



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIRECCIÓN REGIONAL DE AGUAS – REGIÓN METROPOLITANA**

**“DIAGNÓSTICO DE CALIDAD DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LA REGIÓN
METROPOLITANA- COMPLEMENTARIO
DIAGNÓSTICO PLAN MAESTRO DE
RECURSOS HÍDRICOS REGIÓN
METROPOLITANA DE SANTIAGO”**

INFORME FINAL

**REALIZADO POR:
SGA S.A.**

S.I.T. N°390

SANTIAGO, JULIO, 2016

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIRECCIÓN REGIONAL DE AGUAS REGIÓN METROPOLITANA DE
SANTIAGO**

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Directora Regional de Aguas – Región Metropolitana de Santiago
Abogada Srta. Carmen Herrera Indo

Inspector Fiscal
Ingeniero Agrónomo Srta. Daniela Vidal Ferrúz

Profesionales DGA
Ingeniero Químico Sra. Doris Águila González
Ingeniero Civil Agrícola Sr. Rodrigo Jelvez Echeverría
Ingeniero Civil Agrícola Sr. Carlos Quintana Sotomayor

NOMBRE CONSULTORA:

SGA S.A.

Jefe de Proyecto
Hidrogeóloga Dra. Srta. Daniela Villablanca Espinoza

Profesionales:
Hidrogeóloga Sra. Lidia Casarrubios Blanco
Geógrafo Sr. Francisco Cornejo Cornejo
Geólogo Sr. Alejandro Muñoz Asensio
Hidrogeóloga Dra. Sra. Laura Vitoria Codina

TABLA DE CONTENIDO GENERAL

1	RESUMEN	1
2	INTRODUCCIÓN	3
3	OBJETIVOS.....	4
3.1	OBJETIVO GENERAL	4
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
4	ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL ESTUDIO	6
4.1	REVISIÓN DE ANTECEDENTES	7
4.2	REUNIONES.....	7
4.3	ACTIVIDADES DE TERRENO: ETAPA I Y ETAPA II	8
4.4	APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD Y CLASIFICACIÓN DE POZOS	10
4.5	DIAGNÓSTICO DE LA RED DGA DE MONITOREO ACTUAL Y NUEVA PROPUESTA	11
5	ANTECEDENTES MEDIO FÍSICO REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO	12
5.1	GEOMORFOLOGÍA	12
5.2	GEOLOGÍA	13
5.3	HIDROGEOLOGÍA.....	18
5.3.1	Hidrogeología regional.....	18
5.3.2	Descripción hidrogeológica por sector acuífero.....	20
5.4	VULNERABILIDAD DE ACUÍFERO	39
5.5	SITUACIÓN DE EXPLOTACIÓN EN LA REGION	41
5.6	USO DE SUELO POR SECTOR ACUÍFERO	43
5.6.1	Sistema Chacabuco.....	43
5.6.2	Sistema Colina	47
5.6.3	Sistema Maipo – Mapocho y Maipo Alto.....	50
5.6.4	Sistema Puangue	56
5.6.5	Sistema Melipilla.....	60
5.6.6	Sistema Yali	63
5.6.7	Sistema Alhué	65
6	METODOLOGÍA.....	67
6.1	DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS Y POZOS DE MONITOREO	67
6.2	EQUIPOS Y MATERIALES PARA MEDICIONES EN TERRENO	72
6.3	PRESERVACIÓN Y TRANSPORTE DE LAS MUESTRAS	75
6.4	PARÁMETROS QUÍMICOS Y LABORATORIO	75
6.5	MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFERO SEGÚN ÍNDICE DE CALIDAD ...	77

6.5.1	Generalidades y esquema general de la metodología	78
6.5.2	Cálculo del Índice de Calidad	80
6.5.3	Interpretación de temporalidad.....	85
7	RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS DE LOS POZOS APR MONITOREADOS ...	86
7.1	CALIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS.....	86
7.2	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS.....	89
7.3	CONCENTRACIONES QUÍMICAS	100
7.4	COMPARACIÓN CON NORMATIVA NCH 409.....	102
7.4.1	Sistema acuífero Chacabuco.....	103
7.4.2	Sistema acuífero Colina	107
7.4.3	Sistema acuífero Maipo-Mapocho	111
7.4.4	Sistema acuífero Melipilla.....	116
7.4.5	Sistema acuífero Puangue	118
8	CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA DE SECTORES ACUÍFEROS DE LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO	124
8.1	SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS LOCALES.....	124
8.1.1	Caracterización de posibles contaminantes de ocurrencia natural ..	124
8.1.2	Caracterización de posibles contaminantes de origen antrópico.....	126
8.2	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD	129
8.2.1	Índice de Calidad por APR	129
8.2.2	Índice de Calidad por Sistema acuífero	134
8.3	DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL IC GENERAL.....	135
8.4	MAPAS REGIONALES DE CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE LAS AGUAS	136
9	PROPUESTA AMPLIACIÓN RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO	140
9.1	DIAGNÓSTICO DE LA RED ACTUAL.....	140
9.2	PROPUESTA DE INCORPORACIÓN DE NUEVOS POZOS	142
9.2.1	Incorporación a corto plazo	146
9.2.2	Incorporación a mediano plazo	147
9.2.3	Incorporación a largo plazo	149
10	CONCLUSIONES.....	153
11	RECOMENDACIONES	156
12	BIBLIOGRAFIA.....	157

TABLA DE CONTENIDO ESPECÍFICO

LISTADO DE ANEXOS

- ANEXO 1: Parámetros físico - químicos.
- ANEXO 2: Resultados químicos y balance iónico.
- ANEXO 3: Informes de laboratorio.
- ANEXO 4: Fichas de pozos con datos registrados en terreno.
- ANEXO 5: Fotografías.
- ANEXO 6: Certificado de acreditaciones de Laboratorio.
- ANEXO 7: Datos Técnicos Equipos.
- ANEXO 8: Planos, Tablas y Reuniones.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3-1. Localización de pozos APR considerados en este estudio de la Región Metropolitana de Santiago	5
Figura 4-1. Esquema de las Etapas y actividades del Estudio.....	6
Figura 5-1. Unidades Morfoestructurales.....	13
Figura 5-2. Mapa Geológico Regional.....	17
Figura 5-3. Mapa Hidrogeológico Regional.....	19
Figura 5-4. Sistema Chacabuco	22
Figura 5-5. Sistema Colina.....	24
Figura 5-6. Sistema Maipo-Mapocho	27
Figura 5-7. Sistema Maipo Alto.....	28
Figura 5-8. Sistema Puangue	31
Figura 5-9. Sistema Melipilla	33
Figura 5-10. Sistema Yali.....	35
Figura 5-11. Perfiles hidrogeológicos del Sistema Yali.....	36
Figura 5-12. Sistema Alhué.....	37
Figura 5-13. Perfil hidrogeológico Sistema Alhué	38
Figura 5-14. Mapa de vulnerabilidad Región Metropolitana de Santiago	40
Figura 5-15. Distribución espacial de derechos de aprovechamiento de aguas según la fuente de abastecimiento.....	42
Figura 5-16. Usos del Suelo Sistema Chacabuco	46
Figura 5-17. Usos del Suelo Sistema Colina	49
Figura 5-18. Usos del Suelo Sistema Maipo Mapocho y Maipo Alto	55
Figura 5-19. Usos del Suelo Sistema Puangue	59
Figura 5-20. Usos del Suelo Sistema Melipilla.....	62
Figura 5-21. Usos del Suelo Sistema Yali	64
Figura 5-22. Usos del Suelo Sistema Alhué	66
Figura 6-1. Red de 104 servicios APR para monitoreo y diagnóstico de calidad de aguas subterráneas en la Región Metropolitana de Santiago.....	69
Figura 6-2. Esquema medición de la profundidad del agua subterránea	73
Figura 6-3. Esquema metodológico determinación Índice de Calidad	80
Figura 6-4. Cálculo Índice de Calidad mediante interpolación lineal entre clases	82
Figura 7-1. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Chacabuco	93

Figura 7-2. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Colina.	94
Figura 7-3. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Maipo-Mapocho y Maipo Alto	95
Figura 7-4. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Puangue	96
Figura 7-5. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Melipilla	97
Figura 7-6. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Yali	98
Figura 7-7. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Alhué .	99
Figura 8-1. Índice de Calidad General por APR. 1 ^{era} Campaña 2015.....	132
Figura 8-2. Índice de Calidad General por APR. 2 ^{da} Campaña 2016	133
Figura 8-3. Índice de Calidad General de la Región Metropolitana de Santiago. 1 ^{era} Campaña 2015.....	137
Figura 8-4. Índice de Calidad General de la Región Metropolitana de Santiago. 2 ^{da} Campaña 2016.....	138
Figura 8-5. Índice Temporal de Calidad entre primera y segunda campaña	139
Figura 9-1. Red actual de monitoreo de calidad de aguas subterráneas DGA	141
Figura 9-2. Red de pozos propuestos para monitoreo de calidad química de aguas subterráneas DGA	145
Figura 9-3. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en corto plazo	147
Figura 9-4. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en un mediano plazo	149
Figura 9-5. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en largo plazo.....	151
Figura 9-6. Resumen de Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en largo plazo	152

LISTADO DE TABLAS

Tabla 4-1. Número de pozos monitoreados por Provincia y Comuna	8
Tabla 5-1. Principales sistemas y sectores acuíferos en la Región Metropolitana de Santiago.....	21
Tabla 5-2. Derechos de aprovechamiento de aguas según Fuente de Abastecimiento	41
Tabla 6-1. Listado de servicios APR para monitoreo y diagnóstico de calidad de aguas, Región Metropolitana de Santiago.....	67
Tabla 6-2. Características de instrumento para medición de niveles	72
Tabla 6-3. Instrumento para medir parámetros físico-químicos <i>in situ</i>	74
Tabla 6-4. Características de equipos de apoyo en terreno.....	75
Tabla 6-5. Parámetros analizados y laboratorio	76
Tabla 6-6. Metodologías de análisis químico empleados por SGS	77
Tabla 6-7. Metodologías de análisis químico empleados por la DGA.....	77
Tabla 6-8. Criterios para establecer el IC general	83
Tabla 7-1. Diferencia Admisible en cálculo de Error de Balance.....	86
Tabla 7-2. Listado de parámetros para caracterizar las aguas y su límite de detección	100
Tabla 7-3. Resumen resultados de parámetros <i>in situ</i> y laboratorio.....	101
Tabla 7-4. Rango de valores máximos permitidos por la norma chilena de Agua Potable NCh409.....	102
Tabla 7-5. Resumen parámetros excedidos Sistema Chacabuco.....	122
Tabla 7-6. Resumen parámetros excedidos Sistema Colina	122
Tabla 7-7. Resumen parámetros excedidos Sistema Melipilla.....	122

Tabla 7-8. Resumen parámetros excedidos Sistema Maipo- Mapocho y Maipo Alto..	123
Tabla 7-9. Resumen parámetros excedidos Sistema Puangue.....	123
Tabla 8-1. Posibles Compuestos Contaminantes debido a fenómenos naturales	125
Tabla 8-2. Metales y parámetros químicos asociados a distintos tipos de actividad antrópica.....	127
Tabla 8-3. Criterios de selección de parámetros locales en la Región Metropolitana de Santiago.....	128
Tabla 8-4. Valores de corte de los parámetros fijos y locales.....	129
Tabla 9-1. Red actual de monitoreo de calidad de aguas subterráneas DGA	140
Tabla 9-2. Densidad óptima de puntos de monitoreo según representatividad y grado de explotación del acuífero.....	142
Tabla 9-3. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo químico DGA	143
Tabla 9-4. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en corto plazo	146
Tabla 9-5. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en un mediano plazo.....	148
Tabla 9-6. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en largo plazo.....	150

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 6-1. APR Huelquén, comuna de Paine (Sector Cardonal).....	71
Fotografía 6-2. Medición de nivel agua en el pozo APR Santa Marta de Liray, Comuna de Colina, Provincia de Chacabuco	73
Fotografía 6-3. Medición de parámetros físico-químicos en terreno	74

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 7-1. Distribución porcentual del Error de Balance Primera Campaña.....	87
Gráfico 7-2. Distribución porcentual del Error de Balance Segunda Campaña	88
Gráfico 7-3. Diagrama de clasificación de Piper de las aguas de los pozos APR monitoreados en Octubre 2015	90
Gráfico 7-4. Diagrama de clasificación de Piper de las aguas de los pozos APR monitoreados en Febrero-Marzo 2016	91
Gráfico 7-5. Valores de pH en Sistema Chacabuco. Campañas 2015 y 2016.....	104
Gráfico 7-6. Concentraciones de Arsénico (mg/L) en Sistema Chacabuco. Campañas 2015 y 2016	105
Gráfico 7-7. Concentraciones de Hierro (mg/L) en Sistema Chacabuco. Campañas 2015 y 2016	106
Gráfico 7-8. Concentraciones de Arsénico (mg/L) en Sistema Colina. Campañas 2015 y 2016.....	107
Gráfico 7-9. Concentraciones de Hierro (mg/L) en Sistema Colina. Campañas 2015 y 2016.....	108
Gráfico 7-10. Concentraciones de Manganeso (mg/L) en Sistema Colina. Campañas 2015 y 2016	109
Gráfico 7-11. Concentraciones de Nitrato (mg/L) en Sistema Colina. Campañas 2015 y 2016.....	110
Gráfico 7-12. Concentración de Hierro (mg/L) en Sistema Maipo Mapocho. Campaña 2015 y 2016	112
Gráfico 7-13. Concentración de Manganeso (mg/L) en Sistema Maipo Mapocho. Campaña 2015 y 2016	114

Gráfico 7-14. Concentración de Nitrato (mg/L) en Sistema Maipo Mapocho. Campaña 2015 y 2016	115
Gráfico 7-15. Concentración de Hierro (mg/L) en Sistema Melipilla. Campaña 2015 y 2016.....	116
Gráfico 7-16. Concentración de Manganeso (mg/L) en Sistema Melipilla. Campaña 2015 y 2016	117
Gráfico 7-17. Concentración de Hierro (mg/L) en Sistema Puangue. Campaña 2015 y 2016.....	118
Gráfico 7-18. Concentración de Manganeso (mg/L) en Sistema Puangue. Campaña 2015 y 2016	119
Gráfico 7-19. Concentración de Nitrato (mg/L) en Sistema Puangue. Campaña 2015 y 2016.....	120
Gráfico 7-20. Concentración de Sulfato (mg/L) en Sistema Puangue. Campaña 2015 y 2016.....	121
Gráfico 8-1. Porcentaje de puntos APR y su Índice de Calidad	131

Acrónimos

APHA	American Public Health Association.
APR	Agua Potable Rural.
AWWA	American Water Works Association.
CE	Comunidad Europea.
CODELCO	Corporación Nacional del Cobre.
DGA	Dirección General de Aguas.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
IC	Índice de Calidad.
IGME	Instituto Geológico y Minero de España.
INN.....	Instituto Nacional de Normalización.
LADGA	Laboratorio Ambiental de la Dirección General de Aguas.
OMS	Organización Mundial de la Salud.
RMS.....	Región Metropolitana de Santiago.
S.D.T. DGA	Serie de documentos técnicos DGA.
SDT	Sólidos Disueltos Totales.
SERNAGEOMIN.....	Servicio Nacional de Geología y Minería.
SGA	Soluciones en Gestión Ambiental S.A.
SGS	SGS Chile Ltda.
SIG	Sistema de Información Geográfica.
SISS	Superintendencia de Servicios Sanitarios.
SIT	Serie de Informes Técnicos.
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América.

1 RESUMEN

El presente estudio informa acerca del estado físico-químico de las aguas subterráneas en la Región Metropolitana de Santiago (RMS), a partir del monitoreo de 104 servicios de Agua Potable Rural (APR), cuyo principal objetivo fue elaborar un diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas mediante la determinación de un Índice de Calidad (IC) por pozo y una propuesta de inclusión de Pozos APR en la actual Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas de la DGA, por sector acuífero.

Los sectores acuíferos que fueron caracterizados en la Región incluyeron un total de 8 sistemas denominados Chacabuco, Colina, Maipo-Mapocho, Maipo Alto, Puangue, Melipilla, Yali y Alhué.

Los pozos APR fueron visitados y muestreados en dos campañas, la primera durante los meses de Octubre y Noviembre de 2015, mientras la segunda se realizó durante los meses de Febrero y Marzo de 2016, siendo todos ellos representativos del horizonte acuífero más somero de cada sistema acuífero de la Región. Dentro de las actividades de terreno se incluyó la confección de fichas, el registro de parámetros *in situ* (Conductividad eléctrica, pH, Temperatura y Potencial REDOX) y el muestreo para el análisis de 23 parámetros en laboratorio (iones mayoritarios y minoritarios totales). Los resultados han sido graficados utilizando diagramas de Piper y Stiff para una mejor comprensión de la composición química y su distribución en la Región Metropolitana de Santiago.

Aplicando la metodología de la DGA (2009) respecto a la determinación del Índice de Calidad por pozos y sector acuífero, es que se realizó una selección de parámetros químicos, en dos grupos. El primero, denominado de parámetros fijos, que incluyó el análisis de Sólidos Disueltos Totales (SDT), Calcio, Sodio, Cloruro, Sulfato, Magnesio, y Nitratos. El segundo grupo, que representó los parámetros locales, que permiten distinguir los acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago, incluyó las concentraciones de Arsénico y Manganeso. Todos ellos fueron comparados con las normas de la OMS para Agua Potable, estándares de las normas chilenas de agua potable y riego, y la FAO para riego, con el fin de clasificar y categorizar a través de un Índice la Calidad (IC) del pozo APR y, por la interpolación de estos, la del sector acuífero en Excepcional, Bueno, Regular, Insuficiente e Intratable.

Los resultados mostraron que la mayoría de los APR monitoreados en el marco de este estudio cumplen excepcionalmente con la normativa de la OMS para Agua Potable y de buena manera con la Norma Chilena NCh409, lo cual también significó que en estos pozos APR se observó un bajo impacto de actividad antrópica. Los pozos APR con IC de peor calidad, están representados por un IC Insuficiente, es decir que son aptos para uso de tipo industrial. Estos se identificaron en sólo tres pozos APR de la Región, localizados en la comuna de Curacaví, comuna de Melipilla y comuna de Lampa. La calidad insuficiente de estos APR fue determinada principalmente por los parámetros locales, entre estos el Manganeso, seguido de Arsénico, los cuales han sido asociados en parte a la actividad agrícola, por el uso de pesticidas, y otras actividades de carácter industrial (por ejemplo, manejo de materiales metálicos). Cabe destacar, que ningún APR presentó un IC Intratable, es decir, que no se reconocieron pozos APR con

parámetros que necesitaran un tratamiento demasiado complejo y costoso, para lograr cumplir con la normativa de Agua Potable.

Finalmente, se realizan recomendaciones respecto a una propuesta de pozos para ampliar la red actual de monitoreo de la DGA, la que se refiere principalmente a la ubicación de éstos en la Región Metropolitana de Santiago, basado en los Índices de Calidad por pozo de cada sistema acuífero, su referencia con respecto a la norma de agua potable (NCh409), los antecedentes de Vulnerabilidad de Acuífero y su representatividad en la Región.

2 INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas (DGA), de acuerdo a las disposiciones establecidas en Art. 129, bis 3, del Código de Aguas, es el organismo del Estado encargado de establecer y operar la red de estaciones de control de calidad, cantidad y niveles de las aguas, tanto superficiales como subterráneas en cada cuenca u hoya hidrográfica.

En la actualidad la DGA cuenta con una red de monitoreo de aguas subterráneas a lo largo del País. Esta red tiene como objetivo monitorear el estado químico de los acuíferos, así como detectar sus cambios temporales y espaciales.

En este contexto, a través del presente estudio, se establecerá un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas en la Región Metropolitana de Santiago, utilizando para estos fines los pozos APR, a través de la medición de los parámetros físico-químicos y de las concentraciones químicas en las fuentes de agua subterránea.

Además, con los resultados obtenidos de las mediciones físico químicas, la interpretación del origen de los compuestos químicos y el diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas se busca obtener una propuesta de qué pozos de APR pueden ser incorporados en la Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas de la DGA, para seguimiento futuro por sector acuífero.

En la Región Metropolitana de Santiago, con una extensión aproximada de 15.400 km², actualmente existen 15 pozos que forman parte de la Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas, por lo que se estima necesaria la ampliación del número de puntos de esta red, particularmente en aquellos sectores acuíferos donde la DGA ha establecido limitaciones de extracción de agua, con el propósito de proteger tanto en cantidad como en calidad un recurso escaso.

Dentro de las opciones de mejoramiento de la cobertura espacial de esta Red de Monitoreo, se cuenta con la posibilidad de incluir alguno de los 104 pozos que forman parte del programa de Agua Potable Rural (APR) de la Dirección de Obras Hidráulicas.

Esto permitirá avanzar en el mejoramiento de la Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas que posee la DGA en la Región Metropolitana de Santiago, a fin de ejercer la prevención y detección temprana de la presencia de sustancias contaminantes en los acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago.

3 OBJETIVOS

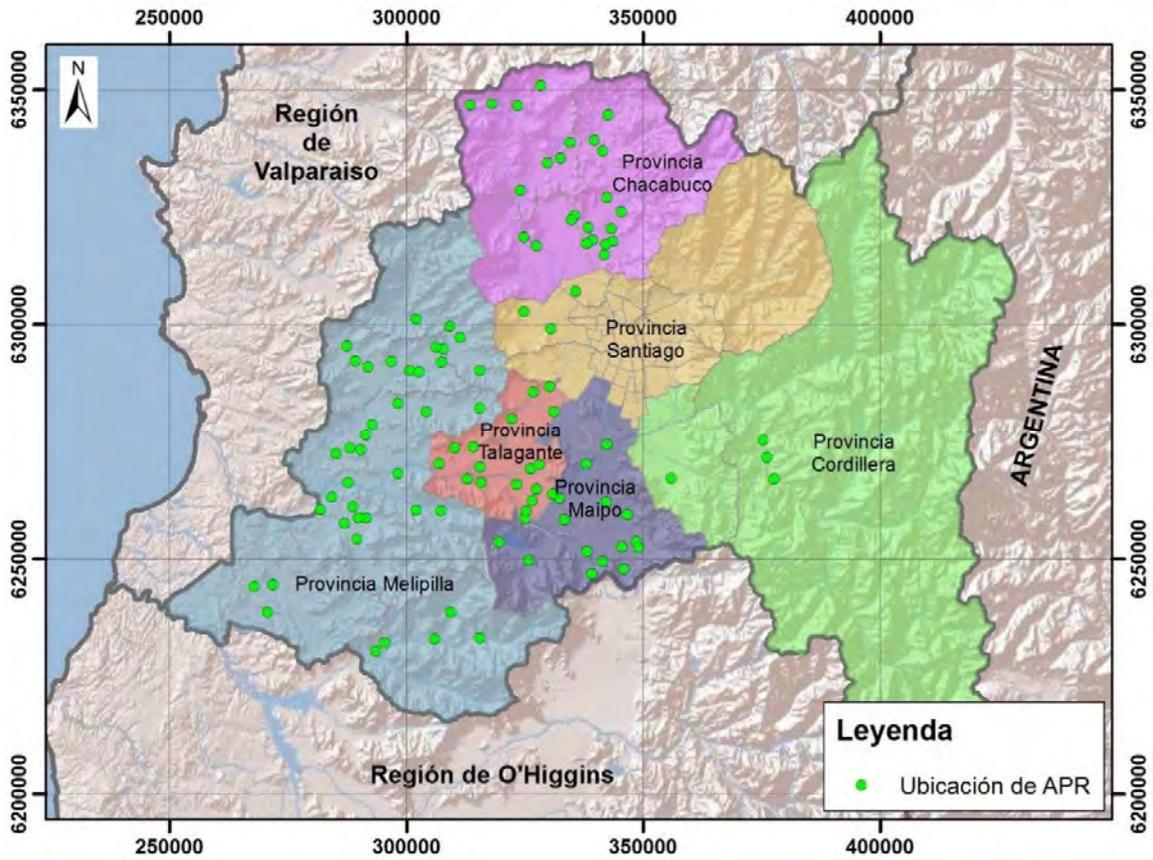
3.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este estudio es generar información acerca del estado físico-químico de las aguas subterráneas en la Región Metropolitana de Santiago, a partir del monitoreo en terreno de las aguas subterráneas de pozos pertenecientes a los programas de APR de la Región, determinar un Índice de Calidad por pozo y proponer la inclusión de Pozos APR en la Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas por sector Acuífero.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar información acerca del estado físico-químico de las aguas subterráneas en la Región Metropolitana de Santiago, a partir de dos (02) campañas de monitoreo en terreno de las aguas subterráneas en pozos APR de la Región Metropolitana de Santiago (Figura 3-1).
- Ejecutar el análisis químico de laboratorio, en las muestras de agua subterránea.
- Determinar un Índice de Calidad de agua por pozo.
- Obtener una propuesta de inclusión de Pozos APR en la Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas, por sector acuífero.
- Contar con los respectivos informes de ensayo de laboratorio DGA y externo Etapa I y Etapa II.
- Generar un Informe Global de Calidad de Aguas Subterráneas de la Región Metropolitana de Santiago que contenga: los informes de análisis de los laboratorios, la determinación de un Índice de Calidad por pozo, y una propuesta de qué pozos APR debieran incorporarse a la Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas de la DGA Región Metropolitana de Santiago, para seguimiento futuro, por sector acuífero.

