato (Figura 18) se puede observar que los valores altos se encuentran al norte y al este de la zona y en las estaciones que se ubican en los límites de la cuenca.

Para el As y el Mn se tiene que en la mayoría de las estaciones los valores de las concentraciones son inferiores al límite de detección instrumental. Para el caso del As tres estaciones presentan valores que superan 1 ppb, éstas corresponden a los

pozos P1, P3B y P6, los cuales se encuentran en el sector norte y noreste de la cuenca. Por otro lado, al observar las concentraciones de Mn se puede determinar que existen dos estaciones que presentan valores altos, los pozos P3B y P5, donde el último corresponde al ubicado en el ex vertedero de Cerros de Renca, donde los valores pueden sobrepasar los 4 mg/l. El pozo P3B presenta una concentración que llega a los 0,7 mg/l en el año 2001, sin embargo en los años siguientes su concentración disminuye. El hecho de encontrar estos valores en el sector cercano al ex vertedero induce a pensar que podría existir relación con éste.

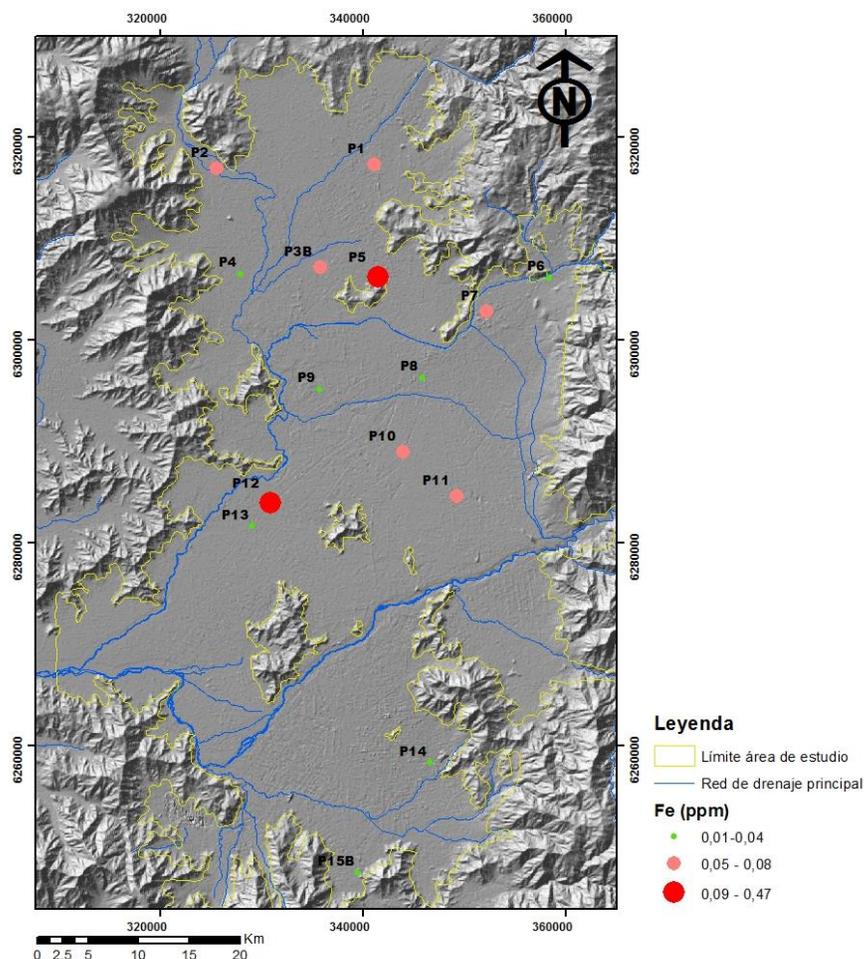


Figura 17 Mapas de distribución de las concentraciones de Fe (ppm) en el área de estudio, año 2006. Coordenadas UTM Huso 19S.

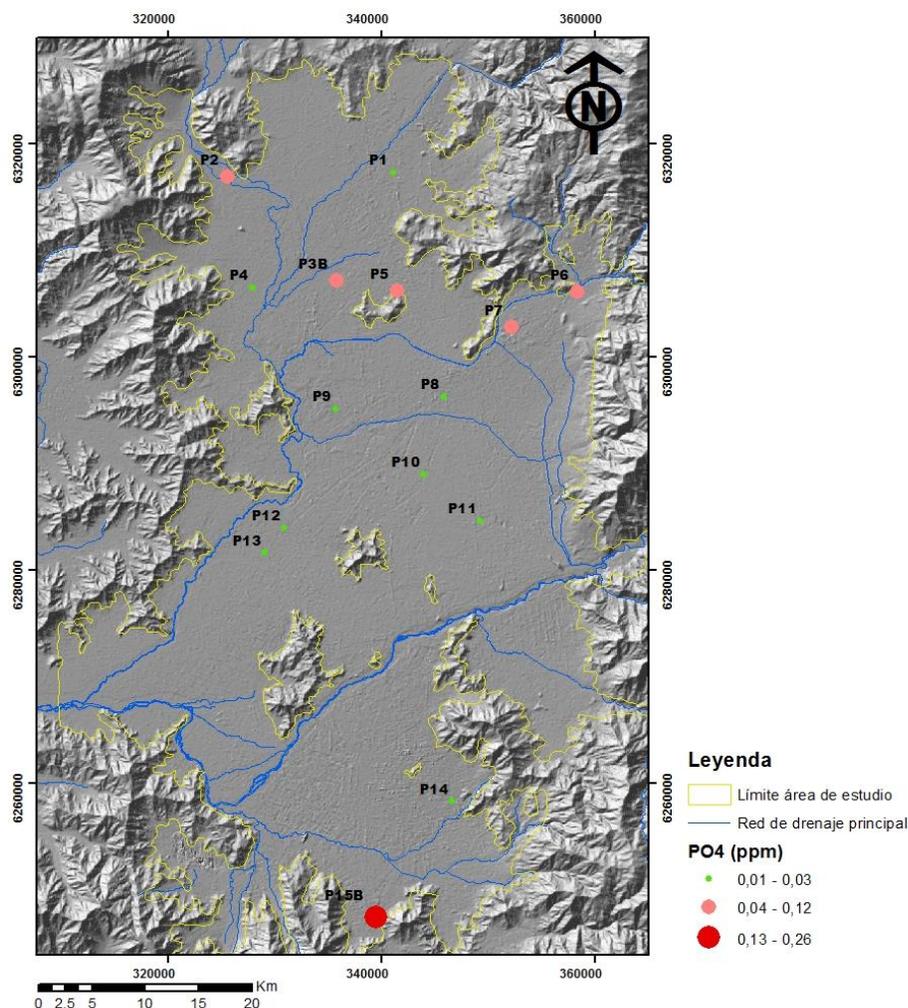


Figura 18 Mapas de distribución de las concentraciones de PO_4^{3-} (ppm) en el área de estudio, año 2006. Coordenadas UTM Huso 19S.

4.2.3 pH y Temperatura

El pH medido en las estaciones indica que las aguas subterráneas son, generalmente, neutras a levemente alcalinas. En la Figura 19 se presenta la distribución espacial de los valores de pH para los datos del año 2006. Se puede observar que, en general, los valores mayores se encuentran en el centro de la cuenca, siendo los valores más altos los correspondientes a las estaciones P4, P3 y P6 y el más bajo en la P5. En el Anexo C se encuentran los mapas de distribución para los datos de los años 2001 y 2010, donde se observa que el pH se mantiene prácticamente constante. Las estaciones ubicadas en el límite de la cuenca son las que presentan una mayor variación en los tres años estudiados.

Para el caso de la temperatura los datos señalan que los valores van desde los 16°C a los 20°C, con respecto a su distribución (Figura 20) esta variable no presenta una clara pauta espacial. Sin embargo, al observar los mapas de los años 2001 y 2010 (Anexo D) se observa que en general las estaciones que presentan los mayores valores se encuentran en las zonas noroeste de la cuenca y los menores al este.

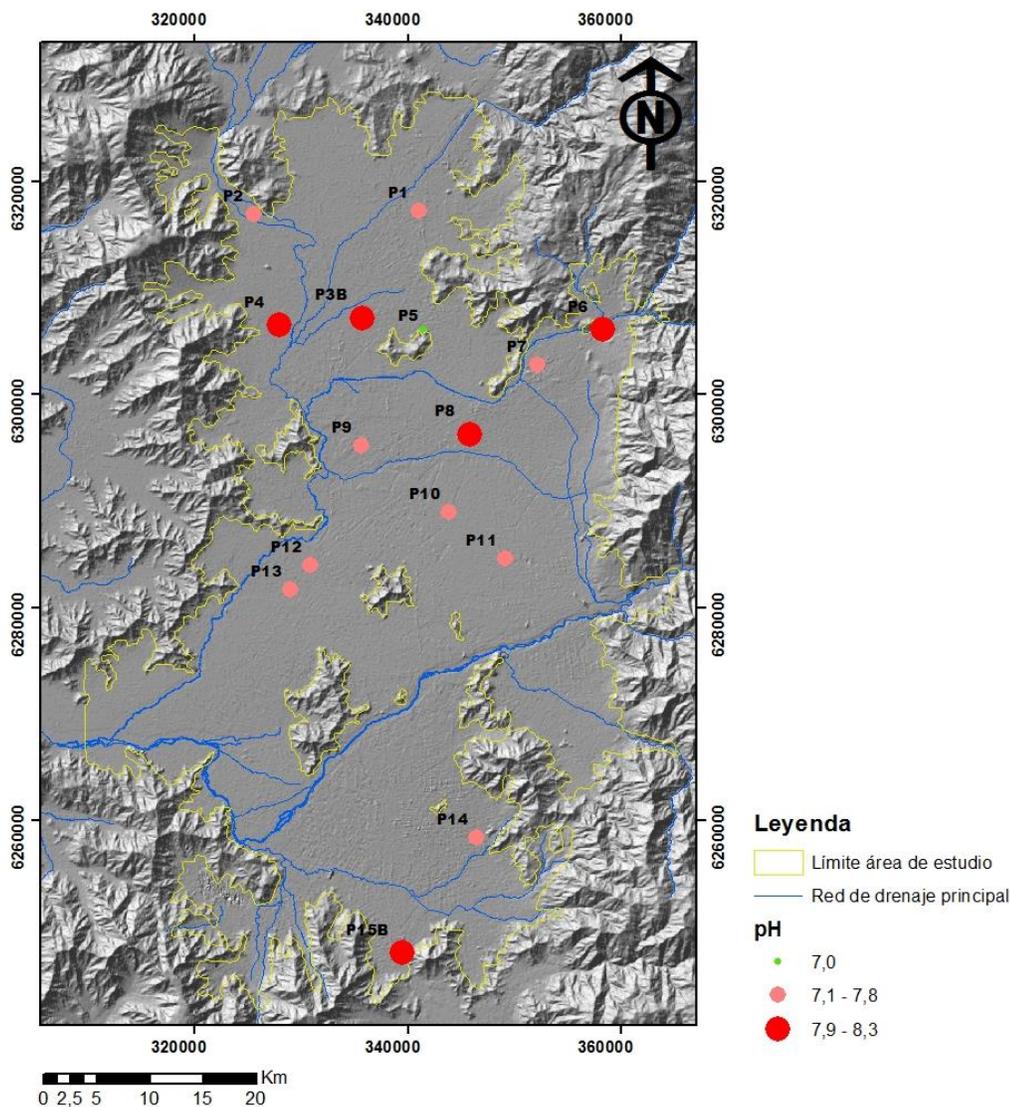


Figura 19 Mapa de distribución de pH, año 2006. Coordenadas UTM Huso 19S.

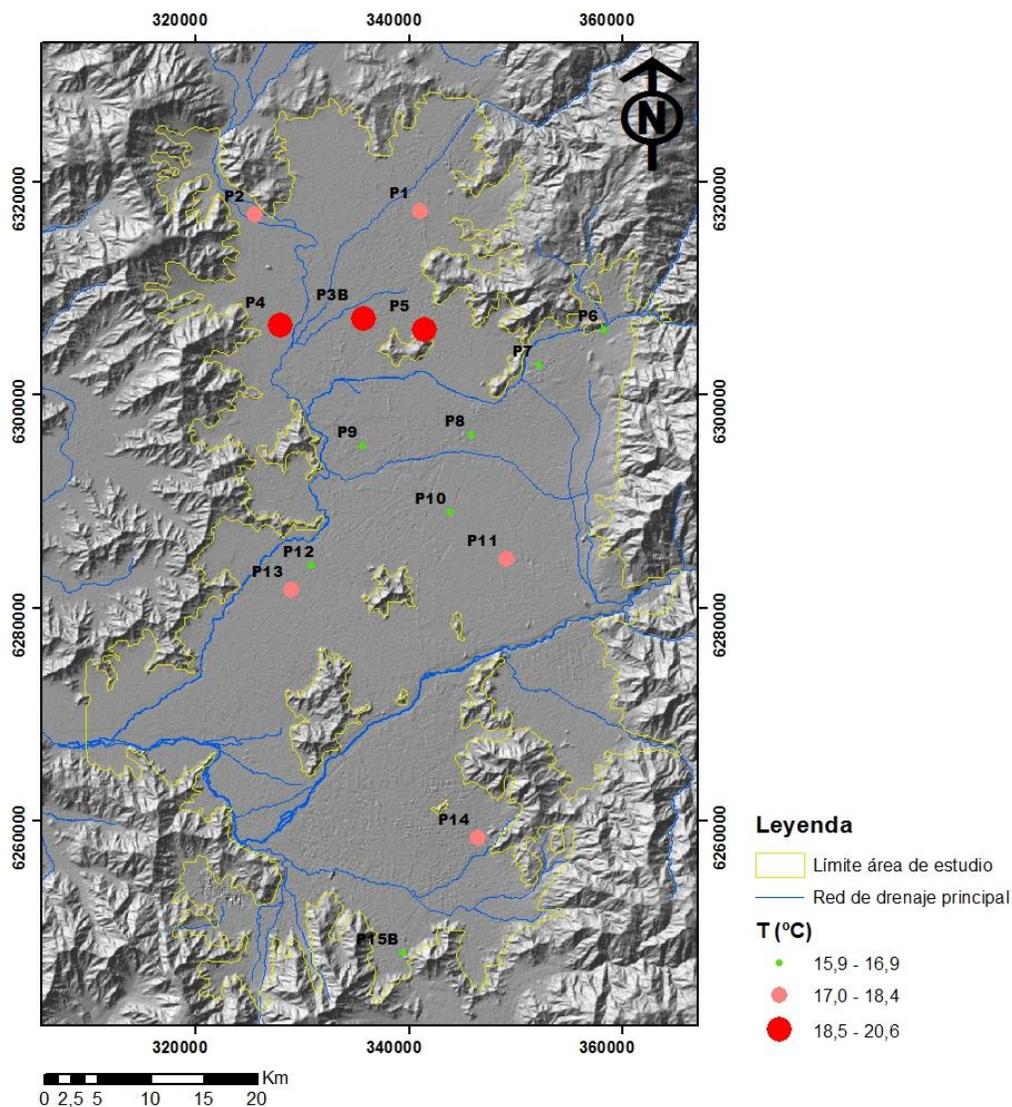


Figura 20 Mapa de distribución de temperatura, año 2006. Coordenadas UTM Huso 19S.

4.2.4 Conductividad eléctrica

A diferencia del pH y la temperatura, la conductividad eléctrica presenta una mayor variación en sus valores, ya que se han medido valores entre los 200 y 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Al observar el mapa de distribución del año 2006 (Figura 21), se ve que los valores menores se encuentran al este y en los límites de la zona y los mayores al centro y oeste, mostrando una pauta similar a la analizada en los diagramas de Stiff, donde se observaba un cambio en los tipos de agua de la cuenca. Por lo tanto, la conductividad aumentaría en el sentido del movimiento de las aguas subterráneas, es decir, a lo largo de las líneas de flujo.

La estación que presenta los valores más altos en los tres años analizados (ver Anexo E) corresponde a la P5, ubicada en el ex vertedero de Cerros de Renca, lo que conlleva, vista la excepcionalidad del valor asociado a esta muestra en

comparación con las demás de la cuenca, en una posible contribución de los residuos almacenados en el ex vertedero. De hecho, si se excluye esta muestra, los valores de C.E. variarían entre los 300 y 1900 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

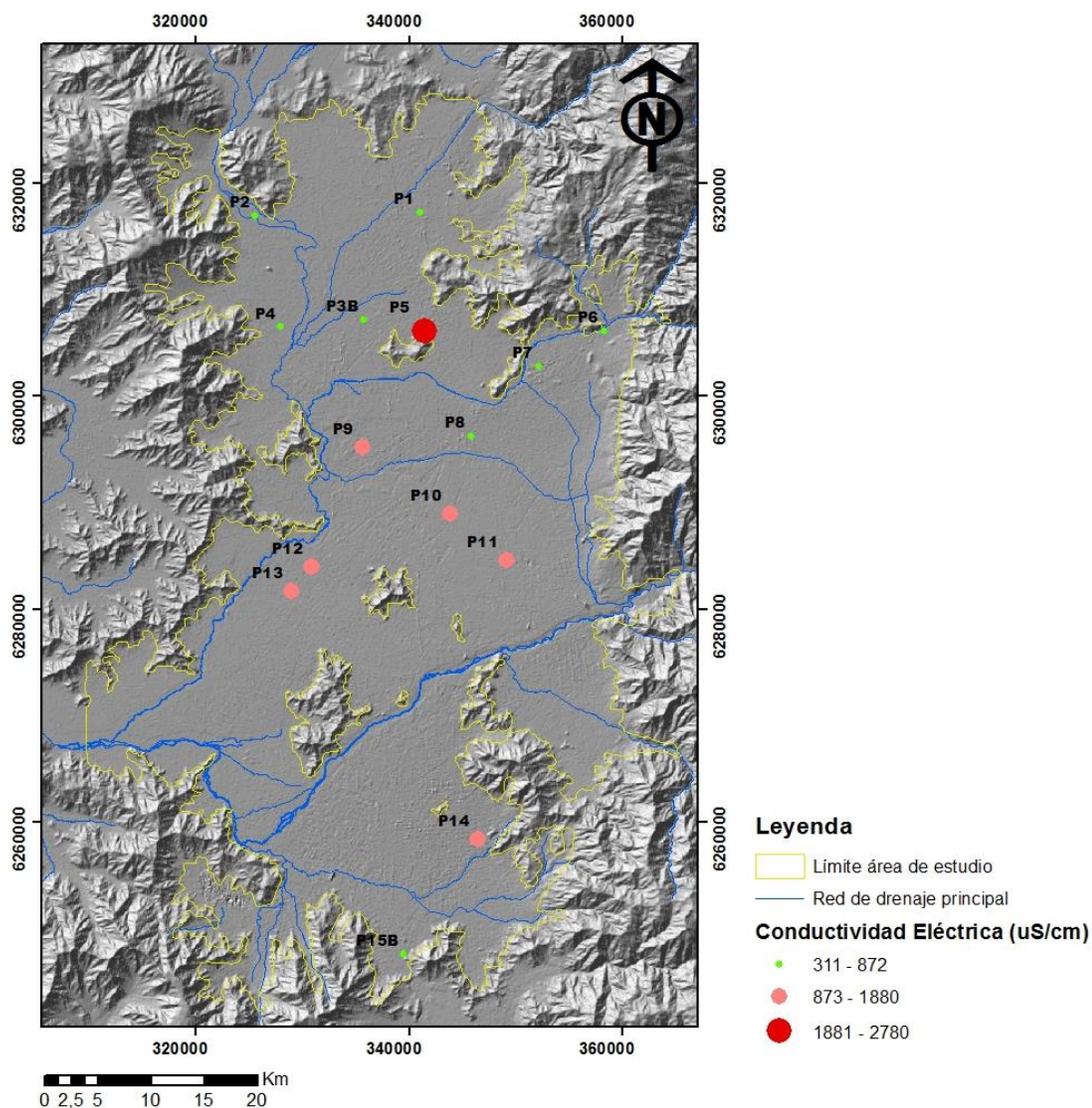


Figura 21 Mapa de distribución de conductividad eléctrica, año 2006. Coordenadas UTM Huso 19S.

4.3 Identificación de procesos hidrogeoquímicos

4.3.1 Análisis estadístico

4.3.1.1 Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos es una herramienta útil y simple para empezar a preparar y organizar los datos, y permite tener una visualización previa al análisis definitivo que se realizará posteriormente. Entre sus objetivos se encuentran:

determinar la distribución de las variables a estudiar, identificar correlaciones entre variables, detectar errores en las mediciones y reconocer datos atípicos u *outliers*.

Existen diferentes técnicas que utilizan el análisis exploratorio de datos, entre ellas se encuentran las técnicas gráficas las cuales, en forma sencilla, permiten mostrar las características y propiedades subyacentes en cada uno de los parámetros analizados. Dentro de los métodos más comunes de este tipo se encuentran los histogramas, los diagramas de puntos y los diagramas de cajas o *box plots*, éstos últimos se han utilizado con frecuencia en prospecciones geoquímicas con el fin de detectar valores anómalos e identificar procesos (Daniele, 2007).

Los diagramas de caja son gráficos, basados en cuartiles, que describen en forma visual varias características importantes al mismo tiempo de un determinado conjunto de datos. El gráfico se construye dibujando una caja que se extiende del cuartil inferior de la muestra al cuartil superior (intervalo que contiene el 50% de los datos), se inserta una línea vertical correspondiente a la mediana y un signo “+” se coloca en la media, luego, se dibujan líneas, llamadas bigotes, en los extremos de las cajas, las que representan los valores más grandes y pequeños de los datos. Si existen datos atípicos éstos se ilustran como puntos aislados por debajo o delante de la caja.

Para la elaboración de los diagramas se utilizó el programa Statgraphics. Los datos fueron separados por variable y por año, obteniéndose de esta manera 10 gráficos correspondientes a los elementos mayores, la temperatura y el pH (Figura 22).

De los diagramas elaborados se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Los gráficos de los iones Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} y HCO_3^- presentan una concentración sin variaciones significativas en sus valores durante los tres años analizados. Sin embargo, a partir del año 2006 se puede observar la presencia de un dato atípico, el cual corresponde al pozo ubicado en un relleno sanitario (ex vertedero de Cerros de Renca). Las concentraciones de la estación señalada difieren, notoriamente, del resto de los valores, por lo que podría indicar un posible foco de contaminación.
- En las concentraciones de nitratos se logra ver que la mayoría de los valores se ubican bajo los 10 mg/l y que presentan un leve aumento durante los tres años analizados. Se observa que existen datos atípicos que superan los 20 mg/l, relacionados a los pozos del Cementerio Metropolitano y al ubicado en la parte oeste de la cuenca (P9), los cuales, al igual que en punto anterior, pueden indicar posibles procesos de contaminación.
- Los sulfatos son el parámetro que presenta la mayor variación en sus concentraciones, los cuales van aproximadamente de 50 a 350 mg/l. Este comportamiento se relaciona con lo observado en los diagramas de Stiff, el cual mostraba una variación en los valores de sulfato en la zona de estudio, lo

que podría indicar alguna influencia antrópica o recorrido por litologías ricas en este elemento. Para el caso del sodio y el potasio se observan concentraciones constantes en los 3 años.

- Con respecto a los parámetros físicos-químicos, como el pH y la temperatura, se puede decir que el pH, al igual como lo señalado en el ítem anterior, presenta valores que se mantienen entre neutro a levemente alcalino, con excepción de puntos atípicos que presentan valores mayores a 8,5 o cercanos a 6,5 correspondiente al año 2010. En el caso de la temperatura no presenta gran variación en sus valores, los cuales se concentran, en su mayoría, entre los 16 y 20 grados Celsius.