Figura 3-1. Localización de pozos APR considerados en este estudio de la Región Metropolitana de Santiago

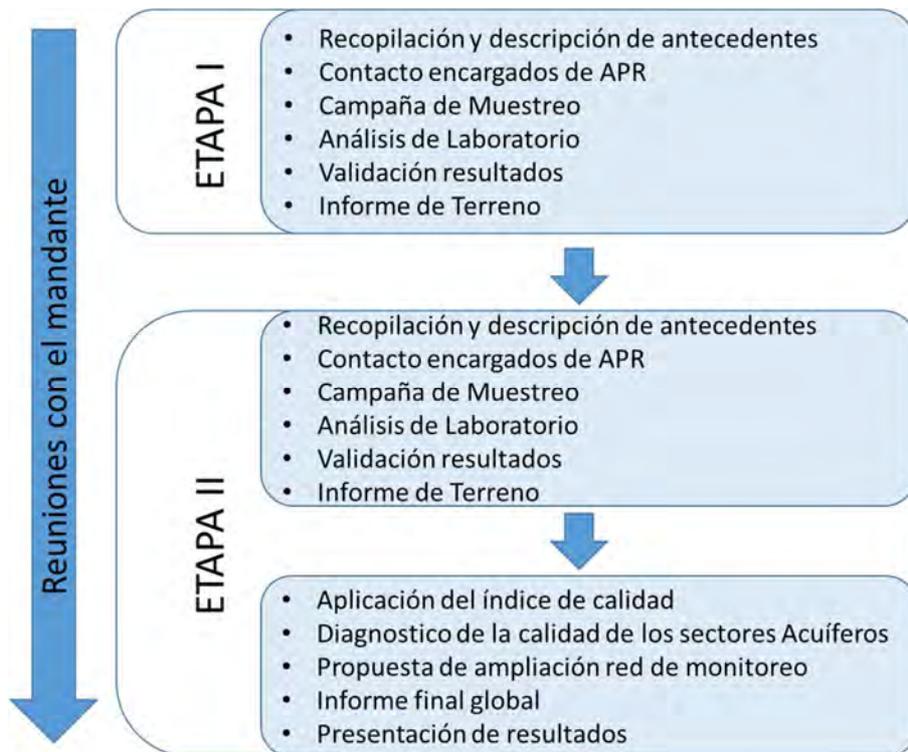


Fuente: Elaboración propia

4 ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL ESTUDIO

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos presentados anteriormente, se han desarrollado una serie de pasos metodológicos orientados al avance sistemático de las actividades consideradas en este estudio. A grandes rasgos, el trabajo se dividió en dos etapas: Etapa I y Etapa II, en cada una de las cuales se realizaron diferentes actividades, tales como reuniones, campañas de muestreo, análisis químicos y análisis de resultados. Un esquema de estas etapas y actividades consideradas en el estudio se muestran en la Figura 4-1:

Figura 4-1. Esquema de las Etapas y actividades del Estudio



Fuente: Elaboración propia

Las principales actividades desarrolladas en el marco del estudio se describen a continuación.

4.1 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

La revisión de antecedentes se realizó sobre documentos técnicos y estudios esenciales, tanto de organismos públicos como privados. Esta revisión tuvo como principal énfasis el analizar trabajos anteriores respecto al cálculo del Índice de Calidad por pozo y en sectores acuíferos, elaborados en otras regiones del país, entre los que destacan los estudios publicados por la Dirección General de Aguas (DGA). Además, se revisaron estudios e informes del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y el Instituto Geográfico Militar (IGM) respecto a la geología, delimitación de acuíferos, uso de suelos, Vulnerabilidad de acuíferos, entre otros.

La revisión de dichos estudios también permitió obtener información hidrogeológica, como direcciones de flujo, profundidades de los niveles piezométricos, parámetros hidráulicos, conexiones hidráulicas entre acuíferos, entre otros, lo que permitió establecer vínculos entre diferentes pozos y sectores del acuífero.

También se revisó la información en cuanto al uso del suelo en el entorno del servicio APR y de las actividades presentes, lo cual tuvo como objetivo definir las potenciales presiones antrópicas que existen sobre los acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago y dar una posible explicación de los resultados de Índice de Calidad por pozo y sector acuífero. En esta misma línea se recopilaron y analizaron los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas otorgados, dado que esto representa, también, una presión sobre el recurso.

Los estudios y documentos revisados se detallan en el Capítulo 12 de Bibliografía.

4.2 REUNIONES

Las reuniones llevadas a cabo en el marco del estudio tuvieron como objetivo principal validar las actividades de terreno y gabinete, informar respecto a la coordinación del equipo de trabajo, lograr acuerdos y entregar antecedentes respecto de los sistemas de Agua Potable Rural (APR) construidos por la Dirección de Obras Hidráulicas. Un detalle de las reuniones se presenta en el Anexo 8, Apéndice 1, Reuniones.

En el marco de estas reuniones, se entregaron al consultor como antecedente del estudio, y previo inicio de las campañas, el registro de 104 servicios de APR a monitorear.

La información de estos servicios APR incluyó su ubicación, coordenadas, operadores y datos de contacto (teléfonos y correos electrónicos). Cabe mencionar que, esta información fue elaborada por la Dirección de Obras Hidráulicas Región Metropolitana de Santiago, la cual fue remitida a la DGA Región Metropolitana de Santiago para los fines de este estudio.

Los 104 pozos APR monitoreados se distribuyen en las 6 provincias y 20 comunas que se indican en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Número de pozos monitoreados por Provincia y Comuna

Provincia	Comuna	Nº de pozos monitoreados
Chacabuco	Colina	12
	Lampa	4
	Til Til	8
Cordillera	Pirque	1
	San José del Maipo	3
Maipo	Buin	3
	Paine	10
	San Bernardo	2
Talagante	El Monte	3
	Isla Maipo	8
	Padre Hurtado	3
	Peñaflor	1
	Talagante	3
Melipilla	María Pinto	8
	Alhue	5
	Curacaví	5
	Melipilla	19
	San Pedro	3
Santiago	Pudahuel	2
	Quilicura	1
Total de pozos APR monitoreados =		104

4.3 ACTIVIDADES DE TERRENO: ETAPA I Y ETAPA II

Las actividades de terreno consideradas en el presente estudio fueron dos campañas de monitoreo para medir los parámetros *in situ* y tomar muestras para su análisis de laboratorio en 104 pozos APR en ambas campañas. Un listado detallado de los servicios APR y su ubicación se presentan en la Tabla 6-1 y Figura 6-1.

Las campañas se ejecutaron en las Etapas I y II del estudio en las fechas que se indican a continuación:

- i) Etapa I: Campaña 2015, entre los días 5 de Octubre y 4 de Noviembre.
- ii) Etapa II: Campaña 2016, entre los días 22 de Febrero y 15 de Marzo.

El equipo de terreno para el muestreo y medición de parámetros *in situ* estuvo formado por:

- Daniela Villablanca, Dra. Hidrogeología, Jefe de Proyecto de SGA.
- Lidia Casarrubios, Hidrogeóloga, Especialista Recursos Hídricos y Medio Ambiente, de SGA.
- Francisco Cornejo, Geógrafo, Especialista Recursos Hídricos y Medio Ambiente, de SGA.
- Marcelo León, Jaime Cortes y Juan Muñoz, Técnicos de Laboratorio de SGS.

Para la ejecución de los servicios solicitados, la DGA Región Metropolitana de Santiago informó mediante oficio, a cada representante o encargado del APR, acerca de la ejecución del estudio, sus objetivos e individualización de la empresa adjudicataria.

Se destaca que previo a las actividades de terreno se realizaron las siguientes actividades de gabinete para la preparación y buena organización de las campañas:

- Con el listado de los Pozos APR y sus antecedentes, se contactó telefónicamente o vía email a los encargados de los APR, a fin de confirmar el inicio del presente estudio, dar a conocer la realización de dos campañas: una en Octubre de 2015 y otra en Febrero-Marzo de 2016 y coordinar la disponibilidad (fecha, hora) de toma de muestra de cada campaña.
- Durante el periodo de contacto con los encargados de los APR, se consultó por el estado de cada pozo a fin de constatar la operación del mismo y la factibilidad de la toma de muestra. En el caso de múltiples pozos se seleccionó el más idóneo, de preferencia el más somero, siendo comunicado a la Inspección Fiscal. Además, se confirmó la recepción del Oficio de notificación, elaborado por la DGA Región Metropolitana de Santiago.
- Se coordinó con los encargados de los laboratorios SGS y de la DGA el pedido del conjunto de envases.
- Se prepararon las fichas de terreno, las que incluyeron el nombre del pozo, coordenadas, persona de contacto APR, nivel de agua en el pozo, características de la bomba, parámetros físico-químicos, además de fotos y un plano de ubicación.

4.4 APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD Y CLASIFICACIÓN DE POZOS

La calidad química de las aguas subterráneas puede considerarse óptima para un determinado uso, pero mala para otro. Asimismo, el origen de sus compuestos, perjudiciales o no para la salud o para un uso en particular, puede ser natural o antrópico. Así, definir la calidad de un agua, y que esta definición esté exenta de subjetividad y pueda ser comparable con la definición de calidad de otra agua, no es tarea fácil.

Es por ello que en general, la legislación ambiental chilena no contempla normativas de calidad para las aguas subterráneas sino solamente para determinados usos, como son el agua potable o el agua de riego. En efecto, las Normas Chilenas 409 y 1333, respectivamente, dictan las concentraciones máximas permitidas para cada elemento y compuesto en las aguas que se destinan a estos usos. Luego, la legislación ambiental considera como aguas contaminadas aquellas que, contrastadas con análisis previos del mismo lugar, han aumentado sus concentraciones químicas producto de una actividad antrópica (directa o indirectamente) como fuente de ese aumento.

No obstante lo anterior, una forma de definir la calidad de un agua es aplicando un Índice de Calidad, que corresponde a una fórmula matemática, basada en las concentraciones químicas de determinados parámetros en la muestra, que permite obtener un resultado único y simple que, trasladado a una categoría cualitativa de calidad de la muestra, puede ser comparado fácilmente con el resultado de otras muestras. Este valor o categoría, puede ir acompañado, o no, de una definición o explicación de esta calidad, por ejemplo indicando que tiene un origen antrópico o natural.

De esta manera, el presente estudio aplicó un Índice de Calidad para todas las muestras analizadas, basado en lo propuesto por la DGA en su informe S.I.T. N° 183 del 2009, llamado "Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos". En este estudio se clasifica la calidad química de tres acuíferos en el país (Aconcagua, Los Choros y El Loa) en base a las concentraciones de número de parámetros presentes en las aguas subterráneas. A partir de estas concentraciones se calcula un índice principal único (Índice de Calidad), con categorías cualitativas (Excepcional, Buena, Regular, Insuficiente e Intratable) y que es representable espacialmente mediante un mapa.

Esta metodología permite clasificar los pozos APR monitoreados según la calidad de sus aguas subterráneas, y obtener un diagnóstico de la calidad de las aguas en los diferentes sectores acuíferos de la Región. Estos resultados permiten objetivamente establecer aquellos sectores más críticos donde se recomendaría incorporar un número óptimo de pozos de monitoreo a la actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas de la DGA Región Metropolitana de Santiago.

4.5 DIAGNÓSTICO DE LA RED DGA DE MONITOREO ACTUAL Y NUEVA PROPUESTA

Los resultados de la aplicación del Índice de Calidad de cada pozo APR, y por lo tanto también del diagnóstico de calidad de los sectores acuífero estudiados de la Región Metropolitana, se contrastan con las actividades antrópicas presentes en el área, la Vulnerabilidad de acuífero y con la red de monitoreo actual de calidad de agua de la DGA. Esta comparación tiene como objetivo analizar la distribución de los puntos de control en base a las características y condiciones de los sistemas acuíferos de la Región y con ello, proponer los sectores donde es necesario aumentar el número de puntos de control existentes y/o agregar nuevos puntos de control para obtener una mejor representatividad del monitoreo de calidad de agua de los acuíferos en la Región.

5 ANTECEDENTES MEDIO FÍSICO REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

5.1 GEOMORFOLOGÍA

En la Región Metropolitana de Santiago se reconocen tres unidades morfoestructurales principales dispuestas en franjas orientadas Norte-Sur. De Oeste a Este son las siguientes: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal, ver Figura 5-1.

- La Cordillera de la Costa se sitúa entre el Océano Pacífico y la Depresión Central, en ella se encuentran cerros que sobrepasan los 2.000 m.s.n.m. Está formada principalmente por granitoides del Paleozoico Superior en su flanco occidental y por secuencias volcánicas y sedimentarias mesozoicas en la parte más oriental, como indica la información geológica disponible (Wall et al., 1999; Sellés y Gana, 2001; SERNAGEOMIN, 2003).
- La Depresión Central separa los dominios cordilleranos de la costa y andino, formando una amplia cuenca alargada en dirección Norte-Sur, cuyo relleno sedimentario de edad Plioceno-Holoceno alcanza hasta 800 metros de espesor (Wall et al., 1999). Del relleno no consolidado sobresalen "cerros isla" como los cerros Chena y Lonquén. Al Norte de la Región Metropolitana de Santiago, la Depresión Central desaparece, dando paso a una serie de cordones montañosos de baja altitud, separados por valles que conectan la Cordillera Principal con la Cordillera de la Costa. Al Sur del Río Maipo, la Depresión Central se estrecha hasta alcanzar un máximo en la localidad de Angostura. En el sector Sur de la Región Metropolitana de Santiago, esta queda dividida en las cuencas de Santiago, al Norte, y de Rancagua, al Sur.
- La Cordillera Principal está representada principalmente por la Formación Farellones y la Formación Abanico con presencia de intrusivos cenozoicos, como la granodiorita de La Obra, o intrusivos hipoabisales.
- Los materiales geológicos presentes en los citados dominios se desarrollaron durante los ciclos hercinico y Andino (Coira et al., 1982) en los que se produjeron alzamientos y desarrollo de cuencas sedimentarias. Las estructuras principales presentan orientación Norte-Sur con variaciones en el tipo de deformación, que corresponden principalmente a pliegues asimétricos y fallas inversas (Fock, 2005).

Figura 5-1. Unidades Morfoestructurales



Fuente: Modificado de Fock, 2005

5.2 GEOLOGÍA

Depósitos no consolidados

Los depósitos no consolidados son materiales terrígenos producto de la erosión, transporte y sedimentación de los materiales geológicos de la Cordillera de la Costa y la Cordillera Principal durante el Neógeno. Habitualmente, estos depósitos tienen una importancia hidrogeológica alta o muy alta debido a la gran capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea.

En la Cordillera de la Costa y la Cordillera Principal se desarrollan principalmente depósitos coluviales, de pie de monte en las laderas y depósitos fluviales en el fondo de los valles, muchas veces acompañados de depósitos fluviales más antiguos que forman terrazas.

En la Depresión Central se encuentran depósitos aluviales de los ríos Maipo y Mapocho que cubren una gran extensión en la zona de Santiago y al Sur del mismo hasta el Sur de la localidad de Paine donde se produce el cambio a depósitos aluviales del Río Angostura. En los límites de la depresión se desarrollan abanicos aluviales y depósitos de remoción en masa.

Rocas estratificadas

En la Cordillera de la Costa se encuentran rocas estratificadas, sedimentarias y volcanosedimentarias de edades neógenas, cretácicas y jurásicas. Las rocas estratificadas están mejor representadas en la parte oriental de la Cordillera donde afloran materiales principalmente cretácicos en los que, por extensión, destacan la Formación Las Chilcas, La Formación Veta Negra y la Formación Lo Prado.

- La Formación Las Chilcas es una secuencia volcánica y sedimentaria continental principalmente, de aproximadamente 1800 metros de espesor. Se dispone en discordancia sobre la Formación Veta Negra y subyace en discordancia de erosión a la Formación Lo Valle (Wall et al., 1999). En la base de esta Formación se encuentran lavas andesíticas y dacíticas acompañadas de rocas piro y epiclásticas de la misma composición. La parte media de la Formación, con una potencia de hasta 800 metros, se caracteriza por depósitos volcánicos riolíticos y rocas epiclásticas de la misma composición. Las lavas del nivel superior de la Formación tienen tendencia calcoalcalina.
- La Formación Veta Negra se compone de una secuencia lávica, en parte subvolcánica y piroclástica, de composición intermedia a ácida, con escasas intercalaciones sedimentarias con un espesor estimado de 800 metros, principalmente al Sur del Maipo. Sobreyace concordantemente sobre la Formación Lo Prado y subyace en discordancia angular a la Formación Las Chilcas. Se compone de lavas porfídicas y afáníticas de composición andesítica y de intrusivos de la misma composición, tobas de ceniza de color rojizo. Los materiales sedimentarios están representados por areniscas rojas de grano grueso y escasos lentes calcáreos.
- La Formación Lo Prado es una secuencia volcánica con intercalaciones sedimentarias marinas, con una potencia aproximada de 1500 metros subyace concordante con la Formación Veta Negra y sobreyace con la Formación Horqueta (Jurásico superior) de forma también concordante. Está formada por tobas de lapilli dacítico y andesíticos intercalados con lavas de la misma composición. Las intercalaciones sedimentarias se encuentran a techo de la unidad y se componen de calizas bioclásticas y areniscas calcáreas fosilíferas, lutitas, arenitas feldespáticas y conglomerados pudiendo alcanzar hasta 400 metros.

En la Cordillera de la Costa se reconocen otras unidades de rocas estratificadas de edad cretácica y jurásica, pero de menor representación a escala regional. También se encuentran rocas estratificadas más recientes como las rocas sedimentarias neógenas de la Estratos de Potrero Alto, con secuencias principalmente aluviales, o la Formación

Navidad, con sedimentos marinos. Estas, junto con las lavas basálticas de Patagua, afloran únicamente en la zona más occidental de la Región Metropolitana de Santiago. En algunos valles de la Cordillera de la Costa se encuentran sedimentos no consolidados que conforman acuíferos cubiertos por los depósitos de las Ignimbritas de Pudahuel que se componen de depósitos piroclásticos de flujos de cenizas y lapilli.

En la Depresión Central se encuentran rocas estratificadas que aparecen en "cerros isla" como el cerro de Chena donde aflora la Formación Las Chilcas, al Sur de Quilicura afloran la Formación Lo Valle y la Formación Abanico. Los estratos del Cordón Los Ratones aparecen en el Cordón homónimo al Sur del Río Maipo, que es una secuencia informal compuesta por secuencias volcánicas y subvolcánicas con intercalaciones de sedimentos continentales, tiene un espesor aproximado de 450 metros. Subyace en discordancia con la Formación Abanico. También se encuentran los depósitos de las Ignimbritas de Pudahuel cubriendo sedimentos no consolidados.

La Cordillera Principal, en la zona de la Región Metropolitana de Santiago estudiada, está representada principalmente por la Formación Farellones y la Formación Abanico.

- La Formación clásicamente conocida como Farellones (Mioceno-Plioceno) estaría constituida por dos unidades separadas por una discordancia, siendo la inferior la Formación Farellones y la superior la Formación Colorado-La Parva. La Formación Farellones es una secuencia volcánica y volcanosedimentaria de 2500 metros de potencia aproximadamente. En la base de la unidad se presentan ignimbritas en bancos de 5 metros hasta alcanzar una potencia promedio de 120 metros. Predominan lavas andesitas basálticas con intercalaciones menores de tufitas y areniscas en estratos menores a 2 metros. Esta unidad sobreyace discordante con la Formación Abanico.
- La Formación Abanico está constituida por lavas, básicas e intermedias, y rocas piroclásticas ácidas con intercalaciones de sedimentos continentales que forman lentes que alcanzan hasta 500 metros de espesor. Aflora en dos franjas Norte Sur separado por la Formación Farellones. Se distinguen dos niveles, el nivel inferior de 1000 metros de espesor se compone de lavas basálticas y andesiticobasálticas con presencia de Dacitas e intercalación de brechas autoclásticas y tobas brechosas. El nivel superior se compone de un conjunto de brechas volcánicas y rocas sedimentarias interestratificadas cuyo espesor puede alcanzar los 1200 metros. De acuerdo a diversas dataciones radiométricas y estudios de fauna fósil se le asigna una edad Eoceno Superior – Mioceno Inferior (Fock 2005, Sellés y Gana, 2001).

Rocas intrusivas

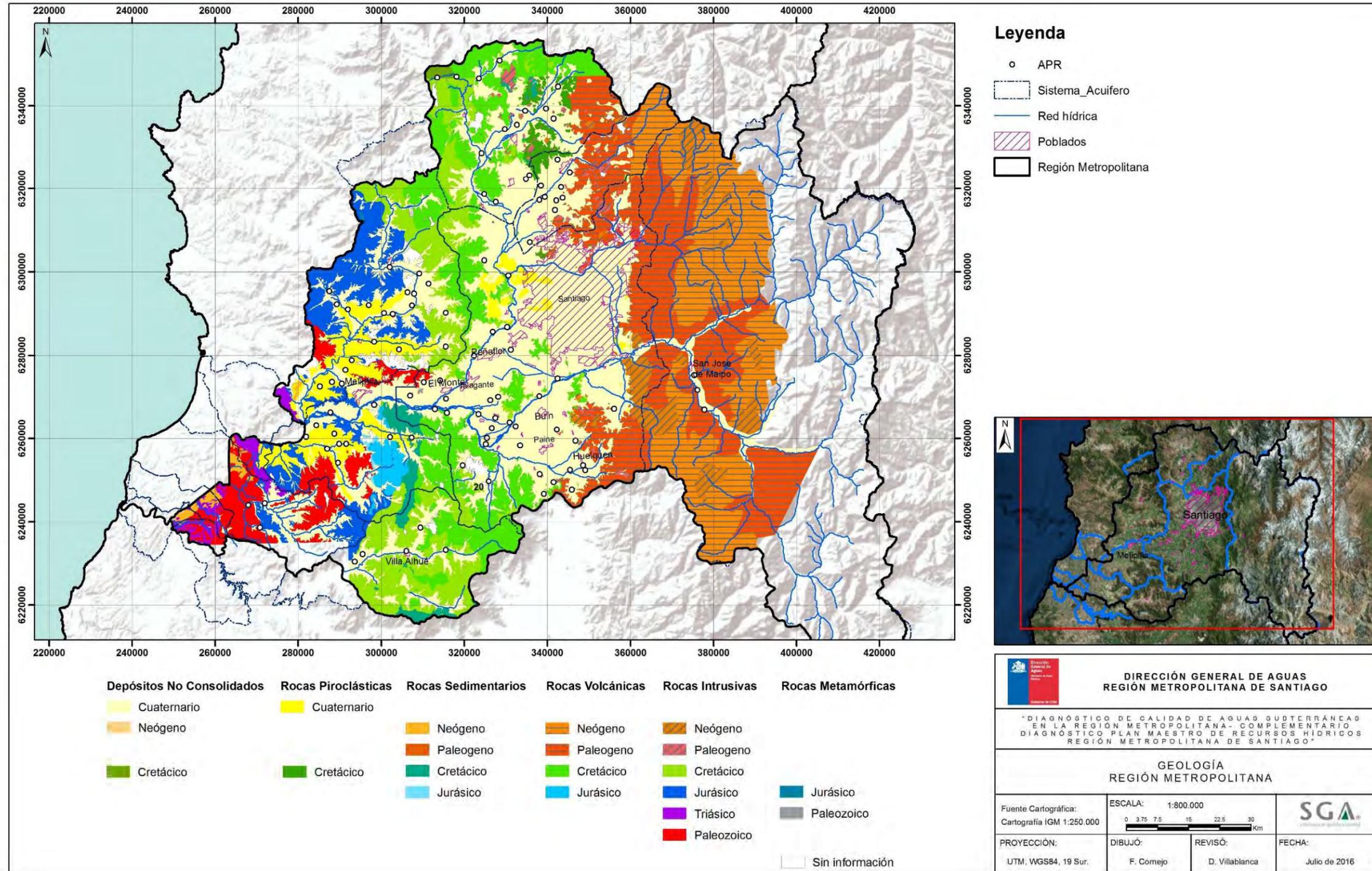
Generalmente, las rocas intrusivas en la Región se disponen en bandas Norte-Sur con edades más antiguas al Oeste y que van disminuyendo su edad hacia el Este.

- Intrusivos Paleozoicos: en la Cordillera de la Costa en la zona central de la Región se localizan intrusivos de Tonalita y granodioritas. También hay afloramientos de poca extensión de granitos porfídicos (Wall et al., 1996).

- Intrusivos Jurásicos: se componen de diferentes unidades que se localizan al Este en la Cordillera de la Costa, con mayor desarrollo al norte del área de estudio. Las rocas presenta una composición muy variada, encontrándose tonalitas, monzogranitos, leucotonalitas y leucogranodioritas, monzodiritas, gabros y granitos (Gana et al., 1966).
- Intrusivos Cretácicos: corresponden a diferentes unidades ubicadas, en su mayoría, en la Cordillera de la Costa. Estos presentan una gran variación en cuanto a su composición, entre estos gabros, granodioritas y pórfidos andesíticos.
- 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): Intruyen a la Formación Abanico, los Estratos del Cordón Los Ratones y la Formación Las Chilcas en la localidad de Angostura (Thiele, 1980).
- Intrusivos hipabisales dacíticos (Paleoceno-Eoceno): Intrusivos 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 y Gana, 2001).
- Granodiorita La Obra (Mioceno Inferior): es un intrusivo granodiorítico a amonzogranítico. Se localiza en la Cordillera Principal, al Sur-Oeste de la región intruyendo a la Formación Abanico y Formación Farellones (Sellés y Gana, 2001).

A continuación, se incluye en la Figura 5-2 el mapa geológico de la Región Metropolitana de Santiago en el que se muestran las unidades anteriormente descritas y la ubicación de los 104 pozos APR en estudio.

Figura 5-2. Mapa Geológico Regional



Fuente: Modificado de Sernageomin, 2003

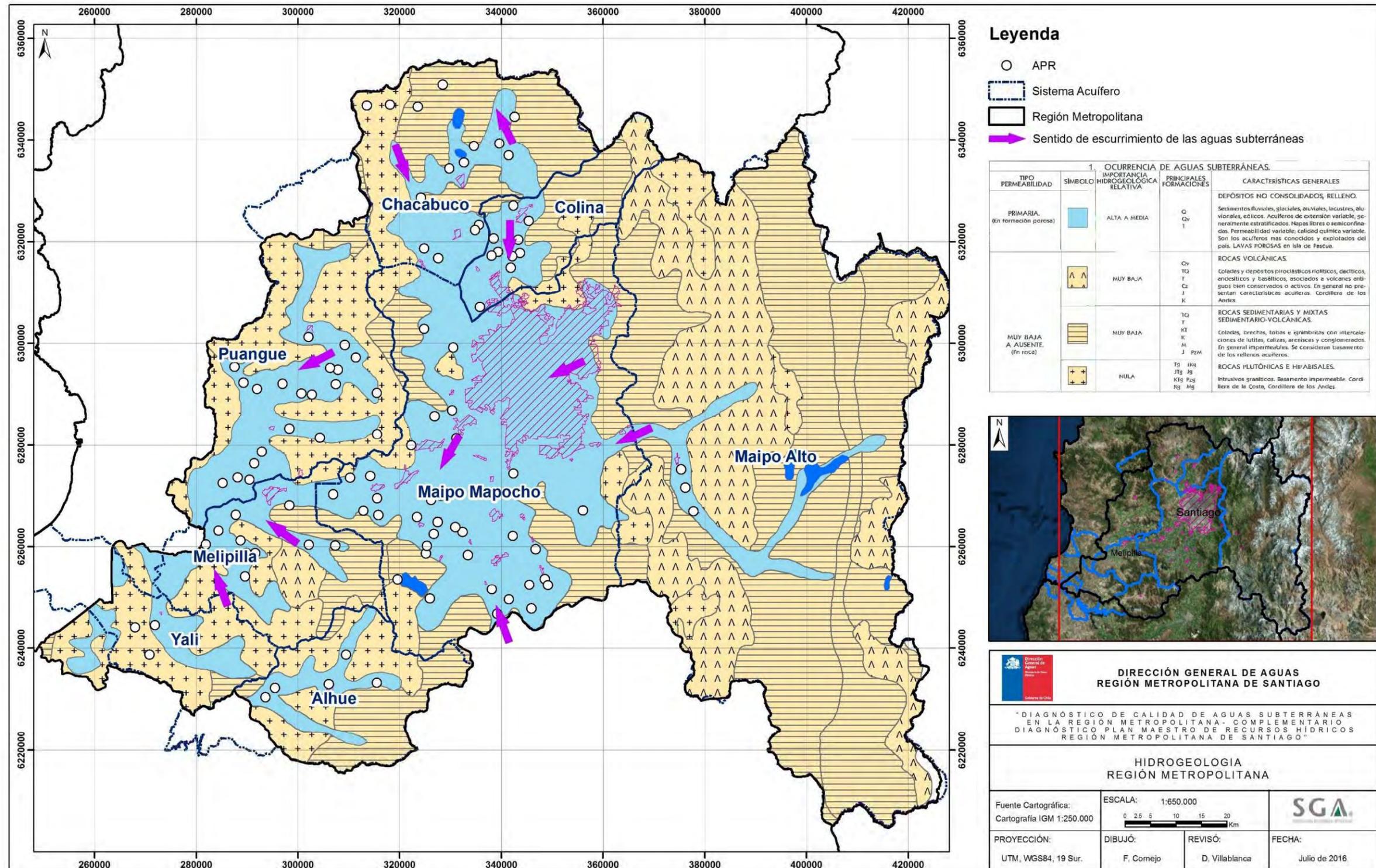
5.3 HIDROGEOLOGÍA

5.3.1 Hidrogeología regional

En un contexto regional, la hidrogeología de la Región Metropolitana de Santiago es descrita de acuerdo a las principales unidades geológicas que se identifican en un sector, sus propiedades hidráulicas, y comportamiento de las aguas subterráneas. En la Figura 5-3 se presenta un mapa hidrogeológico regional con esta información, basado en un estudio de la DGA (1986). Desde Este a Oeste, se puede mencionar lo siguiente:

- En la Cordillera de la Costa, la mayor parte de los materiales que afloran corresponden a rocas intrusivas de edades comprendidas entre el Paleozoico y Cretácico, con potencial hidrogeológico de bajo a nulo. Las unidades geológicas de potencial hidrogeológico alto o muy alto corresponden a depósitos no consolidados localizados en los valles. Las secuencias volcano-sedimentarias con intercalaciones de sedimentos continentales y marinos pueden presentar un potencial hidrogeológico de bajo a medio.
- En la Depresión Central, los materiales geológicos que presentan una mayor extensión son depósitos no consolidados provenientes del Río Maipo y Mapocho con un potencial hidrogeológico alto a muy alto. De estos depósitos emergen "cerros isla" de materiales intrusivos y volcano sedimentario con muy escasa extensión y potencial hidrogeológico medio a nulo. La profundidad del basamento, según estudios gravimétricos (Yáñez *et al.*, 2015) supera los 150 metros de profundidad, la cual aumenta gradualmente hacia el Sur, hasta alcanzar unos 640 metros en los sectores de Paine y Peñaflores. Una porción importante en la Depresión Central es la cuenca de Santiago. Morales (2002) diferenció tres unidades en el relleno sedimentario: una unidad inferior, donde predominan materiales finos y compactos, una unidad intermedia, compuesta por sedimentos de grano grueso que considera el principal acuífero de la región y, una superior que describe materiales volcano-sedimentarios.
- En la Cordillera Principal, los materiales que afloran mayoritariamente en la zona de estudio corresponden a secuencias volcano-sedimentaria asignados al Mioceno, con intercalación de sedimentos continentales, que se consideran de potencial hidrogeológico medio a bajo. En contraste, los materiales con potencial hidrogeológico alto o muy alto corresponden a depósitos no consolidados localizados en los fondos de los valles.

Figura 5-3. Mapa Hidrogeológico Regional



Fuente Modificado de DGA, 1986, de escala 1:1.000.000

5.3.2 Descripción hidrogeológica por sector acuífero

En esta sección se recopilaron y revisaron antecedentes de los sectores acuíferos presentes en la Región Metropolitana de Santiago, con el fin de conocer su funcionamiento hidrogeológico y los parámetros característicos relevantes para el estudio. En algunos párrafos y figuras se citan los pozos muestreados en el marco de este estudio, los cuales son descritos en el Capítulo 6 sección 6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS Y POZOS DE MONITOREO.

La información hidrogeológica que se incluye en esta sección, corresponde principalmente a la clasificación realizada por la DGA, en su Informe de Zonificación de Sectores Acuíferos (S.D.T. Nº 133, 2002).

En la Región Metropolitana de Santiago se identifican 3 cuencas hidrológicas, siendo la Cuenca del Río Maipo la que abarca la mayor superficie en la Región. Al Sur de la Región Metropolitana de Santiago se encuentra un sector acuífero que hidrológicamente pertenece a la cuenca del Río Rapel, el cual discurre en el resto de su trazado por la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y al Suroeste un acuífero que hidrológicamente se corresponde con el estero Yali, cuenca litoral entre las cuencas de los ríos Maipo y Rapel.

La red de drenaje superficial de la Cuenca del Río Maipo cuenta con una red hidrográfica de afluentes compuesta por los ríos Volcán, Yeso y Colorado en la parte alta, y en la parte media como afluente principal, el Río Mapocho. En la zona media baja se pueden mencionar los afluentes Río Angostura, Esteros Lampa, Puangue y Colina.

En la Tabla 5-1 se presentan las principales cuencas denominadas Sistemas y sus respectivos sectores acuíferos. A continuación, se describen cada uno de estos sistemas acuíferos desde un punto de vista hidrogeológico.

Sistema Chacabuco

En este sistema se encuentran los sectores de Til Til, Polpaico-Chacabuco y Lampa, en los cuales se definieron las siguientes unidades hidrogeológicas generales de más profunda a más superficial:

Unidad Lampa 1: La unidad se detecta en la base de la secuencia por encima de la roca basal, a profundidades de muro que pueden superar los 80 metros o incluso los 170 metros según algunos sondeos realizados, en los que no se detectó la roca basal.

La litología de esta unidad corresponde a sedimentos de granulometría fina con presencia de una fracción clástica mayor escasa formada por arenas, con gravas ocasionales y una abundante matriz de arcillas y limos. Estos sedimentos se constataron a lo largo del valle tanto longitudinal como transversalmente, por lo que su continuidad se estimó como total. La permeabilidad media estimada para esta unidad en función de sus características granulométricas fue de 0,09 m/día.

Unidad Lampa 2: Por encima de la unidad descrita anteriormente se reconoce una unidad con total continuidad a lo largo del eje longitudinal del valle, mostrando potencias

entre 30 metros y 65 metros en las cabeceras y unos 3 km aguas abajo de la confluencia de los esteros Chacabuco y Quilapilún. En algunos tramos, como el mencionado, esta unidad aflora en superficie. La Unidad 2 se presenta intercalada con la Unidad 3, donde los valles del Estero Peldehue y Quilapilún tributan al valle del Estero Chacabuco. Está constituida por sedimentos gruesos que afloran en superficie, y mantienen un espesor de 40 metros aguas abajo de la zona de tributación del estero Quilapilún al estero Chacabuco. En el sector de Polpaico se observa una reducción del espesor de la unidad, con un aumento hacia el valle de Til Til. El mayor espesor detectado para esta unidad ha sido de hasta 100 metros.

Tabla 5-1. Principales sistemas y sectores acuíferos en la Región Metropolitana de Santiago

Sistemas Cuenca Río Maipo	Sector acuífero
Sistema Chacabuco	Til Til
	Polpaico - Chacabuco
Colina	Lampa
	Colina Inferior
	Colina Sur
	Santiago Norte
	Chicureo
	Colina Superior
Maipo Mapocho	Las Gualtatas
	Lo Barnechea
	Vitacura
	Santiago Central
	Santiago Sur
Puangue	Puangue Alto
	Puangue Medio
	Puangue Bajo
	Estero La Higuera
Melipilla	Melipilla
	Estero Cholqui
	Estero Popeta
	Ulmén
Sistemas Cuenca Río Rapel	Sector acuífero
Sistema Alhué	Estero Alhué
Sistemas Cuenca Río Yali	Sector acuífero
Sistema Yali	Estero Loica
	San Pedro
	Yali bajo El Prado

Fuente: Elaboración propia en base a clasificación DGA

La unidad presenta un conjunto de sedimentos permeables de granulometría formada por una fracción clástica mayor de ripios, gravas y arenas gruesas en una matriz de arena media a fina con escasos limos y arcillas.

Esta unidad forma un acuífero de buenas propiedades hidráulicas con una permeabilidad media entre 0,9 m/día y 8,6 m/día.

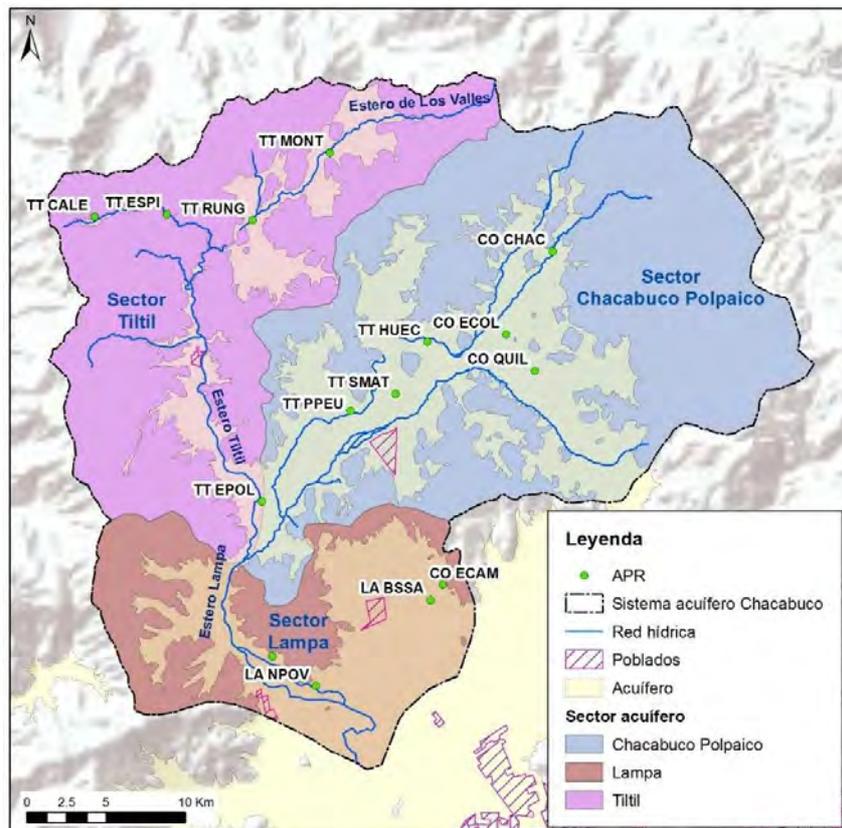
Unidad Lampa 3: Esta unidad se dispone hacia el techo de la secuencia sedimentaria presentando alta continuidad lateral a lo largo del valle, a excepción de las zonas de cabecera, en las que la unidad es discontinua. Estos rellenos alcanzan una potencia máxima de 40 metros. En el extremo distal del valle estos sedimentos se intercalan con los detritos de la Unidad 2.

Litológicamente corresponde a sedimentos finos, con una fracción de arenas medias a finas escasas y una abundante matriz arcillosa.

De acuerdo a las características granulométricas de los sedimentos descritos la permeabilidad estimada fue de aproximadamente 0,09 m/día, lo que la clasifica como una unidad de bajo potencial hidrogeológico.

Los sectores acuíferos descritos en el sistema Chacabuco se muestran en la siguiente Figura 5-4.

Figura 5-4. Sistema Chacabuco



Fuente: Elaboración propia

El sector acuífero Til Til es el más septentrional de la Región Metropolitana de Santiago, con una superficie aproximada de 429 km². En este acuífero se monitorearon los APR Espinalillo, Caleu, Montenegro, Rungue y Estación Polpaico, los primeros ubicados en la parte alta de la cuenca y el último en la zona baja, a la salida de la cuenca hidrográfica.

En este sistema acuífero la unidad principal está asociada a depósitos coluviales, conos de deyección, depósitos fluviales actuales así como antiguos aterrizados.

También en el extremo Norte de la Región Metropolitana de Santiago se encuentra el acuífero Chacabuco-Polpaico, asociado a la cuenca del Estero Chacabuco, formado por la confluencia de los Esteros Chacabuco, Santa Margarita y Quilapilún en la zona de Angostura de Huechún.

Entre las localidades de Polpaico y Quilapilún, la zona constituye una superficie subhorizontal elevada por sobre el llano de la ciudad de Santiago mientras en la cabecera de la cuenca las unidades acuíferas principales están asociadas a depósitos coluviales y conos de deyección. En la zona media aparecen los depósitos del abanico aluvial del Estero Chacabuco, formados por arenas y arenas gravosas y en la parte baja depósitos lacustres formados por sedimentos finos como limo – arenoso – arcilloso, intercalados entre ellos. Cubriendo todo el sector se encuentran los depósitos fluviales actuales y antiguos aterrizados, formados por gravas arenosas y arenas. En este acuífero se monitorearon los APR Chacabuco, Quilapilún, Huechún de Til Til, Punta Peuco y Santa Matilde.

Inserto en el sistema Chacabuco se encuentra el acuífero Lampa, formado por la entrada de flujos tanto superficiales como subterráneos, procedentes de los sectores de Til Til y de Chacabuco-Polpaico. Estos flujos ingresan al llano principal donde convergen los recursos de la cuenca del Estero Lampa y del Estero Colina, por este motivo el llano principal se dividió en los sectores de Lampa y Colina Sur considerando las influencias de los esteros del mismo nombre.

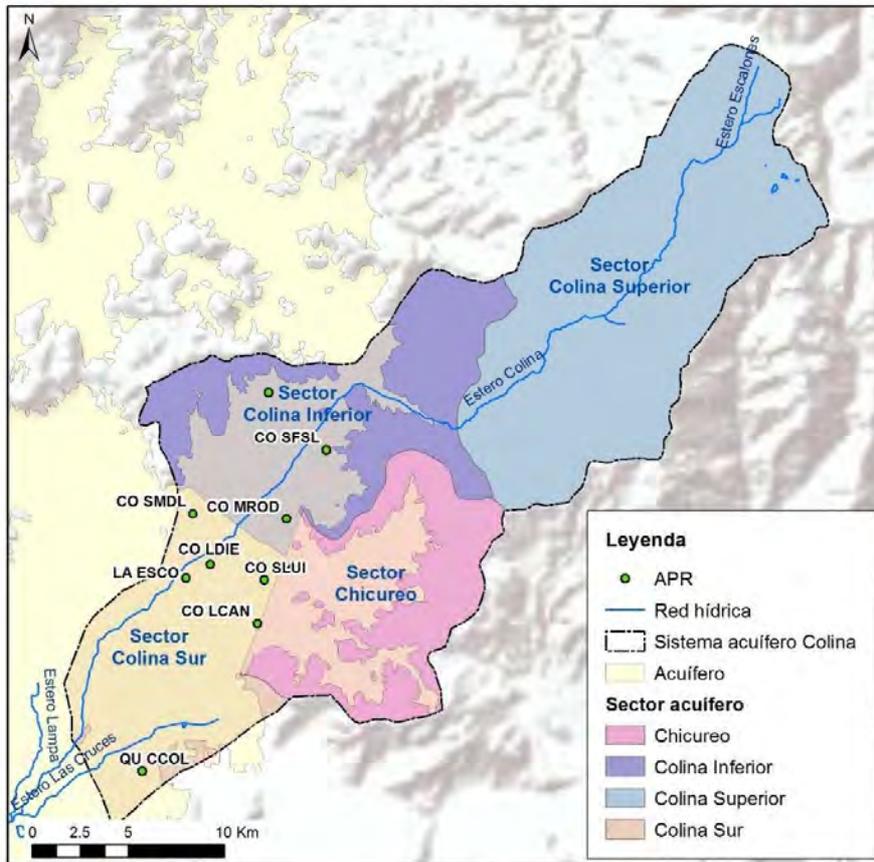
El acuífero se encuentra asociado principalmente a los depósitos del abanico aluvial del Río Colina en su zona baja, formados por sedimentos finos y también a depósitos fluviales actuales y antiguos aterrizados, formados de gravas arenosas y arenas.

En este acuífero se han analizado muestras procedentes de los APR Nuevo Porvenir, El Lucero y Batuco – Santa Sara.

Sistema Colina

Este sistema se encuentra dividido en los acuíferos Colina Inferior, Colina Sur, Santiago Norte, Chicureo y Colina Superior, que se aprecian en la Figura 5-5, y según los estudios previos, es posible definir las siguientes unidades hidrogeológicas generales, también descritas de más profunda a más superficial:

Figura 5-5. Sistema Colina



Fuente: Elaboración propia

Unidad Colina 1: A nivel de posición estratigráfica y características granulométricas esta unidad es equivalente a la Unidad Lampa 1.

Unidad Colina 2: Sobre la unidad anterior se encuentra la Unidad Colina 2, la cual es correlacionable con la Unidad Lampa 2 y la Unidad B del sistema Maipo – Mapocho, todavía no descrita.

Esta unidad muestra una buena continuidad en el sentido longitudinal del valle, a excepción del sector de tributación del valle del Estero Lampa en la Depresión Central, donde se detectan interestratificaciones de sedimentos finos.

La litología de la unidad está formada por una fracción mayor de arenas, gravas y ripios en una matriz de arena media a fina con escasas arcillas y limos. La potencia máxima detectada para esta unidad es de más de 100 metros en la vertiente norponiente del valle.

Tal como se asignó a la Unidad Lampa 2, este acuífero presenta buenas propiedades hidráulicas con permeabilidades de 10^{-4} a 10^{-5} m/s.

Unidad Colina 3: Los sedimentos que componen esta unidad se encuentran hacia el techo de la secuencia, es decir, sobreyaciendo a los depósitos de la Unidad Colina 2. La Unidad Colina 3 es correlacionable con la Unidad B del sistema Maipo – Mapocho.

Los rellenos de la unidad están formados por arenas medias a finas escasas y una matriz arcillosa abundante, con espesores máximos detectados de 70 metros.

En función de las características granulométricas de la unidad, la permeabilidad media estimada fue entre 10^{-6} y 10^{-7} m/s, lo que corresponde a una unidad de prácticamente nulo potencial hidrogeológico.

En el presente estudio no se monitoreó ningún APR en el acuífero Colina Superior, esto debido a que la demanda de agua subterránea en el sector es nula. Desde el punto de vista geológico en dicho sector no se ha establecido prácticamente presencia de depósitos sedimentarios, por lo que no se asocia la presencia de una fuente de agua subterránea en el sector.

Inmediatamente aguas abajo del anterior, se encuentra el sector acuífero Colina Inferior cuyo componente principal es el Estero Colina, que se desarrolla sobre depósitos fluviales actuales, formados por gravas arenosas. En este acuífero se monitorearon los APR Reina Norte, Santa Filomena San Luis y Manuel Rodríguez.

El acuífero Colina Sur ubicado aguas abajo del acuífero Colina Inferior, también recibe la influencia del Estero Colina.

La unidad acuífera principal corresponde principalmente a los depósitos aluviales del abanico del Estero Colina que, en su zona intermedia y distal, están formados por arenas y sedimentos finos respectivamente.

Los puntos de monitoreo en este sector corresponden a los pozos APR San Luis, Las Canteras, Los Diecisiete, Estación Colina y Colo Colo.

En la cabecera del sector Santiago Norte se encuentran depósitos coluviales y conos de deyección, si bien el acuífero principal corresponde al abanico aluvial del Estero Lampa, formado por arenas y arenas gravosas. Se destaca, no obstante, que en el sector existen depósitos de cenizas pumíticas, riolíticas de colores claros que se ubican principalmente en las zonas de Lo Aguirre y Lomas de Pudahuel.

Este acuífero mantiene conexión hidráulica superficial y subterránea con el resto de los sectores limítrofes, que al Norte es el sector de Lampa, por el Sur el sector de Santiago central y por el este con el sector de Colina Sur.

Por el Oeste el límite se establece por la divisoria de aguas que separa las cuencas del Estero Puangue y el Estero Colina.

En este acuífero tan solo dispone de un punto de monitoreo APR Noviciado – Peralito.

El único punto de monitoreo presente en el sector acuífero Chicureo (APR Hermanos Carrera), se encuentra muy próximo a los sectores ubicados al Oeste, Colina Inferior y Colina Sur.

El acuífero corresponde a depósitos de abanico aluvial, formado por arenas y arenas gravosas del Estero Ñipas. A diferencia del acuífero Santiago Norte, el de Chicureo no tiene conexión hidráulica con los sectores que lo limitan, a excepción del sector Colina Sur, que se encuentra al Oeste, hacia el que escurren los recursos hídricos tanto subterráneos como superficiales.

Sistema Maipo – Mapocho y Maipo Alto

En este sistema acuífero se identifican 5 sectores, Las Gualtatas, Lo Barnechea, Vitacura, Santiago Central y Santiago Sur, de los cuales únicamente se monitorearon los dos últimos. El sistema está formado por los valles de los ríos Maipo y Mapocho y el interfluvio entre ambos, ver Figura 5-6.

Sobre la base de las características granulométricas de la secuencia de rellenos se identificaron tres unidades hidrogeológicas, las cuales cubren una superficie de 2.065 km².

Unidad A: Esta unidad se encuentra en la base de la secuencia sobreyaciendo el basamento. Litológicamente se compone de granulometría fina, heterogénea en algunos lugares, pero siempre con elevadas proporciones de arcilla. La fracción clástica mayor está formada por arenas medias a finas en una matriz principalmente de arcillas. La presencia de estos sedimentos se asocia a corrientes de barro y aportes laterales provenientes de los altos topográficos.