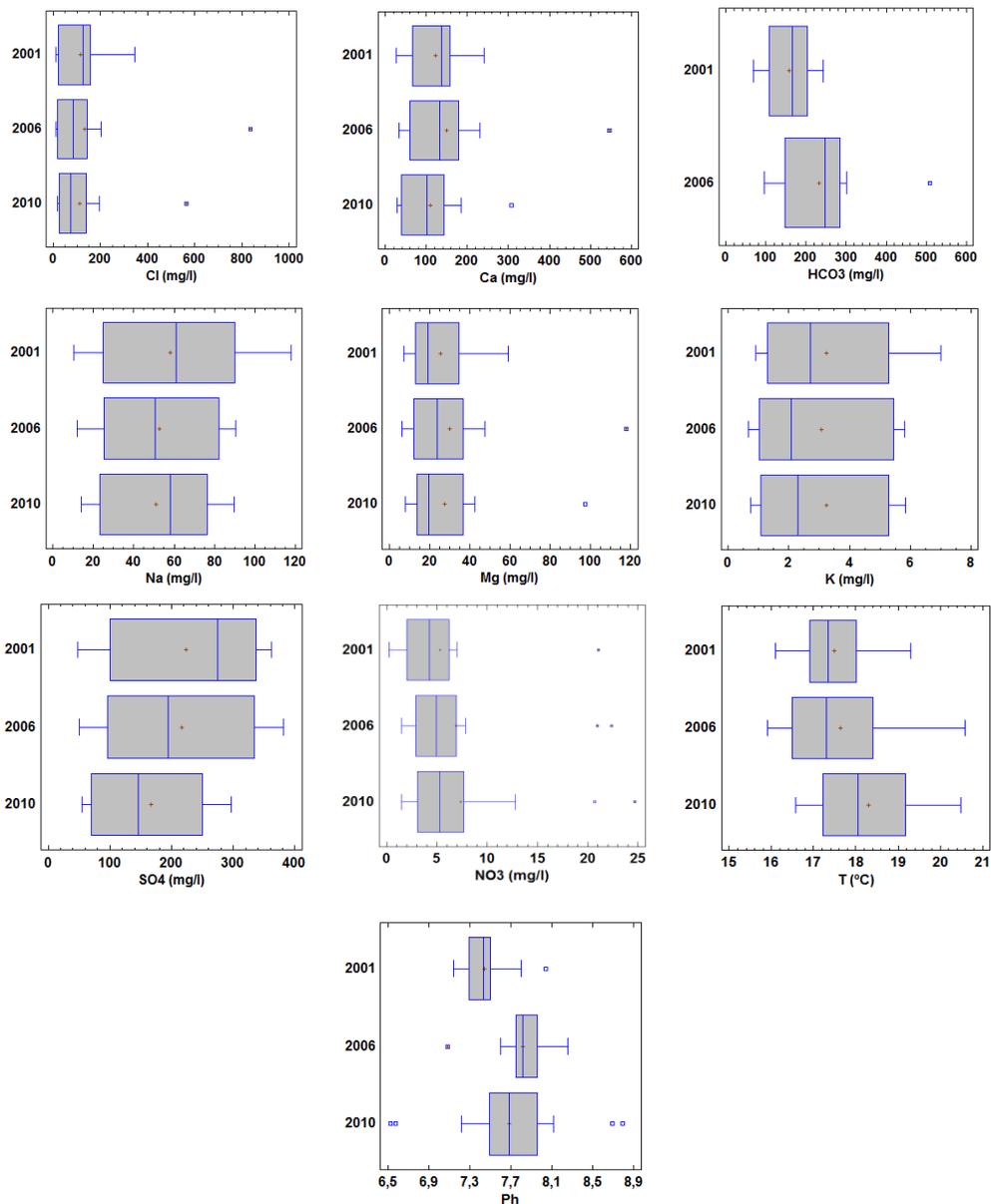


Figura 22 Diagramas de caja de los elementos mayores, el pH y la temperatura.

Otra técnica útil, y que es utilizada habitualmente es el análisis de correlación. Este método bivariante se aplica para describir el grado de relación entre dos parámetros analizados. Un alto coeficiente de relación, con valores cercanos a 1 (o -1, correlación inversa), indica una buena relación entre las dos variables, por el contrario, un valor próximo a cero indica una ausencia de relación. Para este estudio se definirá un $r > |0,7|$ para indicar una alta correlación, entre $|0,5|$ y $|0,7|$ una correlación moderada, entre $|0,3|$ y $|0,5|$ una correlación débil y menor a $|0,3|$ una escasa o nula correlación.

El coeficiente ocupado corresponde al de correlación de rangos o de Spearman, el cual no requiere que los datos tengan una distribución normal. En la Tabla 3 se pueden observar las matrices de correlación de cada uno de los años considerados. Los parámetros analizados con este método son los elementos mayores y trazas (con excepción del As y Mn) más los valores de pH y temperatura.

Los resultados obtenidos permiten observar que entre las altas correlaciones positivas, que se mantienen durante los tres años, se encuentran las del ion Cl^- con Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y SO_4^{2-} , del K^+ con Na^+ y SO_4^{2-} y del Ca^{2+} con SO_4^{2-} . En el caso contrario, el único ion que tiene una correlación negativa, aunque no significativa, con la mayoría de los otros parámetros es el PO_4^{3-} . Este resultado es coherente con lo observado en el mapa de distribución y es asociado al origen antrópico de este ion, aunque las concentraciones encontradas son muy bajas. Entre todas las variables analizadas, los bicarbonatos experimentan el mayor cambio entre las medidas de los años 2001 y 2006. En este último año se presentan unas altas correlaciones con la mayoría de los otros parámetros, hecho que no se observa en la matriz asociada al año 2001 y que no se puede corroborar en el año 2010 por la ausencia de este parámetro en los datos.

La buena correlación positiva de la mayoría de los iones con el Cl^- podría indicar que las concentraciones aumentan a medida que aumenta la salinidad, comportamiento que es coherente con el incremento a lo largo del recorrido del flujo subterráneo y, que en ocasiones puntuales, quizás pueda estar influenciado también por actividades antrópicas. Por otro lado, los nitratos presentan correlaciones moderadas con el K^+ , el Ca^{2+} y el Mg^{2+} lo que podría asociarse a la actividad de fertilizantes ya que el nitrato de potasio, de calcio y de magnesio se encuentran entre los tipos de fertilizantes más utilizados en la agricultura (INIA, 2010).

En el caso de los parámetros físicos se puede decir que la temperatura muestra una escasa o nula correlación con las demás variables, mientras que el pH, en los datos del 2006, muestra altos valores de correlación negativa. Por lo tanto, no habría una especial dependencia entre la concentración de la mayoría de las variables con el pH.

Tabla 3 Matrices de correlación de los parámetros físicos y químicos de los años estudiados.

2001

	Cl	Al	HCO3	Ca	Fe	PO4	Mg	NO3	pH	K	Na	SO4	T
Cl	1												
Al	-0,09	1											
HCO3	0,26	-0,04	1										
Ca	0,81	-0,1	0,29	1									
Fe	0,64	-0,09	0,39	0,51	1								
PO4	-0,44	-0,37	0,44	-0,37	-0,18	1							
Mg	0,92	-0,26	0,38	0,68	0,78	-0,18	1						
NO3	0,16	-0,26	-0,01	0,47	0,2	-0,19	0,16	1					
pH	0,24	0,37	-0,09	0,16	0,3	-0,67	0,13	-0,04	1				
K	0,68	-0,09	0,24	0,58	0,46	-0,43	0,62	0,56	0,26	1			
Na	0,81	0,10	0,05	0,52	0,57	-0,64	0,72	0,23	0,37	0,75	1		
SO4	0,80	0,16	0,02	0,73	0,47	-0,62	0,65	0,41	0,26	0,77	0,85	1	
T	0,21	0,25	0,27	0,34	-0,03	-0,31	0,04	-0,19	0,35	-0,03	0,09	0,02	1

2006

	Cl	Al	HCO3	Ca	Fe	PO4	Mg	NO3	pH	K	Na	SO4	T
Cl	1												
Al	0,48	1											
HCO3	0,79	0,17	1										
Ca	0,95	0,41	0,81	1									
Fe	0,31	0,17	0,23	0,27	1								
PO4	-0,65	-0,76	-0,23	-0,55	-0,24	1							
Mg	0,84	0,12	0,88	0,88	0,26	-0,33	1						
NO3	0,6	0,18	0,68	0,68	0,11	-0,4	0,74	1					
pH	-0,74	-0,38	-0,6	-0,79	-0,54	0,48	-0,71	-0,56	1				
K	0,79	0,24	0,67	0,78	0,24	-0,59	0,77	0,49	-0,65	1			
Na	0,8	0,4	0,75	0,75	0,2	-0,55	0,71	0,67	-0,58	0,7	1		
SO4	0,89	0,47	0,75	0,94	0,14	-0,65	0,81	0,75	-0,72	0,78	0,85	1	
T	0,23	0,10	0,21	0,06	0,17	-0,02	0,03	-0,13	0,15	-0,06	0,29	0,00	1

2010

	Cl	Ca	Fe	PO4	Mg	NO3	pH	K	Na	SO4	T
Cl	1										
Ca	0,87	1									
Fe	-0,01	0,00	1								
PO4	-0,5	-0,30	0,06	1							
Mg	0,8	0,85	-0,09	-0,25	1						
NO3	0,64	0,67	-0,11	-0,23	0,78	1					
pH	0,24	-0,08	-0,11	-0,49	-0,07	-0,1	1				
K	0,76	0,74	0,06	-0,58	0,78	0,61	-0,06	1			
Na	0,82	0,75	0,24	-0,38	0,68	0,51	0,08	0,75	1		
SO4	0,91	0,89	0,03	-0,56	0,79	0,64	0,2	0,75	0,86	1	
T	0,15	-0,06	-0,01	0,24	0,05	-0,19	0,26	0,06	0,16	-0,05	1

0,0-0,3
0,3-0,5
0,5-0,7
>0,7

4.3.1.2 Análisis multivariante

El análisis multivariante es un conjunto de métodos estadísticos y matemáticos, cuyo objetivo es describir e interpretar los datos que provienen de la observación de diferentes variables estadísticas (Cuadras, 2014). Con el método univariante sólo se estudia el comportamiento de una variable, en este caso los parámetros físico-químicos por separado. En cambio, con el multivariante se considera las pautas entre las variables observando la relación existentes entre ellas.

El método estadístico, ocupado en este estudio, corresponde al análisis cluster jerárquico (ACJ), el cual es una técnica elaborada para identificar agrupaciones, o clusters, dentro de un conjunto de datos. El ACJ es una de las técnicas estadísticas más usadas en las Ciencias de la Tierra y a menudo es usado en la clasificación de datos hidrogeoquímicos (Cloutier *et al.*, 2008).

Los grupos de variables se representan en gráficos denominados dendrogramas, que permiten visualizar los grupos relacionados entre sí. Para este análisis las variables ocupadas correspondieron a los elementos mayores, en meq/l, y el pH. El método de agrupamiento empleado fue el del vecino más cercano y la distancia es la euclidiana cuadrada.

En la Figura 23 se pueden ver los 3 dendrogramas realizados para los datos de los tres años estudiados. En estos gráficos, la altura de cada barra indica la distancia (menor relación) entre las variables, mientras más pequeña sea la distancia mayor será la relación con la variable a la que se encuentra conectada. En los diagramas obtenidos se observa que el par que presenta la menor distancia es el de K^+ y NO_3^- , otro grupo que se puede identificar es el formado por el Na^+ , Mg^{2+} , y Cl^- , el cual se repite los dos primeros años. Posteriormente, se les une el SO_4^{2-} y el Ca, los que en el dendrograma relacionado a los años 2001 y 2006 presentan un grupo aislado, finalmente, se une el pH a una gran distancia.

La fuerte relación entre el K^+ y el NO_3^- indica que estos dos elementos pueden tener un origen común y que ésta podría estar vinculado al uso de fertilizantes que, en gran parte de los casos, son a base de nitrógeno y potasio (INIA, 2010) y podrían afectar las aguas subterráneas de las zonas cercanas a donde son utilizados. Además, en estos lugares, el nivel freático es poco profundo (menor a 25 metros) y muchos de los sondajes en el que se toman las muestras se ubican en sectores donde existe actividad agrícola, principalmente en las zonas norte y oeste de la Cuenca de Santiago.

En caso del pH se puede corroborar lo observado en las matrices de correlación, donde no se puede concluir que el comportamiento de este parámetro esté relacionado con alguna otra variable, indicando que su influencia en el quimismo encontrado es escasa. Si bien, no está representada en estos dendrogramas, la temperatura presenta una pauta similar a la del pH. No está incluida porque la distancia obtenida era extensa y dificultaba la presentación de los gráficos, pero al ser su distribución parecida a la del pH, se deduce que su influencia en los parámetros analizados es escasa.

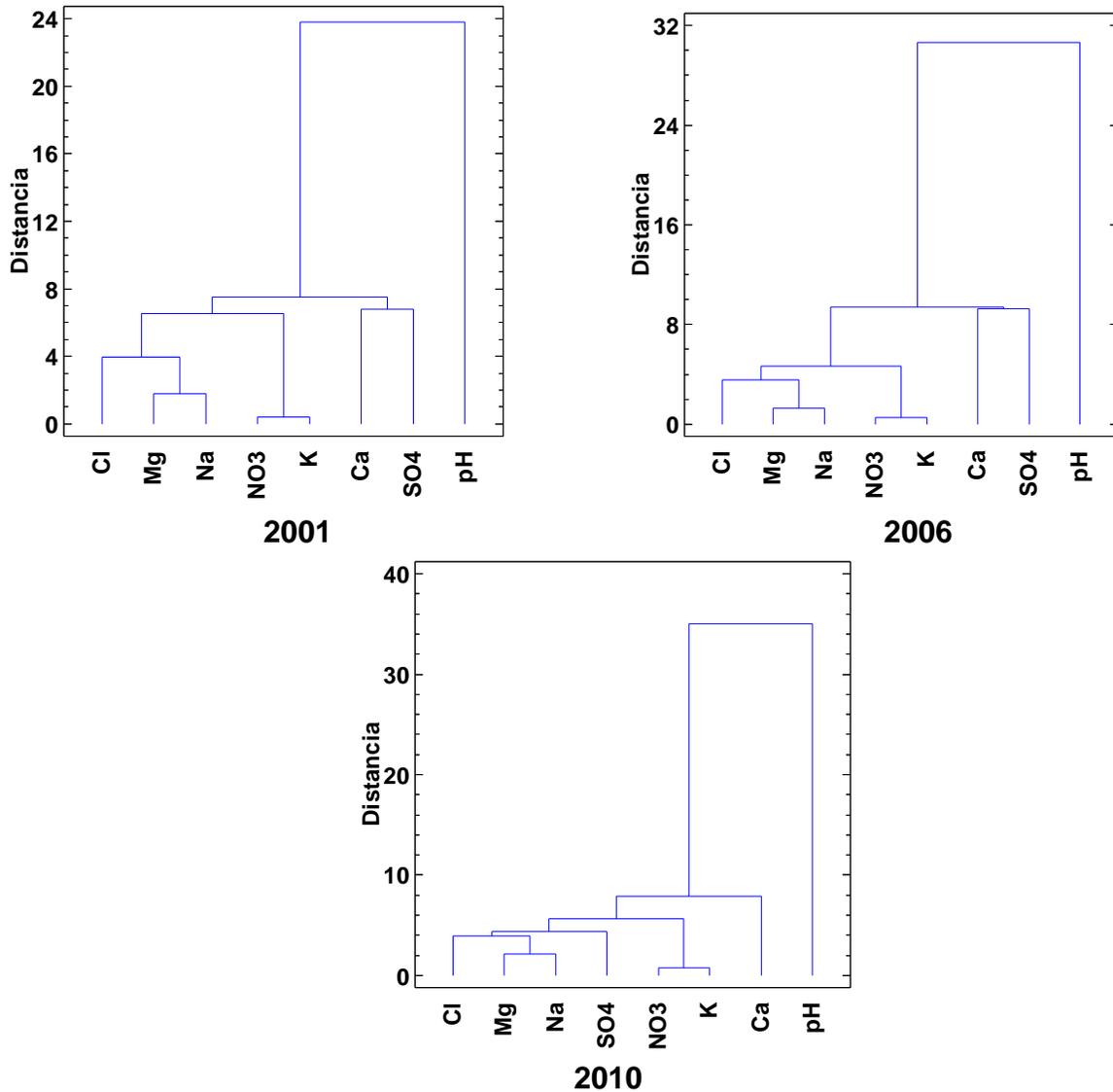


Figura 23 Dendrogramas para elementos mayores y pH de los datos de aguas subterráneas que considera los tres años estudiados.

De igual manera, se realizó un dendrograma con los datos del año 2006, con el objetivo de observar las similitudes entre las estaciones de toda la zona (Figura 24). Se puede ver que la agrupación obtenida se relaciona a lo analizado en los ítems anteriores, donde hay una separación entre las estaciones ubicadas al este y cercanas al límite de la Cuenca de Santiago y las que se encuentran en las zonas centro y oeste. También, se tienen pares de estaciones P3B-P4 y P9-P10 cuyas uniones reflejan un comportamiento semejante entre éstas. La estación P5, ubicada en el ex vertedero, muestra un comportamiento muy distante a las otras, probablemente, relacionado a la fuerte exposición a contaminantes antrópicos.

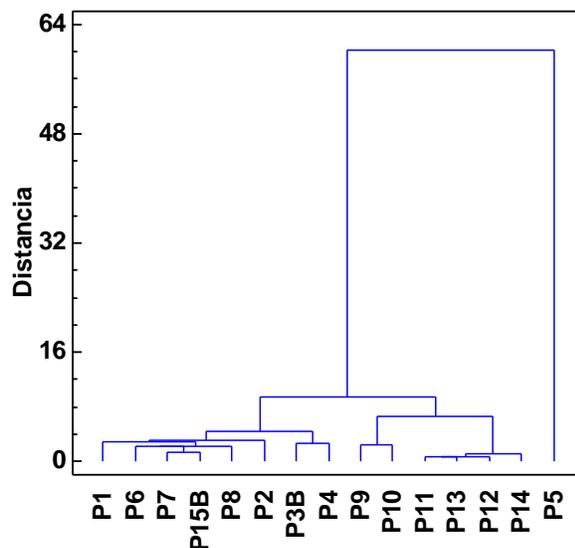


Figura 24 Dendrograma para las estaciones de aguas subterráneas, datos año 2006.

4.3.2 Procesos de interacción agua-roca

La química de las aguas subterráneas puede estar controlada por diferentes procesos y mecanismos. Entre los factores que pueden influir se encuentran el estado físico del acuífero, la mineralogía de la roca huésped y las condiciones climáticas. Gibbs (1970) propone dos diagramas, donde se grafican las variaciones de las razones $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ para los cationes y $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ para los aniones en función del total de sólidos disueltos (TSD). Estos diagramas permiten identificar el mecanismo controlador de la química en las aguas subterráneas, los cuales pueden ser la interacción con la roca, la precipitación o la evaporación.

En la Figura 25, que ocupa los datos correspondientes a los años 2001 y 2006, se muestra en forma evidente que la mayoría de las muestras caen en la zona de interacción con la roca, por lo que los procesos de disolución/precipitación de minerales y/o el intercambio iónico deberían controlar su química. Se observa que algunas estaciones se ubican en el sector de evaporación del diagrama, estos puntos corresponden a estaciones ubicadas en la zona centro y oeste del área de estudio, donde el nivel freático es más somero (inferior a 20 metros de profundidad) y, donde probablemente puedan ocurrir procesos de evaporación. Para el caso de las estaciones ubicadas al noreste de la zona, donde el nivel freático también es somero, el relleno sedimentario en la parte superior presenta una granulometría fina, principalmente limo y arcilla, que podría atenuar los procesos de evaporación y conllevar a que las muestras se vieran controladas por la interacción del agua con los sedimentos de la cuenca.

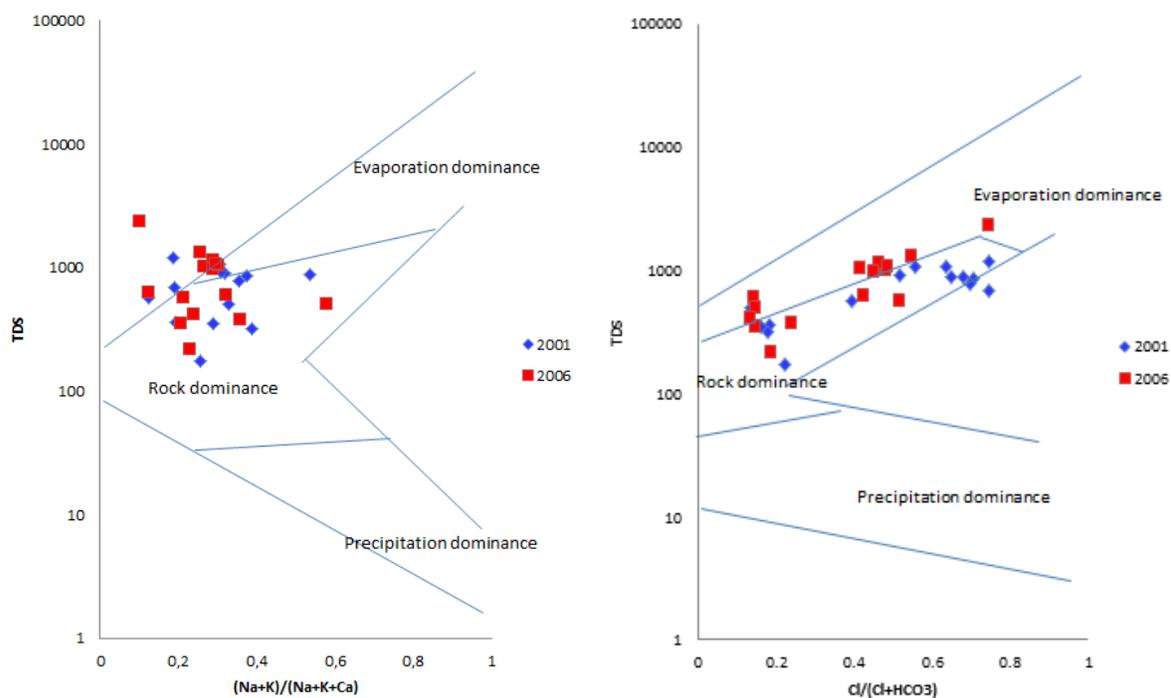


Figura 25 Diagramas de Gibbs que ilustran el mecanismo controlador de las aguas subterráneas de la zona de estudio.

Teniendo presente el mecanismo controlador de la química de las aguas subterráneas es necesario identificar los procesos de interacción agua-roca que ocurren, como por ejemplo la meteorización de minerales. Las razones iónicas son una herramienta útil para determinar el origen de la composición de las aguas en un área de estudio. En este trabajo las razones ocupadas serán: rCa/rMg y rNa/rCl ($r = meq/l$), éstas serán graficadas versus el Cl^- , anión frecuentemente utilizado como trazador a lo largo del flujo de agua subterránea (Han *et al.*, 2009). Además, se puede considerar conservativo como indicador del movimiento del agua (Araguás, 1993).

La relación rCa/rMg señala que si la razón es igual a 1 se asume que ocurre disolución de dolomita, mientras que una razón más alta indica una mayor contribución de calcita (Mayo and Loucks, 1995). A su vez, Katz *et al.* (1998) agregó que una alta razón molar ($rCa/rMg > 2$) es indicativo de la contribución de silicatos. En el gráfico de la Figura 26 se puede observar que la mayoría de los datos caen sobre la línea igual a 2 lo que indicaría la interacción de las aguas analizadas con silicatos. Sin embargo, cabe señalar que dicha interacción es un mecanismo lento y, las condiciones de pH y temperatura no son las más adecuadas. Una posible explicación es que las aguas subterráneas interactúen con silicatos ya meteorizados y, de esta forma, sea más fácil que los iones provenientes de estos minerales sean adquiridos como componentes de las aguas.