Debido a las características litológicas de los sedimentos de esta unidad la permeabilidad estimada fue entre 10^{-4} y 10^{-6} m/s, lo que la clasifica como una unidad prácticamente impermeable.

Unidad B: Formada por sedimentos de granulometría gruesa y media, con una fracción clástica mayor de gravas, arenas gruesas y ripios subordinados, en matriz de arena media a fina con escasas proporciones de limos y arcillas. Se encuentra sobre la Unidad A presentando buena continuidad a lo largo de todo el sector, aunque con algunas variaciones de sus fracciones gruesas, lo que no afecta a su buena permeabilidad.

La permeabilidad asignada a esta unidad varía entre 10^{-2} y 10^{-4} m/s, lo que la convierte en la unidad acuífera relevante de la zona.

Unidad C: En general se presenta de forma discontinua en la zona originado por aportes heterogéneos provenientes de los flancos de los valles y altos topográficos. La unidad está formada por una fracción clástica de granulometría mayor de arenas gruesas a medias con gravas ocasionales en una matriz de arenas finas con alto contenido de arcilla. Por la elevada presencia de finos y discontinuidad estratigráfica la unidad tiene baja o nula potencialidad de formar acuíferos, con una permeabilidad estimada entre 10^{-3} y 10^{-5} m/s.

En primer lugar, se describe el sector acuífero de Santiago Central, asociado a la cuenca hidrográfica del Río Mapocho, cuyos depósitos de abanico fluvial forman la unidad acuífera principal del sector, compuesta por gravas arenosas y arenas.

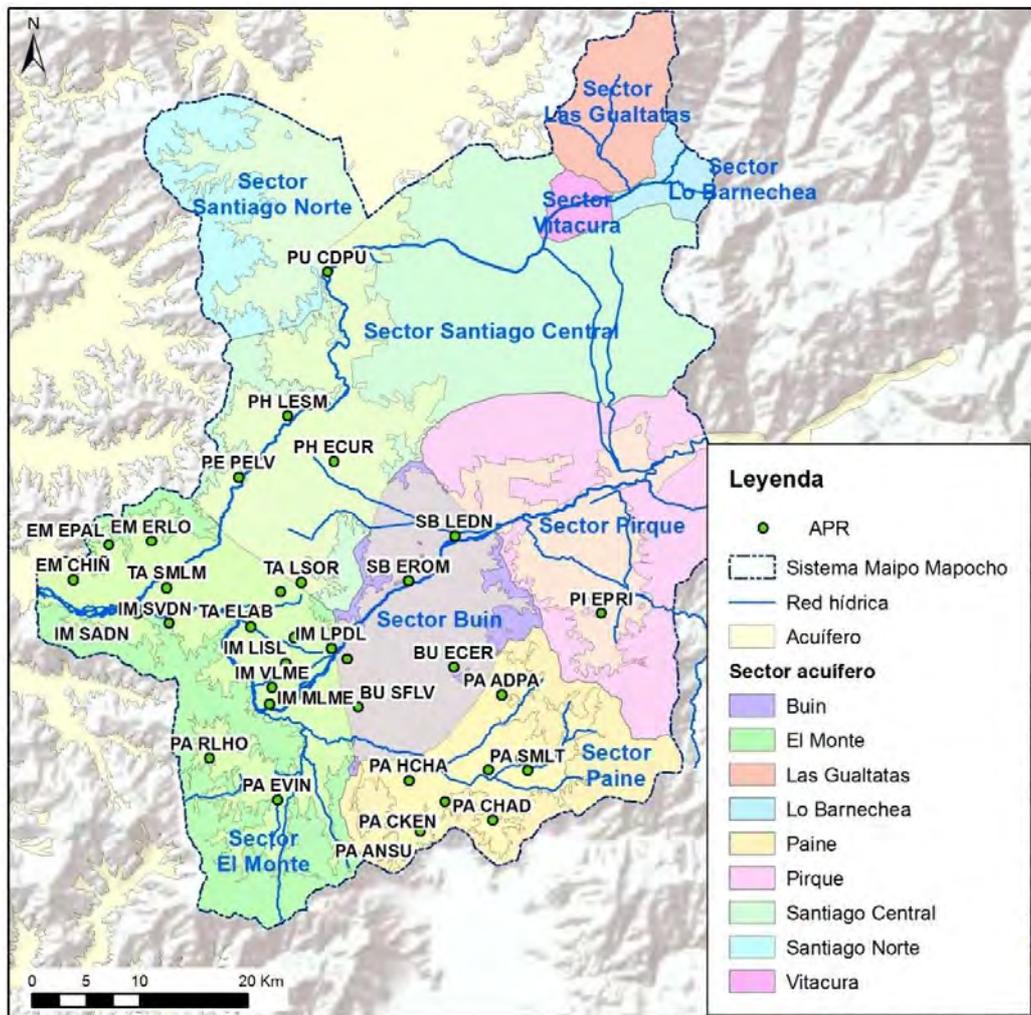
En este sector, igual que en el sector Santiago Norte, existe presencia de depósitos de cenizas pumíticas y riolíticas de colores claros.

Este sector mantiene conexión hidráulica con todos los limítrofes a excepción de Chicureo. El límite Oeste queda definido por la divisoria de aguas que separa las cuencas del Estero Puangue y el Río Mapocho.

Desde el sector Mapocho Alto surge el Río Mapocho, que en la zona de Pudahuel confluye con el Estero Lampa, procedente del sector Santiago Norte y finalmente abandona el sector en la zona de Talagante, poco antes de su confluencia con el Río Maipo.

En este acuífero se dispone del monitoreo de los pozos APR Casas de Pudahuel, El Trebal, El Curato, La Esperanza – Santa Mónica y Pelvin.

Figura 5-6. Sistema Maipo-Mapocho



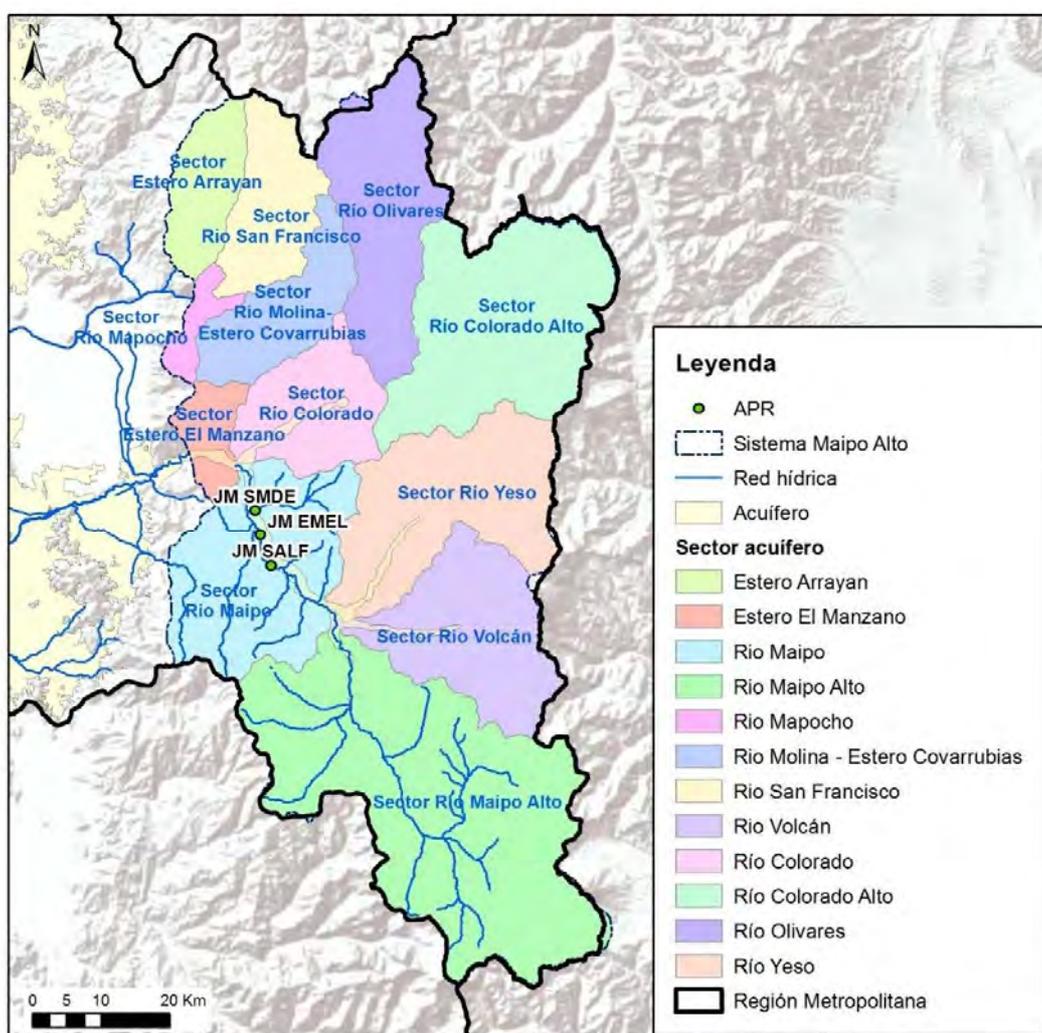
Fuente: Elaboración propia

El sector de Santiago Sur se divide en otros 4 subsectores acuíferos, Pirque, Buin, Paine y El Monte asociados fundamentalmente a la cuenca hidrográfica del Río Maipo.

La unidad acuífero principal del sector corresponde a los depósitos de los abanicos aluviales del Maipo, Río Angostura, Estero Abrantes y Estero El Escorial además de depósitos coluviales y conos de deyección.

El límite Este del sector Santiago Sur se establece por la divisoria de aguas que separa el llano principal de pequeñas subcuencas ubicadas en la precordillera en la zona de San Juan de Pirque. El límite Sur lo define la cuenca del Río Maipo con la cuenca del Río Angostura, en la zona de Angostura de Paine y el límite Este se establece por el cierre de la cuenca hidrográfica del Maipo en la Zona de Pomaire. Existe conexión hidráulica al Norte, con el sector de Santiago Central.

Figura 5-7. Sistema Maipo Alto



Fuente: Elaboración propia

Sistema Puangue

Ubicado en la cuenca del Estero Puangue, corresponde a uno de los dos sistemas del acuífero Puangue – Melipilla, y comprende una extensión de 1.540 km². A través de toda la cuenca, cubriendo una superficie de 640 km², se presentan tres unidades hidrogeológicas que son las que se describen a continuación:

Unidad Puangue 1: Esta unidad sobreyace el basamento de la zona y está formada por sedimentos finos, con una fracción clástica mayor escasa, compuesta por arenas y alguna grava, en una matriz principalmente de arcillas.

En el sector alto de la cuenca la roca basal se detectó a profundidades entre 45 metros y 65 metros, mientras en la zona baja la profundidad del basamento se detecta a unos 60 metros. En el resto del valle se desconoce con detalle la profundidad de la roca basal. La unidad descrita tiene correlación y continuidad con la Unidad A definida en el valle del Río Maipo, al Noroeste de Melipilla. La cota del basamento en las proximidades de María Pinto no se conoce con exactitud, tal como se indicó anteriormente, pero se estima a una profundidad media de 180 metros, mientras que desde la localidad de Los Rulos hacia aguas arriba se estima a 150 metros de profundidad y desde Los Rulos hacia aguas abajo a unos 200 metros.

De acuerdo a las características granulométricas de esta unidad se estimó una permeabilidad media de 10⁻⁶ m/s.

Unidad Puangue 2: Sobreyace a la Unidad Puangue 1 y está formada por un nivel permeable de gravas y arenas gruesas con bolones y ripios subordinados en una matriz de arenas medias con escasos finos.

La continuidad de la unidad es buena entre el sector alto del valle hasta la confluencia del Estero Améstica con el Estero Puangue, donde la unidad se acuña contra sedimentos finos aportados por el Estero Améstica. En este mismo sector se detectó un estrato lenticular, que se proyecta hacia la quebrada del estero Améstica intercalado entre los depósitos de la Unidad Puangue 3. A la altura de la confluencia del Estero Pajonal con el Estero Puangue se distingue nuevamente el nivel permeable de la Unidad Puangue 2, que presenta tendencia a aumentar su espesor aguas abajo. El espesor medio asignado a esta unidad es de 25 metros a 30 metros, con el mayor espesor aguas abajo de Curacaví, donde alcanzaría 45 metros.

De acuerdo a sus características granulométricas esta unidad acuífera presenta una permeabilidad entre 10⁻⁴ a 10⁻⁵ m/s. Esta Unidad también se correlaciona y tiene conexión con la Unidad B, que se definió en la cuenca del Río Maipo, en el sector del paleovalle donde el Estero Puangue confluía con el Río Maipo.

Unidad Puangue 3: En el sector alto de la cuenca sobreyace los sedimentos de la Unidad 2, mientras que en el sector de confluencia con la quebrada Améstica sobreyace directamente sobre los depósitos de la Unidad Puangue 1.

La Unidad 3 corresponde a un depósito constituido por arenas finas con abundantes arcillas y limos, dispuestos hacia el techo de la secuencia sedimentaria. A los sedimentos se les atribuye un origen mixto proveniente de las vertientes del valle principal y sus tributarios por una parte y a los sedimentos distales de tributarios por otra.

En los sondajes realizados, el mayor espesor se detectó en la zona de confluencia del Estero Améstica, con una potencia de 50 metros aproximadamente, desde donde se presenta una disminución gradual hacia aguas arriba, hasta tener una expresión discontinua en el sector alto de la cuenca. Hacia la zona distal del valle la tendencia a la disminución del espesor es más evidente con una potencia que no supera los 5 metros, hasta desaparecer en la zona de tributación del Puangue al antiguo valle del Río Maipo.

De acuerdo a las características granulométricas, la permeabilidad media estimada es 10^{-6} a 10^{-7} m/s, lo que le confiere a la unidad un escaso potencial hidrogeológico.

El Sistema Puangue, cuyas unidades acuíferas se han descrito anteriormente, se divide en los 4 sectores que se presentan en la Figura 5-8. Uno de los 4 acuíferos que se distinguen en este sistema es el de Puangue Alto, que se asocia con los depósitos sedimentarios de la parte alta de la cuenca, como los depósitos fluviales actuales y antiguos aterrazados, además de depósitos coluviales y conos de deyección.

Los límites de la cuenca son los que definen los límites del sector acuífero, que recibe los aportes superficiales de la cabecera de la cuenca y descarga tanto los recursos superficiales como los subterráneos al sector de Puangue Medio.

Se trata de un acuífero somero que, en algunas zonas como Maria Pinto, se caracteriza por la presencia de pozos surgentes. Para el presente estudio el único pozo APR que se monitoreó en el sector fue el APR Las Rosas, en el cual se informó un nivel estático de poco más de 3 metros de profundidad, lo que corresponde a un nivel somero.

En la mayoría de pozos del Puangue Alto se detecta la presencia de un acuífero de importancia en los primeros 20 metros de profundidad, formado por sedimentos de espesor variable como bolones, grava y arenas de variada granulometría haciendo posible la presencia de zonas de acuífero libre y otras semiconfinadas.

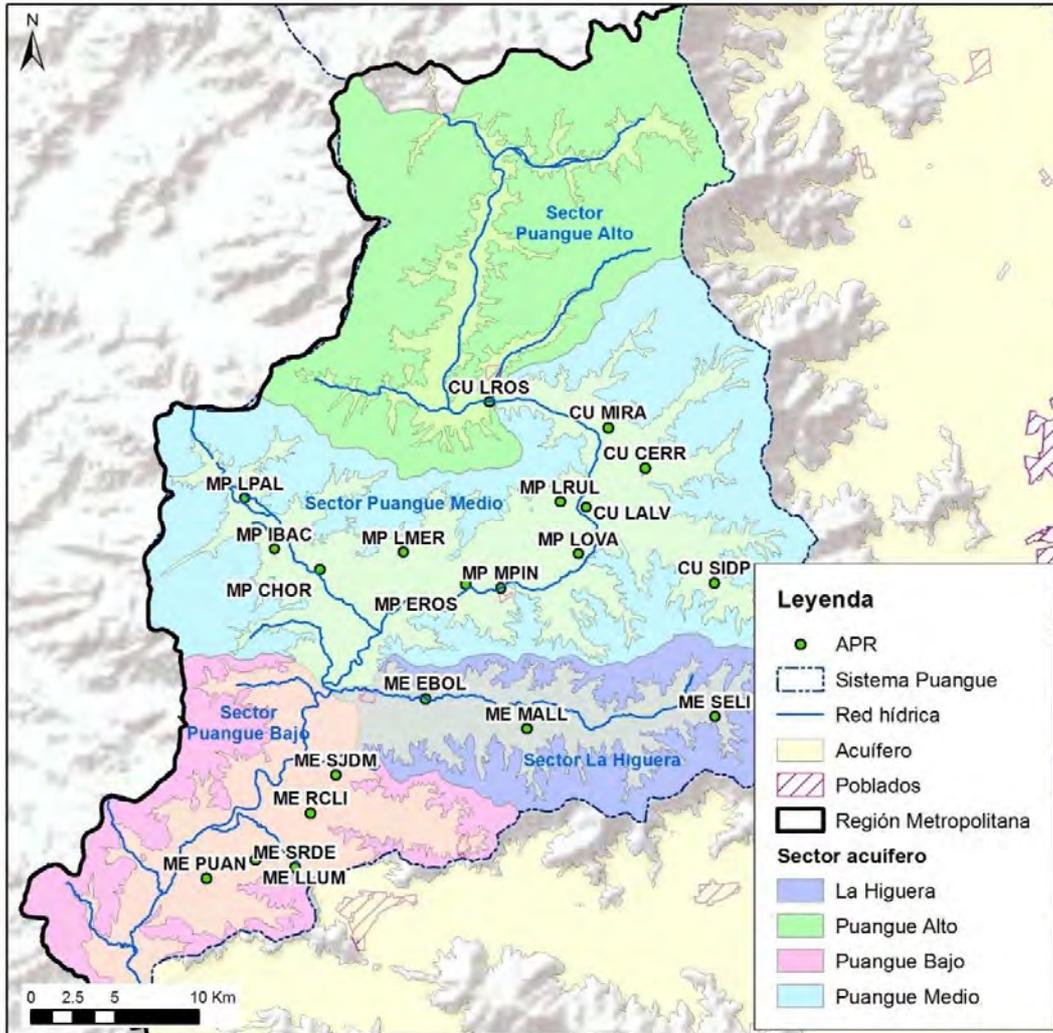
Aguas abajo del sector anterior se encuentra el acuífero de Puangue Medio, ubicado en el llano donde el valle alcanza su mayor amplitud, cercana a los 4 km. Los límites del sector también se encuentran definidos por los límites de la cuenca hidrográfica. Los aportes del Estero Améstica y los provenientes de la cuenca del Mapocho a través del Canal Las Mercedes son los de más relevancia desde el punto de vista hidrogeológico.

El acuífero está asociado a depósitos fluviales actuales y antiguos aterrazados, formados por gravas arenosas y arenas, depósitos coluviales y conos de deyección. En menor proporción se distingue la presencia de depósitos fluviales subactuales formados por gravas arenosas y arenas y depósitos lacustres formados por sedimentos finos limos – arenosos – arcillosos. Los depósitos sedimentarios se encuentran cubiertos por cenizas de origen volcánico correspondientes a depósitos de cenizas pumíticas ignimbríticas.

El relleno sedimentario en esta zona es superior a 90 metros y es posible distinguir dos acuíferos. Un primer acuífero superficial que alcanza una profundidad de unos 40 metros aproximadamente y un segundo acuífero que subyace al anterior. Estas intercalaciones de materiales semipermeables e impermeables originan sectores del acuífero de naturaleza confinada.

El sector de Puangue Bajo marca su límite inferior antes de la confluencia con el Maipo. La conexión hidrogeológica con los sectores aguas arriba y con el sector de Melipilla es estrecha, donde además existe un importante flujo subterráneo que ingresa por la localidad de Melipilla.

Figura 5-8. Sistema Puangue



Fuente: Elaboración propia

La unidad acuífera principal, formada por depósitos sedimentarios, se encuentra cubierta por cenizas pumíticas ignimbríticas, formadas de cenizas riolíticas de colores claros con piedras pómez y fragmentos líticos aislados.

Los depósitos sedimentarios del sector corresponden a depósitos fluviales actuales y antiguos aterrazados, formados por gravas arenosas y arenas, así como depósitos coluviales y conos de deyección. En la parte central del valle el relleno supera los 80 metros, y hacia la cabecera el basamento se detecta a poco más de 40 metros.

Los niveles en el sector de Puangue Bajo también son someros, sobre todo en el sector antes de la confluencia debido a la estrechez en esa zona.

Dentro del sistema Puangue, se encuentra el acuífero vinculado al Estero La Higuera, que corresponde a una pequeña cuenca aportante a la del Puangue entre los sectores Medio y Bajo.

La unidad acuífera está formada por depósitos sedimentarios, fluviales antiguos aterrazadas, formadas por gravas arenosas y arenas, depósitos coluviales y conos de deyección. Igual como se observó en los otros acuíferos del sistema Puangue el acuífero también se encuentra cubierto por cenizas de origen volcánico.

El aporte de este sector, desde el punto de vista hidrogeológico, es al sector de Puangue Bajo tanto superficial como subterráneamente.

Sistema Melipilla

En este sistema se identifican también, tres unidades hidrogeológicas generales, que se correlacionan en los 4 sectores acuíferos (Melipilla, Estero Cholqui, Estero Popeta, Ulmén) y cubren una superficie de 405 km².

Unidad A: Esta unidad se encuentra sobre la roca basal formada por sedimentos finos con altas proporciones de arcillas. La permeabilidad media estimada para esta unidad fue entre 10^{-4} y 10^{-6} m/s.

Unidad B: Siguiendo la secuencia, por sobre de la anterior se detecta esta unidad formada por sedimentos de granulometría gruesa y media, buena permeabilidad y con valores de permeabilidad estimados que se encuentran entre 10^{-3} y 10^{-4} m/s.

Unidad C: Se trata de la unidad más superficial, formada por sedimentos de granulometría media a fina. La permeabilidad de la unidad es baja, con estimaciones ente 10^{-2} y 10^{-4} m/s.

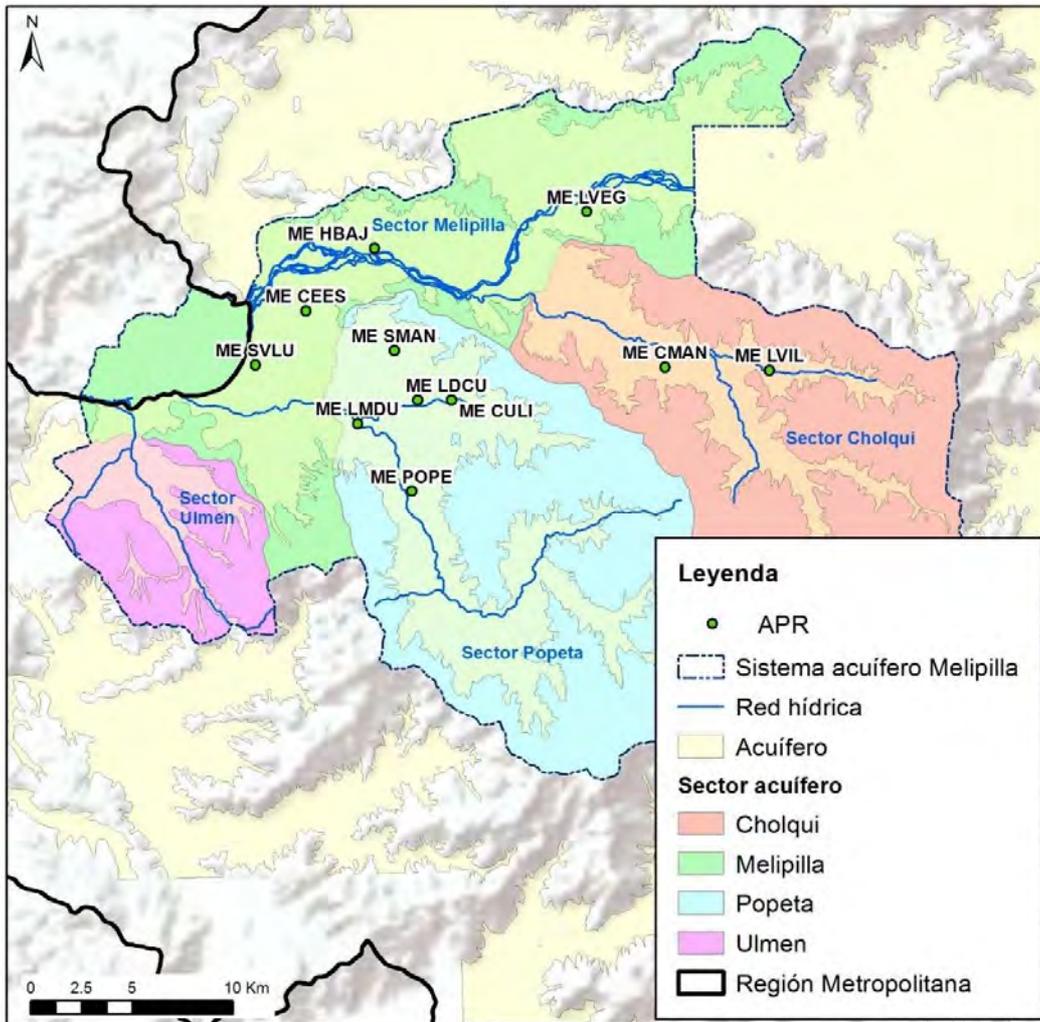
El sector Melipilla es uno de los acuíferos que se distinguen dentro del sistema, correspondiendo a un área del valle del Río Maipo, ver Figura 5-9. En este sector de la cuenca se observa un estrangulamiento de la misma, lo que hace aumentar el gradiente hidráulico, al disminuir la sección de paso. La sección de entrada del acuífero se ubica en la localidad de Pomaire, recibiendo aportes tanto superficiales como subterráneos del Sector de Santiago Sur. La sección de salida se ubica aguas abajo de la confluencia del estero Los Sauces con el Maipo, donde se produce el máximo estrechamiento de la cuenca.