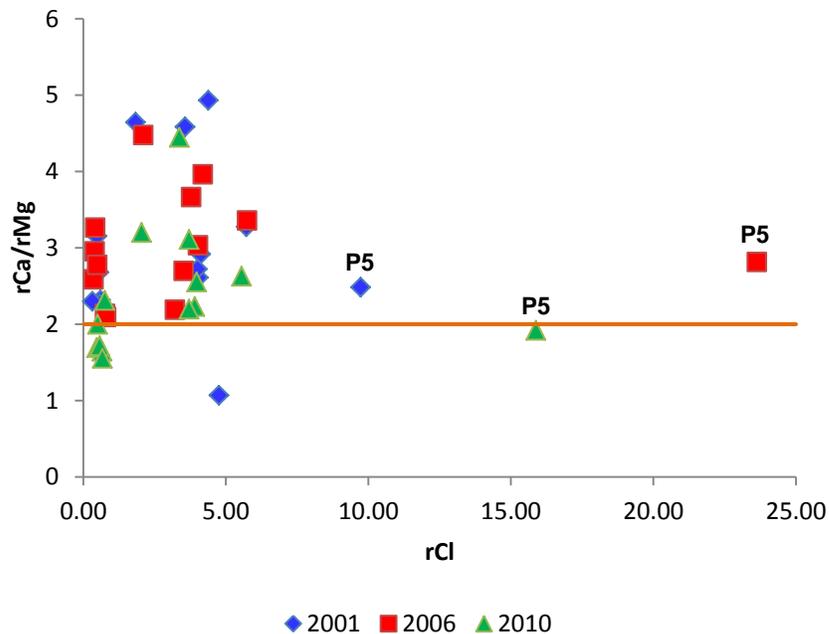


Figura 26 Relación de la razón iónica rCa/rMg versus el anión rCl.

Con respecto a la relación rNa/rCl , se puede observar en el gráfico de la Figura 27 que las muestras forman dos grupos, uno correspondiente a las estaciones que presentan bajas concentración de Cl^- y una alta razón rNa/rCl (mayor a 1), y el otro con altos valores de Cl^- y razones cercanas o menores a 1. Un valor mayor a 1 puede ser interpretado como un exceso de sodio producto de la meteorización de silicatos (Maiback, 1987) o señalar procesos de intercambio iónico. Según Rogers (1989), si la disolución de silicatos es una probable fuente de sodio, las muestras de aguas subterráneas deberían tener HCO_3^- como el anión más abundante, esto ya que la reacción de feldespatos con ácido carbónico, en presencia de agua, libera HCO_3^- (Elango *et al.*, 2003). Al observar el mapa de distribución de esta relación en la Figura 28, se muestra que las estaciones que presentan dicha característica son, en su mayoría, las ubicadas en el norte y este de la zona, lugares, según lo observado en los diagramas de Stiff y Piper, donde las aguas son sulfatadas-bicarbonatadas.

Con lo anterior señalado, es probable que en este grupo de aguas predomine la interacción con silicatos meteorizados aportando sodio a las aguas subterráneas. Tampoco se descartan procesos de intercambio iónico debido a que, para el caso de las estaciones ubicadas al noreste de la zona de estudio (P2, P4 y P3B), la alta presencia de sedimentos finos, como arcillas, permitirían que ocurriera este proceso donde los iones de sodio se intercambiarían con otros cationes. También cabe señalar, que la estación P3B, la cual presenta el valor más alto de rNa/rCl , registra la menor concentración de calcio, según lo muestra el diagrama de Stiff, lo cual podría tener relación a la mayor movilidad que presenta el sodio con respecto al calcio en presencia de arcillas, donde éste último podría ser retenido.

Por otro lado, para el caso del segundo grupo, con una razón rNa/rCl menor y cercana a 1 es usualmente atribuido a la disolución de halita. Sin embargo, esta opción no concuerda con las características del acuífero del área de estudio, cuyo relleno sedimentario es principalmente aluvial y fluvial y donde no se ha descrito este mineral en esta zona. El aumento de Cl^- en estas zonas, que corresponden a las ubicadas al centro y oeste de la cuenca, podría deberse a otros procesos químicos, como la evaporación, debido a que estas muestras caen en dicha zona en el diagrama de Gibbs, la cual conlleva a un aumento de salinidad. Tampoco se descarta la actividad antropogénica del lugar, ya que el exceso del anión Cl^- es usualmente ocupado como un índice y trazador de contaminación de aguas subterráneas (Loizidou y Kapetanios, 1993). Además, Jeelani *et al.* (2014) señalan que una buena correlación entre el Na^+ y el Cl^- estaría relacionada con la presencia de residuos domésticos, en este estudio el coeficiente de correlación entre los dos iones es sobre 0.8, lo que indica una fuerte correlación. Las muestras que más se alejan son las ubicadas en el ex vertedero (P5), las que señalan un comportamiento influenciado, principalmente, a la contaminación del sector.

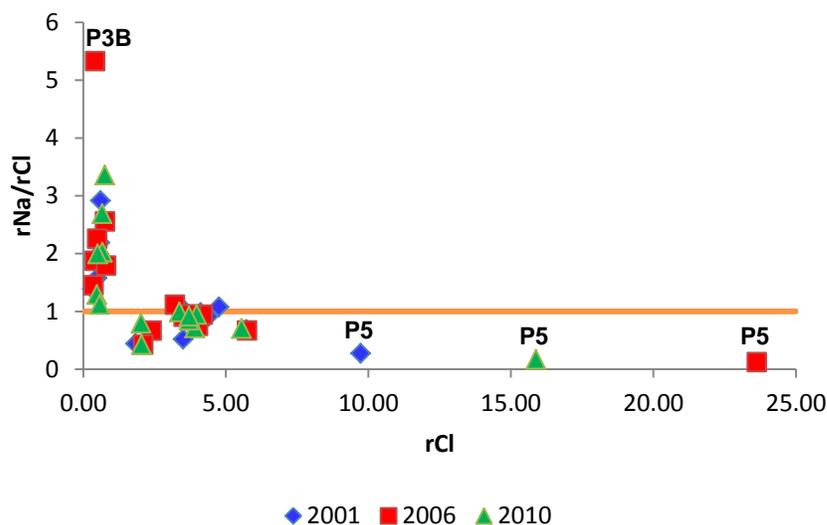


Figura 27 Relación de la razón iónica rNa/rCl versus el anión rCl .

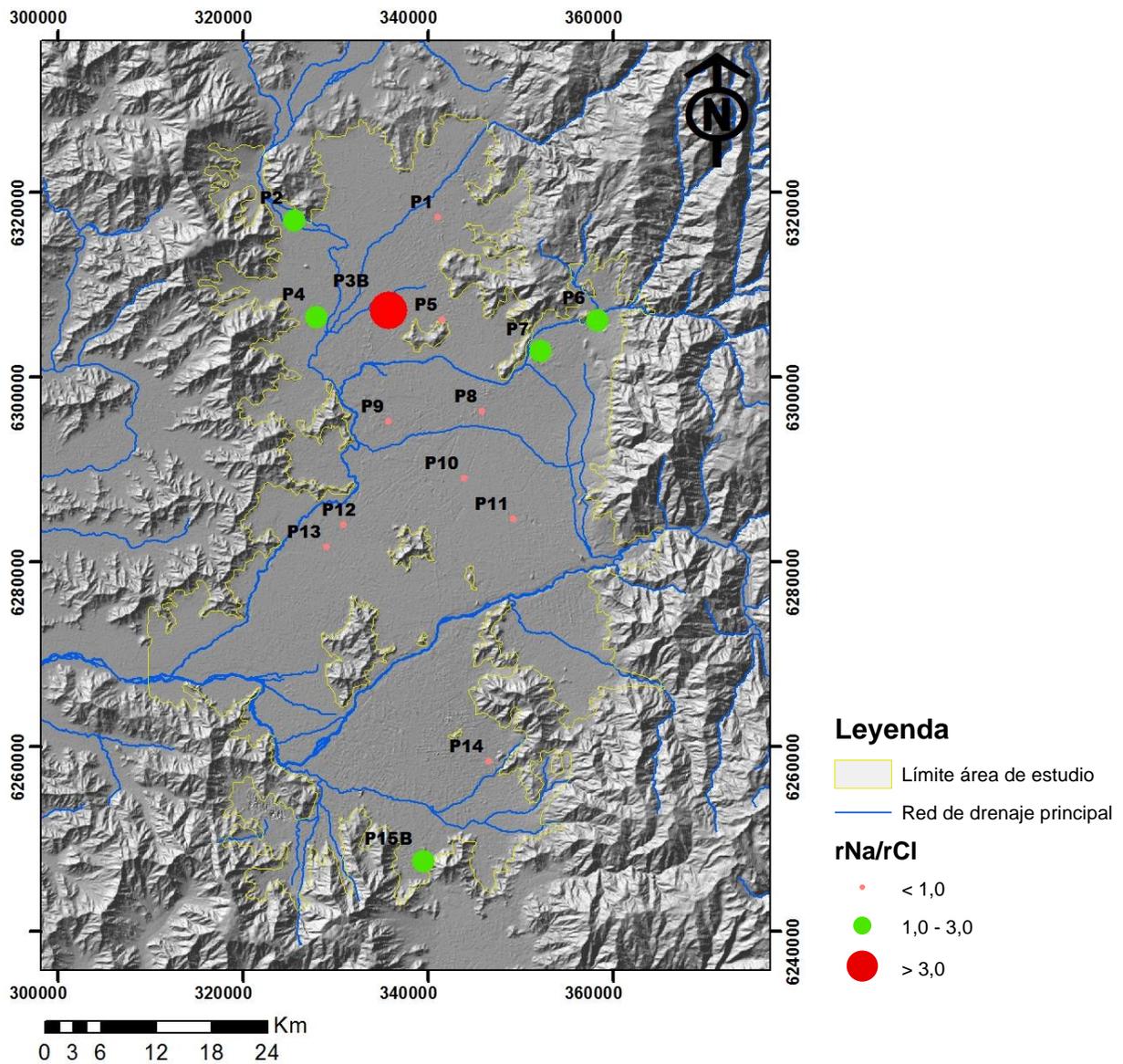


Figura 28 Distribución espacial de la razón rNa/rCl en el área de estudio. Datos correspondientes al año 2006. Coordenadas UTM Huso 19S.

Como se observó en los diagramas Piper y Stiff, junto al análisis realizado anteriormente, las estaciones de monitoreo se pueden agrupar según las composiciones químicas determinadas en las aguas subterráneas. Los dos grupos identificados presentan diferencias en sus características químicas, como las proporciones de aniones y la concentración de iones. Las estaciones ubicadas al norte del área de estudio presentan aguas más bicarbonatadas que las muestras ubicadas en el centro y oeste de la cuenca, que van de sulfatadas a cloruradas.

En la Figura 29 se muestran los principales depósitos que se encuentran en la Cuenca de Santiago (Sellés y Gana, 2001; Wall *et al.*, 1999) junto a la ubicación de

las estaciones, las direcciones preferenciales del flujo (Iriarte, 2003) y el tipo de agua identificada. Al observar la distribución de las estaciones y los cambios litológicos en el relleno sedimentario, se puede observar una posible relación entre la distribución de los tipos de aguas y las variaciones litológicas, como también en la posición de los puntos con respecto a la dirección del flujo de las aguas subterráneas.

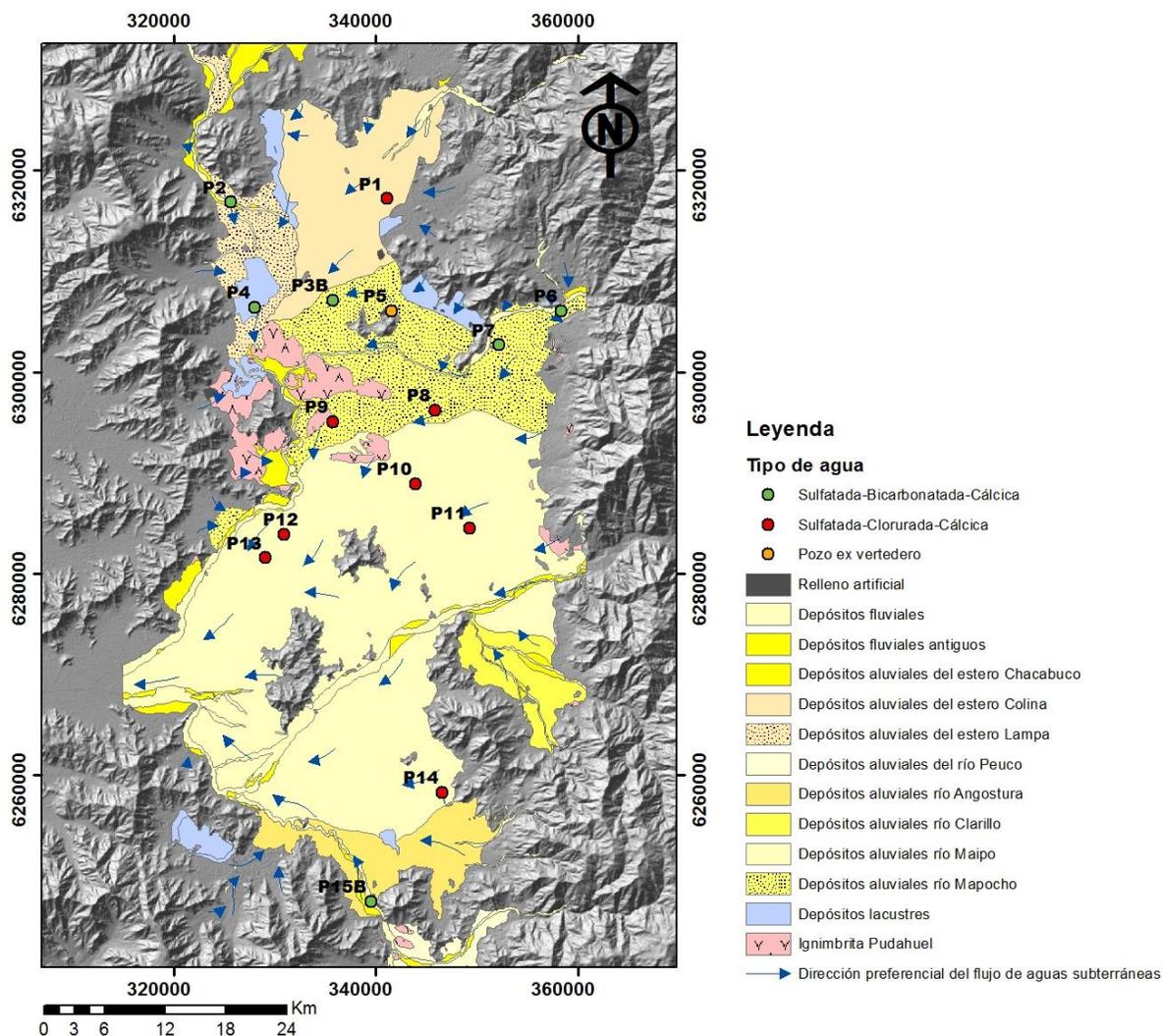


Figura 29 Mapa de la distribución del tipo de agua identificada junto con los principales depósitos sedimentarios de la Cuenca de Santiago y las direcciones preferenciales del flujo de aguas subterráneas. Coordenadas UTM Huso 19S.

Los sondajes y perfiles estratigráficos, realizados en el sector norte de la cuenca (Morales, 2003; Proyecto de baja entalpía, 2015 CEGA), revelan que el relleno sedimentario presenta niveles arcillosos de potencia mayor a los que se encuentran

en las zonas centro y sur, donde la granulometría del relleno es principalmente de arenas y gravas en su parte superior. Esto implica que el acuífero, generalmente libre, presenta características más parecidas a un tipo confinado hacia el norte. Considerando lo anterior, se puede señalar que en las zonas con alto contenido de sedimentos finos se podrían dar cambios en la circulación hidráulica, los cuales podrían jugar un papel importante en la composición hidrogeoquímica encontrada. Estos cambios podrían estar también asociados con las bajas concentraciones de nitratos en los pozos P3B y P4 (inferior a 3 mg/l), indicando que existe cierta separación con la superficie y que la zona podría ser menos propensa a recibir contaminación antrópica, de acuerdo también a lo indicado en el mapa de vulnerabilidad de Iriarte (2003).

Si bien, las diferencias litológicas e hidráulicas pueden tener alguna implicancia en los tipos de aguas encontrados, en el caso de las aguas de tipo sulfatado-bicarbonatado, como se puede observar en la Figura 29, corresponden a aguas situadas en zonas de proximidad a las áreas de recarga, donde seguramente es menor el tiempo de residencia y/o presentan un recorrido más rápido, al situarse en zonas de infiltración con mayor pendiente que la zona central. Lo anterior coincidiría con la secuencia de Chevotareb, la cual señala que aguas recién infiltradas son del tipo bicarbonatado y, a medida que aumenta su recorrido y tiempo de residencia, pasan a ser sulfatadas y finalmente cloruradas.

Por otro lado, asumiendo que el flujo va en dirección suroeste, se observa que las aguas subterráneas cambian a un tipo más sulfatado- clorurado. Esto puede ser por posibles procesos naturales, que adquieren iones a lo largo del recorrido en el sentido del flujo, por una mayor interacción con el relleno sedimentario, debido a procesos de evaporación (al menos en algunos puntos, según el diagrama de Gibbs) o por causas antrópicas, producto de una mayor exposición a zonas urbanas y agrícolas. Esto podría explicar las características del segundo grupo, ubicado en las zonas centro y oeste de la Cuenca de Santiago.

4.4 Variación temporal

Con el objetivo de observar la variación de las concentraciones en el tiempo se elaboraron gráficos para cada estación de monitoreo (Anexo F), donde cada punto representa el promedio de la concentración (en meq/l) de un determinado ión para cada año seleccionado. La base de datos ocupada en este estudio tiene registros discontinuos desde 1991 en adelante. Sin embargo, los registros comienzan a ser más sistematizados a partir del año 2000. Es por esto que se añadieron dos años más para poder observar de mejor manera el comportamiento de cada parámetro, para este caso se agregaron datos de los años 1991 o 1992 y del año 2013.

En la Figura 30 se pueden observar los gráficos de cuatro estaciones representativas del área de estudio. El primer gráfico corresponde al pozo P1 ubicado en el sector norte de la Cuenca de Santiago. Se ve que existe un aumento en las concentraciones de algunos iones entre los años 1992 y 2001. Las variaciones más significativas son las de SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Cl^- , el Mg^{2+} presenta un

incremento pequeño, mientras que en los siguientes años se observa una disminución paulatina en la concentración.

Los bicarbonatos son el único parámetro que disminuye su cantidad en los primeros tres años seleccionados. Los otros parámetros no presentan grandes variaciones. Esta estación se encuentra en un sector rural, con instalaciones de parcelas y fundos, donde existe principalmente actividad agrícola, por lo que no se descarta que la variación de la concentración de iones pudiera estar relacionada a actividad antrópica.

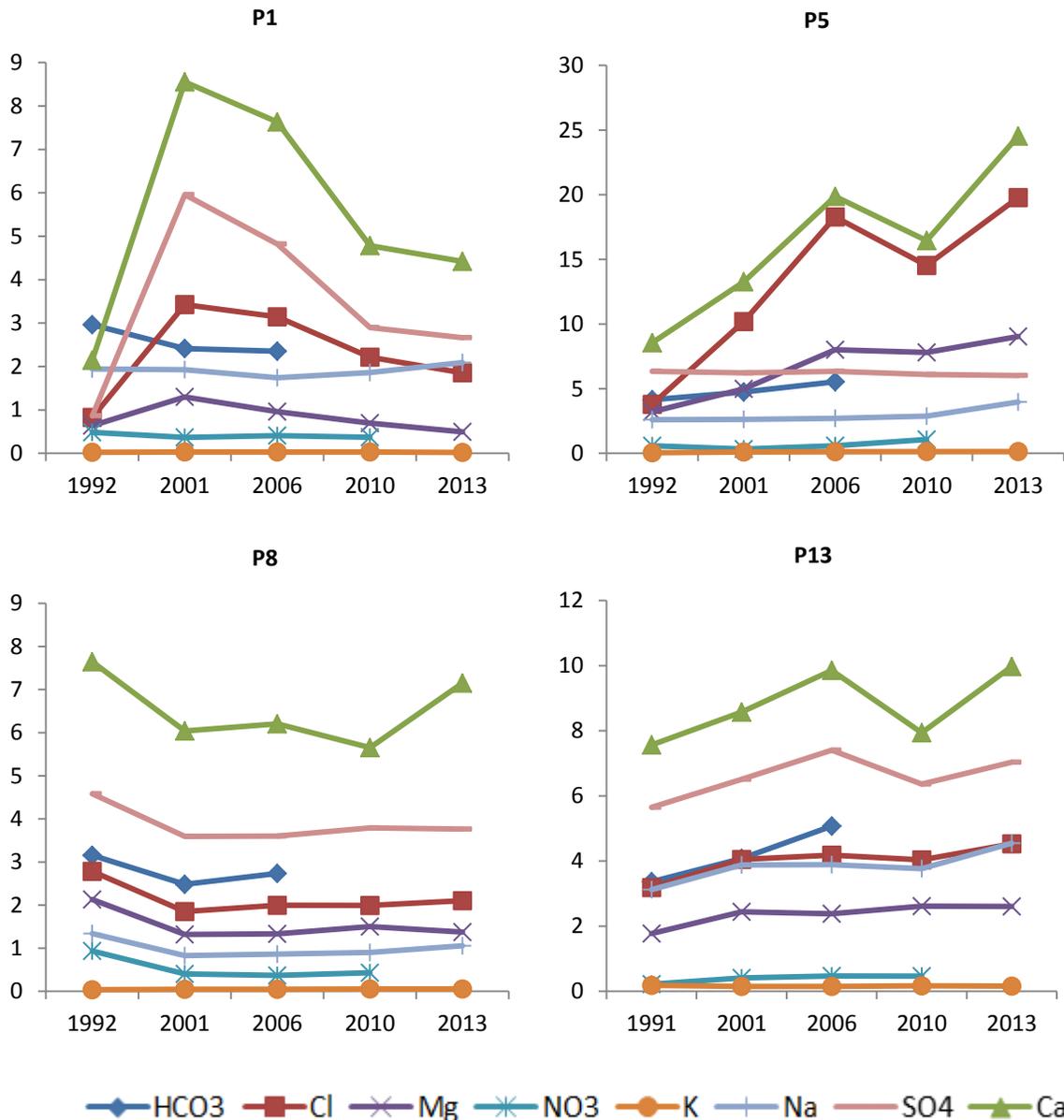


Figura 30 Variación en la concentración de iones (meq/l) en cinco años de cuatro estaciones de monitoreo de aguas subterráneas.

La estación ubicada en el ex vertedero (P5) presenta un importante aumento en las concentraciones de Cl^- y Ca^{2+} , también de Mg^{2+} y HCO_3^- pero menos significativo. Los otros iones se mantienen sin variación. Por lo tanto, se puede señalar que exista alguna relación con el relleno sanitario, donde una deficiente impermeabilización podría influir en gran medida en la concentración de determinados iones en las aguas subterráneas que se encuentran en ese sector.

En el caso de las estaciones P8 y P13, a diferencia de las dos estaciones anteriores, las variaciones en el tiempo son menos pronunciadas. La primera, ubicada en la comuna de Santiago, en la zona centro del área de estudio, muestra una disminución en la concentración de sus iones en el intervalo del primer y segundo año seleccionado, después mantiene un comportamiento sin importantes variaciones. El pozo P13, emplazado en el sector sur, en área de actividad agrícola, presenta un incremento gradual en las concentraciones de la mayoría de los parámetros en los primeros años analizados.

Si se analizan los gráficos de todos los pozos (ver Anexo F), se puede señalar que las variaciones de concentraciones como Cl^- , SO_4^{2-} y Ca^{2+} podrían estar influenciadas, en algunos casos, por actividad antropogénica, proveniente de distintas fuentes ya sean industriales, domésticas o agrícolas. Con respecto al orden de las proporciones de cada ion, se tiene que en algunos pozos (P8, P10 y P12) la disposición de los aniones cambia, donde el anión SO_4^{2-} , debido a su fuerte incremento, pasa a ser el mayoritario superando al HCO_3^- , el cual disminuye en forma más leve. Para los cationes el Ca^{2+} , en todas las estaciones, se mantiene como el catión mayoritario, presentando en algunas situaciones un fuerte aumento en su concentración.

4.5 Elementos potencialmente contaminantes

Existen variadas formas de realizar análisis de posibles contaminantes en las aguas subterráneas de una determinada área de estudio. Como se ha señalado en los ítems anteriores, la actividad antrópica puede tener una gran influencia en la química de las aguas analizadas y puede ser detectada por valores de concentración iónica anómalos. En los siguientes puntos se mostraran los resultados del análisis de la calidad de las aguas subterráneas de la Cuenca de Santiago, utilizando diferentes técnicas de análisis con el objetivo de corroborar estas observaciones.

4.5.1 Total de sólidos disueltos (TSD)

Variaciones de los TSD podría estar relacionados al uso de los suelos y a contaminación, por lo que podría ser usado como un indicador de actividad antrópica en las aguas subterráneas (Jalali, 2009). Una de las formas de emplearlos consiste en observar los TSD en función de los diferentes iones analizados, determinando si

éstos aumentan o disminuyen y estudiar sus correlaciones (Choi *et al.*, 2005; Marghade *et al.*, 2010). En la Figura 31 se recogen los gráficos realizados, donde se usaron los datos de los años 2001 y 2006. En éste se observa que gran parte de los cationes y aniones tiene una relación directa con el TSD, aumentando con el incremento de este parámetro. En la mayoría de los gráficos aparece una separación entre los datos y se debe a que los pozos P9, P10, P12, P13 y P14, ubicados al centro y oeste del área de estudio, muestran un leve enriquecimiento en sus concentraciones con respecto al TSD. Estos valores se dan en las muestras que se supone puedan tener una influencia antrópica, en particular, la estación P5 ubicada en el ex vertedero, es la más alejada en los gráficos y refleja la posible participación de lixiviados de contaminantes antropogénicos.

El Cl⁻ presenta una fuerte correlación con los TSD ($r^2 = 0.92$) y, como se observó en los diagramas de Stiff y en las razones iónicas, aumenta su concentración en la dirección del flujo de las aguas subterráneas, indicando que las aguas aumentan su contenido salino a lo largo de su recorrido por la cuenca, tanto de forma natural como, en las muestras señaladas en los apartados anteriores, por posibles causas externas. Sin embargo, casos como la estación P5 ubicada en el ex vertedero, la cual presenta concentraciones muy altas con respecto a todas las muestras de la cuenca, se relacionan con procesos de contaminación. Cabe señalar que son numerosos los estudios que han señalado la influencia de las zonas urbanas y agrícolas en el aumento de concentraciones como el ion Cl⁻ (Chambel *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2005).

Un escenario semejante presenta el SO₄²⁻ ($r^2 = 0.89$), al igual como se observó en los diagramas de caja en el análisis exploratorio de datos, el gráfico muestra que sus concentraciones presentan una gran variación y además tienen una alta pendiente, lo cual refleja un aumento significativo con respecto a los TSD. Una opción es que procesos químicos, como la oxidación de la pirita, sean el origen de la disolución de estos iones (Hem, 1985). Sin embargo, estudios isotópicos, realizados en el sector norte de la Cuenca de Santiago (Iriarte, 2003), descartan dicha alternativa y concluyen que la concentración de los sulfatos estaría influenciada por filtraciones de agua potable y alcantarillado. Otra opción, que no es descartada, es la contribución del río Maipo el cual posee altas concentraciones de sulfatos de origen natural.

En la misma línea, los cationes de Ca²⁺ ($r^2 = 0.96$), Mg²⁺ ($r^2 = 0.87$) y Na⁺ ($r^2 = 0.80$) también presentan una alta correlación al aumentar el TSD. Para el caso del K⁺, los dendrogramas realizados en el análisis multivariante señalan, en algunas muestras, una posible influencia con el uso de fertilizante en las zonas agrícolas

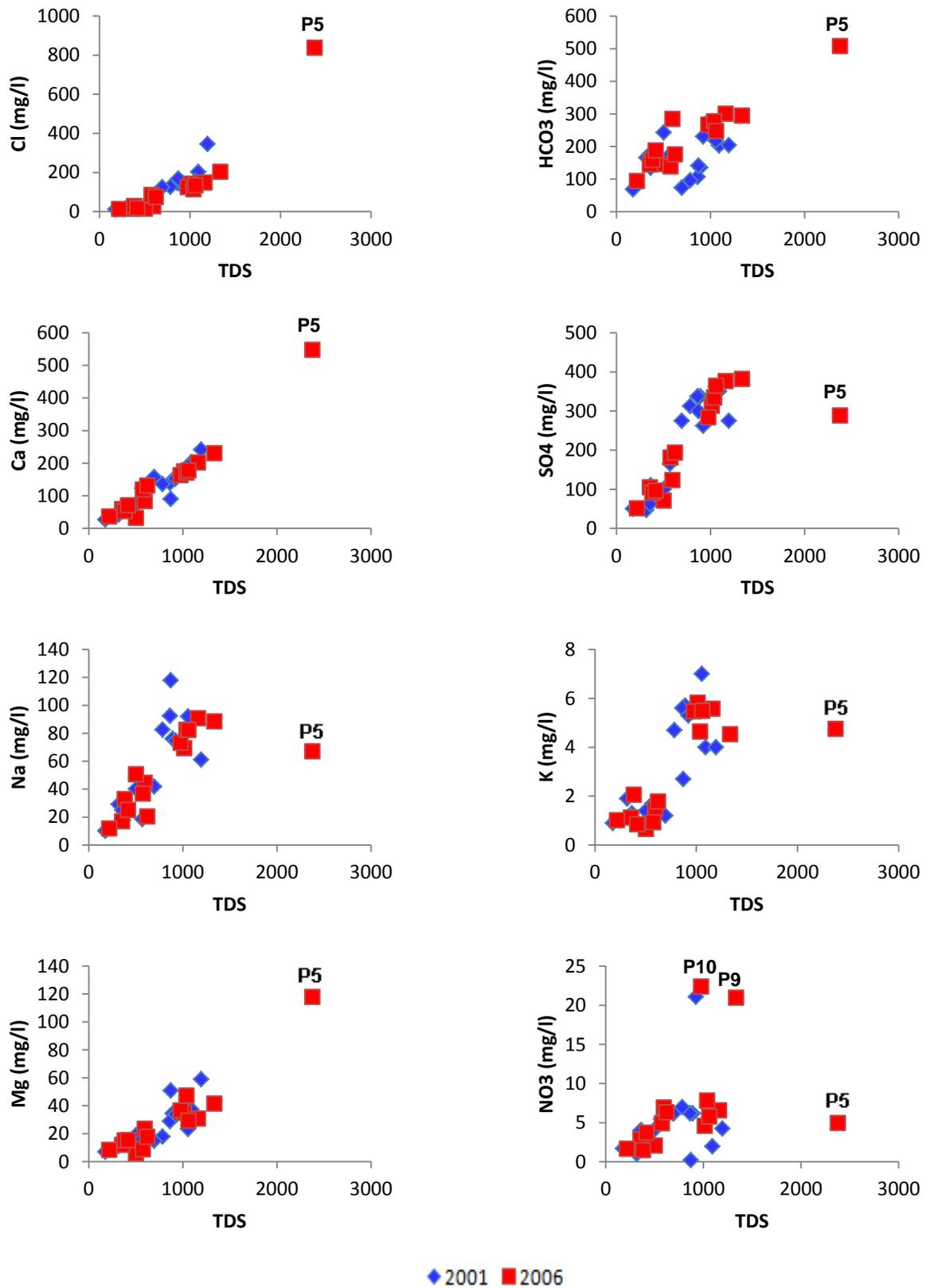


Figura 31 Relación de los elementos mayores versus los TSD.

4.5.2 Índices de calidad

4.5.2.1 TSD y salinidad

Davis and De Wiest (1966) clasificaron las aguas subterráneas en base a los TSD, cantidades menores a 500 mg/l son indicadas como conveniente para su consumo, entre 500 y 1000 mg/l como aceptable para su consumo, entre 1000 y 3000 mg/l como aceptable para regadío y mayor a 3000 mg/l como no apta para regadío ni consumo. En la Tabla 4 se observa que 4 estaciones situadas en los bordes de la cuenca, presentan valores menores a 500 mg/l, que, según esta clasificación, corresponden a aguas aptas para su consumo. Por otro lado, las estaciones en la zona central de la cuenca muestran aguas aceptables para su consumo y regadío y ninguna muestra resulta no apta debido a que no presentan valores superiores a 3000 mg/l. Las estaciones que contienen valores de TSD alrededor de 1000 mg/l y que pueden ser distinguidas en algunos gráficos de la Figura 31, corresponden a las ubicadas más al sur-oeste de la cuenca. La muestra que se encuentra en el vertedero presenta el valor más alto de la zona el cual es de 2376 mg/l en el año 2006.

Tabla 4 Clasificación de las aguas subterráneas basado en los TSD (Davis y De Wiest, 1966).

TSD (mg/l)	Clasificación	Nº de muestras	
		2001	2006
< 500	Conveniente para su consumo	4	4
500 - 1000	Aceptable para su consumo	8	4
1000 - 3000	Útil para regadío	3	7
> 3000	No apta para el consumo y regadío	0	0

La conductividad eléctrica y el Na⁺ juegan un rol importante en el estudio de las aguas utilizadas para regadío (Marghade *et al.*, 2010). El exceso de salinidad del agua puede afectar las plantas en su crecimiento y rendimiento, producto de efectos en la osmosis (Hanson *et al.*, 1993). Existen diferentes diagramas que se utilizan para la clasificación de las aguas para riego, uno de los más empleados corresponde al elaborado por el *US Salinity Laboratory* (1954), donde se grafica la razón de absorción de sodio (RAS) versus la conductividad eléctrica a escala logarítmica, la cual es utilizada como medida de salinidad. En la Figura 32 se observa que la mayoría de las muestras recaen en los campos C2-S1 y C3-S1, lo que indica un nivel bajo de sodio y salinidad media a alta. El primer campo se determina como un agua de buena calidad, donde plantas con una moderada tolerancia a la salinidad pueden crecer sin practicar un control especial. El segundo campo corresponde a un agua de calidad moderada, en este caso su uso no debería ser usado en suelos con un drenaje restringido, incluso en sectores con buen drenaje puede ser necesario un control de salinidad en el sector utilizado para el cultivo. Cabe señalar que la mayoría de las estaciones que caen en este campo

corresponden a las ubicadas en zonas donde existe actividad agrícola y, generalmente, estas aguas están destinadas al riego de plantaciones. Los datos de la estación ubicada en el ex vertedero son los únicos que caen en la zona C4-S1 que señala un agua de mala calidad, la cual no es adecuada para regadío en condiciones ordinarias.

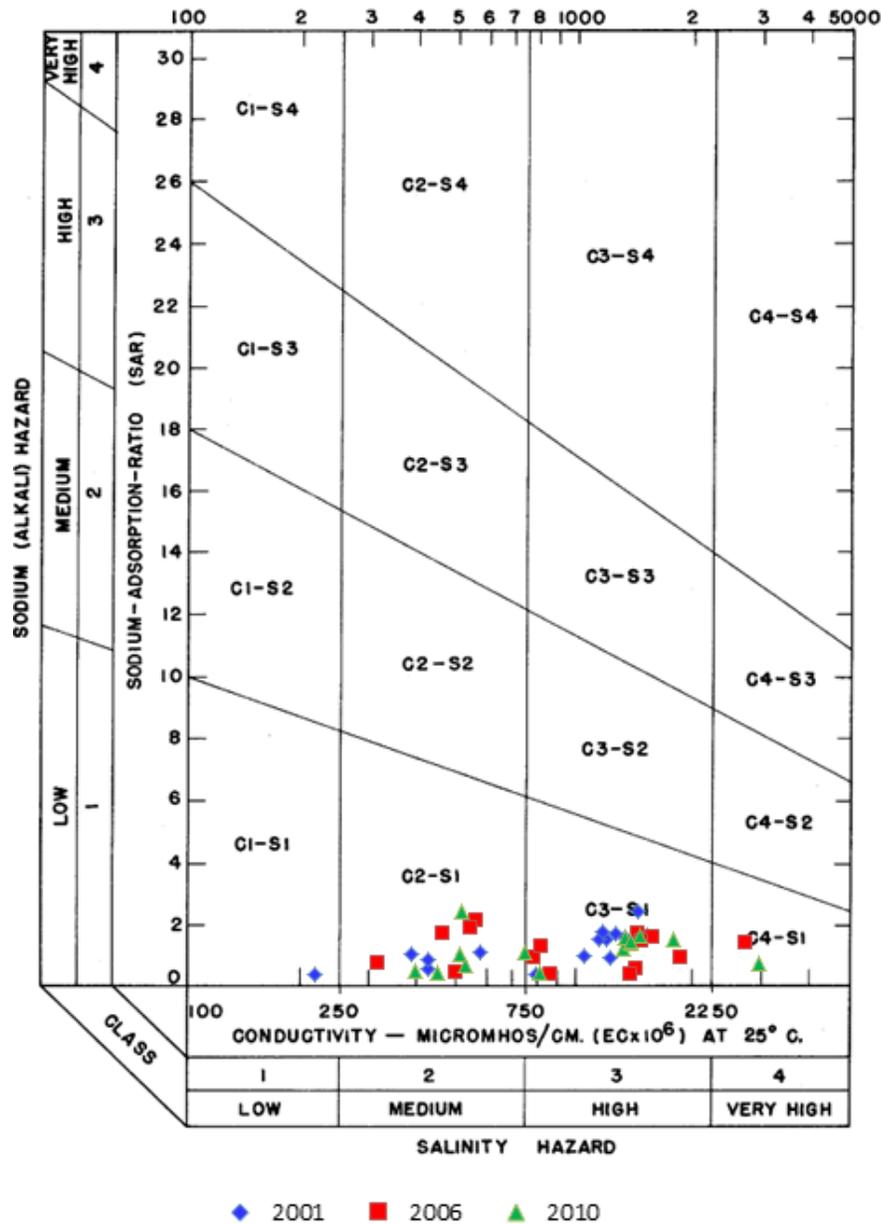


Figura 32 Diagrama de salinidad USSS para la clasificación de agua para regadío.

En el gráfico de la Figura 33 se resume la evolución de la calidad de las aguas subterráneas estudiadas. Para realizar los gráficos se ocuparon los promedios de

cada año de la conductividad y la razón de absorción de sodio, añadiendo los datos de los años 1992-1993 para tener una mejor perspectiva histórica. Según muestra el gráfico, el número de estaciones que registran una calidad buena pasa de 5 a 6 a partir del año 2006 y la calidad moderada pasa de 10 a 8 en ese mismo año, manteniéndose estos valores estables hasta el 2010. El gráfico ilustra también que, a partir del año 2006, la estación ubicada en el ex vertedero comienza a registrar una calidad mala, debido a sus altos valores de conductividad eléctrica. Las aguas de mejor calidad se concentran en las estaciones ubicadas, principalmente, al este y norte de la cuenca.

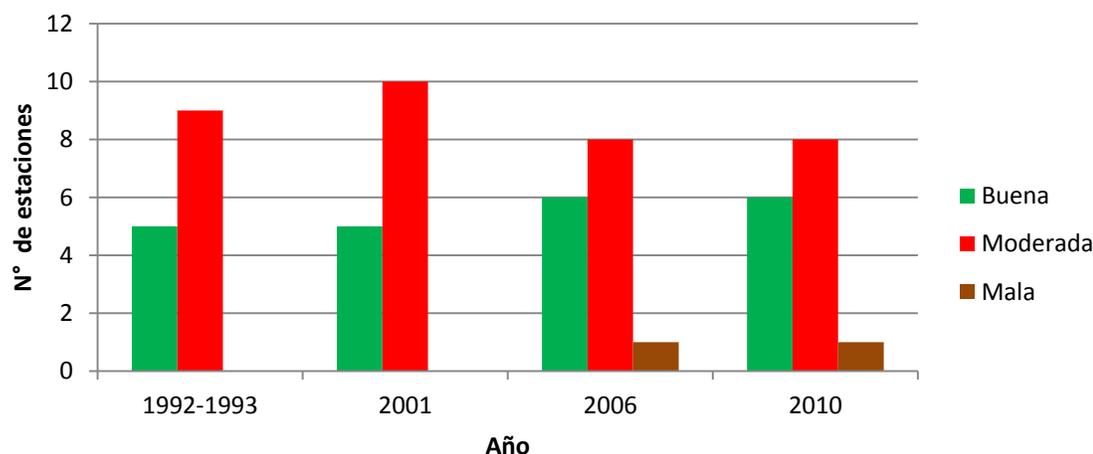


Figura 33 Evolución de la calidad de las aguas subterráneas que registran las estaciones de la cuenca, según la clasificación de aguas para riego de la USSL.

4.5.2.2 Normas chilenas

Actualmente existen dos normas nacionales, una para agua potable (NCh. 409/Of.84) y otra para regadío (NCh. 1333/Of.78). La primera creada en 1984 y cuya última modificación fue en el 2005, utiliza cinco tipos de agrupación de parámetros para definir los requisitos de calidad, estos son:

Tipo I	Parámetros microbiológicos y de turbiedad
Tipo II	Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud
Tipo III	Elementos radioactivos
Tipo IV	Parámetros relativos a las características organolépticas
Tipo V	Parámetros de desinfección

Debido a la información disponible en la base de datos, sólo algunos de los parámetros del tipo II y IV fueron utilizados para su estudio. En la Tabla 5 se puede observar los elementos seleccionados y el límite permitido por la norma chilena. Al comparar los datos con los valores fijados en las normas, se observa que pocas estaciones registran valores que sobrepasan este límite. Los parámetros involucrados son los metales Fe, Mn y As que presentan valores que exceden los límites fijados por la norma. Las muestras que incumplen estos valores son los pozos P1 y P3 (A y B). Para el caso del pH, los datos del año 2010 muestran que dos estaciones (P3B y P4) sobrepasan el rango autorizado, mientras que otras dos (P6 y P15) se encuentran bajo los valores del intervalo.

Tabla 5 Comparación de datos con la norma chilena NCh. 409/Of.84.

Parámetro	Límite máximo (mg/l)	Nº de muestras que sobrepasan valor límite		
		2001	2006	2010
Cl	400	0	1	1
Fe	0.3	3	2	0
Mg	125	0	0	0
NO3	50	0	0	0
pH	6.8-8.5	0	0	4
SO4	500	0	0	0
Mn	0.1	2	1	2
As	0.01	2	3	3

La norma NCh1333/Of. 78, modificada en el año 1987, presenta requisitos para la calidad del agua con diferentes usos, entre los que se encuentra la dedicada para riego. En la Tabla 6 se pueden leer los parámetros químicos seleccionados para la comparación con los datos utilizados en esta memoria. Se observa que en los datos de los años 2001 y 2006, un número considerable de pozos sobrepasan la concentración de sulfatos. Estos puntos son los que se encuentran en sectores de actividad agrícola y, según el índice de salinidad, presentan agua de calidad moderada, por lo que si se usan las aguas subterráneas para regadío de cultivos sería necesario un tratamiento previo. Con respecto a los nitratos, los pozos P9 y P10 son los que presentan los valores más altos, los cuales superan los 20 mg/l. El punto P9 y el pozo ubicado en el ex vertedero superan los valores límite de cloruro.

Tabla 6 Comparación de datos con la norma chilena NCh 1333/Of. 78.

Parámetro	Límite máximo (mg/l)	Nº de muestras que sobrepasan valor límite		
		2001	2006	2010
Cl	200	2	2	1
Al	5	0	0	0
Fe	5	1	0	0
NO3	10	1	2	3
pH	5.5-9.0	0	0	0
Na%	35	0	1	1
SO4	250	9	7	3
Mn	0,2	2	1	1
As	0,05	0	0	0

4.5.3 Potenciales focos de contaminación

En las secciones anteriores se han podido identificar determinadas estaciones que presentan valores de concentraciones significativos, en comparación con el resto de los puntos analizados. Estos son los pozos P5, P9 y P10, los cuales presentan características que llevan a establecerlos como potenciales focos contaminantes.

El primero corresponde al pozo ubicado en el ex vertedero de Cerros de Renca (Figura 34). Este colector se abrió el año 1978 y recibió los desechos de 16 comunas de la ciudad de Santiago hasta que en 1996 fue cerrado por el Servicio de Salud y Medio Ambiente de la Región Metropolitana (CORFO, 2007). Posteriormente, para su tratamiento se construyeron zanjas en las laderas del vertedero para conducir los líquidos percolados a las piscinas de lixiviación. Luego, se anunció un plan de cierre el cual incluía, entre otros procedimientos, la instalación de una capa de arcilla y el control de ingreso de aguas a través de canales de drenaje. En el año 2010 se aplicó una multa a la Municipalidad de Quilicura, debido a problemas de impermeabilización de las piscinas de lixiviados (Causa N°87729/2013, Corte de Apelaciones de Santiago, 2014).



Figura 34 Sector donde se ubica el pozo P5, la línea segmentada de color azul corresponde al perímetro aproximado del ex vertedero de Cerros de Renca.

Los líquidos lixiviados en un vertedero se generan como producto de la percolación del agua que ingresa al relleno y disuelve diferentes componentes de los residuos sólidos, junto con transportar los productos de la descomposición aerobia y anaerobia (Kiss y Encarnación, 2006). Sin un control adecuado éstos podrían tener un impacto ambiental, contaminando las aguas subterráneas del sector en donde se ha instalado el relleno. Este lixiviado podría ser el responsable de las características presentadas en la estación ubicada en este sector, las cuales, como se ha analizado, presenta altos valores de Cl^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} , junto con presentar una fuerte salinidad y elevados contenidos de manganeso, que se han ido incrementando en el tiempo.

Cabe señalar que cuando se presentan condiciones hidrogeológicas adecuadas para la infiltración de aguas, como por ejemplo un relleno sedimentario muy permeable, la zona de influencia de la contaminación del vertedero se puede expandir a lugares muy alejados o quedar desconectado posterior al cierre del vertedero (Porrás y Nieto, 1985). La Figura 35 muestra un ejemplo de un vertedero emplazado en un acuífero arenoso y su impacto en las concentraciones de Cl^- .

En los últimos años se han realizado estudios de impacto ambiental en la comuna de Quilicura las cuales reflejan, además de los efectos señalados anteriormente, altas concentraciones de arsénico y fluoruro. A pesar que los datos ocupados no reflejan altos valores de dichos componentes, estos análisis presentan un escenario preocupante en la zona, por lo que se hace necesario la pronta regulación del relleno y, de este modo, detener el gradual deterioro de la calidad de las aguas del sector.

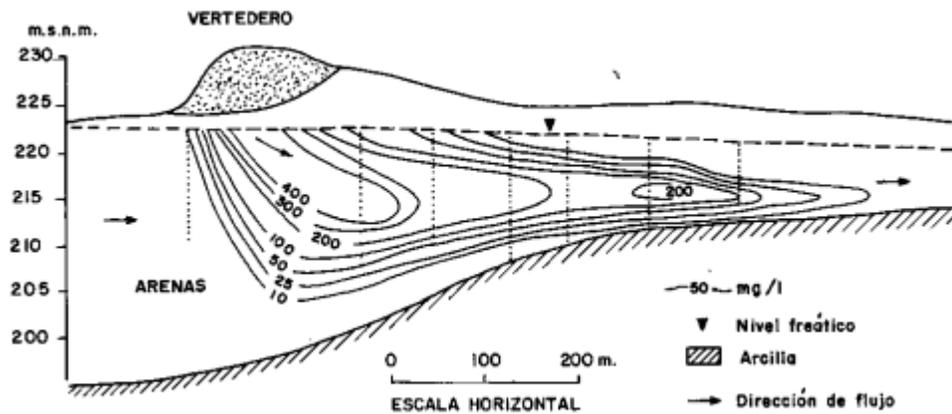


Figura 35 Zona de contaminación influenciado por un vertedero. Las curvas representan el contenido de cloruro en mg/l. Obtenido de Porras y Nieto (1985).