En este sector, el acuífero está formado por depósitos fluviales actuales y subactuales y también antiguos aterrazados formados por gravas arenosas y arenas. Tal como se describió en los acuíferos del Puangue, una parte menor del acuífero se encuentra cubierta por cenizas volcánicas pumicíticas ignimbríticas de colores claros.

El sector acuífero Estero Cholqui se define en función de la cuenca hidrográfica y aporta al sector de Melipilla tanto superficial como subterráneamente. La litología del acuífero se compone principalmente por depósitos fluviales actuales y antiguos aterrazados

(gravas arenosas y arenas) y depósitos coluviales y conos de deyección. También este sector se encuentra en gran parte cubierto por cenizas de origen volcánico.

Figura 5-9. Sistema Melipilla



Fuente: Elaboración propia

Otro de los sectores acuíferos identificados en el sistema Melipilla corresponde al Estero Popeta, que también aporta al Sector de Melipilla superficial y subterráneamente. Los materiales del acuífero, así como la cobertura de cenizas de origen volcánico coinciden con lo descrito en el sector anterior.

Por último, en el sistema Melipilla se diferencia el sector acuífero de Ulmén, definido en función de la cuenca hidrográfica del Estero El Sauce, en el que únicamente en una reducida parte del sector se presentan depósitos coluviales y conos de deyección vinculados al cauce. El resto del sector acuífero se encuentra cubierto por cenizas

volcánicas tal como se observó anteriormente y también afloramientos de rocas intrusivas del jurásico, expuestas en la mayor parte del área.

Sistema Yali

La cuenca del Estero Yali se ubica entre las Regiones Metropolitana y Valparaíso, siendo una típica cuenca costera de la zona central con aporte netamente pluvial.

En este sistema se distinguieron 4 unidades hidrogeológicas, además del basamento impermeable, que en el Informe "Determinación de la Disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Cuenca del Estero Yali Hasta Sector El Prado, DGA 2005" se denominaron como se describe a continuación:

Unidad de Alta Permeabilidad: Se asocia a la fracción gruesa de los sedimentos fluviales distribuidos a lo largo de los valles fluviales actuales, cuya litología corresponde principalmente a depósitos no consolidados de arenas gravas y gravillas intercalados en una secuencia de 100 metros de potencia aproximadamente.

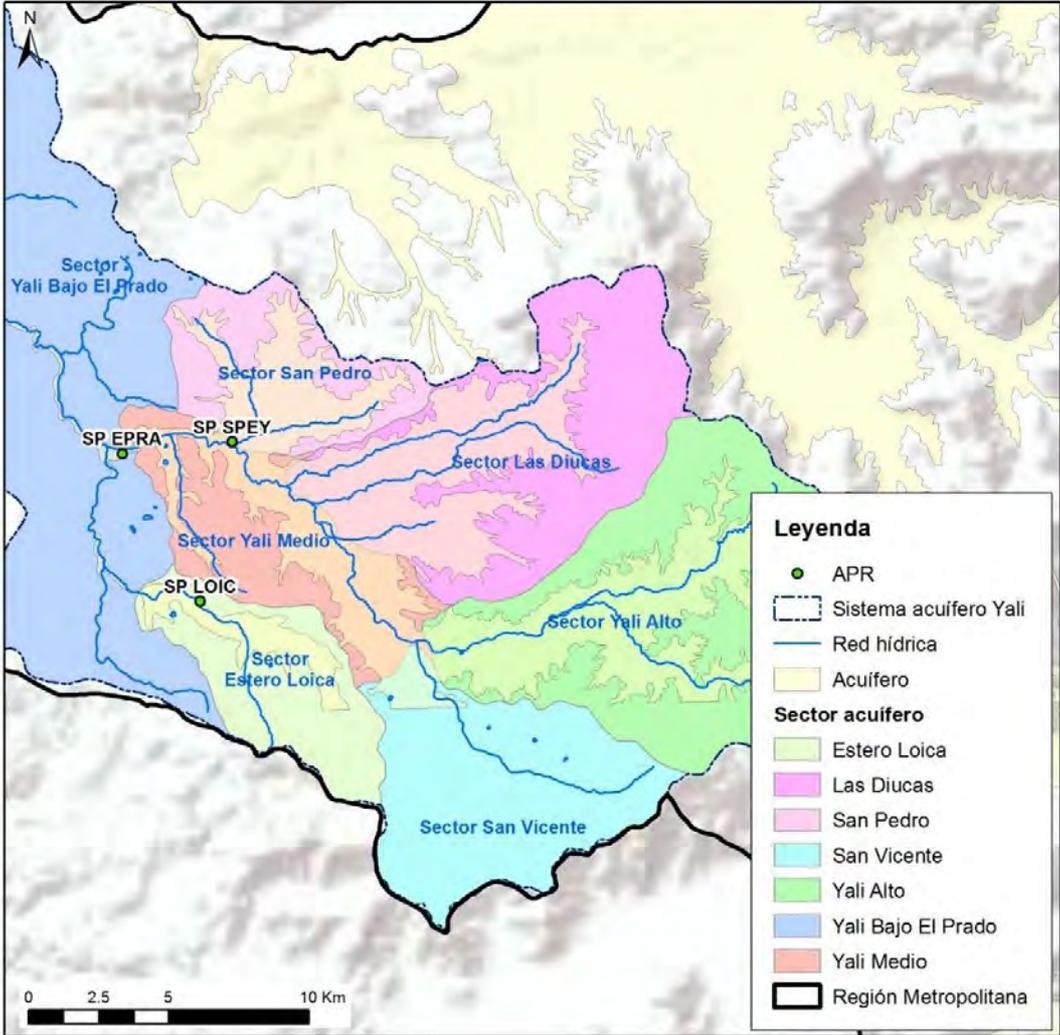
Unidad de media a alta permeabilidad: Esta unidad forma la transición entre las unidades de roca y los depósitos fluviales. Está correlacionada con los depósitos coluviales de piedemonte formados por una mezcla heterogénea de material no consolidado, de mala selección procedente principalmente de meteorización de la unidad de roca.

Unidad de media permeabilidad: Depósitos sedimentarios medianamente consolidados compuestos por conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas. La secuencia se encuentra entre la unidad de roca y los depósitos fluviales descritos anteriormente. Los materiales se detectan sobretodo en la porción Noroeste de la subcuenca de Yali Superior.

Unidad de baja permeabilidad: Unidad que se presenta con morfología de lentejones de sedimentos finos (limos y/o arcillas) intercalados dentro de la secuencia fluvial.

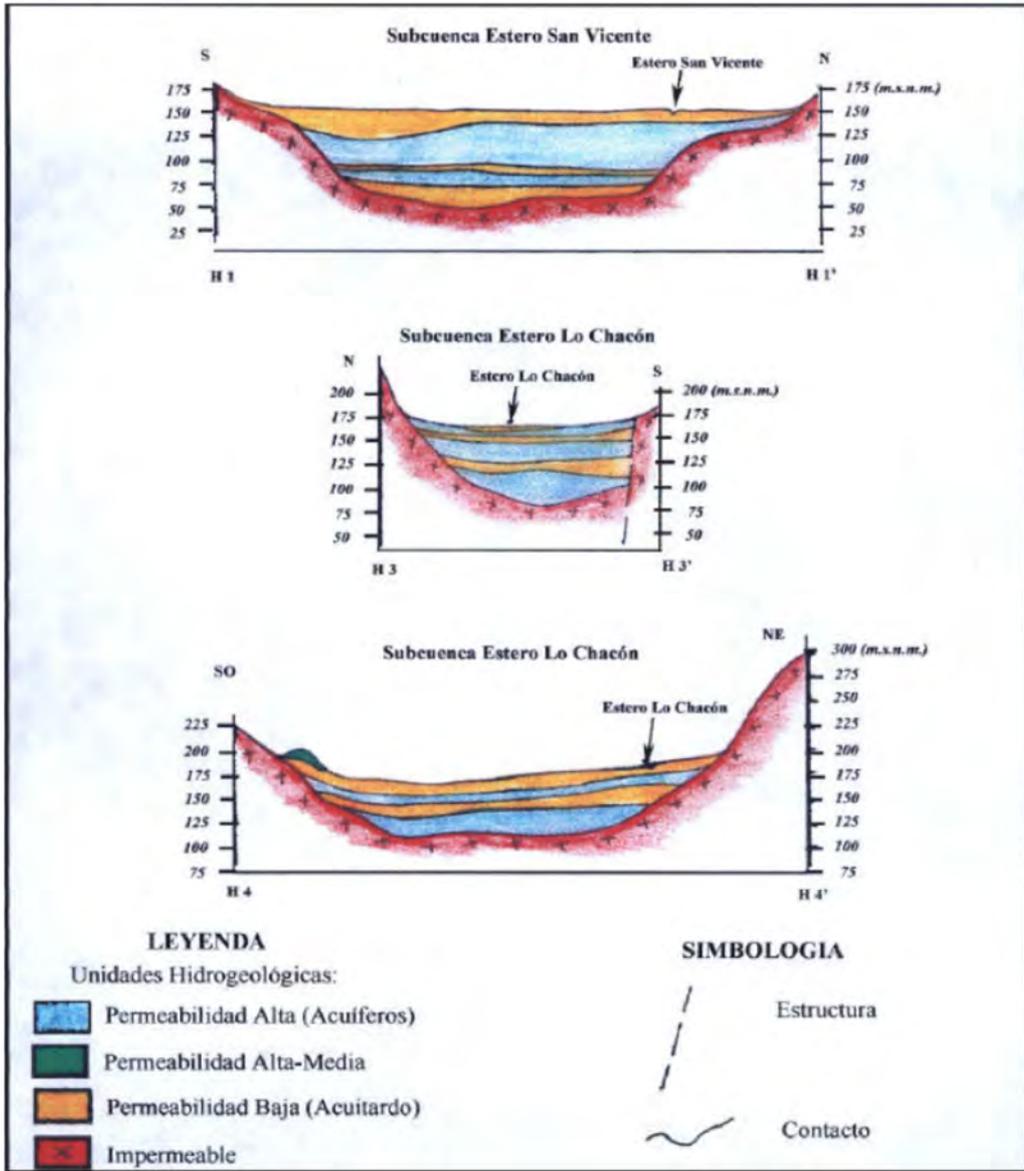
En la Figura 5-11, extraída del estudio DGA S.D.T. N° 189, enero 2005, se muestra la disposición y relaciones de contacto entre estas unidades en los sectores del Estero San Vicente y Lo Chacón.

Figura 5-10. Sistema Yali



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-11. Perfiles hidrogeológicos del Sistema Yali



Fuente: DGA, 2005 (S.D.T. N° 189)

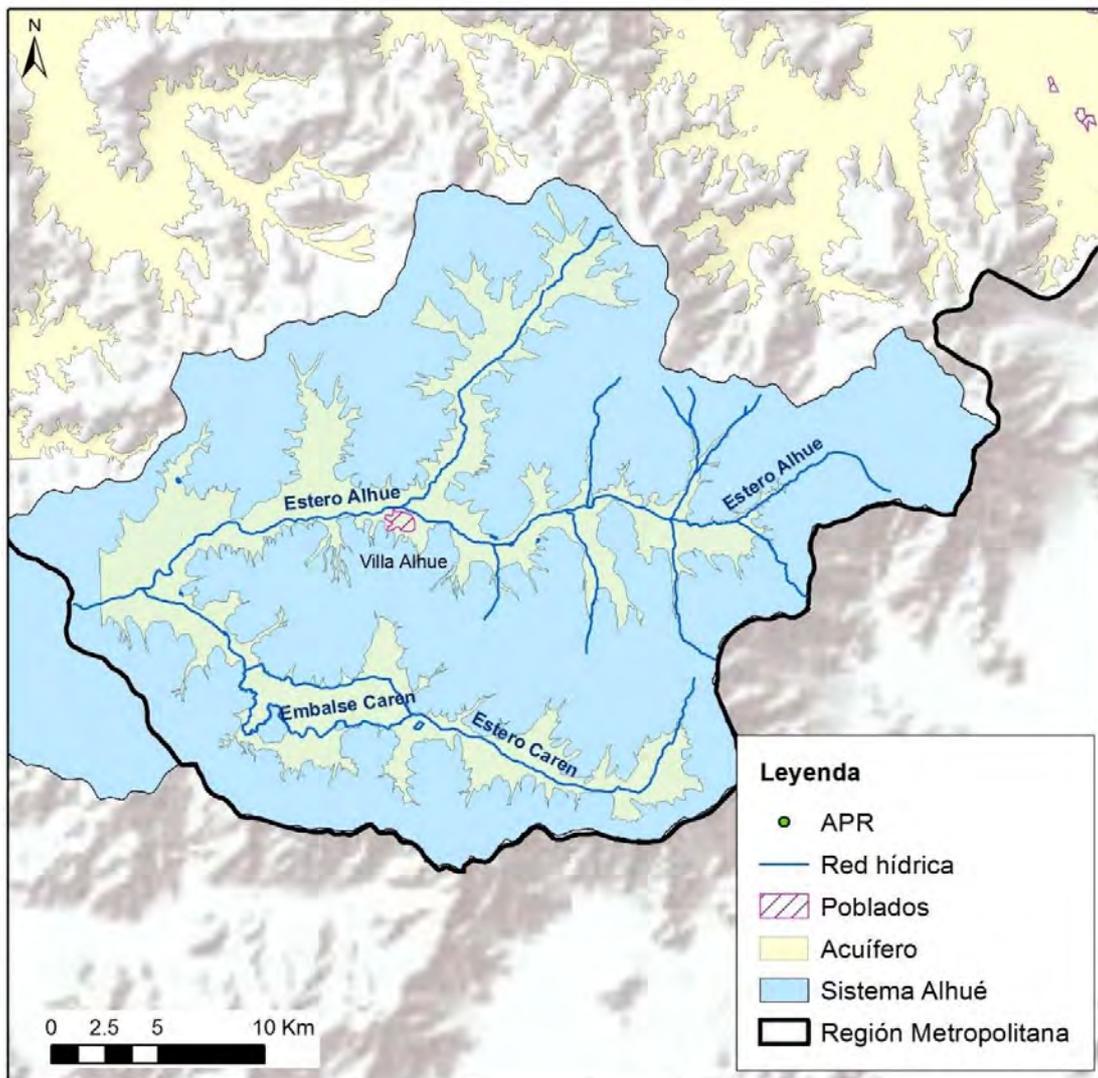
El acuífero principal del sistema corresponde a la unidad de alta permeabilidad que, de acuerdo a la disposición intercalada de lentes de sedimentos finos, hace que el acuífero pueda presentar características tanto de acuífero libre como confinado.

Acuífero Alhué

Al Sur de la Región Metropolitana de Santiago, en la comuna de Alhué, se encuentra el límite con la cuenca del Río Rapel. En esta localidad se desarrolla el sistema acuífero de Alhué, ver Figura 5-12.

En este sector, los materiales que conforman el acuífero dan lugar a dos unidades, la superior de granulometría media a gruesa con un espesor de unos 50 metros aproximadamente y la unidad inferior compuesta por intercalaciones de sedimentos que presentan granulometría más gruesa aguas arriba. Sobre la unidad superior se detecta una tercera unidad, en el sector del Estero Las Palmas, con un alto contenido de arcillas que confiere a nivel local cierto grado de confinamiento al acuífero.

Figura 5-12. Sistema Alhué



Fuente: Elaboración propia

La descripción más detallada de las principales unidades hidrogeológicas se describe a continuación:

Unidad I: Conforman el basamento del sector y está formado por rocas metamórficas y cuerpos intrusivos.

Unidad II: Constituida por rocas sedimentarias y secuencias volcánicas expuestas por erosión y/o por tectónica. A nivel hidrogeológico esta unidad presenta escasa porosidad y baja permeabilidad.

Unidad III: Se agrupan depósitos no consolidados: fluviales, aluviales y coluviales desarrollados en el sector de la Depresión Intermedia.

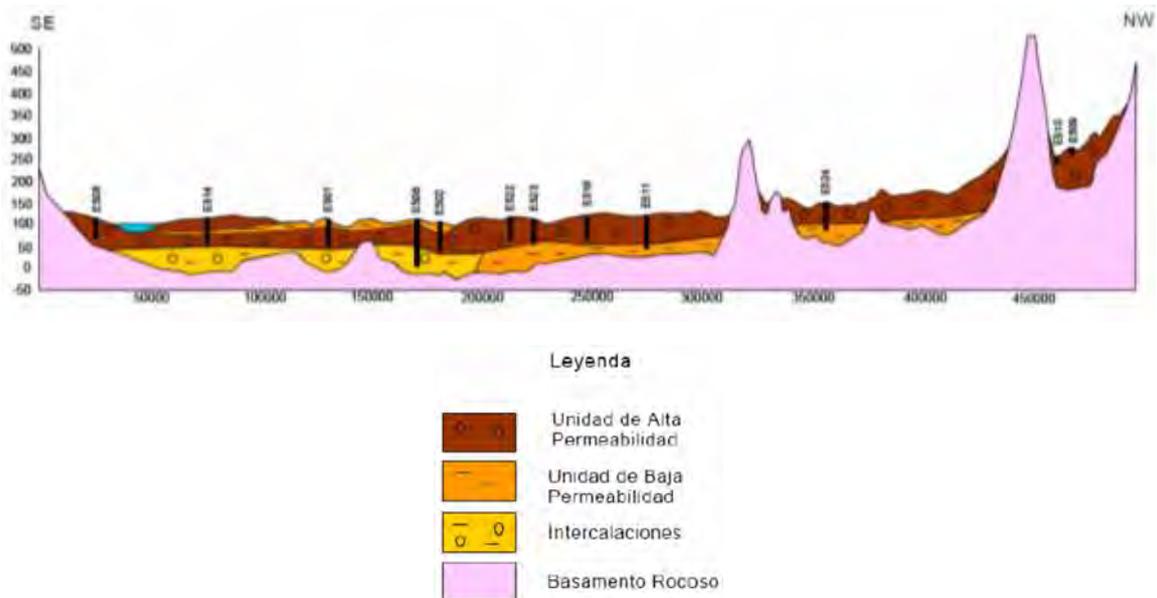
Este sistema acuífero se caracteriza por un importante gradiente hidráulico en la parte alta de la cuenca, que disminuye progresivamente hacia el embalse Rapel.

En la bibliografía consultada (Diagnóstico de la Red de Aguas Subterráneas Región del Libertador Bernardo O'Higgins, S.I.T. N°227, Enero 2011), para la obtención de los valores de conductividad hidráulica se consultó un ensayo de bombeo realizado en los rellenos fluviales del Estero Alhué, obteniendo un valor de 16 m/día.

En el presente estudio, dentro del acuífero de Alhué, se monitorearon los APR La Línea, El Asiento, Barrancas de Pichi, Villa Alhué y Las Hijuelas de Loncha.

En la Figura 5-13 se incluye un perfil geológico longitudinal a la cuenca del Estero Alhué (COORD SE: 299.791; 6.232.894, COORD NW: 321.593; 6.231.518), interpretado en base a las propiedades hidrogeológicas de los materiales presentes, en el que se observan las unidades descritas anteriormente, incluyendo el basamento.

Figura 5-13. Perfil hidrogeológico Sistema Alhué



Fuente: DGA, 2011 (S.D.T. N° 277)

En este acápite se resumió la información hidrogeológica principal de los acuíferos presentes en la Región Metropolitana de Santiago, siguiendo la clasificación y descripción realizada por la DGA.

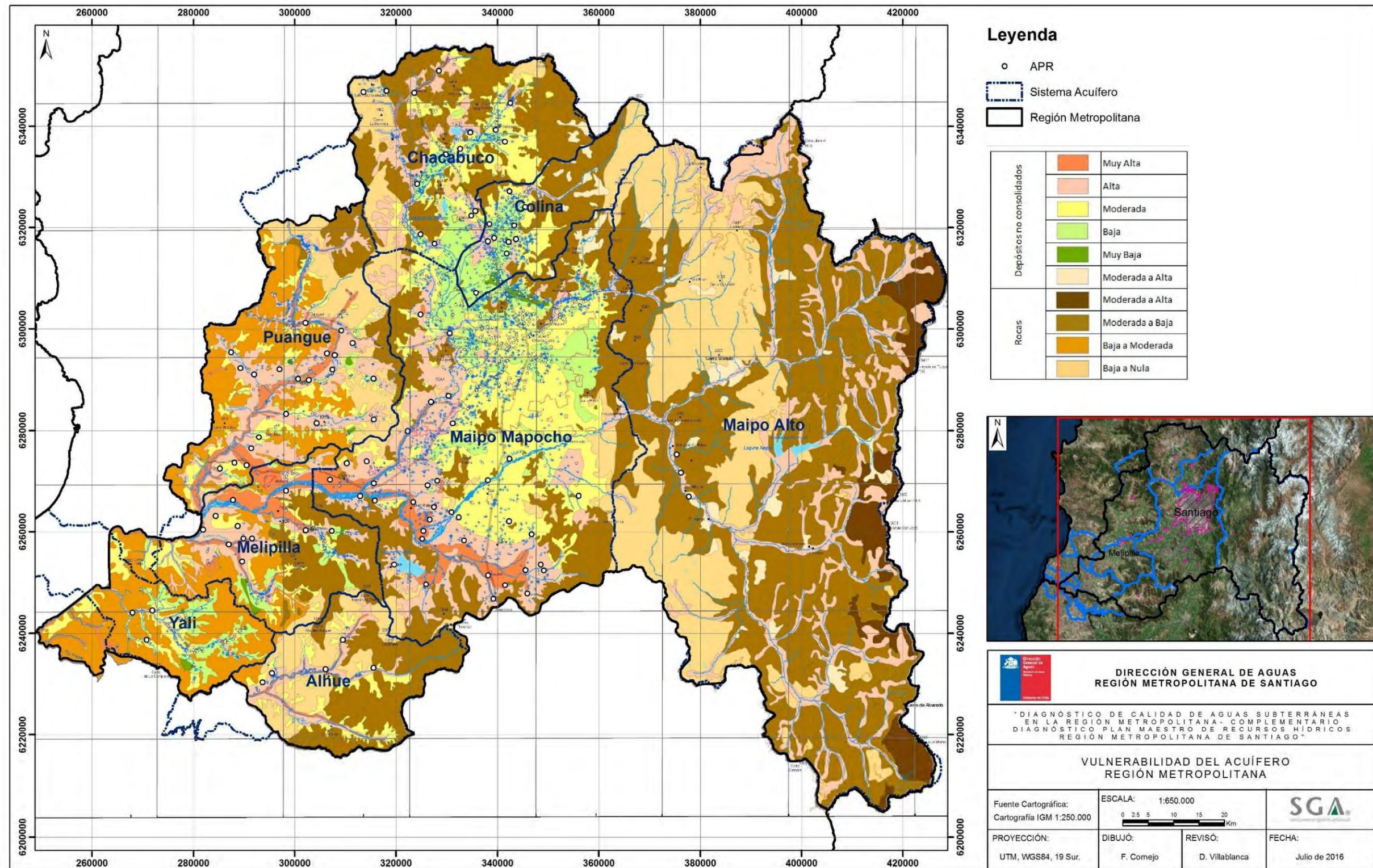
5.4 VULNERABILIDAD DE ACUÍFERO

El agua subterránea presente en los sistemas acuíferos está provista de cierta protección frente a los contaminantes, bajo la suposición que el medio físico, como pueden ser los materiales de la tierra, pueden actuar como filtros naturales frente algunos impactos humanos. Este potencial de protección es limitado y muy variable y su valoración se realiza asignando un determinado peso específico a los atributos o factores como, profundidad del nivel estático, litología de la zona no saturada y recarga hacia los acuíferos. De este modo la Vulnerabilidad intrínseca de un acuífero se relaciona con la velocidad con la que un contaminante puede alcanzar la zona saturada del subsuelo (SERNAGEOMIN).