El segundo de los casos se refiere a los pozos P9 y P10, los cuales, como se observó en los diagramas de caja, tienen en común las altas concentraciones de nitratos, registrados con valores que, generalmente, superan los 20 mg/l. La causa de este comportamiento puede deberse a la ubicación de los pozos, ya que, como muestran las imágenes de la Figura 36, éstos se encuentran en el interior o cerca de algún cementerio instalado en la zona. Según Iriarte (2003), la contaminación por nitratos se debería a la descomposición de cuerpos sepultados bajo tierra y que, producto del riego permanente de sus área verdes, aumenta la capacidad de transporte de posibles contaminantes orgánicos hacia las napas subterráneas. La situación del pozo P9 podría ser más compleja ya que se encuentra ubicado en un sector de actividad agrícola, por lo que el uso de fertilizantes podría también contribuir a un incremento en la concentración. Además, el nivel estático de las aguas subterráneas es somero e inferior a 25 metros de profundidad en promedio, siendo aún más propenso a recibir contaminantes. Estudios realizados en esta zona muestran que las aguas subterráneas se encuentran contaminadas por nitratos (Falcón y Matutano, 2000).



Figura 36 Sectores donde se ubican los pozos P10 y P9, las líneas segmentadas de color azul corresponden al perímetro de los cementerios de la zona.

4.6 Relación con aguas superficiales

Junto con las 15 estaciones de aguas subterránea que se han analizado hasta el momento, se han seleccionado 22 estaciones de monitoreo de aguas superficiales ubicadas al interior de la Cuenca de Santiago y situadas al este de esta zona, donde los cursos fluviales recorren sectores de la Cordillera Principal. Una de las principales fuentes de recarga del acuífero estudiado ocurre por la infiltración de aguas superficiales, por lo que se esperaría que existiera una relación con la química de las aguas subterráneas.

En el Anexo G, se encuentra el diagrama de Piper realizado para las muestras de aguas superficiales, correspondiente a los datos del año 2006. En él se puede observar que el tipo de agua de la mayoría de las muestras es sulfatada cálcica, al igual que lo encontrado en la mayoría de los pozos de las aguas subterráneas. En la Figura 37 se presentan las relaciones de algunos iones versus el cloruro, donde los gráficos señalan que tanto las aguas superficiales como subterráneas aumentan su valor junto con la salinidad, a lo largo de las direcciones del flujo, es decir, hacia el suroeste. En cuanto a las concentraciones de sodio, de bicarbonatos y nitratos, éstos presentan concentraciones mayores en las muestras de agua subterránea que en las superficiales. En el caso de los sulfatos ocurre lo contrario. Los otros iones no presentan diferencias notorias entre los dos tipos de aguas comparadas.

Las diferencias encontradas estarían relacionadas con los diferentes tiempos de residencia y/o interacción de las aguas subterráneas con el medio, conllevando a presentar más concentraciones de iones como el sodio y los bicarbonatos. La muestra procedente del estero Lampa es la que presenta las mayores concentraciones de sodio (119 mg/l).

Para el caso de los sulfatos, estudios señalan que las altas concentraciones en el río Maipo, en sus nacientes y tributarios, estarían ligado a una carga salina natural, especialmente a procesos de disolución de yeso (Gonzales, 1991). Por otro lado, se considera que su concentración también podría estar relacionada a la actividad antrópica, como residuos domésticos e industriales, los cuales podrían ser vertidos en forma directa a los flujos superficiales de la zona. Los nitratos, al ser relacionados con el uso de fertilizantes en la zona y ser aplicados en los cultivos, influyen, principalmente, en la calidad de las aguas subterráneas del sector, por percolación a través del terreno.

Los componentes trazas (Fe , PO_4^{3-} , Mn y As) en las aguas superficiales presentan, en su mayoría, concentraciones mayores que las que se registran en las subterráneas. El arsénico, en particular, muestra valores que se mantienen parcialmente constantes a lo largo del recorrido de las aguas, con un leve incremento en las estaciones más alejadas del área de recarga. El río Maipo es, en general, el curso fluvial que muestra las mayores concentraciones desde su área de cabecera, lo que induce a pensar a un probable origen natural de este elemento. La estación S16 presenta valores significativamente diferentes, cerca de 90 ppb (datos del año 2010), lo que podría señalar un foco potencial de contaminación. El río

Mapocho muestra valores próximos a 10 ppb en la zona oriente de la cuenca, lo que podría explicar los valores de arsénico del pozo P6 que se encuentra ubicado cercano a una zona señalada de recarga (Iriarte, 2003). Estudios en la localidad de Lampa (Rocco y Rubio, 2009), donde se encontraron valores altos de arsénico tanto en aguas subterráneas como superficiales (3 a 10 veces lo permitido por la norma NCh 409), atribuyen sus concentraciones a un origen natural de este ion, relacionado a la presencia de minerales sulfurados como la Pirita y Calcopirita. El aluminio, el hierro y el manganeso presentan comportamientos similares al arsénico. Cabe destacar, la presencia de alto contenido de cobre disuelto ($>1\text{mg/l}$) en la estaciones S4 y S5, ubicadas en los valles de la Cordillera Principal, probablemente relacionados a la actividad minera del sector.

Al estudiar la calidad de las aguas superficiales, se observa en la Figura 38 que las aguas son de calidad buena a moderada para su uso de regadío, según el diagrama de salinidad de la USSL (1954). Las aguas de mejor calidad se encuentran al este, en los ríos tributarios al Mapocho, mientras que en el centro de la cuenca se concentran las aguas moderadas, similar a lo observado en las aguas subterráneas.

Cabe señalar que existen diferencias en el comportamiento de los ríos Mapocho y Maipo, el primero en sus nacientes presenta aguas de buena calidad mientras que en la zona oeste del área de estudio se registran aguas de calidad moderada. Las cuatro estaciones de monitoreo en el río Mapocho, señaladas en la Figura 38, muestran que a lo largo de su recorrido hacia el oeste, la conductividad aumenta, pasando de 290 a 1273 $\mu\text{S/cm}$. En cambio, el río Maipo presenta una menor variación de conductividad eléctrica en su cauce, variando entre 750 y 1000 $\mu\text{S/cm}$. El deterioro en la calidad del río Mapocho tendría como causa más probable el hecho de que su recorrido lo realiza por el gran núcleo urbano de la ciudad de Santiago, estando a expuesto a recibir contaminantes como descargas de aguas servidas, mientras que el río Maipo bordea el área metropolitana hacia el sur, más alejado de la urbanización.

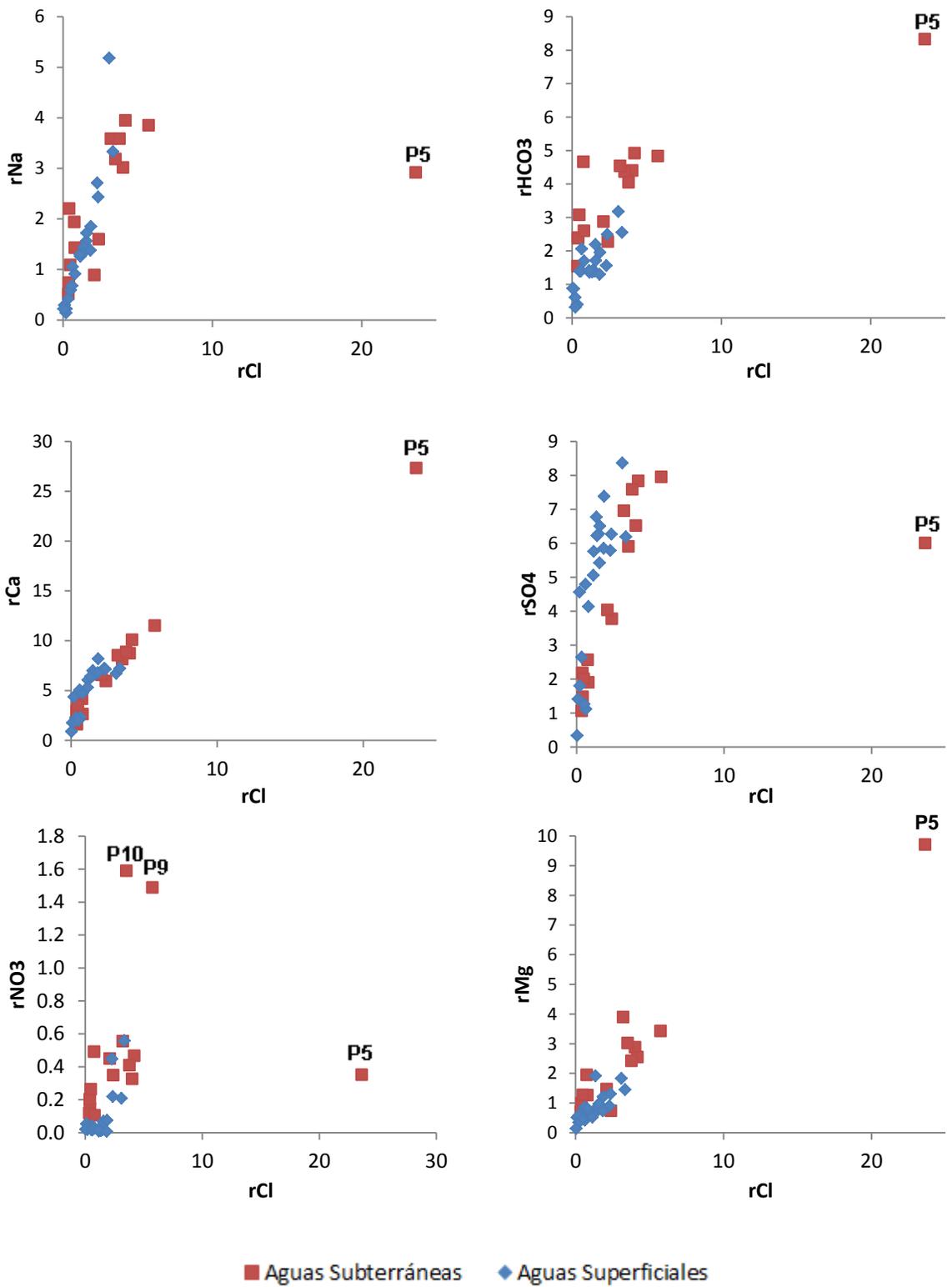


Figura 37 Relación de algunos iones con el cloruro, según los datos de las estaciones de aguas superficiales y subterráneas.

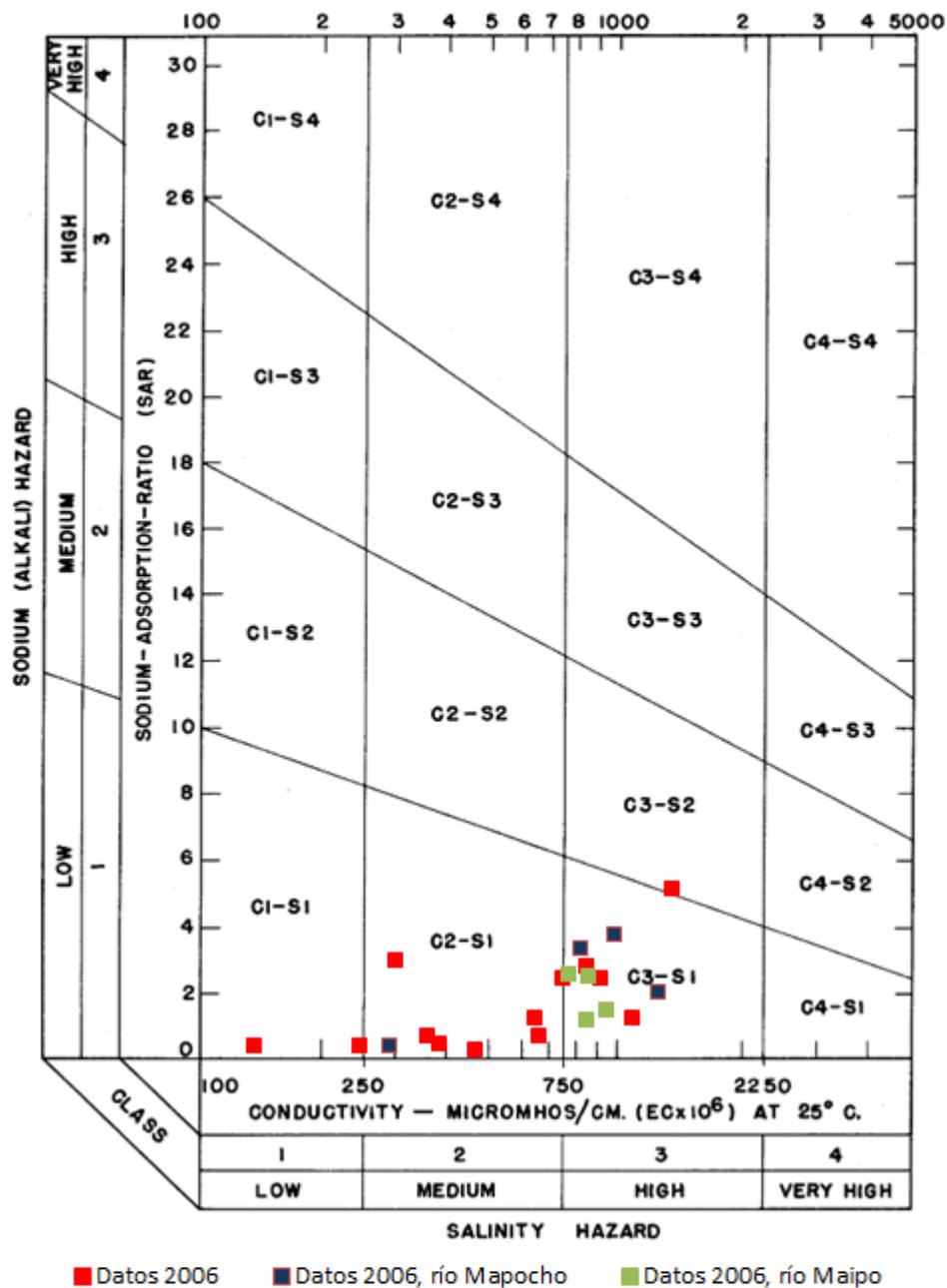


Figura 38 Diagrama de salinidad USSS para la clasificación de agua para regadío. Datos de estaciones de aguas superficiales del Año 2006. Se destacan las estaciones ubicadas en los ríos Mapocho y Maipo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Mediante el análisis y tratamiento de los datos fisicoquímicos, disponibles en la página web de la Dirección General de Aguas, se han observado diferencias en la composición hidrogeoquímica y en la distribución espacial en el acuífero estudiado, que permiten diferenciar dos grupos de aguas.

Los tratamientos realizados han permitido identificar diferentes procesos fisicoquímicos en las muestras estudiadas, los cuales se detallan a continuación.

- La interacción con los sedimentos del acuífero y, en puntos determinados, la influencia de actividad antrópica, son los procesos responsables de la química de las aguas subterráneas en la Cuenca de Santiago. Existe una diferencia entre las aguas muestreadas en el límite sur y al noreste de la cuenca (grupo uno) y las que se encuentran al centro y suroeste (grupo dos).
- El primer grupo presenta las concentraciones más bajas de iones y valores de conductividad eléctrica que no superan los 800 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Los diagramas de Piper y Stiff indican que el anión sulfato y bicarbonato son los más abundantes, siendo el tipo de agua $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$. Las razones iónicas señalan que su quimismo se debe, principalmente, a los procesos de interacción con la litología que conforma el acuífero: disolución/precipitación e intercambio iónico. En la zona norte, las estaciones de este grupo se encuentran en áreas con alto contenido de sedimentos finos en la parte superior del relleno, mientras que en las zonas este y sur, se encuentran en sectores cercanos al límite de la cuenca, donde las aguas presentan un menor tiempo de infiltración.
- El segundo grupo tiene mayores concentraciones de elementos con respecto al anterior y presenta valores de conductividad eléctrica que varían entre 850 y 1900 $\mu\text{s}/\text{cm}$, superando los 2800 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en algunos casos particulares. Los análisis indican que el sulfato se presenta como anión de proporción mayor y las aguas también presentan una mayor concentración de cloruro, lo cual muestra un cambio en el quimismo a lo largo de las direcciones del flujo de agua subterránea y donde existe una mayor interacción con zonas urbanas. Además, el acuífero en este sector es mayoritariamente freático, con niveles piezométricos someros. Sus características químicas podrían estar vinculadas a procesos naturales y antrópicos, y no se descarta la influencia del río Maipo, el cual presenta una alta concentración de sulfatos.
- Los elementos trazas presentan una distribución no definida en la cuenca. Las concentraciones de fosfato son más altas en los límites de la cuenca, la concentración de arsénico, sobre el límite instrumental, se detecta en los sectores noreste de la zona, mientras que concentraciones altas de manganeso se encuentran en el pozo P5, éste último podría ser relacionado a la actividad del ex vertedero.

- Los iones que presentan la mayor variación en sus concentraciones corresponden al cloruro, el calcio y los sulfatos. Casos particulares, como la estación ubicada en el ex vertedero, señalan que sus valores estarían influenciado directamente a actividad antrópica.
- La alta actividad antropogénica de los sectores urbanos y rurales de la zona podría influir en la concentración iónica analizada. Los elementos mayores reflejan un leve *input* en las zonas oeste de Cuenca de Santiago. El análisis estadístico muestra que iones como el K^+ podría estar influenciado por actividades agrícolas, debido a su alta relación con los nitratos, mientras que antecedentes de trabajos anteriores señalan que los sulfatos podrían estar relacionados con infiltraciones de agua potable.
- Según los índices de calidad, las aguas subterráneas de la Cuenca de Santiago son de calidad buena a moderada, donde la salinidad es un factor importante a considerar para su consumo o regadío. En cuanto a las normas chilenas, los sulfatos y los iones trazas, como el manganeso y el arsénico, son los parámetros en los cuales algunas estaciones sobrepasan el límite permitido. En general, se tiene que las aguas ubicadas al centro y oeste del área de estudio son de menor calidad que las ubicadas al noreste y límite sur de la Cuenca de Santiago.
- Existen posibles focos de contaminación responsables de las concentraciones de determinados elementos en el sector donde se encuentran las estaciones de medición. Un caso corresponde al ubicado en el ex vertedero de Cerros de Renca, el cual presenta valores muy altos de cloruro, calcio y manganeso. El análisis de variación temporal ha mostrado que éstos han ido incrementando gradualmente a través del tiempo. Otros focos potenciales de contaminación se presentan en pozos cercanos a cementerios, que presentan valores significativos de nitratos, aunque éstos también se verían influenciados por la actividad agrícola en algunos casos.
- Las aguas superficiales presentan un comportamiento hidroquímico similar a los datos de los pozos. Las diferencias se encuentran en la mayor concentración en las aguas subterráneas de sodio, bicarbonatos y nitratos, los primeros atribuidos a la influencia de la interacción con las litologías del acuífero mientras que el nitrato está relacionado con el uso de fertilizantes. Los sulfatos, que en el centro de la cuenca presentan una mayor concentración en los flujos superficiales, se relacionarían a las altas concentraciones del río Maipo debido a procesos naturales, como la disolución de yeso presente en la cabecera de su área drenante, y que también podría influir en la concentración de sulfatos en las aguas subterráneas. En cuanto a los elementos trazas, éstos presentan mayores concentraciones de metales que las subterráneas. Su origen sería natural y, en algunos sectores del río Maipo, antrópica.

- El río Mapocho, en su recorrido hacia el suroeste, presenta un mayor deterioro en la calidad de sus aguas que el río Maipo, reflejado por su significativo aumento en la conductividad eléctrica, lo que podría estar relacionado a su exposición más directa a contaminación urbana.

5.2 Recomendaciones

- Debido a la presencia de actividad antrópica y fuentes contaminantes en la zona, se hace necesario la instalación de más estaciones de monitoreo de aguas subterráneas en determinados sectores de la Cuenca de Santiago. Son necesarias estaciones de monitoreo en la cuenca de los esteros Chacabuco y Peldehue debido a que es un sector expuesto a contaminación antrópica relacionado a los relaves ubicados en dicho lugar. En algunos puntos, como en la zona sur del sector, próximo al río Maipo, también se debería incrementar el número de estaciones de control porque en la actualidad no es posible un monitoreo.
- Se sugiere solucionar el problema de la ausencia de datos en los registros de los últimos años de parámetros como los bicarbonatos, ya que su ausencia limita el control de los datos y la interpretación al faltar elementos de análisis.
- La existencia de focos de contaminación, en sectores determinados de la cuenca, sugiere recomendar estudios completos y de detalle en estas áreas, enfocados en la valoración de los impactos en las aguas subterráneas. Un punto a vigilar es la zona del ex vertedero de Cerros de Renca, la localidad de Lampa y el sector poniente de la ciudad de Santiago. Además, son necesaria medidas para reducir la vulnerabilidad de estas aguas frente a los residuos industriales y domésticos.

Bibliografía

Araguás, L. 1993. Técnicas isotópicas en el estudio del transporte del agua y de los contaminantes. Barcelona, España.

Araneda, M.; Avendaño, M. S.; Díaz, G. 2010. Modelo estructural de la Cuenca de Santiago, Chile y su relación con la hidrogeología. *Revista Geofísica* (n.62): pp.29-48

Causa N°87729/2013 (Protección), Resolución N°418748, Corte de Apelaciones de Santiago, 28 de Abril del 2014.

Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA) y Ministerio de Energía. Proyecto de baja Entalpía: Determinación de parámetros termales en el subsuelo de las cuencas de Santiago y Talca: implicancias para el uso directo de la energía geotérmica. En desarrollo.

Centro de información de Recursos Naturales; CORFO 2006-2007. Catastro frutícola.

Choi, B., Yun, S., Yu, S., Lee, P., Park, S., Chae, G., and Mayer, B. 2005. Hydrochemistry of urban groundwater in Seoul, South Korea: effects of land-use and pollutant recharge, *Environ. Geol.*, 48(8): pp.979–990.

Chambel, A., Duque, J. & Madeira, M. M. 2006. Hydrochemical Quality of Groundwater in Urban Areas of South Portugal. *Urban Groundwater Management and Sustainability*, J.H. Tellam et al. (Eds.), Springer: pp.241-250.

Cloutier, V., R. Lefebvre, R. Therrien, and M. M. Savard. 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology* 353: pp.294–313.

Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), 2007. Estudio de preinversión para proyectos Capital semilla – Línea 1 proyecto "Producción de Gas Metano en combinación con archaeobacterias en sistema continuo" (06PCS-0176).

Corporación Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 1999. Análisis de la Contaminación de Aguas Subterráneas en la Región Metropolitana por Aguas Servidas.

Corporación Nacional Forestal (CONAF), 2000. Catastro Bosque Nativo.

Cuadras C. 2014. Nuevos Métodos de Análisis Multivariante. CMC Editions, Barcelona, España.

Daniele, D. 2007. Aplicación de sistemas de información geográfica al estudio de acuíferos complejos. Caso del Campo de Dalías. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.

Davis SN, DeWiest RJ (1966) *Hydrogeology*. New York: Wiley.

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Informe Climatológico, Estación Quinta Normal, Santiago. Consultado en Noviembre del 2014 en la página web <http://164.77.222.61/climatologia/>.

Elango L., Rannan R., Senthil K.M. 2003. Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of groundwater in a part of Kancheepuram district, Tamil Nadu, India. *J Environ Geosci* 10: pp.157–166.

Falcon E., Castillo O., Valenzuela M., 1970. Hidrogeología de la Cuenca de Santiago. Publicaciones Especiales No. 3. Instituto de Investigaciones Geológicas. Sección Hidrogeología. Corporación de Fomento de la Producción. Departamento de Recursos Hídricos.

Falcon, M. F., Matutano, G., 2000. Contaminación de nitratos en las aguas subterráneas del sector poniente de la Cuenca de Santiago, región metropolitana, Chile. *Actas del IX Congreso Geológico Chileno, Vol. 1, Sesión Temática N°1*: pp. 37-41.

Fock, A., 2005. Geocronología y tectónica del Neógeno entre los 33 y 34°. Tesis para optar al grado de Magister en ciencias, mención Geología. Universidad de Chile.

Foster, S.S.D., 1987. Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied Scientific Research: pp.69-86.

Gana, P.; Wall, R. 1997. Evidencias geocronológicas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K-Ar de un hiatus cretácico superior-eoceno en Chile central (33-33°30'S). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 24: pp. 145-163.

Gibbs, R. J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry: *Science*, Vol. 170: pp.795– 840.

Gonzales, S., 1991. Prospección de elementos trazas en recursos agrícolas de Chile. II. Aguas superficiales de los valles Maipo y Mapocho, Región Metropolitana. *Agricultura Técnica (Chile)* 51 (1): pp.22-29.

Han DM, Liang X, Jin MG, Currell MJ Han Y, Song XF. 2009. Hydrogeochemical Indicators of Groundwater Flow Systems in the Yangwu River Alluvial Fan, Xinzhou Basin, Shanxi, China. *Environmental Management*. 44:pp.243-255

Hanson, B., S.R. Grattan and A. Fulton. 1993. Agricultural Salinity and Drainage: A Handbook for Water Managers. Water Management Series publication number 93-01, University of California, Davis.

Hem, J.D., 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, 3rd ed. Water-Supply Paper 2254

Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación Especializado en Agricultura del Desierto y Antiplano, INIA URURI. 2010. Los Fertilizantes en la agricultura. Informativo N°16. Ministerio de Agricultura.

Instituto Nacional de Estadística (INE), 2003. Censo 2002 Síntesis de Resultados. Disponible en internet: <http://www.ine.cl/cd2002/sintesisencensal.pdf>

Instituto Nacional de Normalización (INN-Chile). 1987. Norma Chilena Oficial NCh 1333.Of78.

Instituto Nacional de Normalización (INN-Chile). 2005. Norma Chilena Oficial NCh 409/1.Of2005.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Technical Summary.

Iriarte, S., 2003. Impact of Urban Recharge on Long-Term Management of Santiago Norteaquifer, Santiago–Chile, M.S. Thesis, Waterloo University, Ontario, Canada.

Iriarte, S., 2003. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la Cuenca de Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa a escala 1:100,000.

Jalali M. 2009. Geochemistry characterization of groundwater in an agricultural area of Razan, Hamadan, Iran. *Environ Geol*, 56: pp.1479–1488.

Jeelani G, Shah A R, Hussain A 2014. Hydrogeochemical assessment of groundwater in Kashmir valley, India. *Journal of Earth System Science* (Accepted). (IF: 0.96) JESS-D-13-00128.

Katz, B.G., Coplen, T.B., Bullen, T.D., Davis, J.H., 1998. Use of chemical and isotopic tracers to characterize the interaction between groundwater and surface water in mantled Karst. *Groundwater* 35, pp.1014–1028.

Kiss, G., Encarnación, G., 2006. Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, ISSN 1405-2849, N°. 79, 2006, pp. 39-5.

Loizidou M, Kapetanios EG 1993. Effect of leachate from landfills on underground water quality. *Sci Total Environ* 128: pp.69–81.

Marghade, D., Malpe, D.B. & Zade, A.B. 2010. Geochemical characterization of groundwater from northeastern part of Nagpur urban, Central India. *Journal of Environmental Earth Science*.

Mayback, M., 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Am. J. Sci.* 287: pp.401–428.

Mayo, A.L., Loucks, M.D., 1995. Solute and isotopic geochemistry and groundwater flow in the Central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology* 172: pp.31–59.

Morales F, 2002. Definición de Acuíferos en la cuenca del río Maipo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Muñoz, M., Garat, P., Flores-Acheveque, V., Vargas G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S., Daniele, L., Morata, D., Parada, M. A., 2014. Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin-Chile (33.5 °S). Disponible *online*. *Renewable Energy* 76 (2015): pp.186-195.

Piper, A.M, 1944. A graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses. *Trans Am Geophys Union*; 25: pp. 914– 923

Porras J., Nieto P., 1985. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas de España. Informe de síntesis. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Rocco, M., Rubio, M., 2009. Informe Técnico N°2. Análisis fisicoquímico y químico de las aguas subterráneas en la localidad de Lampa. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Química y Biología, Departamento de Ciencias del Ambiente.

Rogers RJ 1989. Geochemical comparison of groundwater in areas of New England, New York, and Pennsylvania. *Groundwater* 27: pp.690–712

Sellés D. 2000. La relación discordante entre las Formaciones Abanico y Las Chilcas en la localidad de Angostura: implicancias regionales. En: Congreso Geológico Chileno vol. 9.

Sellés D, Gana P. 2001. Geología del área Talagante e San Francisco de Mostazal: regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. 1 map, scale 1:100,000.

Sistema Nacional de Información Ambiental. Diagnóstico de los Suelos de la Región Metropolitana. Consultado el 16 de Diciembre del 2014 en la página www.sinia.cl/1292/articles-39511_pdf_suelo.pdf.

Sistema Nacional de Información Ambiental. Resumen Diagnóstico Ambiental. Recursos Hídricos en la Región Metropolitana de Santiago. Consultado el 16 de Diciembre del 2014 en la página www.sinia.cl/1292/articles-39509_pdf_agua.pdf

Thiele R., 1980. Hoja Santiago: Región Metropolitana: carta geológica de Chile. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile.

Thomas, H., 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas; Boletín N°2

US Salinity Laboratory (USSL), 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Department of Agriculture Hand Book, No. 60, p.160.

Wall R, Gana P, Gutiérrez A. 1996. Mapa geológico del área de San Antonio y Melipilla, regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa a escala 1:100,000.

Wall R., Sellés D, Gana P., 1999. Área Tiltill e Santiago, Región Metropolitana. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa a escala 1: 100,000.

Yañez G., Muñoz M., Flores-Aqueveque V., Bosch A., 2015. Gravity derived depth to basement in Santiago Basin, Chile: implications for its geological evolution, hydrogeology, low enthalpy geothermal, soil characterization and geo-hazards. *Andean Geology*.

Anexos

Anexo A:

A.1 Técnicas de Medición utilizados para cada parámetro. No se encontró en la base de datos información sobre los límites de detección para cada una de éstas.

Parámetro	Técnica de medición
Aluminio Total	Espectrofotometria de absorcion atomica
Arsenico Total	Manchas de bromuro de mercurio
Bicarbonato	Titulacion
CLoruro	Potenciometrico - Argentometrico - Titulacion
Calcio Total	Espectrofotometria de absorcion atomica
Calcio disuelto	Permanganato de Potasio - Titulacion
Cobre Total	Espectrofotometria de absorcion atomica
Conductividad Eléctrica	Conductivimetro
Fósforo de Ortofosfato	Kjeldahl - Colorimetria
Hierro Total	Espectrofotometria de absorcion atomica
Magnesio Total	Espectrofotometria de absorcion atomica
Magnesio disuelto	Gravimetrico
Manganeso Total	Colorimetria - Persulfato
Nitrógeno de Nitrato	Espectrofotometria Ultravioleta
pH	Potenciometrico
Potasio Total	Espectrofotometria de absorcion atomica
Potasio disuelto	Fotometria de llama
Sodio Total	Espectrofotometria de absorcion atomica
Sodio disuelto	Espectrofotometria de absorcion atomica
Sulfato	Turbidimetrico
Temperatura	Termometro

Anexo B:

B.1 Datos físico-químicos de los años analizados. Concentración de iones en mg/l y temperatura en °C.

DATOS AÑO 2001																				
Estacion	Fecha	X	Y	Cl	Al	As	HCO3	Ca	Cu	C. Electrica	Fe	PO4	Mg	Mn	NO3	Ph	K	Na	SO4	T
CANAL COLUNA EN CUPIERTIA VARGAS	23/01/2001	344584	6328943	5.414	0.82	0.001	56.392	16.9	0.01	133	0.41	0.029	2.5	0.01	0.429	8.06	0.9	5.6	15	16.6
CANAL SAN CARLOS EN DESEMBOCADURA RIO MAPOCHO	26/01/2001	350781	6301774	58.013	27.62	0.041	115.185	123.2	0.08	852	21.9	0.427	8.8	0.76	1.483	7.81	4	38.5	265	17.3
ESTERO ARRAYAN EN LA MONTOSA	23/01/2001	364466	6311618	15.857	0.82	0.004	41.394	26.2	0.01	254	0.35	0.01	4.2	0.03	0.478	7.96	13.4	5.7	60	19.7
ESTERO LANPA ANTES RIO MAPOCHO (CA)	26/01/2001	329560	6299112	107.519	2.46	0.011	178.177	125.4	0.05	1317	2.38	0.192	22.4	0.22	2.461	7.65	20.3	115	375	24.1
ESTERO PLANQUE EN RUTA 78	31/01/2001	283277	6272878	184.484	3.29	0.006	246.569	178	0.22	1578	2.53	0.978	37.5	0.14	4.454	7.88	27	92.5	360	25.2
ESTERO YERBA LOCA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	23/01/2001	373099	6309978	4.641	4.64	0.006	2.399	67.5	3.85	427	1.15	0.01	6.5	0.5	0.129	4.49	0.8	4.1	200	16.9
POZO AGRICOLA HERMANOS POBLETE	05/01/2001	331113	6284256	143.101	0.2	0.002	135.583	148.5	0.01	1207	2.22	0.029	34.5	0.01	6.187	7.5	5.7	76.1	337.5	16.1
POZO ASSENTAMIENTO CENTRAL LO VARGAS	04/01/2001	325783	6316670	21.271	0.2	0.003	242.969	72.6	0.01	575	0.09	0.078	19	0.01	4.134	7.37	1.4	40.2	100	17.4
POZO ASSENTAMIENTO MALLOCO	05/01/2001	329193	6281973	145.808	0.1	0.002	106.786	139.5	0.01	1280	0.05	0.029	29	0.01	6.184	7.19	5.6	92.5	337.5	16.9
POZO CEMENTERO METROPOLITANO	04/01/2001	342121	6289312	141.94	0.17	0.002	230.971	152.5	0.01	1156	0.82	0.062	34	0.02	21.082	7.38	5.3	74.7	262.5	17.3
POZO CHACRA EL OLIVO	03/01/2001	335578	6294687	202.661	0.29	0.001	202.774	202.5	0.01	1547	0.08	0.029	37.5	0.01	1.976	7.43	4	90	360	18.8
POZO CLUB DE GOLF	04/01/2001	352347	6302383	17.017	0.27	0.002	134.383	66.5	0.01	420	0.07	0.039	12.8	0.01	4.031	7.5	1.3	17.4	110	
POZO ASSENTAMIENTO AGUILAR SUR	05/01/2001	339669	6247889	11.216	0.21	0.002	68.391	26.9		214	0.04	0.052	7.1		1.885	7.14	0.9	10.1	50	16.5
POZO CRUCERO HERALLO	03/01/2001	328171	6306082	20.498	0.26	0.002	165.579	41.7	0.01	381	0.04	0.029	11.2	0.01	1.002	8.04	1.9	29.1	47	19.3
POZO ESTADIO CORFO(LAS CONDES)	04/01/2001	358499	6305802	19.337	0.34	0.013	176.37	55.2	0.01	423	0.06	0.101	12.5	0.01	3.959	7.16	1.2	25	62.5	17.3
POZO FUNDO CACHANTUN	05/01/2001	346766	6258699	126.47	0.34	0.002	95.987	136	0.01	1181	0.06	0.016	18	0.01	6.976	7.45	4.7	82.6	312.5	17.9
POZO FUNDO EL ALGARROBAL	04/01/2001	341497	6316446	124.149	0.26	0.003	73.19	157.4	0.01	1064	0.08	0.02	15	0.01	6.156	7.53	1.2	41.9	275	18
POZO FUNDO LAS CASAS ASSENTAMIENTO COLO COLO	03/01/2001	335981	6307450	169.6	0.29	0.032	141	90	0.02	1463	21.6	0.023	51	0.7	0.198	7.8	2.7	117.9	300	17.2
POZO IMA	05/01/2001	349267	6284527	155.477	0.35	0.001	217.772	191	0.01	1354	0.13	0.02	23.5	0.01	6.104	7.5	7	92.1	362.5	17.5
POZO PARQUE O'HIGGINS	19/04/2001	345856	6296212	64.975	0.26	0.001	174.578	122.5	0.01	797	0.04	0.066	16	0.01	5.458	7.38	1.7	18.6	165	16.5
POZO VERTEDERO CERROS DE RENCA	03/01/2001	341773	6305851	344.989	0.15	0.002	203.974	241.5	0.01	1234	0.16	0.036	59	0.26	4.237	7.29	4	61.1	275	18.2
RO ANGSTURA EN VALDIVA DE PAINE	30/01/2001	325648	6257134	95.916	6.12	0.011	178.177	147.4	0.03	1114	6.78	0.078	18.4	0.21	3.732	7.82	4	60.2	295	19.8
RO CLARILLO ANTES JUNTA RIO MAPO	29/01/2001	349064	6276144	102.104	24.68	0.028	119.385	132.6	0.07	1068	24.4	0.088	12.6	0.87	1.516	8.14	28.8	49.7	285	20.1
RO COLORADO ANTES JUNTA RIO MAPO	24/01/2001	373148	6282685	32.487	13.88	0.026	107.986	101	0.05	671	10.12	0.013	11	0.53	0.125	8.15	3.8	19.7	215	16.6
RO MAPO EN EL MANZANO	26/01/2001	372023	6281962	65.749	19.43	0.025	87.589	116	0.05	835	16.05	0.006	8.8	0.52	0.16	7.91	3.1	40.6	250	16.1
RO MAPO EN LAS MELOSAS	25/01/2001	389337	6253990	95.916	12.04	0.02	71.391	127.6	0.06	969	14.35	0.006	7.8	0.47	0.173	8.07	3.6	57.9	300	15.8
RO MAPO EN MALTUHA	29/01/2001	322464	6286567	71.55	11.15	0.017	106.786	122.8	0.03	908	10.21	0.013	11.2	0.37	0.736	8.24	2.6	45.9	280	20.5
RO MAPO EN PUENTE LOS MORROS (CA)	29/01/2001	346989	6275371	65.749	14.07	0.03	83.989	119.6	0.04	857	13.4	0.003	9.4	0.47	0.49	8.41	2.5	41.1	270	15.2
RO MAPOCHO EN EL MONTE	31/01/2001	317138	6271767	123.763	5.64	0.01	188.376	145	0.23	1254	2.56	1.125	18.5	0.16	7.126	7.46	10.5	75	275	25.1
RO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS	17/01/2001	365026	6306665	4.641	4.3	0.002	12.598	43.2	5.49	382	1.61	0.003	4.7	0.58	0.307	7.53	0.9	4.8	125	19.3
RO MAPOCHO EN PIE RUDAHEL	26/01/2001	331111	6299140	79.285	10.86	0.019	136.782	117.6	0.34	933	12.15	1.517	9.8	0.27	6.775	7.46	5.9	49.7	225	22.8
RO MAPOCHO RINCONADA DE MAPU	18/01/2001	331232	63092177	79.285	10.86	0.017	158.38	131.6	0.37	974	11.3	0.235	9.8	0.22	3.917	7.45	5.5	55.3	285	18.8
RO MOLINA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	23/01/2001	370122	6306396	4.641	0.93	0.002	49.793	17.7	0.01	125	0.36	0.01	1.8	0.01	0.346	8.02	1.1	5.2	19	20.8
RO OLIVARES ANTES JUNTA RIO COLORADO	24/01/2001	394398	6294001	44.864	14.96	0.014	88.788	41.8	0.06	341	11.46	0.003	6.5	0.62	0.121	7.92	2.3	22.3	55	17.8
RO SAN FRANCISCO ANTES ESTERO YERBA LOCA	23/01/2001	371252	6310847	10.829	0.71	0.002	13.798	28.8	0.71	240	0.34	0.003	4.9	0.22	0.342	7.58	2.9	5.9	85	20.1
RO VOLCAN ANTES RIO MAPO (CA)	25/01/2001	313144	6346880	59.56	7.8	0.011	112.785	115.8	0.01	810	7.04	0.01	7.8	0.16	0.096	8.14	3	39.4	240	15.2
RO YESO ANTES JUNTA RIO MAPO	26/01/2001	387817	6260811	48.344	2.33	0.02	80.989	139.6	0.01	908	1.13	0.01	1.3	0.06	0.15	8.15	3.4	30.9	337.5	18.8
ZANJON DE LA AGUADA EN PALMARTOS	26/01/2001	339615	6294201	166.693	3.01	0.005	388.751	115.3	0.12	1538	2.74	10.274	12.3	0.13	0.034	7.23	22.1	140	150	24.5

DATOS AÑO 2006

Estacion	Fecha	X	Y	Cl	Al	As	HCO3	Ca	Cu	C. Eléctrica	Fe	PO4	Mg	Mn	NO3	Ph	K	Na	SO4	T
CANAL COLINA EN COMPUERTA VARGAS	14/02/2006	344584	6328943	22.348	1	0.008	125.973	46.436	0.01	383	0.68	0.022	5.138	0.08	0.55	8.05	0.848	24.228	53.605	21.02
CANAL SAN CARLOS EN DESBOCADURA RIO MAFOCHO	22/02/2006	350781	6301774	53.076	18.3	0.032	85.001	140.16	0.07	862	24.2	0.014	10.64	0.9	0.265	7.84	2.113	33.7	301.73	11.7
ESTERO ARAYAN EN LA MONTOSA	13/02/2006	364466	6311618	3.492	0.8	0.007	53.202	35.16	0.03	244	0.28	0.006	6.19	0.03	0.75	7.52	0.546	6.822	67.641	16.27
ESTERO LAMPA ANTES RIO MAFOCHO (CA)	15/02/2006	329560	6299112	109.643	2.6	0.012	193.852	134.74	0.05	1386	2.98	0.378	22.23	0.21	2.923	7.66	17.51	119.19	401.86	21.27
ESTERO PLANQUE EN RUTA 78	16/02/2006	283277	6272878	140.022	0.9	0.006	224.428	165.49	0.03	1462	1.09	0.812	32.37	0.07	4.594	8.31	7.589	84.928	370.39	20.61
ESTERO YERBA LOCA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	16/02/2006	373099	6309978	6.984	2.5	0.002	37.303	87.329	1.18	464	1.31	0.003	6.915	0.68	0.277	7.72	0.848	3.287	219.1	10.16
POZO AGRICOLA HERMANOS POBLETE	03/02/2006	331113	6284256	142.466	0.3	0.002	268.458	174.9	0.01	1460	0.46	0.01	34.98	0.01	4.604	7.75	5.828	69.337	313.1	16.7
POZO ASENTAMIENTO CENTRAL LO VARGAS	23/01/2006	325783	6316670	26.887	0.2	0.002	284.357	83.348	0.01	790	0.06	0.072	23.68	0.01	6.326	7.85	1.481	44.558	123.27	18
POZO ASENTAMIENTO MALLOCO	03/02/2006	329193	6281973	148.403	0.3	0.002	300.257	202.04	0.01	1600	0.04	0.01	30.92	0.01	6.57	7.76	6.578	90.774	376.3	17.8
POZO FLUNDO CASAS DE COLO COLO	23/01/2006	335766	6307127	14.666	0.2	0.002	146.153	32.333	0.01	459	0.05	0.104	6.007	0.02	2.068	8.04	0.656	50.683	70.907	20.6
POZO CEMENTERO METROPOLITANO	02/02/2006	342121	6289312	124.656	0.2	0.002	266.623	163.32	0.01	1452	0.08	0.011	36.72	0.01	22.408	7.67	5.468	73.235	283.61	16.2
POZO CHAGRA EL OLIVO	03/02/2006	335578	6294687	203.573	0.3	0.001	294.753	230.62	0.01	1880	0.03	0.011	41.64	0.01	20.982	7.6	4.533	88.547	381.92	16.9
POZO CLUB DE GOLF	19/01/2006	352347	6302383	13.967	0.2	0.001	144.93	58.904	0.01	498	0.06	0.036	12.09	0.01	2.862	7.76	1.123	16.996	104.74	15.9
POZO COMPLEJO ANGOSTURA	02/02/2006	339511	6247493	12.571	0.2	0.002	94.174	36.42	0.01	311	0.02	0.252	8.537	0.01	1.67	7.96	1.013	11.839	50.963	16.5
POZO CRUCERO FERRALLO	23/01/2006	328171	6306082	28.284	0.2	0.002	158.384	62.882	0.01	558	0.03	0.02	15.32	0.01	1.479	8.26	2.058	32.885	91.272	19.2
POZO ESTADIO CORFOLAS CONDES)	19/01/2006	358499	6305802	17.11	0.2	0.014	187.737	70.805	0.01	544	0.04	0.122	15.46	0.02	3.718	8.17	0.848	25.063	96.328	16.5
POZO FLUNDO CAJANTUN	02/02/2006	346766	6258689	113.833	0.2	0.002	277.019	171.04	0.01	1397	0.04	0.034	47.36	0.01	7.822	7.82	4.643	82.422	334.17	18.2
POZO FLUNDO EL ALGARROBAL	20/01/2006	341497	6316446	84.851	0.4	0.014	138.815	119.17	0.01	824	0.08	0.007	8.904	0.01	4.92	7.82	0.931	36.763	181.14	18.4
POZO INMA	02/02/2006	349267	6284527	134.088	0.2	0.002	247.054	177.55	0.01	1500	0.05	0.013	29.4	0.01	5.775	7.8	5.466	82.422	384.37	17.3
POZO PARQUE O'HIGGINS	19/01/2006	345856	6296212	74.376	0.2	0.001	175.506	131.48	0.01	872	0.01	0.026	17.82	0.01	6.335	7.96	1.783	20.47	183.78	16.5
POZO VEREDERO CERROS DE RENCA	23/01/2006	341773	6305851	837.889	0.2	0.002	508.174	547.62	0.02	2780	0.47	0.065	118	4.32	4.95	7.08	4.753	67.11	288.52	19.8
RO ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PANI	23/02/2006	325648	6257134	83.455	4.9	0.018	152.289	143.06	0.04	1106	7.46	0.081	15.86	0.25	3.066	8.37	3.801	55.967	301.01	17.89
RO CLARILLO ANTES JUNTA RIO MAIPO	15/02/2006	349064	6276144	55.889	5.6	0.01	104.57	136.91	0.03	928	7.81	0.035	11.8	0.3	0.845	7.77	3.351	39.547	312.46	17.04
RO COLORADO ANTES JUNTA RIO MAIPO	27/01/2006	373148	6282685	21.3	6.4	0.023	85.613	101.44	0.03	645	6.86	0.019	10.35	0.27	0.228	8.06	1.866	15.604	230.21	10.11
RO MAIPO EN EL MANZANO	27/01/2006	372023	6281962	41.204	8.5	0.013	83.167	121.35	0.06	777	11	0.032	7.745	0.34	0.143	7.76	1.921	28.967	276.7	10.6
RO MAIPO EN LAS MELOSAS	30/01/2006	389337	6253990	64.948	10.7	0.012	79.498	135.82	0.03	859	15	0.008	8.904	0.43	0.102	7.94	2.058	31.751	280.99	10.45
RO MAIPO EN VAL TAHUA	16/02/2006	322464	6266567	65.995	5.7	0.008	119.247	164.05	0.02	956	6.42	0.017	14.7	0.27	1.051	7.82	2.73	42.609	354.65	17.57
RO MAIPO EN PUENTE LOS MORROS (CA)	15/02/2006	346898	6275371	47.489	7.7	0.01	83.778	128.22	0.03	866	10.4	0.006	23.28	0.36	0.187	7.93	2.251	30.359	325.33	13.42
RO MAIPO EN EL MONTE	16/02/2006	317138	6271767	118.373	3.4	0.008	155.938	144.51	0.06	1273	3.95	1.428	17.6	0.17	7.822	8.23	6.678	76.576	297.44	19.03
RO MAIPO EN LOS ALMENDROS	13/02/2006	365026	6306665	7.682	1.9	0.001	19.569	38.055	1.43	290	0.97	0.003	4.222	0.3	0.407	7.21	0.793	5.152	86.453	14.88
RO MAIPO EN PUENTE RUDAHUEL	15/02/2006	331111	6299140	55.171	4.9	0.01	133.923	131.48	0.09	836	6.53	0.123	9.483	0.14	0.976	7.5	2.663	35.928	260.59	15.6
RO MAIPO EN LA RINCONADA DE MAPU	22/02/2006	331232	6292177	81.01	2.9	0.008	95.397	145.15	0.08	1001	3.75	1.406	10.93	0.23	6.274	7.55	5.991	62.389	278.74	17.66
RO OLIVARES ANTES JUNTA RIO COLORADO	13/02/2006	370122	6306396	1.397	7.5	0.002	53.814	78.882	0.01	137	0.16	0.009	1.673	0.28	0.285	7.8	1.426	13.655	60.632	13.7
RO SAN FRANCISCO ANTES ESTERO YERBA LOCA	13/02/2006	371252	6310847	12.221	0.3	0.002	24.461	44.627	0.13	357	0.08	0.003	7.465	0.23	0.407	7.21	1.508	9.611	126.99	13.72
RO VOLCAN ANTES RIO MAIPO (CA)	30/01/2006	313144	6346880	40.156	3.8	0.006	86.224	106.51	0.01	750	3.47	0.015	6.286	0.12	0.24	8.09	2.223	29.803	242.55	11.82
RO YESO ANTES JUNTA RIO MAIPO	30/01/2006	387817	6260811	28.284	0.3	0.003	103.959	95.29	0.01	658	0.06	0.008	9.773	0.01	0.377	8.06	1.921	21.026	198.74	12.66
ZANON DE LA AGUADA EN PALARTOS	15/02/2006	339615	6294201	49.235	17.7	0.021	86.836	127.5	0.06	861	21.7	0.021	9.483	0.83	0.475	8.11	2.416	33.144	298.87	21.98