En este contexto el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) elaboró en el año 2004 un mapa de "Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago", de escala 1:250.000 (Aguirre *et al.*, 2004) con el objeto de proponer condicionantes que permitan proteger los recursos de agua subterránea. El mapa de Vulnerabilidad a la contaminación considera factores como la profundidad del agua subterránea, las características litológicas de la zona saturada y el tipo de acuífero. En la Figura 5-14 se presenta la clasificación de Vulnerabilidad de acuíferos sedimentarios y fracturados.

Dentro de este contexto, los pozos APR monitoreados en el presente estudio se localizan en la unidad de depósitos no consolidados. Las zonas con mayor Vulnerabilidad, es decir alta a muy alta, se reconocen en el sector Sur y Este de la cuenca de Santiago, en los sectores de Alhué, Puangue, Maipo-Mapocho y parcialmente el sector de Colina Norte.

Figura 5-14. Mapa de vulnerabilidad Región Metropolitana de Santiago



Fuente: Modificado de Iriarte *et al.*, 2004.

5.5 SITUACIÓN DE EXPLOTACIÓN EN LA REGION

El análisis de explotación se realizó con la información procedente del sitio web de la DGA, actualizada al mes de marzo de 2016.

Conforme a la información proporcionada por la DGA, se obtuvo que el total de derechos de aprovechamiento de aguas otorgados en la Región Metropolitana de Santiago corresponden a 8.634 Resoluciones de otorgamiento. Del total de los derechos de aprovechamiento de aguas constituidos, entre derechos subterráneos y superficiales, se obtuvo un caudal total otorgado de 1.716.582,93 L/s.

En la Tabla 5-2 se presentan los datos de derechos de aprovechamiento de aguas y caudales según su fuente de abastecimiento (subterránea o superficial), y en Figura 5-15 se muestra la distribución espacial de éstos. Se observa que la principal fuente que sustenta los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados corresponde a los sistemas acuíferos con un total de 6.704 derechos otorgados. Por otra parte, en la actualidad gran parte de los acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago cuentan con una Resolución formal de limitación a la explotación de aguas subterráneas, es decir se encuentran con Restricción. Una porción menor, al noreste de la ciudad de Santiago, se ha determinado como área de Agotamiento (DGA, 1983).

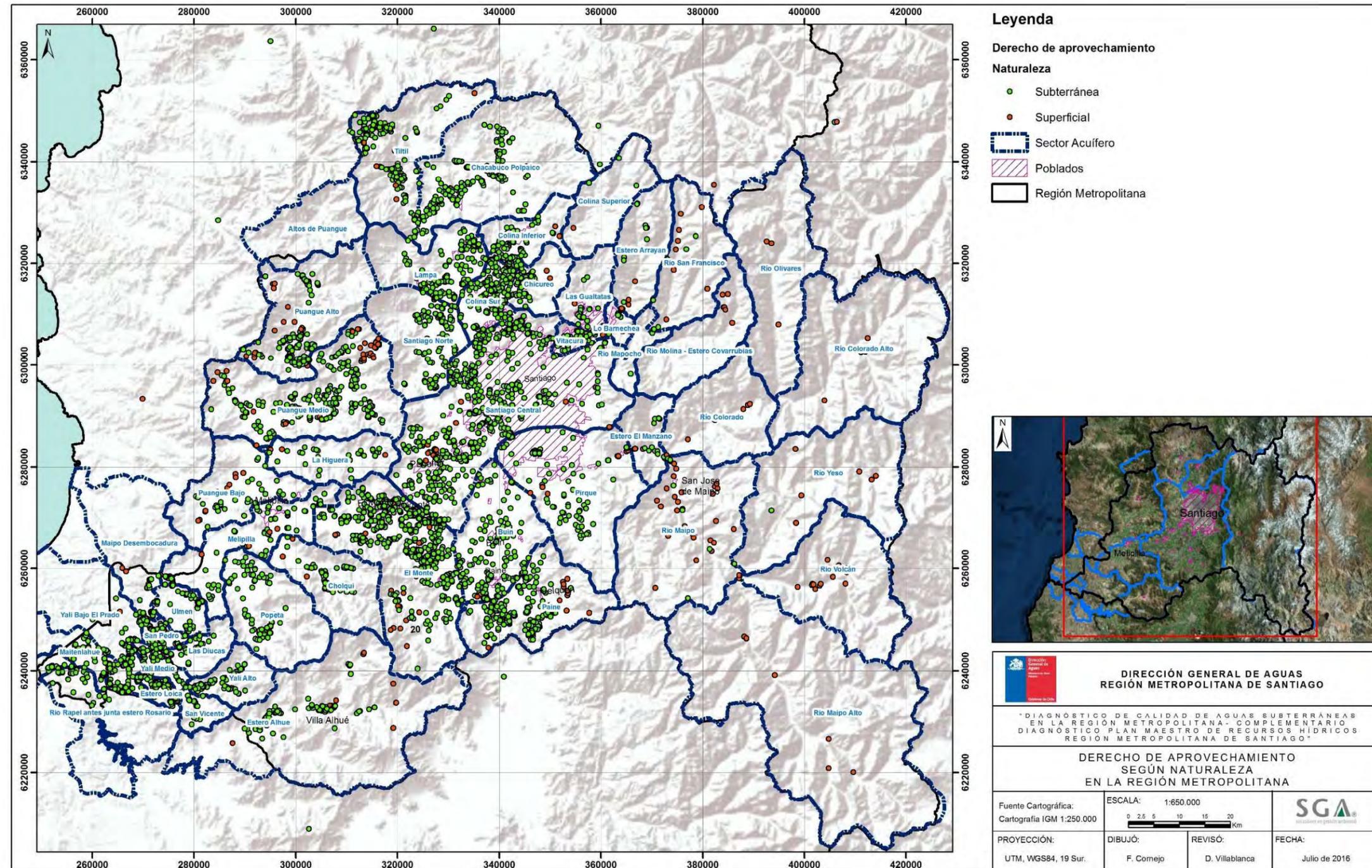
Respecto de los derechos de aprovechamiento de aguas y a caudal otorgado según fuente de abastecimiento esto difiere, ya que los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales poseen el mayor caudal (1.462.846 L/s), cuyas fuentes principales son los ríos y esteros, seguidos de vertientes y quebradas. Los principales derechos de aprovechamiento de aguas en este ámbito, se encuentran en el sector Oriente de la Región donde se localizan las partes altas de las cuencas de los ríos Maipo, Mapocho y sus tributarios (Río Volcán, Río Colorado, etc.).

Tabla 5-2. Derechos de aprovechamiento de aguas según Fuente de Abastecimiento

Fuente de Abastecimiento	Total Derechos	Caudal (L/s)	Porcentaje caudal total (%)
Arroyo	3	154,17	0,009
Derrame	31	3.843,39	0,224
Lago/Laguna	10	5.736,8	0,334
Vertiente	121	1.755,76	0,102
Quebrada	117	6.063,6	0,353
Rio/Estero	1631	1.462.846,68	85,219
Acuífero	6704	235.714,49	13,732
Sin información	17	468,04	0,027
Total general	8634	1.716.582,93	100%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de aprovechamiento de aguas otorgados, DGA, 2016.

Figura 5-15. Distribución espacial de derechos de aprovechamiento de aguas según la fuente de abastecimiento



Fuente: Datos DGA, 2016

5.6 USO DE SUELO POR SECTOR ACUÍFERO

A continuación, se presenta por cada Sistema y Sector Acuífero, las características del uso del suelo en el entorno en que se localizan los pozos de APR monitoreados durante el presente estudio, y que se describen en el Capítulo 6, sección 6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS Y POZOS DE MONITOREO. Además, se describen aquellas actividades industriales, mineras, agroindustriales, urbanas u otras de relevancia, que se desarrollen en el Sector Acuífero o que puedan de alguna forma afectar la calidad del recurso hídrico.

Al final del análisis de cada Sistema se presenta una figura en la cual es posible observar espacialmente las características del territorio y en el Anexo 8, Apéndice 2 se presenta la Tabla 1 que recopila para cada pozo monitoreado el Sistema y Sector Acuífero en el que se inserta además del uso de suelo que predomina en su entorno inmediato (2 a 3 km a la redonda).

5.6.1 Sistema Chacabuco

El Sistema Chacabuco abarca los sectores acuíferos de Til Til, Polpaico – Chacabuco y Lampa, los cuales se localizan en parte de las comunas de Til Til, Lampa y Colina en el extremo Norte de la Región Metropolitana de Santiago. La Figura 5-16 muestra la localización de este Sistema Acuífero, los principales usos del suelo y los APR monitoreados en él.

Sector Acuífero Til Til

De acuerdo al análisis realizado, el sector acuífero de Til Til está geomorfológicamente inserto entre la Cordillera de la Costa y el inicio de la cuenca de Santiago. Hidrográficamente los cursos superficiales más representativos son el estero Rungue y el estero Til Til.

En cuanto al uso del suelo, al tratarse de un área caracterizada por la presencia de la Cordillera de la Costa, existe una gran parte del territorio cubierta por matorrales y bosques. Las zonas pobladas se ubican principalmente en los sectores planos entorno a los principales esteros, entre ellos las localidades de Rungue, Til Til y Estación Polpaico.

Las tierras de cultivo se concentran en torno al área urbana de Til Til y de la localidad de Estación Polpaico. La minería es una actividad extendida por diferentes sectores del acuífero, sobre todo explotaciones de pequeña y mediana minería de cobre, oro, caolín y cuarzo. De acuerdo a la información del SERNAGEOMIN, en el sector acuífero existen tres depósitos de relaves¹ inactivos correspondientes a Mina El Atajo, Mina Anita y Mina

¹ Respecto a los depósitos de relaves y las definiciones de status del SERNAGEOMIN se considera que un depósito Inactivo es aquel que no tiene Resolución de abandono, ya que los dueños no han empezado con las medidas comprometidas en su Resolución de Calificación Ambiental (RCA), de esta manera podría eventualmente ser utilizado. En tanto un depósito abandonado podría tener resolución de abandono con sus respectivas medidas, o no tener ni dueño ni Resolución.

San Francisco y uno activo de Planta Polcura Integrada. Otra actividad es la ubicación del Relleno Sanitario Loma Los Colorados en el Norte del sector acuífero.

Respecto a la localización de los APR dentro del sector acuífero, el APR Caleu (TT CALE) se localiza en la localidad del mismo nombre, caracterizado por un hábitat difuso y alejado de actividades industriales. Por su parte el APR Espinalillo (TT ESPI) se localiza cercano al cauce del estero Caleu, aguas abajo del APR Caleu, y también se encuentra lejos de actividad industrial. El APR Montenegro (TT MONT), no pudo ser monitoreado en ninguna de las dos campañas de terreno. Al analizar su localización se observa que se encuentra dentro de la localidad poblada de Montenegro, en un entorno principalmente residencial y a 3,5 km al surponiente del Relleno Sanitario Loma Los Colorados, antes mencionado. El APR Rungue (TT RUNG) se ubica en la ribera del Estero Rungue. En el sector han existido explotaciones mineras, de ellas la más cercana es la Mina La Despreciada, la cual tiene un status de irregular. Finalmente, el APR Estación Polpaico (TT EPOL) se localiza en un entorno preferentemente agrícola.

Sector Acuífero Chacabuco - Polpaico

Respecto al sector acuífero Polpaico – Chacabuco, se localiza en las comunas de Colina y Til Til, sector que geomorfológicamente abarca la cuenca de Santiago y la precordillera andina. Este sector acuífero presenta una agricultura principalmente desarrollada en los valles entorno a los esteros Chacabuco y Peldehue.

La población se encuentra distribuida en pequeñas localidades rurales, siendo Huertos Familiares la principal localidad poblada, ubicada administrativamente en la comuna de Til Til.

Es posible advertir que este sector presenta una importante concentración de actividad industrial, principalmente ligada a actividad minera actualmente en operación, de ellas sobresalen la planta de procesos y depósitos de relaves Las Tórtolas (AngloAmerican), el depósito de relaves Ovejería (CODELCO), la mina Cerro Blanco de Cemento Polpaico con dos depósitos de relaves activos (Planta Filler y Tranque de relave 5) y uno inactivo (Tranque 1-2-3-4).

Los APR dentro de este sector acuífero, se localizan en entornos preferentemente agrícolas. De los cinco APR monitoreados, dos se encuentran aguas abajo de los depósitos de relave Ovejería y Las Tórtolas, ellos son el APR Santa Matilde y APR Punta Peuco. A continuación, se describe la ubicación de todos los APR de este sector acuífero:

- APR Chacabuco (CO CHAC): Se ubica en un entorno agrícola, no se observan actividades industriales o mineras aguas arriba ni en las cercanías del pozo.

Finalmente los depósitos operativos se encuentran bajo fiscalización de SERNAGEOMIN quien solicita la regularización de éstos y obtención de su correspondiente RCA, a excepción de pequeñas faenas que no superan una producción mensual de 5 toneladas por mes.

- APR El Colorado (CO ECOL): Se encuentra en la localidad del Colorado, el entorno inmediato es residencial y luego de la concentración de viviendas se observa una actividad agrícola importante con predios de tamaños que varían entre 1 y más de 10 hectáreas.
- APR Huechún (TT HUEC): Se encuentra en la localidad de Huechún, sector de hábitat residencial concentrado en el eje de la red vial. Se observa que predomina la actividad agrícola. El tamaño de los predios agrícolas es variable, ya que en el sector más cercano al residencial se observan predios cercanos a 1 hectárea de superficie y otros de más de 100 hectáreas. Aproximadamente 6,5 km al Norte de este APR se encuentra el tranque de relaves Ovejería de CODELCO.
- APR Quilapilún (CO QUL): Este pozo se encuentra en un entorno agrícola, la localidad poblada más cerca se encuentra 1 km al oriente de éste.
- APR Santa Matilde (TT SMAT): Se localiza en un sector agro-residencial, como se ha mencionado previamente se encuentra localizado 5,7 km al Sur del Tranque Ovejería y 4,1 km norponiente del Tranque Las Tórtolas.
- APR Punta Peuco (TTPPEU): Se encuentra en un sector agro-residencial, a 6,8 km al Sur del Tranque Ovejería y 6,7 km al poniente del Tranque Las Tórtolas.

Sector Acuífero Lampa

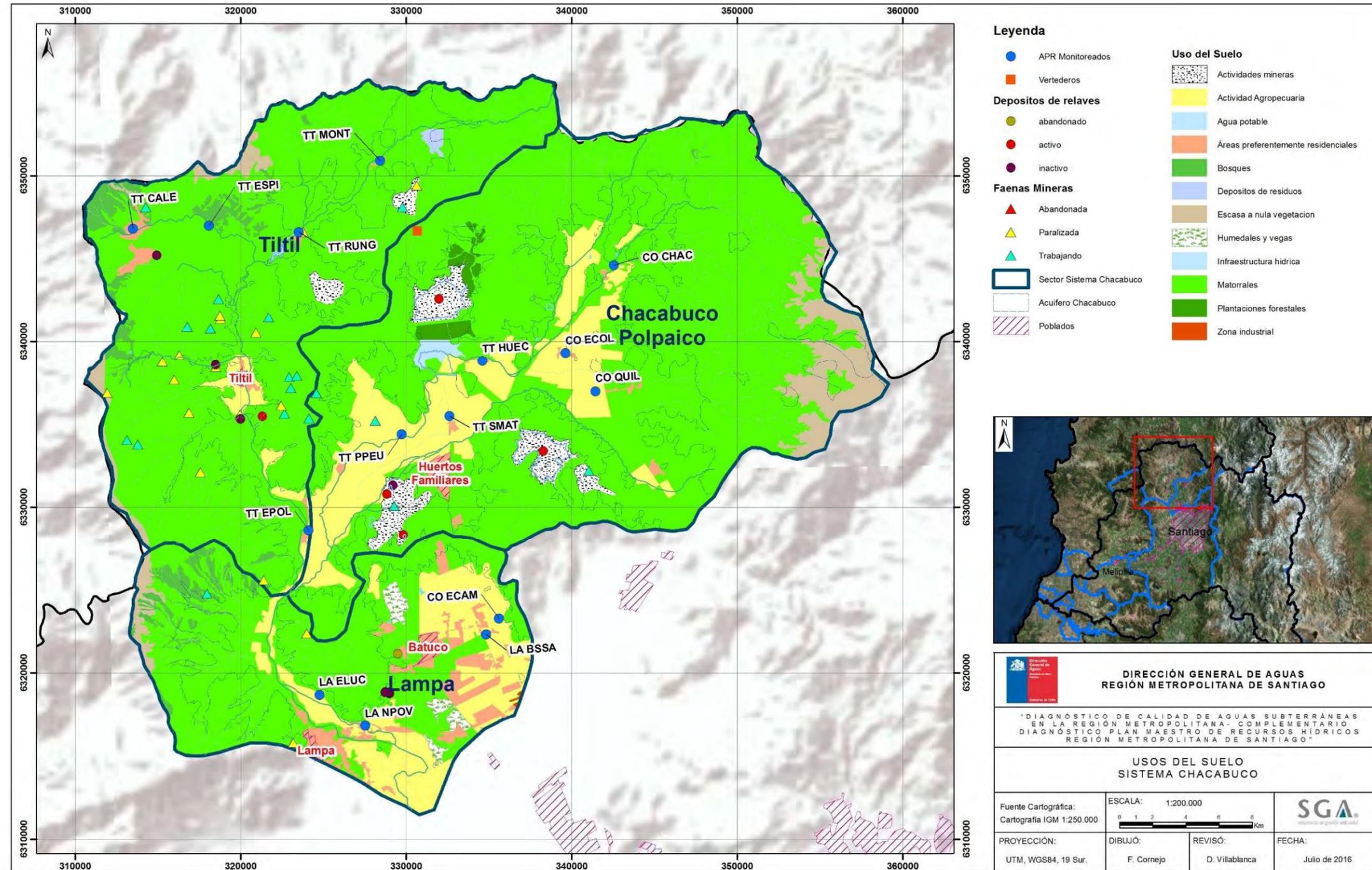
El sector acuífero de Lampa se encuentra principalmente dentro de la comuna del mismo nombre, abarca también un pequeño sector de la comuna de Colina. Existe en este territorio una importante superficie de matorrales, los que predominan en el sector poniente (Cordillera de la Costa). Respecto a las áreas urbanas, las principales son Lampa y Batuco. En el entorno de estas localidades se concentran los predios de uso agropecuarios, actividad muy extendida en el territorio.

La actividad minera principal es la mina CEMIN ubicada en el camino Batuco – Lampa que tiene además de la explotación, la ubicación de tres depósitos de relaves.

En este sector acuífero se monitorearon 4 APR, APR El Lucero (LA ELUC), ubicado en sector del mismo nombre, en un entorno que concentra sector residencial rural y actividad agrícola. El APR Nuevo Porvenir (LA NPOV) se encuentra a un costado del zoológico Lampa Zoo y aguas abajo de la explotación minera CEMIN antes mencionada (2,5 km de distancia aproximadamente).

El APR Batuco Santa Sara (LA BSSA), ubicado en la comuna de Lampa y el APR Ejemplo Campesino (CO ECAM), ubicado en la comuna de Colina, se localizan en entornos mixtos entre agricultura y residencia.

Figura 5-16. Usos del Suelo Sistema Chacabuco



Fuente: GORE Región Metropolitana, 2012

5.6.2 Sistema Colina

El Sistema Colina abarca administrativamente parte de las comunas de Colina, Lampa, Quilicura y Pudahuel. Los sectores acuíferos que componen este Sistema son Colina Inferior, Colina Sur, Colina Superior y Chicureo. Colina Superior está conformado principalmente por vegetación andina y suelos desnudos, y el principal curso de agua superficial es el Estero Colina. Cabe señalar que en este sector acuífero no se realizó monitoreo. A continuación, se describen las principales características del uso del suelo en los sectores acuíferos que forman parte del Sistema Colina, posteriormente, la Figura 5-17 muestra la localización de este sistema acuífero, los principales uso del suelo y los APR monitoreados en él.

Sector Acuífero Colina Inferior

Las actividades principales en el territorio del sector acuífero Colina Inferior se relacionan con usos agropecuarios y centros poblados, además de sectores agro-residenciales y de viviendas en condominios. Se ha determinado como actividades extractivas principales la extracción de áridos en la ribera del Estero Colina, aguas arriba del área urbana de Colina, éstas corresponden a las empresas Áridos Santa Eliana, Conovía y Los Morros S.A. Estas actividades se encuentran aproximadamente a 4 km del pozo monitoreado más cercano.

Respecto a la localización de los APR en este sector se observa que dos de ellos se encuentran aguas abajo de las extracciones de áridos y de la zona urbana, ellos son APR Santa Filomena – San Luis (CO SFSL) y APR Manuel Rodríguez (CO MROD), el entorno inmediato de ambos APR es agro-residencial. El APR Reina Norte (CORNOR), se encuentra aguas arriba de la zona urbana y es un territorio preferentemente agrícola y zonas residenciales difusas.

Sector Acuífero Chicureo

En el sector acuífero Chicureo predominan espacialmente los terrenos de matorrales, los cuales se concentran en el sector precordillerano. En este sector se encuentran quebradas intermitentes que alimentan los principales esteros.

Hacia el centro del sector predominan los condominios residenciales, hasta el extremo poniente, en el cual se observa la presencia del hábitat rural tradicional, con mayor concentración de actividad agrícola. Es en ese sector donde se encuentra el APR Hermanos Carrera (CO HCAR), que es el único APR monitoreado en este sector.

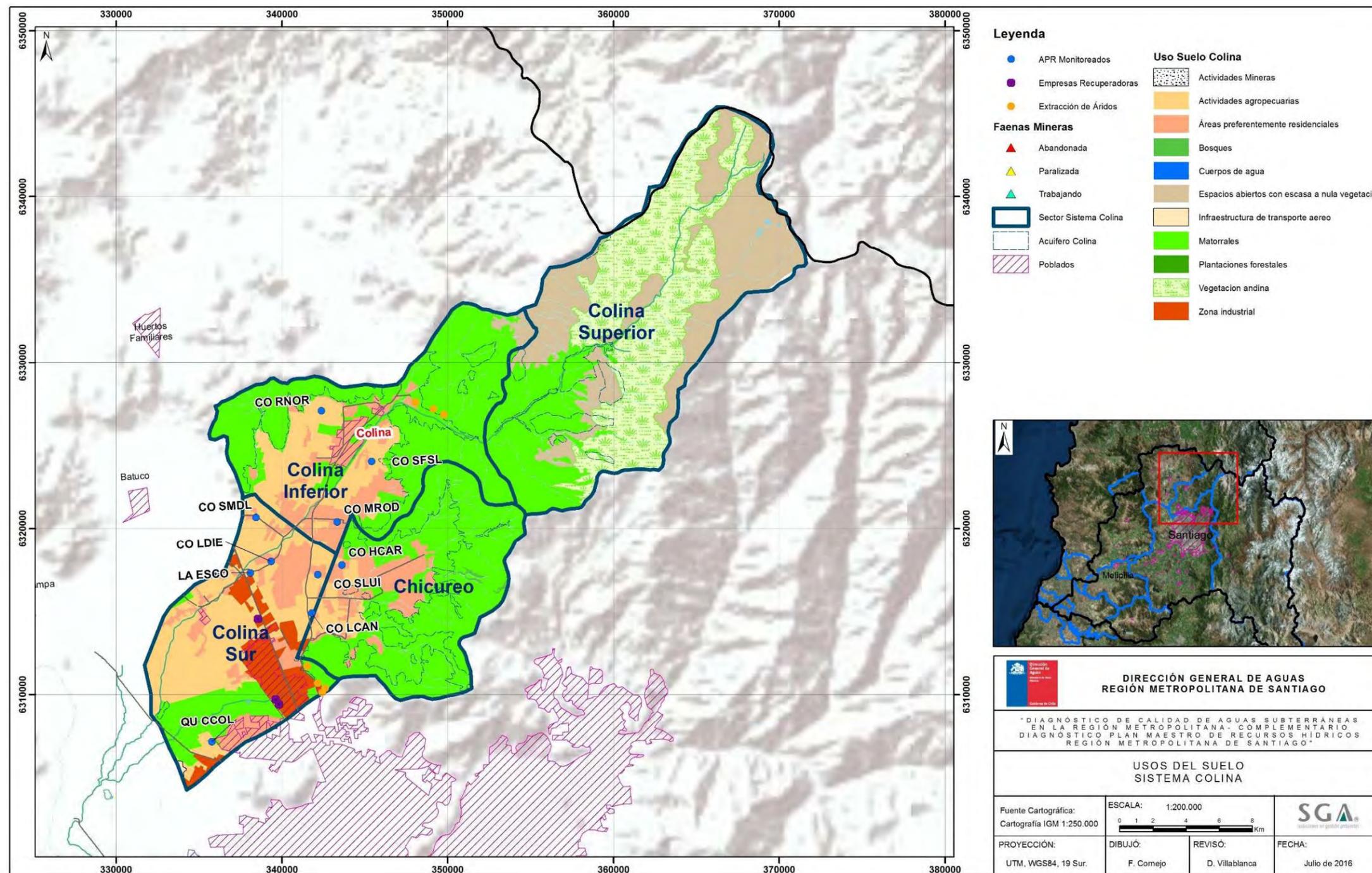
Sector Acuífero Colina Sur

El sector Colina Sur se inserta en las comunas de Lampa, Colina y Quilicura. Este sector presenta un suelo mixto, característico de entornos periurbanos. En él es posible encontrar aún extensas zonas de cultivos, pero con un proceso de urbanización

importante. Además, en torno al eje de la Ruta 5 se concentran una serie de actividades industriales.

En este sector se monitorearon 6 APR, Las Canteras (CO LKAN), Los Diecisiete (CO LDIE), Santa Luisa (CO SLUI), Santa Marta de Liray (CO SMDL), Estación Colina (LA ESCO) y Colo Colo (QU CCOL). De ellos, los cuatro primeros están en entornos residenciales y agrícolas. Por otro lado, el APR Estación Colina se encuentra en el límite de suelos agrícolas e industriales y el APR Colo Colo se encuentra en un entorno de actividades urbanas (terminal de buses Transantiago) e industrial.

Figura 5-17. Usos del Suelo Sistema Colina



Fuente: GORE Región Metropolitana, 2012

5.6.3 Sistema Maipo – Mapocho y Maipo Alto

El Sistema Maipo - Mapocho abarca una parte importante del área metropolitana de la ciudad de Santiago, desde el suroriente de la comuna de Colina por el Norte, hasta San José de Maipo y Paine por el Sur. Los sectores acuíferos considerados dentro de este Sistema son: Las Gualtatas, Lo Barnechea, Vitacura, Santiago Norte, Santiago Central y Santiago Sur (Pirque, Buin, Paine, El Monte, Río Maipo y Río Maipo Alto).

La distribución general de los pozos monitoreados en este Sistema muestra que ellos se concentran mayoritariamente en el suroeste, principalmente en las comunas de Pudahuel, Padre Hurtado, Peñaflor, El Monte, Talagante, Isla de Maipo, San Bernardo, Buin y Paine. Hacia el oriente de este Sistema se localizan tres APR monitoreados en la comuna de San José de Maipo. En los sectores acuíferos de Las Gualtatas, Lo Barnechea, Vitacura y Río Maipo Alto no se monitorearon pozos. A continuación, se describen las principales características del uso del suelo en los sectores acuíferos que forman parte de este Sistema, luego, la Figura 5-18 muestra la ubicación espacial de éste, la localización de los APR monitoreados, además de los principales usos de suelo y otras actividades antrópicas identificadas en el territorio.

Sector Acuífero Santiago Norte

El sector Santiago Norte abarca parte de las comunas de Lampa y Pudahuel, en el cual predominan las actividades agropecuarias y los matorrales de la Cordillera de la Costa. En este sector se encuentran cuatro explotaciones mineras pequeñas, tres de ellas no se encuentran operativas (Mina Ray Ray, Mina La Isabel y Mina May May) y una se encuentra operativa (Mina La Repetida). Además, se encontraron cuatro puntos de extracción de áridos (Agua Santa, Genova, Rivavel y otra no identificada).

En este sector acuífero fue monitoreado el APR Noviciado – Peralito (PU NPER), el cual se encuentra en la localidad del Noviciado. El uso de suelo principal es el agrícola y residencial, aun cuando comienzan a observarse instalaciones de destino principalmente industrial y depósitos de vehículos.

Sector Acuífero Santiago Central

Dentro del sector acuífero Santiago Central se localiza el APR Casas de Pudahuel (PU CDP), APR El Trebal (PH ETRE), APR El Curato (PH ECUR), APR La Esperanza – Santa Mónica (PH LESM), APR Pelvin (PE PELV) y Lonquén – Sorrento (TA LSOR).

El APR Casas de Pudahuel, se encuentra en la comuna de Pudahuel, cercano al Río Mapocho, el cual pasa por este sector luego de su paso por el centro de la ciudad de Santiago. Aguas arriba de este punto se localizan áreas industriales en los alrededores del Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez de Santiago y algunas pequeñas faenas mineras.

El APR El Trebal se localiza en la comuna de Padre Hurtado, también cercano al Río Mapocho en un entorno de hábitat rural ubicado aproximadamente 700 metros al suroriente de la Planta de Tratamientos de Aguas El Trebal.

El APR El Curato se localiza en la comuna de Padre Hurtado y su entorno presenta una mixtura entre zona urbana, parcelas de agrado y predios agrícolas.

El APR La Esperanza – Santa Mónica se localiza también en la comuna de Padre Hurtado, aproximadamente a 3,5 km aguas abajo del APR El Trebal en una zona agro residencial, por su parte el APR El Curato se localiza en la misma comuna, en un entorno residencial en cuyos alrededores se encuentra una importante cantidad de predios agrícolas de superficies que van desde los 5.000 m² a más de 10 hectáreas.

El APR Pelvin, que también se encuentra dentro del acuífero Santiago Central, se encuentra localizado administrativamente en la comuna de Peñaflores, ubicado en un entorno de hábitat rural y predios cultivados. Aguas arriba de este APR, aproximadamente a 1,2 km, se encuentra la mina La Perseguida, la cual no se encuentra activa y su depósito de relaves, el cual se encuentra abandonado. Actualmente en esa área, donde se encontraba el depósito de relaves, se desarrollan actividades agrícolas.

El APR Lonquén – Sorrento se localiza en un área agro-residencial, la mayoría de los predios cercanos tienen una superficie cercana a los 5.000 m². Aproximadamente 9 km al Este del pozo se encuentra el Relleno Sanitario Santa Marta.

Sector Acuífero Santiago Sur

En lo que respecta al sector acuífero Santiago Sur se monitoreó en el sector de Pirque el APR El Principal (PI EPRI), el cual se encuentra localizado en un hábitat mixto entre zonas de hábitat rural y urbano. En este sector no se observa presencia de actividades mineras, industriales o de otro tipo. Principalmente aguas arriba se encuentran sectores agrícolas y de matorrales.

En cuanto al sector de Buin se monitorearon 5 APR, ellos fueron: La Estancilla de Nos, El Romeral, El Cerrillo, Campusano La Estancilla y Santa Filomena Las Vertientes.

El APR La Estancilla de Nos (SB LEDN) se localiza administrativamente en la comuna de San Bernardo en un sector rural, se encuentra aproximadamente 500 metros al Norte del cauce del Río Maipo. El entorno de este APR está surcado por varios canales de regadío que alimentan los predios agrícolas del sector, los cuales en el entorno inmediato del pozo tienen superficies cercanas a 1 hectárea.

El APR El Romeral (SB EROM) se localiza administrativamente en la comuna de San Bernardo, aproximadamente 6 km aguas abajo del APR La Estancilla de Nos. Este APR se encuentra muy cerca del cauce del Río Maipo (250 metros aproximadamente). El sector se compone principalmente de viviendas. Las actividades de mayor relevancia en el territorio para este sector son las relacionadas con la agricultura.

El APR El Cerrillo (BU ECER) se encuentra en la comuna de Buin, en el sector El Cerrillo, específicamente el APR se ubica 100 metros al Oeste del trazado de la carretera Acceso Sur. En el sector se observan principalmente sectores poblados y áreas cultivadas.

El APR Campusano La Estancilla (BU CLES), se localiza en la ribera Sur del Río Maipo, aproximadamente a 1,2 km del cauce de éste. El entorno es preferentemente agrícola, sin advertirse la presencia de actividades extractivas o industriales en la cercanía.

Finalmente, el APR Santa Filomena Las Vertientes (BU SFLV) se localiza en un entorno de hábitat rural con predominio de predios agrícolas, viñedos y frutales. No se observan actividades industriales en el sector.

Otro de los sectores analizado en este sector acuífero es el de Paine, en el cual se monitorearon 8 APR. Estos fueron los siguientes:

- Aparición de Paine (PA ADPA): Este APR se localiza en un sector agrícola, con presencia de viviendas a lo largo del eje de la ruta G-515-H. No se observan actividades industriales o extractivas en el entorno.
- Huelquén (PA HUEL): Este APR se encuentra aproximadamente 6 km al Sur del APR Aparición de Paine, en el eje de la ruta G-515-H, abastece principalmente a las viviendas que se encuentran en el eje de esa ruta. El entorno es fundamentalmente de hábitat rural y agrícola.
- Santa Marta Las Turbinas (PA SMLT): Este APR se localiza a 1,3 km al Sur del APR de Huelquén en el eje de la ruta G-547. El entorno es agrícola y no se observan actividades industriales o mineras en el entorno.
- Cardonal Bajo (PA CBAJ): Se localiza en un sector agrícola, no se observan otras actividades que pudieran afectar a la calidad del agua en el sector.
- Chada (PA CHAD): Este APR se localiza en un entorno agrícola, al Oeste de la localidad de Chada. No se observan actividades industriales o mineras en el sector.
- Colonia Kennedy (PA CKEN): Se localiza en un sector netamente agrícola, no hay actividades industriales o de otro tipo que pudieran afectar al acuífero en este sector.
- Águila Norte – Sur (PA ANSU): Se localiza 500 metros al Oeste de la Ruta 5 Sur, en el extremo Sur del acuífero y límite de la Región Metropolitana de Santiago con la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins. En el sector se observan viviendas y un entorno agrícola y de matorrales.
- Hospital Champa (PA HCHA): Se encuentra inserto en la localidad de Champa, su entorno es preferentemente residencial con algunos sectores de parcelas agro-residenciales y predios de cultivos. Aproximadamente 400 metros al Sur se encuentra el Río Angostura en cuya ribera se observan matorrales y cultivos.

En el sector de El Monte se monitorearon 15 pozos de APR. Los detalles de localización de éstos se presentan a continuación:

- El Rosario Los Olmos (EM ERLO): Se localiza en un sector agro-residencial, donde se observan parcelaciones de 5.000 m² y terrenos agrícolas de cerca de 2 hectáreas hasta fundos de más de 20 hectáreas.
- El Paico Alto (EM EPAL): El pozo monitoreado se localiza en un entorno agrícola y residencial, se observan predios con árboles frutales cuyas dimensiones tienen como promedio 1,5 hectáreas.
- Chiñique (EM CHIÑ): Se localiza en un área residencial a pocos metros de la ruta G-78 que une El Monte con Melipilla. En el entorno se observan sectores

subdivididos en parcelas de 5.000 m² y grandes predios agrícolas que superan las 10 hectáreas.

- Santa Mariana La Manresa (TA SMLM): Se localiza aproximadamente 5 km aguas arriba de la confluencia del río Mapocho con el río Maipo. El sector es fundamentalmente agrícola, ya que los sectores residenciales se encuentran alejados de él. Los sectores residenciales más cercanos son parcelas de 5.000 m² que se encuentran 400 metros al Oeste del pozo. En cuanto a la agricultura presente en el sector, esta se desarrolla en predios de extensiones sobre las 15 hectáreas.
- San Antonio de Naltahua (IM SADN): Se localiza 400 metros al sur del cauce del río Maipo. El entorno es agrícola, además de la presencia de matorrales que se encuentran en el cauce del río. Los sectores residenciales se encuentran aproximadamente a 2 km al sur del pozo. Se observa que los predios agrícolas del entorno están cubiertos principalmente por frutales. Es importante señalar que en los cordones de cerros ubicados al sur del pozo y cuyas quebradas intermitentes drenan hacia éste, hay presencia de faenas mineras, que actualmente no se encuentran operativas. Éstas son las minas El Consuelo, La Brillante y Oro Negro.
- San Vicente de Naltahua (IM SVDN): El pozo se encuentra en un área preferentemente residencial, con mayor densidad de viviendas que otros APR del sector. Hacia el oriente existe mayor actividad agrícola y subdivisiones de terrenos en parcelas de 5.000 m². Hacia el poniente, aproximadamente a 600 metros del pozo se encuentra el antiguo pueblo minero de Naltahua, donde se observa una concentración de residuos mineros principalmente de cobre.
- El Labrador (TA ELAB): Se localiza en un entorno agro-residencial donde se evidencia una menor actividad agrícola y un predominio de parcelaciones residenciales en predios subdivididos.
- Gacitúa (IM GACI): Se localiza en un sector residencial con características prácticamente urbanas por la consolidación de las viviendas, hacia el Sur se observan condominios de parcelas con predios de superficie cercana a los 5.000 m².
- La Islita (IM LISL): Se localiza en un sector residencial densamente habitado, lo cual le entrega características más cercanas a las de las zonas urbanas.
- La Puntilla de Lonquén (IM LPDL): Se localiza 900 metros al poniente del cauce del río Maipo. En su entorno se encuentra la localidad de la Puntilla, que es principalmente residencial y hacia el poniente predomina la actividad agrícola en predios con más de 20 hectáreas de superficie.
- Olea (IM OLEA): Se encuentra localizado en un entorno agro-residencial, observándose que las propiedades más cercanas corresponden a viviendas. Tanto al oriente como al poniente del pozo existen predios agrícolas de extensiones mayores a las 5 hectáreas.
- Villa Las Mercedes (IM VLME): El pozo se localiza en un sector residencial y agrícola. Se observan predios de grandes extensiones de viñedos en este sector, de ellos el más cercano tiene una superficie de más de 80 hectáreas.
- Monte Las Mercedes (IM MLME): El pozo se encuentra en un terreno agrícola, específicamente de viñas, este cultivo predomina en todo el sector. Las zonas

residenciales se encuentran principalmente al oriente y tienen una baja densidad de viviendas. El río Maipo se encuentra a 800 metros al Sur del pozo.

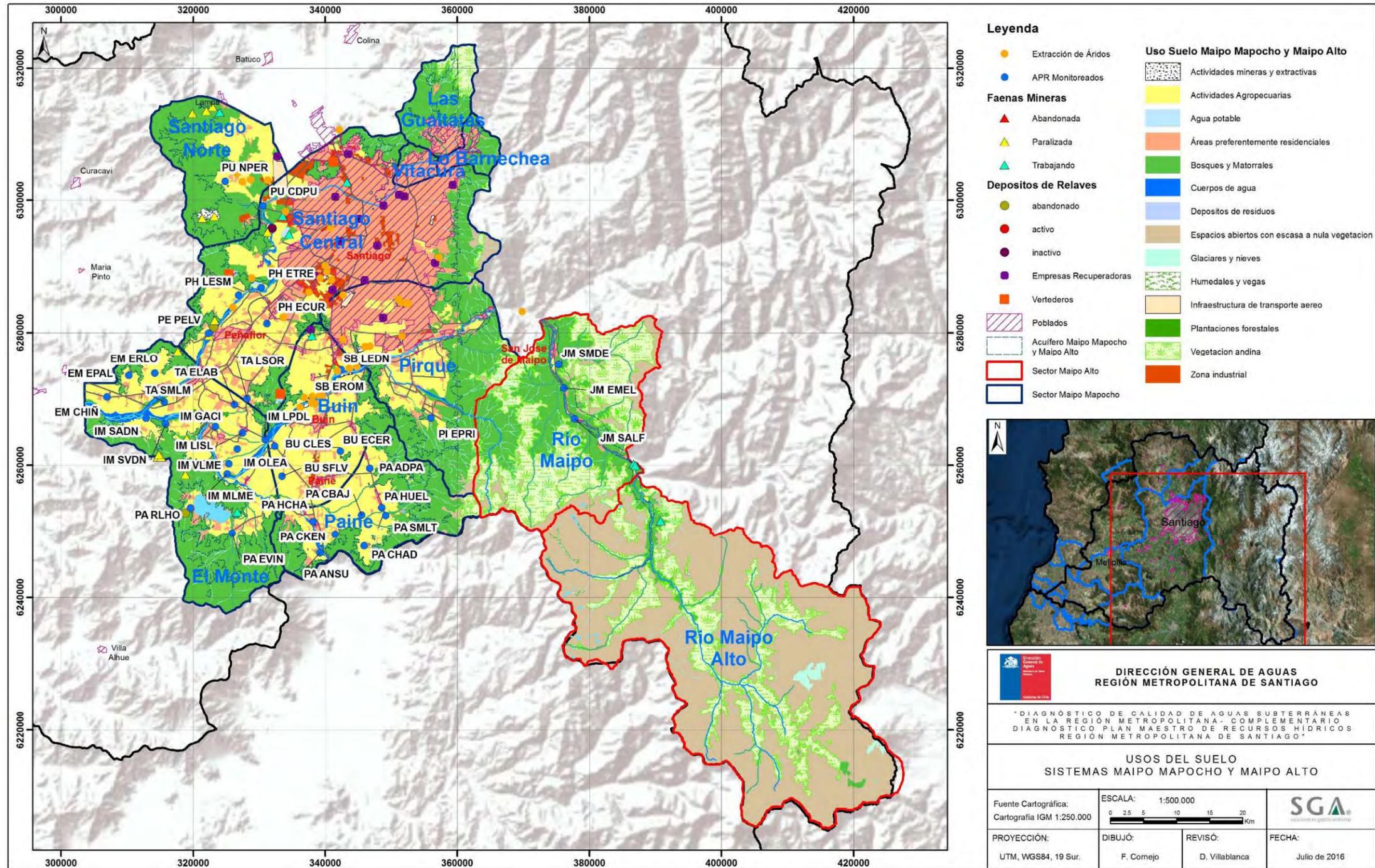
- Rangué Los Hornos (PA RLHO): Se localiza cercano a la Laguna de Aculeo, en un sector de baja densidad de viviendas. En el entorno los predios agrícolas tienen superficies mayores a 10 hectáreas. Es importante destacar la presencia aguas arriba de un depósito de relaves abandonado, de propiedad de la faena minera Los Maquis de Rangué (ex Planta Acúleo).
- El Vínculo (PA EVIN): Se localiza en un sector agro-residencial, donde se observa una mixtura entre el hábitat rural tradicional y sectores donde predominan las subdivisiones de predios en forma de parcelas de agrado, ello debido a la cercanía de este sector con la Laguna de Aculeo.

Sector Acuífero Santiago Sur

Este sector se encuentra en el sector precordillerano y abarca administrativamente parte de la comuna de San José de Maipo. En este sector fueron monitoreados dos pozos, los que se describen a continuación:

- El Melocotón (JM EMEL): Se encuentra en el sector del Melocotón a 40 metros del cauce del río Maipo. En el sector se observan viviendas y terrenos agrícolas.
- San Alfonso (JM SALF): Se encuentra a 150 metros del río Maipo. En el sector predominan los matorrales y sectores residenciales.

Figura 5-18. Usos del Suelo Sistema Maipo Mapocho y Maipo Alto



Fuente: GORE Región Metropolitana, 2012

5.6.4 Sistema Puangue

El Sistema Puangue abarca administrativamente parte de las comunas de Curacaví, María Pinto y Melipilla. Los sectores acuíferos que se encuentran en este Sistema corresponden a Puangue Alto, Puangue Medio, Puangue Bajo y La Higuera. A continuación, se describe el uso del suelo en el entorno de los APR monitoreados en cada sector acuífero y posteriormente se presenta la Figura 5-19, donde se observa la localización del Sistema, sus sectores acuíferos, los pozos APR monitoreados y los principales usos de suelo y actividades antrópicas.

Sector Acuífero Puangue Alto

En el sector Puangue Alto se monitoreó un APR, el cual correspondió al APR Las Rosas (CU LROS). Este APR se encuentra en la comuna de Curacaví, 50 metros al Sur del Estero Puangue y a 100 metros de la Ruta 68.

El entorno presenta una mezcla entre agroindustria y residencias. A 2 km al Suroeste se encuentran obras mineras de la faena Lo Águila, faena actualmente inactiva. Por encontrarse aguas abajo del punto de captación de este APR, no se considera un riesgo para éste.

Sector Acuífero Puangue Medio

En el sector Puangue Medio fueron monitoreados 12 APR, los cuales están distribuidos uniformemente por todo el acuífero. A continuación, se presentan las principales características del uso del territorio en el sector donde se localiza cada uno de ellos:

- APR Miraflores (CU MIRA): Se encuentra ubicado en el camino que une la Ruta 68 con María Pinto. Los sectores residenciales son difusos y el entorno está predominado por predios agrícolas de superficies superiores a las 5 hectáreas y predios subdivididos en parcelas de 5.000 m² aproximadamente.
- APR Cerrillos (CU CERR): Se encuentra ubicado en el camino que conduce la Ruta 68 hacia la cuesta Barriga. Los sectores residenciales se concentran en el eje de este camino. Las principales actividades que se identifican en el territorio son las residenciales y las agrícolas.
- APR Santa Inés de Patagüilla (CU SIDP): Se encuentra en el sector de Patagüilla en la comuna de Curacaví. El sector residencial se encuentra a lo largo del eje del camino que va hacia la cuesta Barriga. El entorno es agrícola sin advertirse presencia de actividades industriales de otro tipo.
- APR Lo Alvarado (CU LAVL): Esta captación de APR se encuentra en un entorno residencial y de terrenos cultivados. No se observan otros usos del territorio.
- APR Los Rulos (MP LRUL): Se encuentra en un sector poblado, cercano a estación de combustible y parcelas agro-residenciales. También se observan amplios predios cultivados, como por ejemplo el Fundo Los Rulos de más de 270 hectáreas y que se encuentra frente al pozo.

- APR Lo Ovalle (MP LOVA): Ubicado en el sector Lo Ovalle en la comuna de María Pinto. En el entorno predominan los predios agrícolas con algunos sectores residenciales difusos, no se observa otro tipo de actividad industrial.
- APR María Pinto (MP MPIN): Se encuentra ubicado en el límite Norte del área poblada de María Pinto a 20 metros del cauce del Estero Puangue. El entorno es residencial con intercalaciones de predios de uso agrícola, los cuales comienzan a predominar al Oeste del Estero Puangue, donde se observan predios desde las 2 hectáreas de superficie a más de 14 hectáreas.
- APR El Rosario: Se localiza aproximadamente a 2.1 km aguas abajo del APR María Pinto, en la ribera Norte del Estero Puangue. Se inserta en un ámbito agrícola de predios que superan las 5 hectáreas de superficie. La única actividad diferente en el entorno es un campo de golf ubicado a 1 km de distancia al Norte del pozo.
- APR Las Mercedes (MP LMER): Los sectores residenciales alrededor de este pozo se concentran en los ejes de las rutas. Hacia el interior predomina la actividad agrícola. Los predios agrícolas más cercanos al pozo tienen en promedio una superficie de 8 hectáreas.
- APR Chorombo (MP CHOR): Este pozo se localiza en un sector de predios residenciales difusos y principalmente predios cultivados como por ejemplo la Hacienda Chorombo que se encuentra a 100 metros del pozo y que tiene una superficie cultivada que supera las 300 hectáreas.
- APR Ibacache (MP IBAC): De acuerdo a las observaciones realizadas y a la recopilación de antecedentes, en este sector la actividad predominante es la agrícola, además de los sectores de viviendas, las cuales se localizan de manera difusa en el territorio a lo largo de los diferentes caminos existentes.
- APR La Palma (MP LPAL): Este es un sector agrícola, con menor densidad de viviendas, las que se encuentran en mayor densidad a aproximadamente 2 kilómetros del pozo. El entorno se encuentra rodeado de quebradas intermitentes que alimentan el valle donde se sitúa el APR. Existen 2 embalses en las laderas norponiente, pero actualmente se encuentran secos.

Sector Acuífero Puangue Bajo

Respecto del sector Puangue Bajo se monitorearon 5 APR, los cuales se concentran principalmente en el sector central del acuífero. A continuación, se presentan las principales características del uso del territorio en el entorno en que se sitúa cada uno de ellos:

- APR San José de Melipilla (ME SJDM): Se localiza en un sector residencial conformado principalmente por parcelas agro residenciales. El resto del sector presenta uso principalmente agrícola.
- APR Rumay – Campo Lindo (ME RCLI): Se encuentra en una situación similar al anterior, donde predominan las viviendas y predios agrícolas con superficie de entre 1 y 3 hectáreas.
- APR Santa Rosa de Esmeralda (ME SRDE): Se encuentra ubicado entre la Ruta 78 y la Ruta G-78 al poniente de la ciudad de Melipilla. Se observa un sector con predominio de predios agrícolas, además de viviendas las cuales se concentran en el eje de la Ruta G-78, vale decir al Sur de la ubicación del pozo monitoreado.