DATOS AÑO 2010

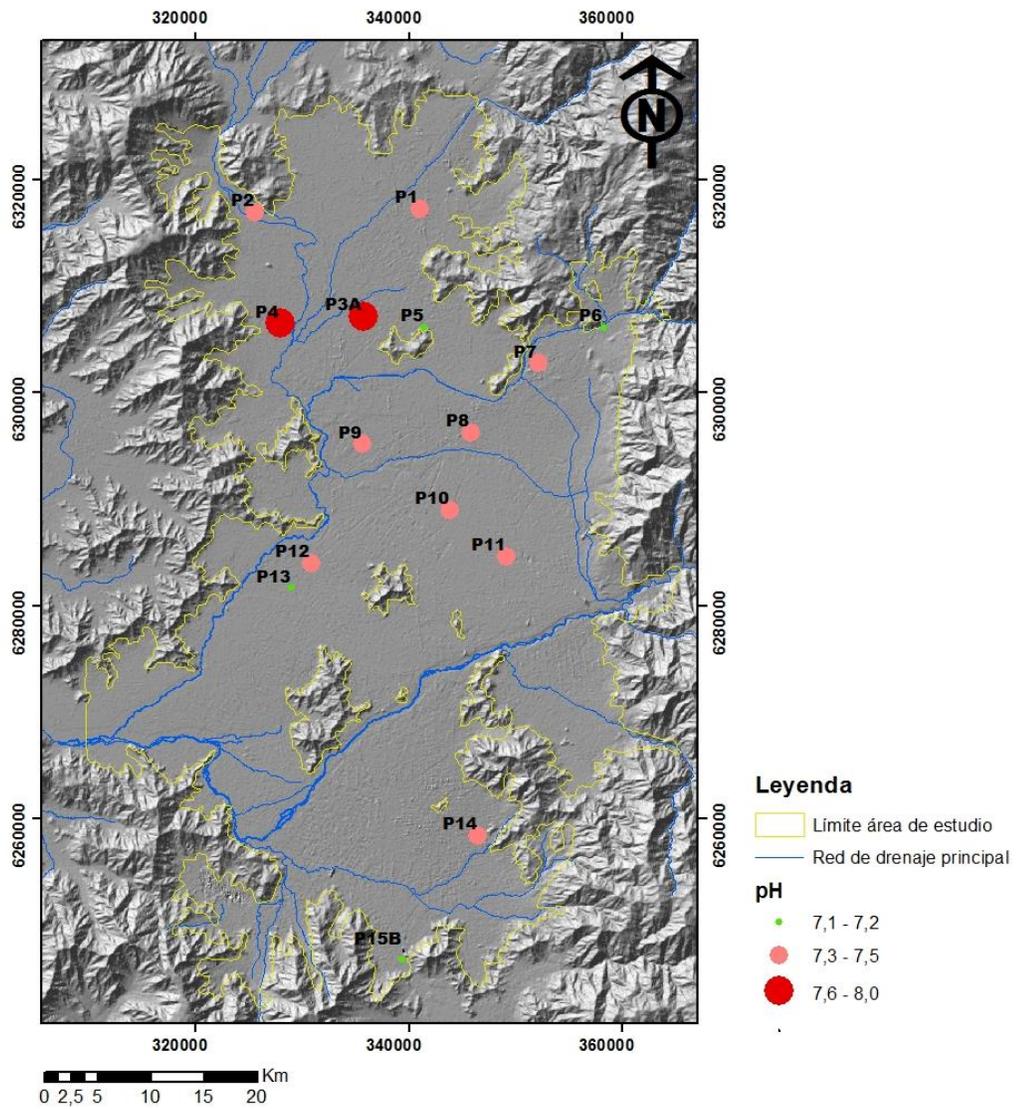
Estación	Fecha	X	Y	Cl	Al	As	Ca	Cu	C Eléctrica	Fe	PO4	Mg	Mn	NO3	Ph	K	Na	SO4	T
CANAL COLINA EN COMPUERTA VARGAS	04/02/2010	344584	6328943	1.317	0.3	0.008	16.829	0.01	162	0.239	0.013	2.864	0.01	0.358	8.76	0.332	8.283	16.947	17.19
CANAL SAN CARLOS EN DESEMBOCADURA RO MAPOCHO	05/02/2010	350781	6301774	79.272	18.67	0.03	151.92	0.05	432	18.65	0.008	21.73	0.815	0.354	7.32	4.284	56.065	247.18	12.91
ESTERO ARRA YAN EN LA MONTOSA	01/02/2010	364466	6311618	1.49	0.3	0.008	26.208	0.01	248	0.108	0.005	5.367	0.04	0.54	7.8	0.817	7.438	62.392	17.79
ESTERO LAMPA ANTES RO MAPOCHO (CA)	05/02/2010	329560	6299112	130.075	2.878	0.014	177.85	0.01	1394	6.997	0.502	28.94	0.425	3.923	6.98	17.51	126.11	308.51	20.58
ESTERO PLANQUE EN RUTA 78	08/02/2010	283277	6272878	164.747	0.653	0.005	138.9	0.01	1505	1.553	0.889	39.61	0.145	6.582	7.46	9.418	96.168	298.04	20.6
ESTERO YERBA LOCA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	16/02/2010	373099	6309978	4.049	8.602	0.005	50.791	5.364	468	4.212	0.005	9.625	1.088	0.307	4.55	2.031	4.241	173.7	13.8
POZO AGROLA HERMANOS POBLETE	23/02/2010	331113	6284256	138.479	0.3	0.001	134.83	0.01	1337	0.03	0.005	36.65	0.01	5.238	7.77	5.29	64.07	265.32	17.89
POZO ASBTAMIENTO CENTRAL LO VARGAS	09/03/2010	325783	6316670	23.266	0.3	0.001	62.942	0.01	743	0.03	0.066	23.2	0.01	7.652	7.62	1.638	40.604	92.561	19.17
POZO ASBTAMIENTO MALLOCO	23/02/2010	329193	6281973	141.004	0.3	0.001	141.34	0.02	1482	0.02	0.005	33.6	0.02	6.148	7.96	5.74	86.727	267.94	18.15
POZO FUNDO CASAS DE COLO COLO	25/02/2010	334578	6307127	26.688	0.3	0.021	29.234	0.01	512	0.255	0.022	7.67	0.04	2.042	8.79	0.736	58.115	77.668	20.34
POZO GABENTERO METROPOLITANO	19/02/2010	342121	6289312	131.429	0.3	0.001	132.09	0.01	1398	0.232	0.01	36.48	0.01	24.674	7.49	5.844	72.203	228.85	17.22
POZO CHACRA EL OLIVO	24/02/2010	335578	6294687	196.833	0.3	0.001	184.45	0.01	1791	0.04	0.017	42.57	0.01	20.716	7.83	5.001	89.632	296.73	17.64
POZO CLUB DE GOLF	08/03/2010	352347	6302383	16.702	0.3	0.001	38.538	0.01	446	0.04	0.022	13.8	0.01	2.497	7.88	1.002	13.953	69.838	17.16
POZO COMPLEJO ANGOSTURA	26/02/2010	339511	6247493	20.319	0.3	0.001	34.928	0.01	388	0.03	0.038	12.35	0.01	3.239	6.52	1.349	14.751	54.885	18.12
POZO CRUCERO PEBALLLO	09/03/2010	328171	6306082	23.634	0.3	0.001	37.725	0.01	507	0.03	0.018	14.74	0.01	1.435	8.12	2.285	31.018	60.654	20.49
POZO ESTADO CORCOLAS CONDÉS)	25/02/2010	358499	6305802	17.803	0.3	0.016	50.18	0.01	526	0.03	0.059	15.23	0.01	3.229	6.57	0.921	23.025	64.057	17.03
POZO FUNDO CAJAMANTU	10/03/2010	346766	6256899	119.355	0.3	0.001	142.15	0.01	1353	0.148	0.028	19.4	0.01	3.035	7.22	4.885	76.56	239.14	19.03
POZO FUNDO E. ALGARROBAL	25/03/2010	341497	6316446	71.777	0.3	0.009	92.443	0.01	778	0.03	0.013	9.062	0.01	4.994	7.75	1.071	36.942	137.34	16.58
POZO INA	09/03/2010	349267	6284527	131.539	0.3	0.001	155.17	0.01	1397	0.117	0.01	30.28	0.01	5.99	7.6	5.764	75.303	248.61	18.06
POZO PAÑOLE O'HIGGINS	08/03/2010	345856	6296212	72.427	0.3	0.001	101.43	0.01	813	0.03	0.008	19.22	0.01	6.129	8.69	2.065	19.975	146.4	17.68
POZO VERTEDERO CERROS DE RENCA	25/02/2010	341773	6305851	562.994	0.3	0.002	307.85	0.01	2980	0.03	0.045	97.33	1.882	12.832	7.67	4.839	62.327	241.76	20.11
RO ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAÑE	09/02/2010	325648	6257134	108.399	2.878	0.009	134.12	0.01	1219	2.892	0.11	22.48	0.157	3.449	8.24	5.868	69.153	287.75	19.67
RO CLARILLO ANTES JUNTA RO MAPO	09/02/2010	349064	6276144	99.26	7.118	0.015	128.43	0.02	1097	6.999	0.063	20.61	0.299	1.622	8.59	5.313	64.215	282.51	20.87
RO COLORADO ANTES JUNTA RO MAPO	18/02/2010	373148	6282685	29.362	13.371	0.036	106.46	0.01	1214	9.755	0.01	18.86	0.498	0.204	9.55	3.209	23.248	208.21	9.36
RO MAIPO EN EL MANZANO	02/02/2010	372023	6281962	68.971	20.048	0.039	135.34	0.04	312	14.005	0.007	19.54	0.754	0.161	6.75	4.042	49.11	267.37	19.3
RO MAIPO EN LAS MELOSAS	15/02/2010	338937	6253990	170.791	9.556	0.015	130.77	0.01	1214	9.388	0.005	16.62	0.397	0.299	9.55	4.365	107.23	287.57	9.36
RO MAIPO EN MALLTAHUA	08/02/2010	322464	6266567	97.989	2.878	0.009	116.22	0.01	1087	5.388	0.004	17.38	0.1	1.429	8.78	4.018	63.199	268.12	26.11
RO MAIPO EN FUENTE LOS MORROS (CA)	04/02/2010	346989	6275371	86.217	59.438	0.089	219.43	0.153	922	48.743	0.011	38.69	2.29	0.331	9.1	6.469	61.601	254.85	17.01
RO MAPOCHO EN EL MONTE	08/02/2010	317138	6271767	121.483	0.3	0.003	118.66	0.01	1213	0.239	0.955	19.8	0.02	8.557	8.25	6.214	75.964	267.46	22.64
RO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS	01/02/2010	365028	6306665	5.417	9.661	0.014	38.995	2.593	893	9.994	0.003	8.64	0.664	0.441	8.01	3.233	6.94	101.72	12.49
RO MAPOCHO EN PTE FUDAHEL	05/02/2010	331111	6239140	80.191	8.072	0.015	122.33	0.073	929	6.382	0.005	16.38	0.376	0.204	8.01	3.521	53.758	236.05	15.27
RO MAPOCHO RANQUADA DE MAPU	03/02/2010	331232	6292177	105.778	10.191	0.02	125.72	0.03	1055	7.727	0.059	18.81	0.36	4.865	6.88	6.33	76.56	266.15	18.18
RO MOLINA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	16/02/2010	370122	6306396	3.332	0.3	0.001	16.752	0.01	147	0.231	0.01	2.275	0.01	0.421	8.62	0.401	5.927	15.866	19.42
RO OLIVARES ANTES JUNTA RO COLORADO	17/02/2010	394398	6294001	77.646	0.653	0.003	41.639	0.01	511	0.93	0.005	8.55	0.08	0.406	9.33	2.331	49.256	44.949	14.02
RO SAN FRANCISCO ANTES ESTERO YERBA LOCA	16/02/2010	371252	6310847	15.754	0.3	0.007	47.943	0.183	460	0.538	0.005	11.9	0.303	0.678	8.34	2.112	15.55	128.73	17.04
RO VOLCAN ANTES RO MAPO (CA)	15/02/2010	313144	6346880	72.92	2.242	0.005	49.52	0.01	888	1.799	0.003	11.51	0.01	0.188	9.3	3.464	46.341	226.53	12.57
RO YESO ANTES JUNTA RO MAIPO	15/02/2010	387817	6260811	41.303	0.3	0.001	123.95	0.01	928	0.193	0.003	15.14	0.02	0.129	8.6	2.447	26.549	323.91	17.03
ZANONEN LA AGUADA EN PAJARITOS	05/02/2010	339619	6294201	85.121	22.168	0.033	194.22	0.06	935	19.29	0.041	30.74	0.997	1.204	7.4	5.567	55.791	262.23	19.26

B.2 Datos de niveles piezométricos utilizados. Valores de profundidades en metros.

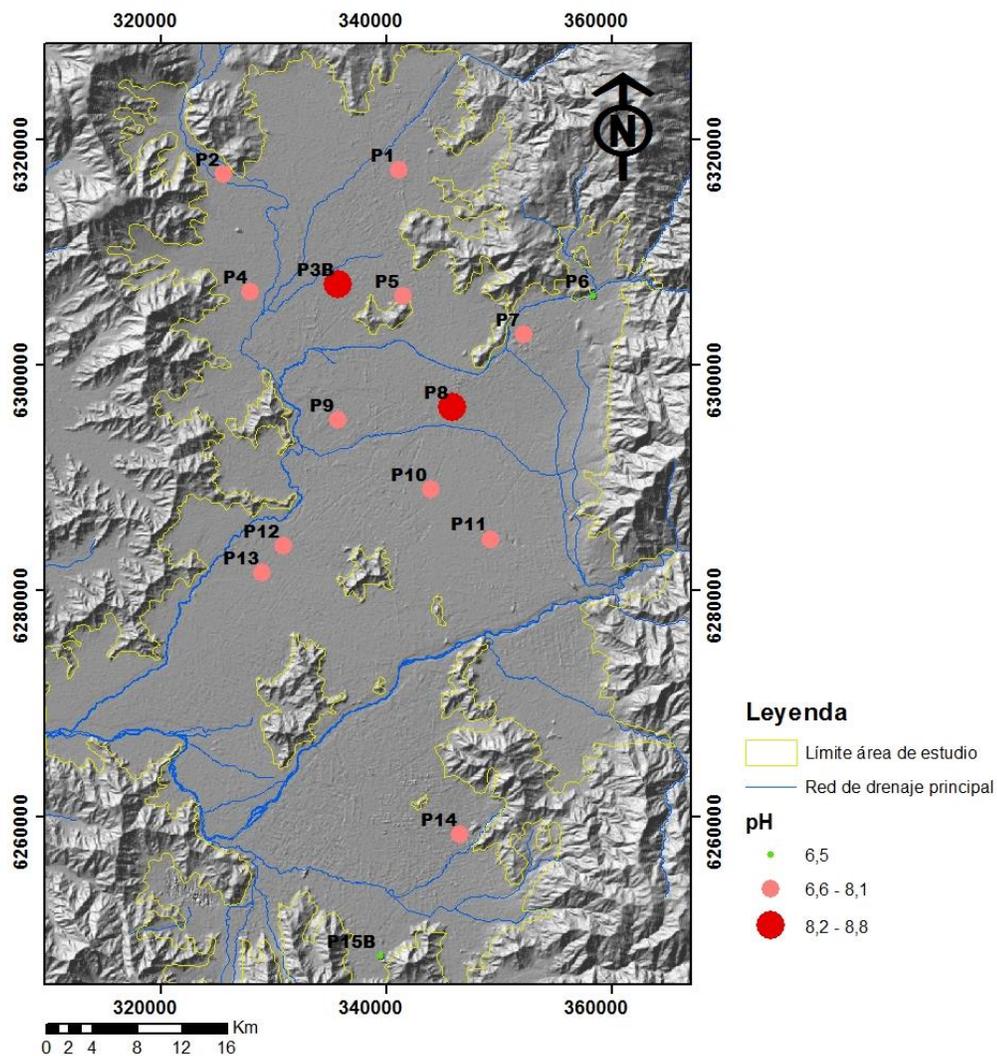
Estación	X	Y	2001	2006	2010
ASENTAMIENTO AGUILA SUR	339501	6246702	14,10	13,70	14,20
ASENTAMIENTO LO VARGAS	325617	6316870		24,80	34,50
ASENTAMIENTO MALLOCO	329053	6281575	5,90	6,30	6,95
ESTADIO CORFO	358354	6306061	32,30		46,20
FUNDO CACHANTUN	346573	6258307	14,70	16,60	17,00
HIJUELA EL OLIVO	335737	6295108	18,37	18,50	30,59
POZO AGRICOLA HERMANOS POBLETE	330891	6283889			15,95
POZO CASAS DE COLO COLO	335768	6307127			10,80
POZO CEMENTERIO METROPOLITANO	343942	6288934		81,70	81,52
POZO CLUB DE GOLF	352223	6302697			27,62
POZO CRUCERO PERALILLO	327999	6306435			18,80
POZO FUNDO EL ALGARROBAL	341097	6317222			45,80
POZO INIA	349039	6284157			86,70
POZO PARQUE O'HIGGINS	345670	6295817			66,67
POZO VERTEDERO CERROS DE RENCA	341531	6306092			27,00

Anexo C

C.1 Mapa de distribución de pH para el año 2001. Coordenadas UTM Huso 19S.

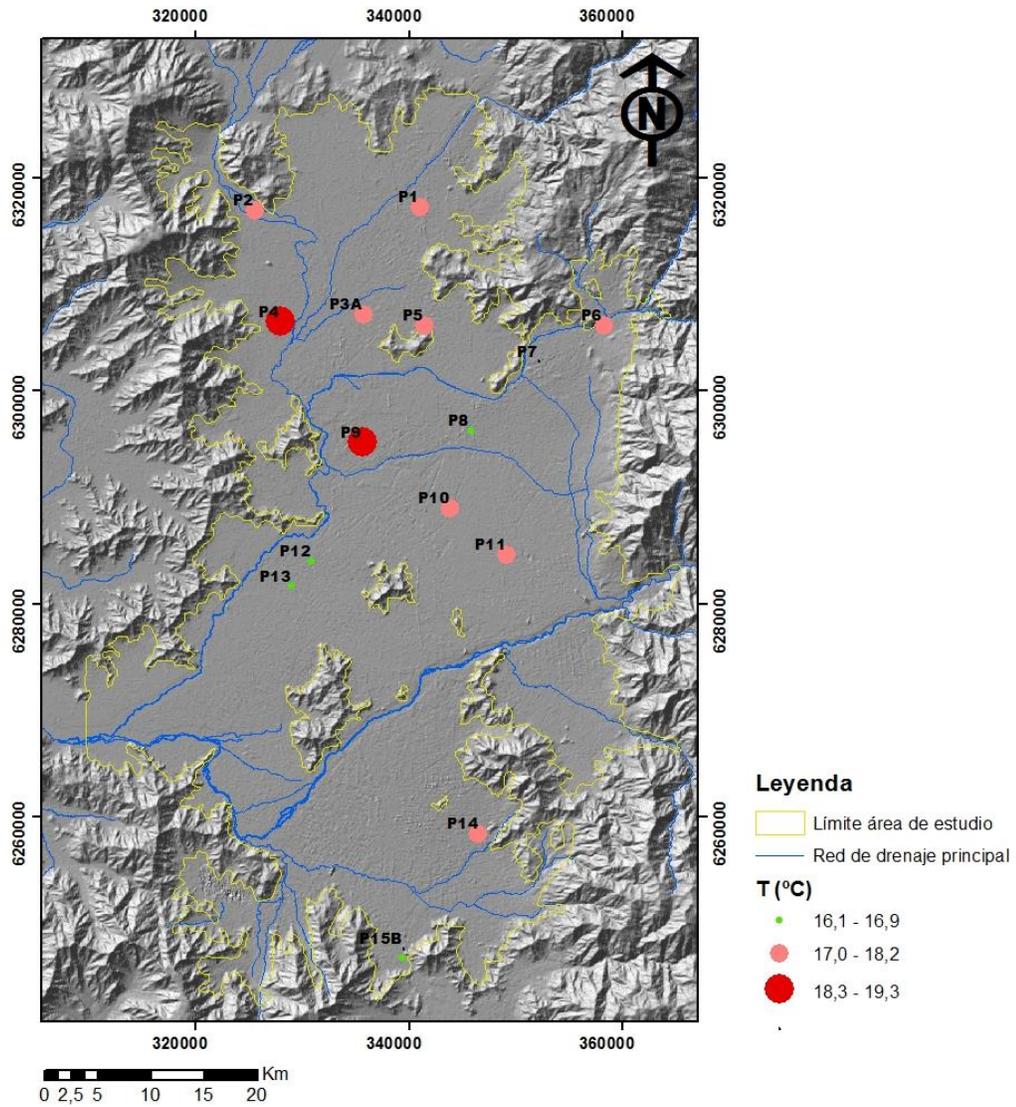


C.2 Mapa de distribución de pH para el año 2010. Coordenadas UTM Huso 19S.

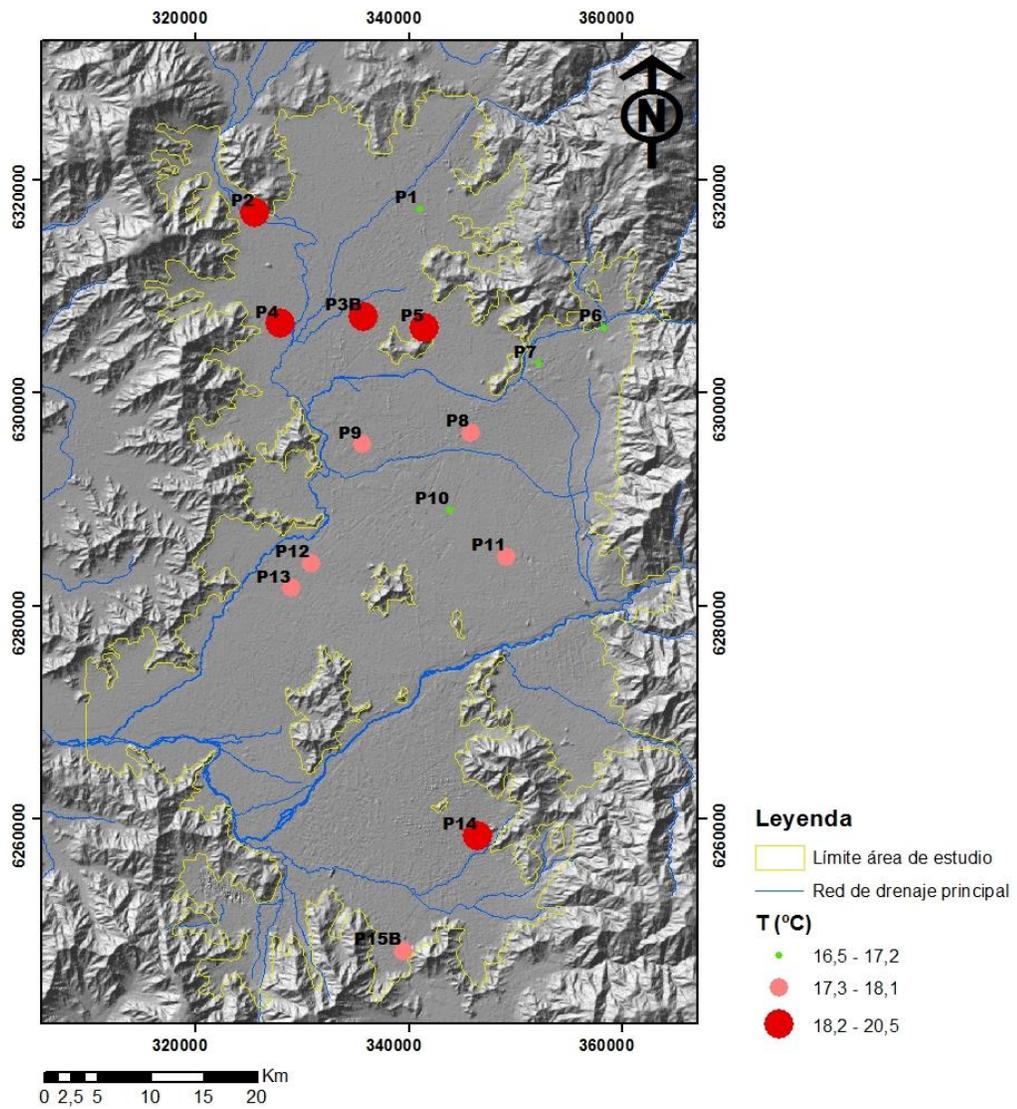


Anexo D

D.1 Mapas de distribución de temperaturas para el año 2001. Coordenadas UTM Huso 19S.

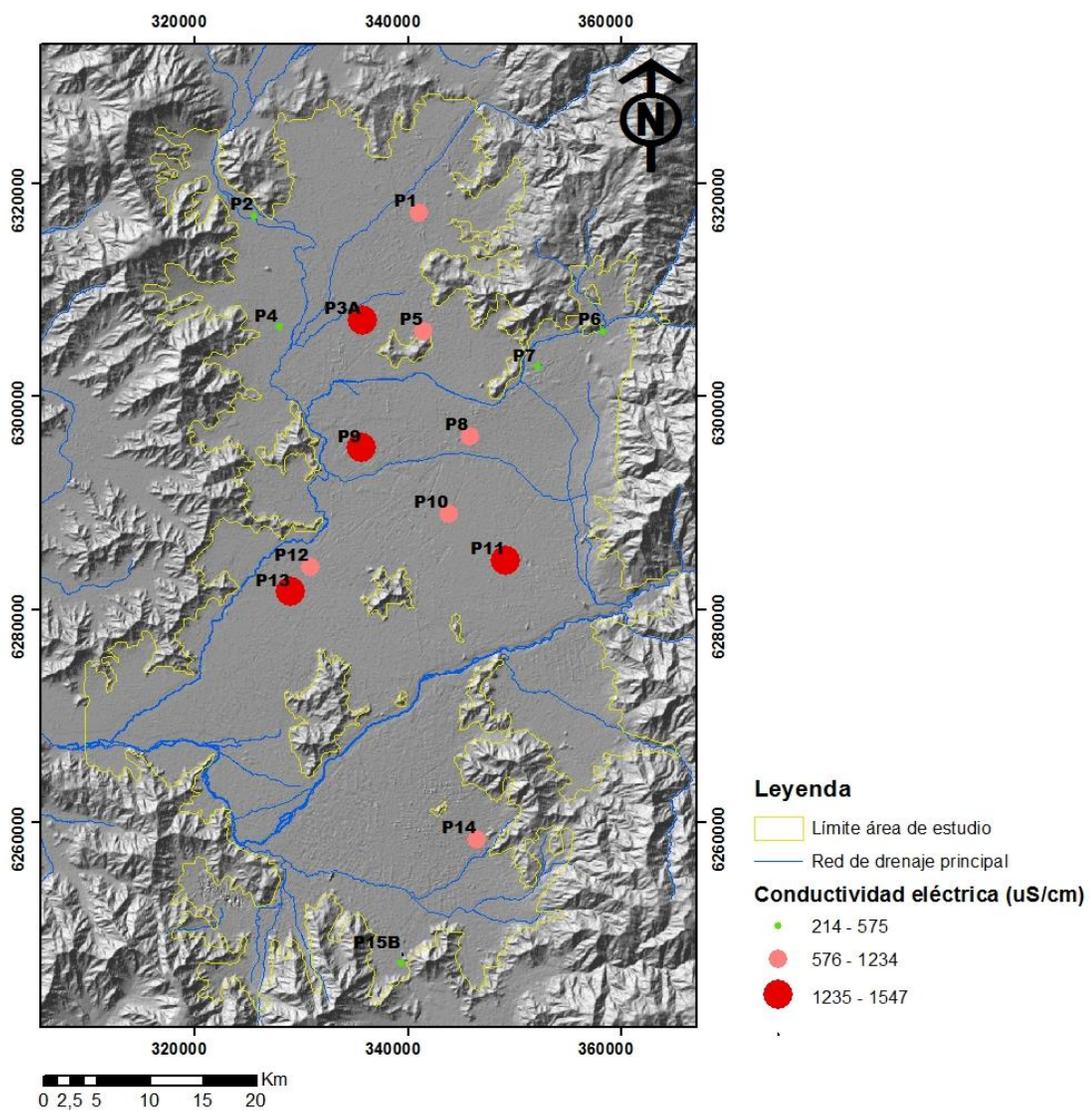


D.2 Mapas de distribución de temperaturas para el año 2010. Coordenadas UTM Huso 19S.

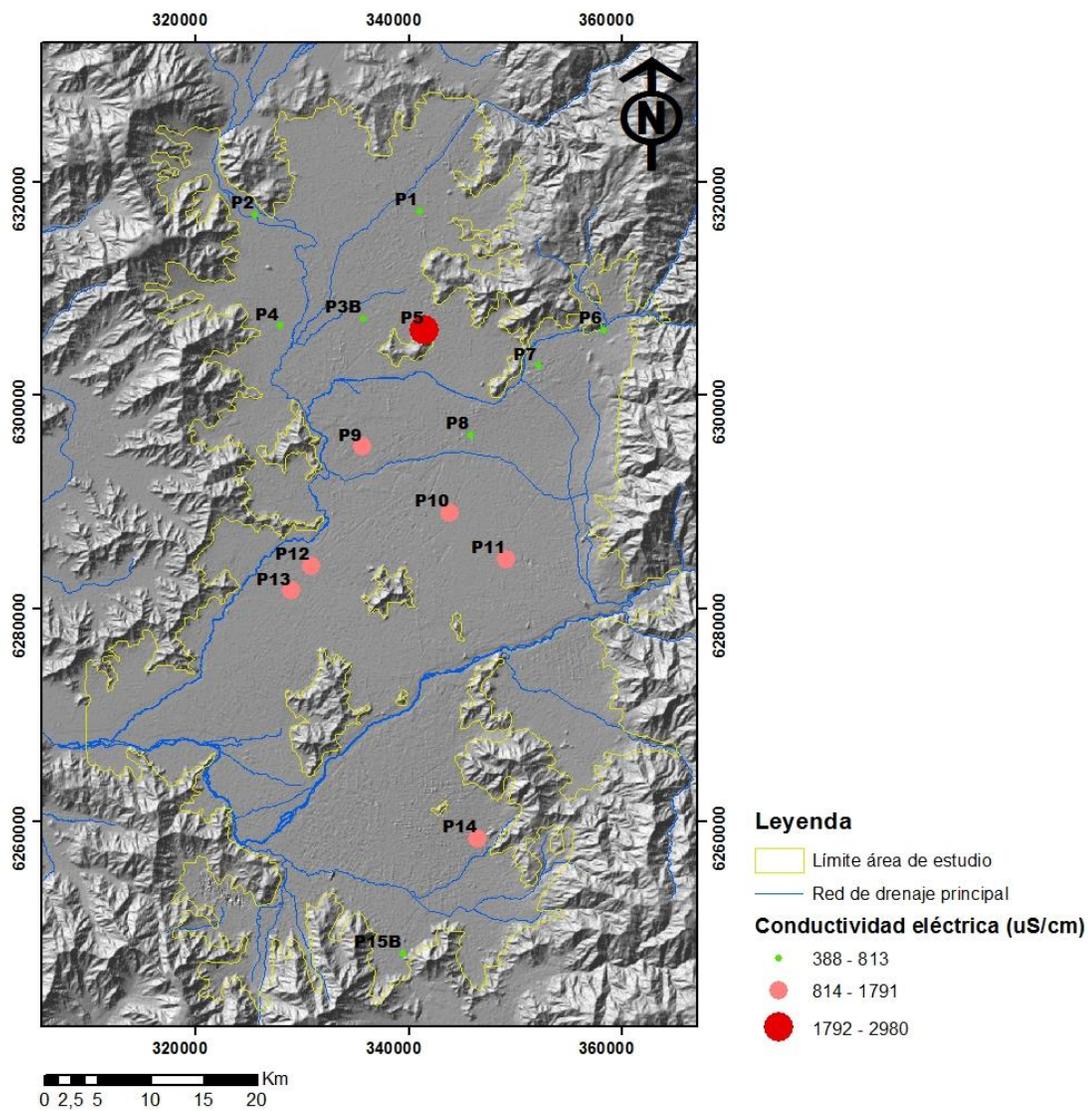


Anexo E

E.1 Mapas de distribución de conductividad eléctrica para el año 2001. Coordenadas UTM Huso 19S.

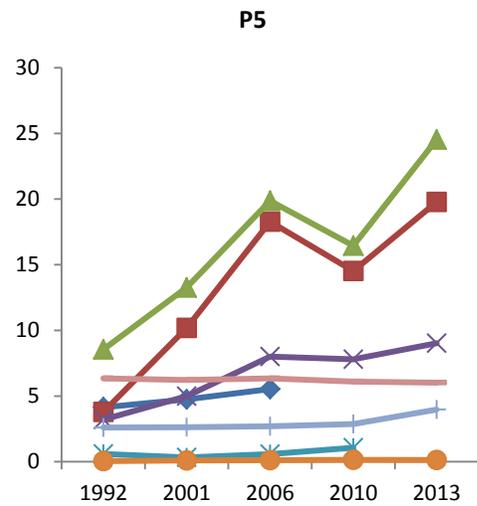
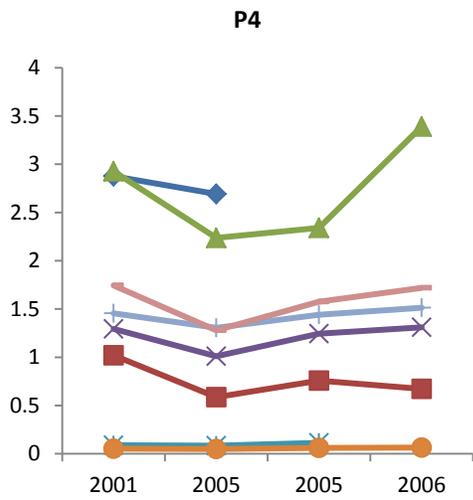
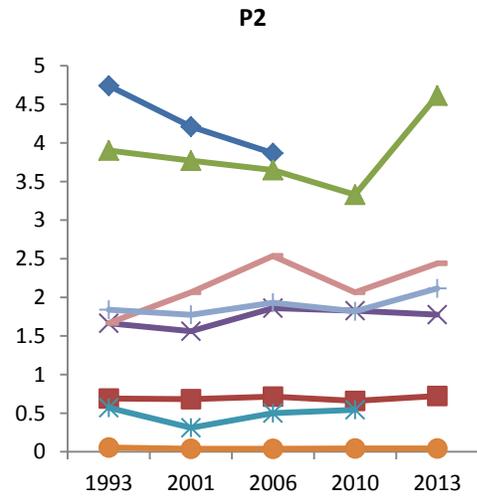
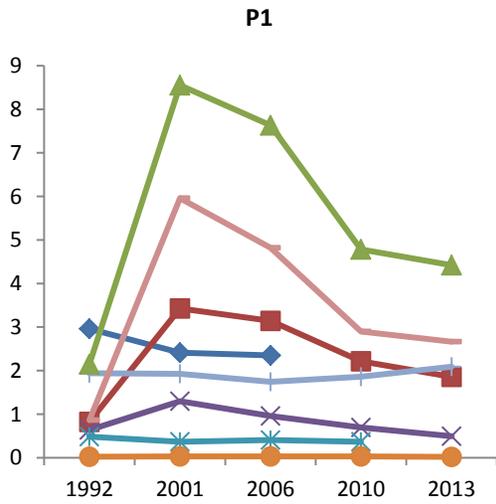


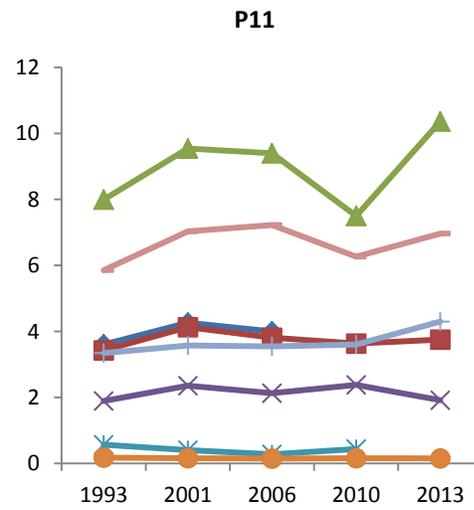
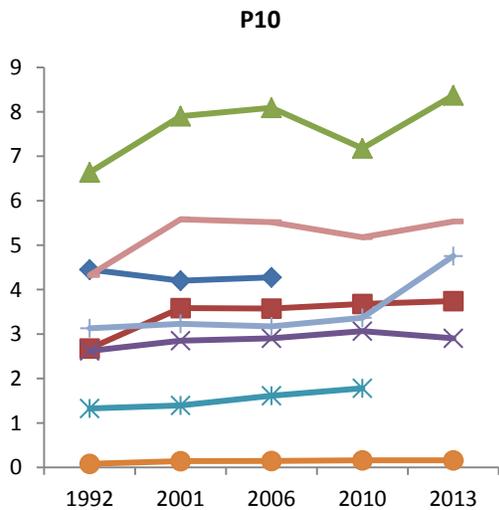
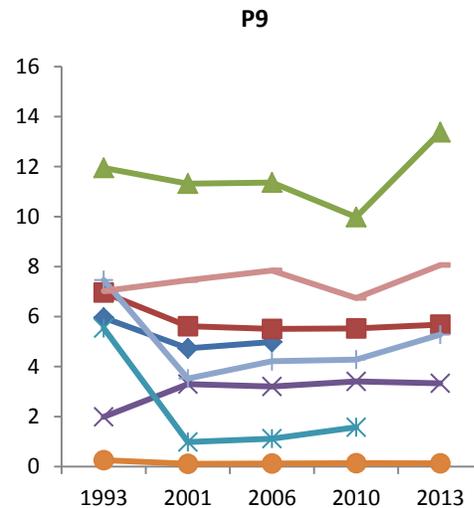
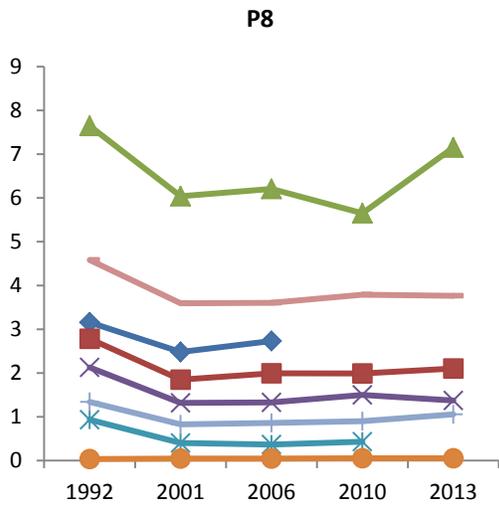
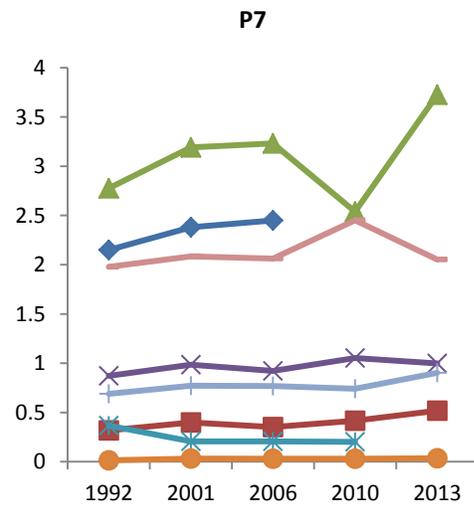
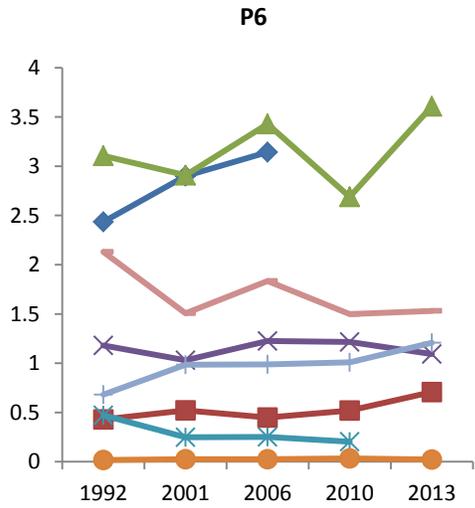
E.2 Mapas de distribución de conductividad eléctrica para el año 2010. Coordenadas UTM Huso 19S.

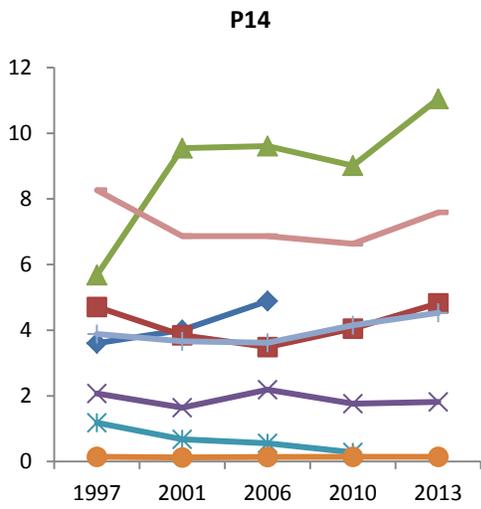
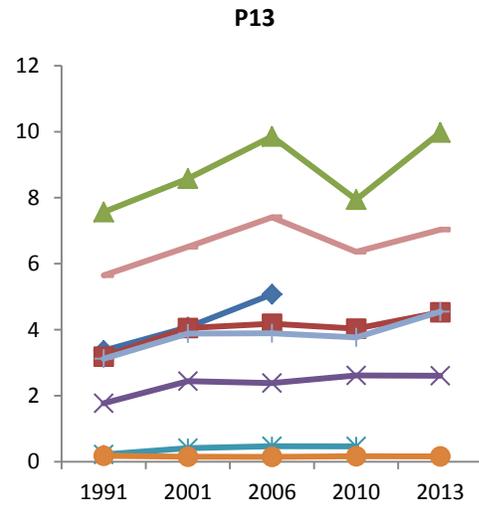
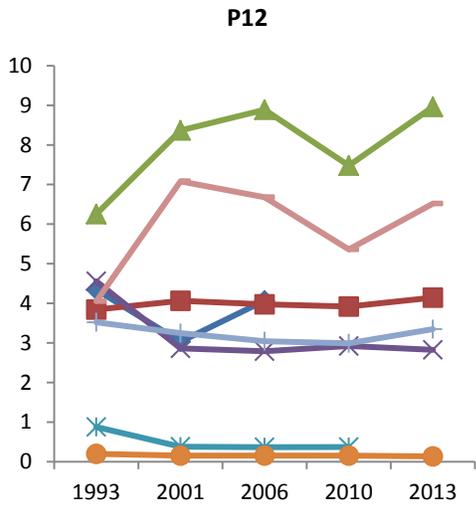


Anexo F

F.1 Análisis temporal de las estaciones de aguas subterráneas



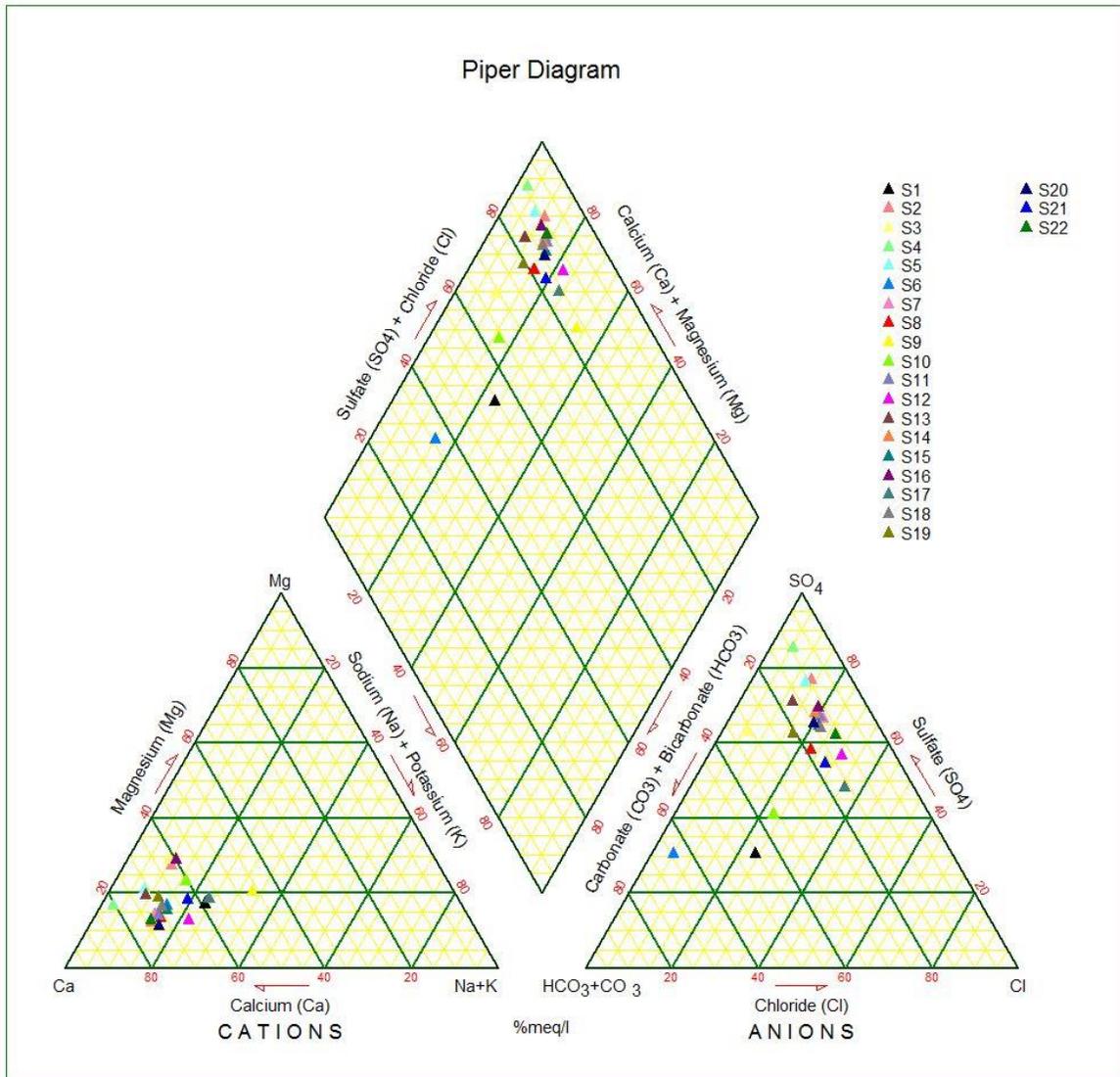




◆ HCO3
 ■ Cl
 × Mg
 ✱ NO3
 ● K
 + Na
 — SO4
 ▲ Ca

Anexo G

G.1 Diagrama de Piper para los datos de aguas superficiales del año 2006



G.2 Diagrama de Stiff para los datos de aguas superficiales del año 2006. Coordenadas UTM Huso 19S.