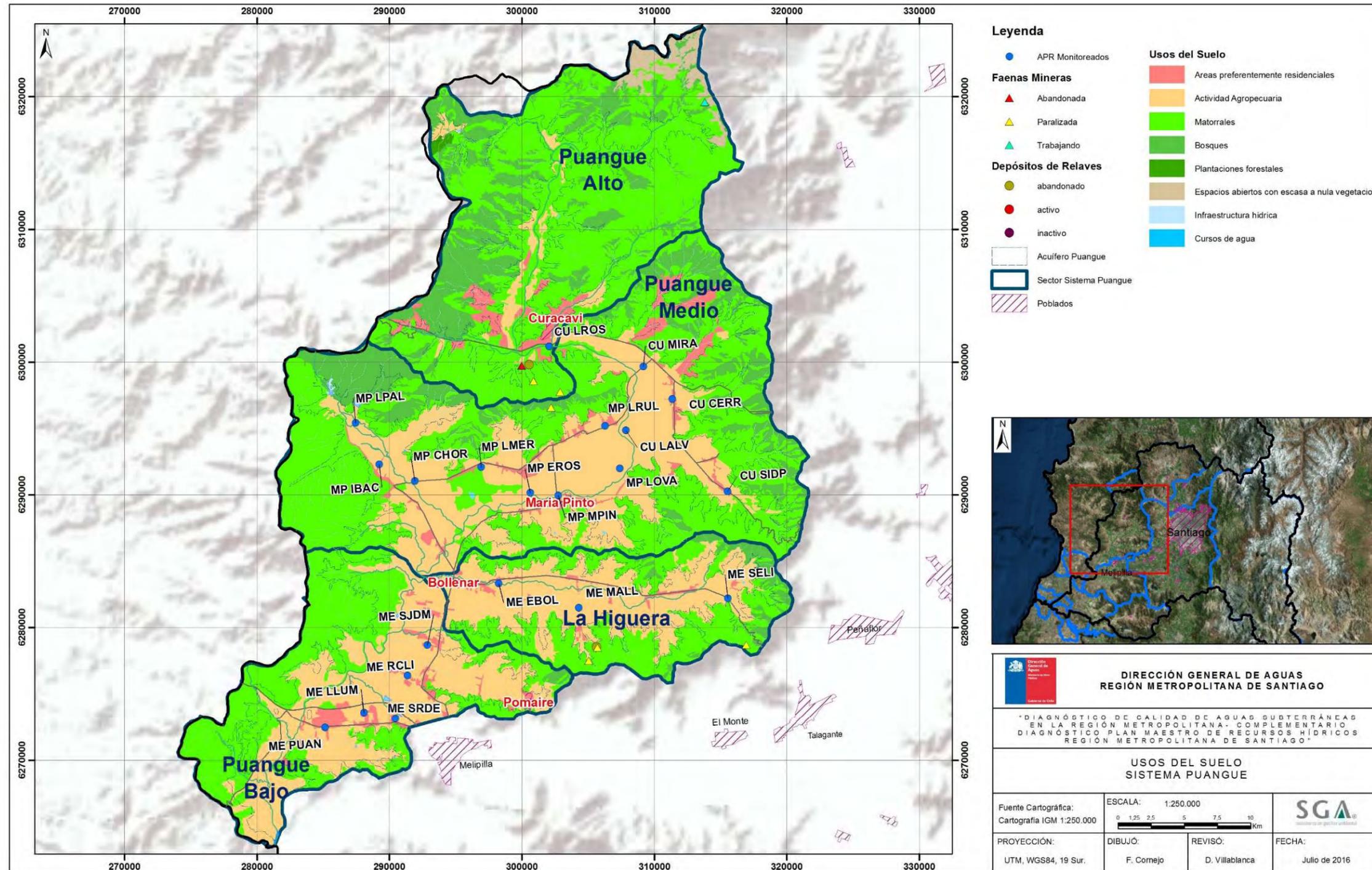
- APR La Lumbrera (ME LLUM): Al igual que el APR anterior, el APR La Lumbrera se localiza entre las Rutas 78 y G-78 (2,3 km al poniente de éste). Las características del entorno también son similares al APR antes mencionado, esto quiere decir que predominan los predios agrícolas de superficies de entre 1 y 5 hectáreas, sectores residenciales rurales tradicionales y subdivisiones de predios en parcelas de menos de 1 hectárea.
- APR Puangue (ME PUAN): Este APR se encuentra en la Ruta G-78. En el entorno existe una mayor densidad de viviendas, sobre todo al Noreste del pozo. El resto son predios cultivados y de agroindustria.

Sector Acuífero La Higuera

En el sector La Higuera se monitoreó tres APR distribuidos por todo el acuífero de manera uniforme. A continuación, se describen las principales características del entorno en que se sitúan los APR visitados:

- APR Santa Elisa (ME SELI): Este APR se localiza en el sector de Mallarauco, en un sector preferentemente agrícola. Aguas arriba, en la cuesta Mallarauco, existe una faena minera subterránea de extracción de oro la cual actualmente no se encuentra en operación (Mina San Daniel).
- APR Mallarauco (ME MALL): Se localiza en un entorno agrícola, donde los sectores residenciales se encuentran muy difusos. En la cabecera de las laderas que drenan hacia este sector por el Sur, se encuentran faenas mineras antiguas de extracción de oro y cobre (Mina La Unión de Melipilla y Mina La Perseguida), además de un depósito de relaves abandonado (Tranque Planta Los Carrera).
- APR El Bollenar (ME EBOL): Se encuentra cercano al cauce del Estero La Higuera en un sector agrícola. Las áreas residenciales se localizan en el eje de la ruta G-80 que se encuentra 270 metros al Norte del pozo.

Figura 5-19. Usos del Suelo Sistema Puangue



Fuente: GORE Región Metropolitana, 2012

5.6.5 Sistema Melipilla

El Sistema Melipilla abarca administrativamente la comuna de Melipilla y una pequeña porción de las comunas de El Monte, San Pedro y de San Antonio (Región de Valparaíso). Los sectores acuíferos que conforman este sistema son: Melipilla, Cholqui, Popeta y Ulmén. En el sector acuífero Ulmén no hubo monitoreo de pozos de APR.

En el sector acuífero de Melipilla se analizaron cuatro APR. Las características de los usos de territorio en que se insertan, se describen a continuación:

- APR La Vega (APR LVEG): El pozo se encuentra en la ribera sur del Río Maipo. El entorno es agrícola con baja densidad de viviendas. Los predios más cercanos tienen superficies sobre las 5 hectáreas.
- APR Huechún Bajo (ME HBAJ): El pozo monitoreado se encuentra en la ribera norte del Río Maipo, después de la confluencia del Río Mapocho con éste. Específicamente se encuentra a aproximadamente 250 metros del cauce actual. El entorno es fundamentalmente agrícola, la mayor densidad de viviendas se localiza a 1,1 km al Norte del pozo.
- APR Codigua El Esfuerzo (ME CEES): Este pozo de APR se encuentra localizado en el sector de Codigua, aproximadamente a 1 km al Norte de la ruta G-668. El entorno inmediato está compuesto por parcelas menores a 1 hectárea que tienen como principal uso el agrícola y el residencial.
- APR San Valentín – La Unión (ME SVLU): Se encuentra ubicado en terrenos agrícolas, las viviendas más cercanas se encuentran a 350 metros del pozo.

En el sector acuífero Cholqui se monitorearon dos pozos de APR, los cuales se encuentran ubicados en el centro del acuífero. El detalle de las características del territorio en que se insertan se presenta a continuación:

- APR La Viluma (ME LVIL): Este APR se localiza en el sector denominado La Viluma. Se trata de un sector residencial rodeado de grandes fundos agrícolas. De ellos el más cercano es el Fundo La Viluma que tiene más de 200 hectáreas.
- APR Cholqui Manantiales (ME CMAN): Este pozo se encuentra 5 km al Oeste del APR La Viluma y tiene características del uso del territorio similares. La principal diferencia es que en la cabecera del Estero Cholqui se encuentra la mina "Las Abuelitas" actualmente en funcionamiento.

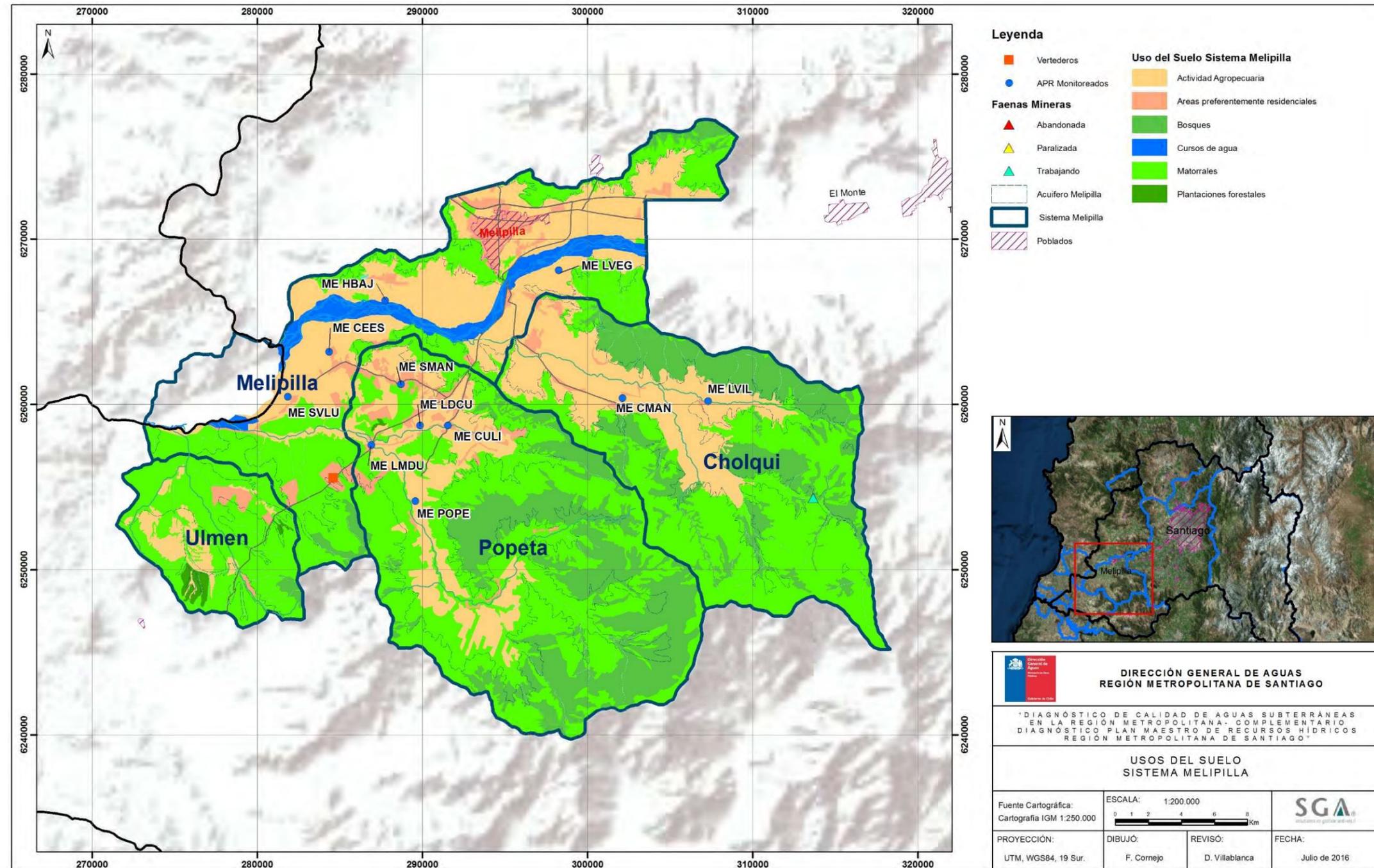
En el sector Popeta se monitorearon 5 APR los que se localizan en el sector Norte del acuífero. A continuación, se presentan las características del sector en que se inserta cada uno de ellos:

- APR San Manuel (ME SMAN): Se encuentra ubicado en la localidad de San Manuel. El sector se caracteriza por la mixtura entre zonas residenciales (ampliamente difuminadas por el sector) y predios agrícolas. No se observa presencia de otro tipo de industrias.
- APR Las Lomas de Culiprán (ME LDCU): El pozo se encuentra en un sector agrícola. Las zonas residenciales se presentan difusas. No se observan otras actividades en el territorio.

- APR Los Maitenes de Ulmén (ME LMDU): Este pozo de APR se localiza entre el Estero Popeta y el Estero Culiprán. El sector aglomera zonas residenciales entorno a la ruta G-60. Alejándose de ese eje, se observa principalmente predios cultivados.
- APR Culiprán (ME CULI): Este pozo se localiza en el sector denominado Culiprán, cercano al cruce del Estero Culiprán con el camino a Los Guindos. Se localiza cercano a viviendas y parcelas que tienen superficies cercanas a una hectárea.
- APR Popeta (ME POPE): Se localiza en el sector de Popeta, aproximadamente a 550 metros del Canal Las Perdices. En este sector el valle fluvial es estrecho por lo cual los predios cultivados son de menor extensión, entre 2 y 5 hectáreas, sobre todo hacia el Oeste del pozo APR en cuestión. Las zonas residenciales se concentran en los ejes de los caminos existentes.

A continuación, se presenta la Figura 5-20 donde se observa la localización del sistema Melipilla, la ubicación de los pozos APR monitoreados y los principales usos y actividades que se desarrollan en el entorno de éstos.

Figura 5-20. Usos del Suelo Sistema Melipilla



Fuente: GORE Región Metropolitana, 2012

5.6.6 Sistema Yali

El Sistema acuífero Yali se encuentra en el sector Suroeste de la Región Metropolitana de Santiago, abarcando principalmente la comuna de San Pedro y parte de la comuna de Santo Domingo, localizada en la Región de Valparaíso. Los sectores acuíferos que conforman este Sistema son Yali Alto, San Vicente, Las Diucas, Yali Medio, Estero Loica, San Pedro y Yali Bajo – El Prado.

El curso superficial principal corresponde al Estero Yali, el cual se alimenta de pequeñas quebradas costeras de régimen pluvial. Geomorfológicamente se encuentra en una zona de transición entre la Cordillera de la Costa y la planicie litoral.

El uso del suelo en este sector se relaciona preferentemente con la actividad agrícola y silvícola. Los asentamientos humanos son dispersos, siendo el principal de ellos la localidad de San Pedro.

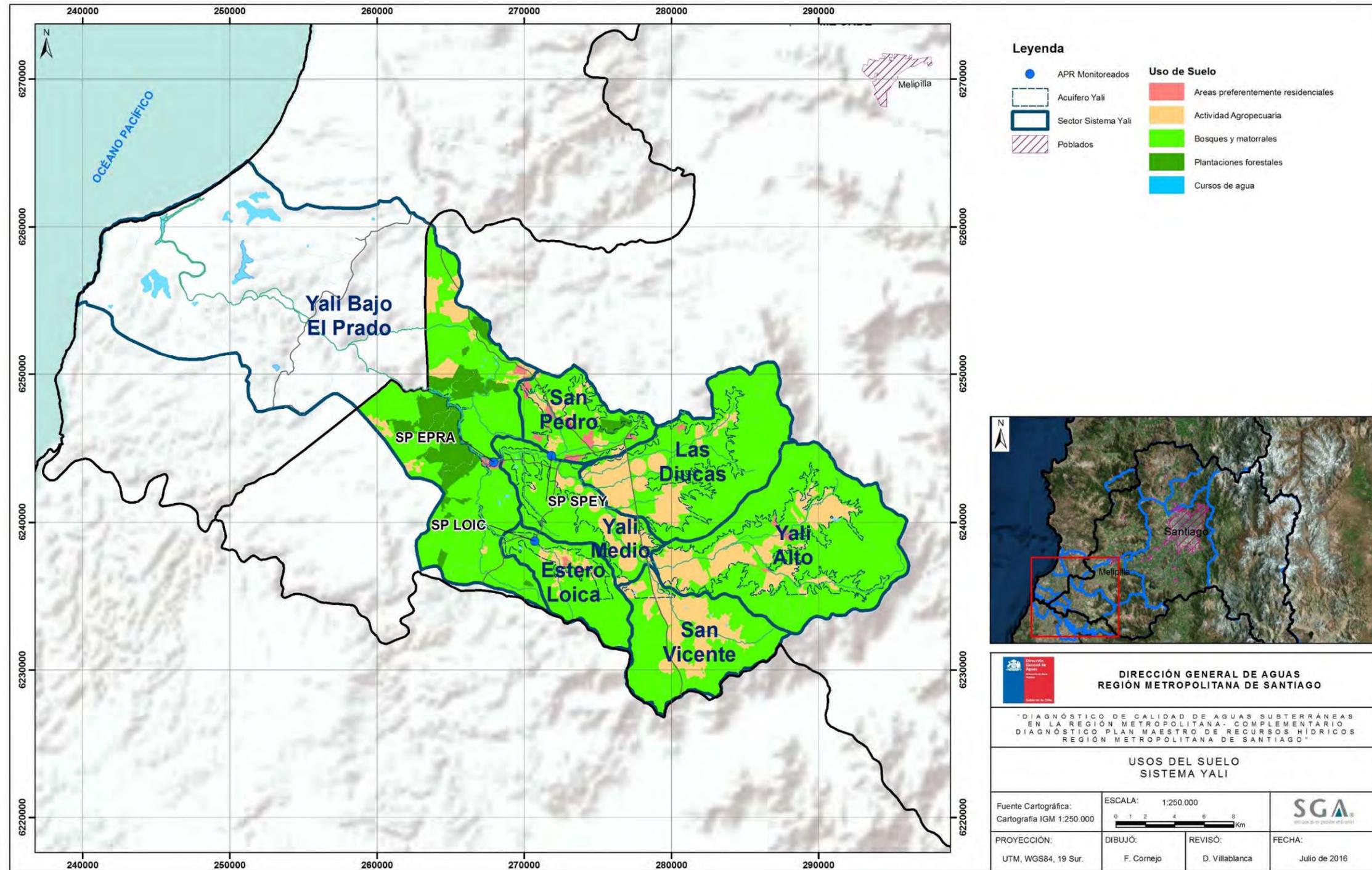
En este acuífero no se presentan actividades de minería, de industrias u otra de esas características.

Los APR monitoreados en este sistema fueron 3, los cuales se encuentran en los sectores acuíferos Estero Loica, San Pedro y Yali Bajo – El Prado. En el resto de sectores acuífero no hubo monitoreo. El detalle se presenta a continuación:

- San Pedro El Yali (SP SPEY): Se localiza en un entorno de suelos agrícolas y praderas de matorrales en las cercanías del cauce del Estero Yali. Los sectores residenciales son difusos y se encuentran alejados del pozo.
- San Pedro Loica (SP LOIC): Se localiza en la ribera del Estero Loica, que es también el sector donde se localizan las áreas residenciales, las cuales tienen baja densidad. En el entorno se observan sectores donde predominan los matorrales y predios agrícolas de superficies menores a 1 hectárea.
- El Prado (SP EPRA): Se encuentra localizado en el sector poblado de El Prado, cercano al Estero Yali. El entorno presenta sectores residenciales y agrícolas, el tamaño de los predios cultivados en el sector es de menos de 1 hectárea.

A continuación, se presenta la Figura 5-21 donde se observa la localización del sistema, la ubicación de los pozos APR monitoreados y los principales usos y actividades que se desarrollan en el entorno de éstos.

Figura 5-21. Usos del Suelo Sistema Yali



Fuente: GORE Región Metropolitana, 2012

5.6.7 Sistema Alhué

El Sistema Acuífero Alhué se localiza al suroeste de la Región Metropolitana de Santiago, administrativamente abarca la comuna de Alhué y parte de la comuna de Las Cabras, ubicada en la Región del Libertador General Bernardo O`Higgins. Se trata de un sector preferentemente rural, en el cual destaca como principal centro poblado la localidad de Alhué.

Geomorfológicamente, este sector se sitúa dentro de la Cordillera de la Costa y en sus cumbres más altas se encuentran Los Altos de Cantillana. Hidrográficamente el sector está marcado por el paso del Estero Alhué, principal curso de agua superficial, cuya alimentación es principalmente pluvial. Este estero desemboca en el embalse Rapel.

Dentro de los principales usos del suelo se encuentran todos aquellos relacionadas con las actividades agrícolas, encontrándose esta actividad extendida a lo largo del valle del Estero Alhué.

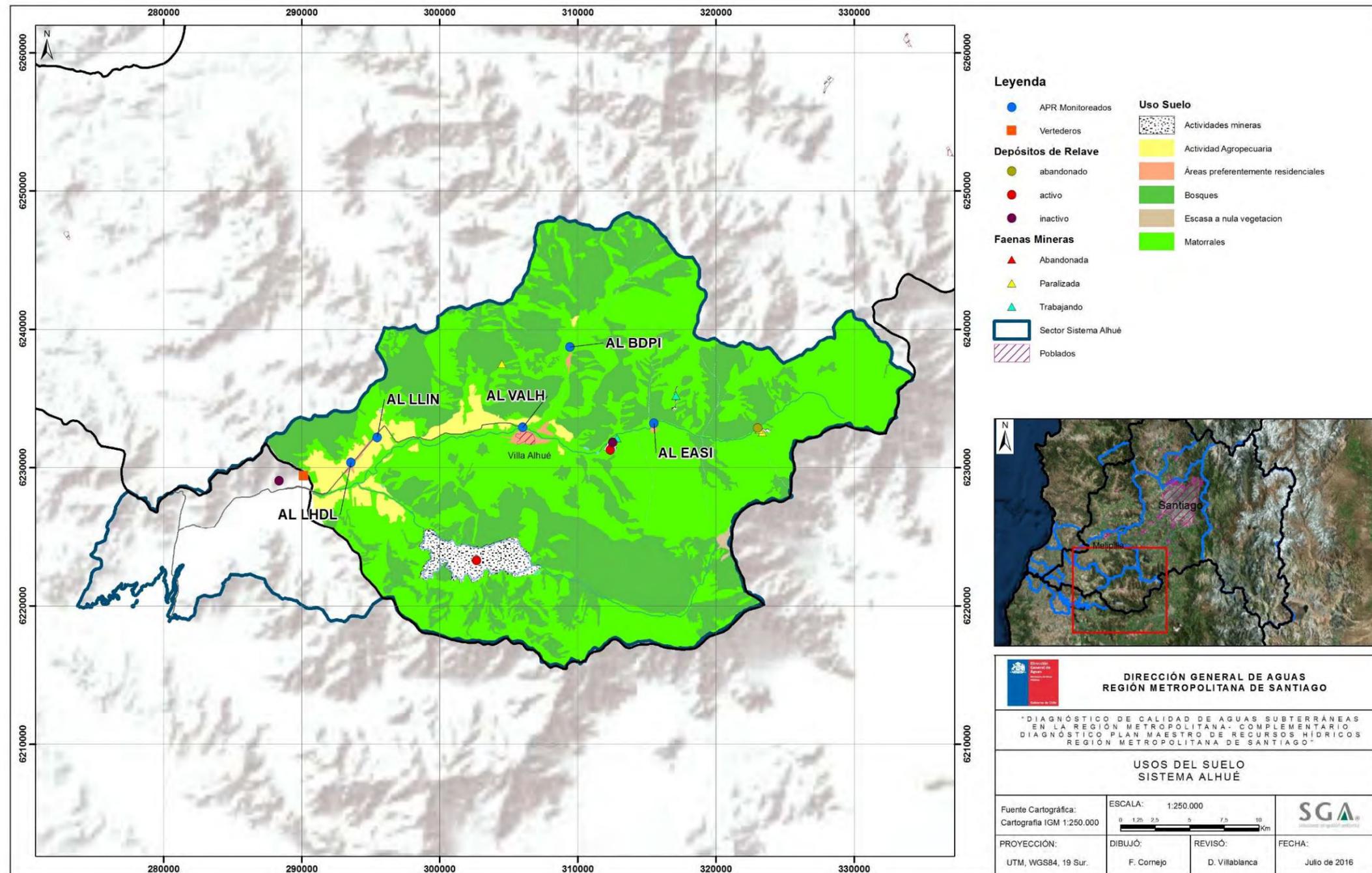
En cuanto a actividades industriales se concentra en este territorio una importante actividad minera, la cual se compone de explotaciones propiamente tal y también la localización de depósitos de relaves. Entre las principales explotaciones se encuentran las que realiza Minera La Florida Ltda. y entre los depósitos de relaves de mayor relevancia se encuentran dos actualmente activos que corresponden a la propia Minera La Florida Ltda. y al Embalse Carén de propiedad de CODELCO – División El Teniente.

La localización de los diferentes APR dentro del acuífero muestra que uno de ellos, APR El Asiento (AL-EASI), se localiza aguas abajo de un depósito de relaves abandonado de propiedad de SCM Tambillos. Luego, los APR de Villa Alhué (AL VALH), La Línea (AL LLIN) y Las Hijuelas de Loncha (AL HDL) se encuentran aguas abajo de un depósito de relaves inactivo y de uno activo, ambos de propiedad de Minera La Florida Ltda. El único APR en este sector que no se encuentra aguas abajo de este tipo de obras mineras es el de Barrancas de Pichi (AL BDPI), el cual se encuentra en un entorno donde predominan los matorrales.

En cuanto a otros usos del suelo, el APR Villa Alhué se encuentra en la ribera del Estero Alhué dentro de la zona poblada y los otros en zonas preferentemente agrícolas.

A continuación, se presenta la Figura 5-22, en la cual se observa la localización del Sistema Alhué, los pozos APR monitoreados y los principales usos y actividades antrópicas identificadas en el territorio.

Figura 5-22. Usos del Suelo Sistema Alhué



Fuente: GORE Región Metropolitana, 2012

6 METODOLOGÍA

6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS Y POZOS DE MONITOREO

A continuación, se entrega el listado de los 104 pozos APR considerados para su muestreo en el marco de este estudio. En la Tabla 6-1, se entregan los nombres de cada pozo, la provincia y comuna a la que pertenecen y se indican las siglas y códigos de cada sistema APR que utiliza la DGA.

La Figura 6-1, muestra la ubicación de estos 104 sistemas APR de la Región Metropolitana de Santiago.

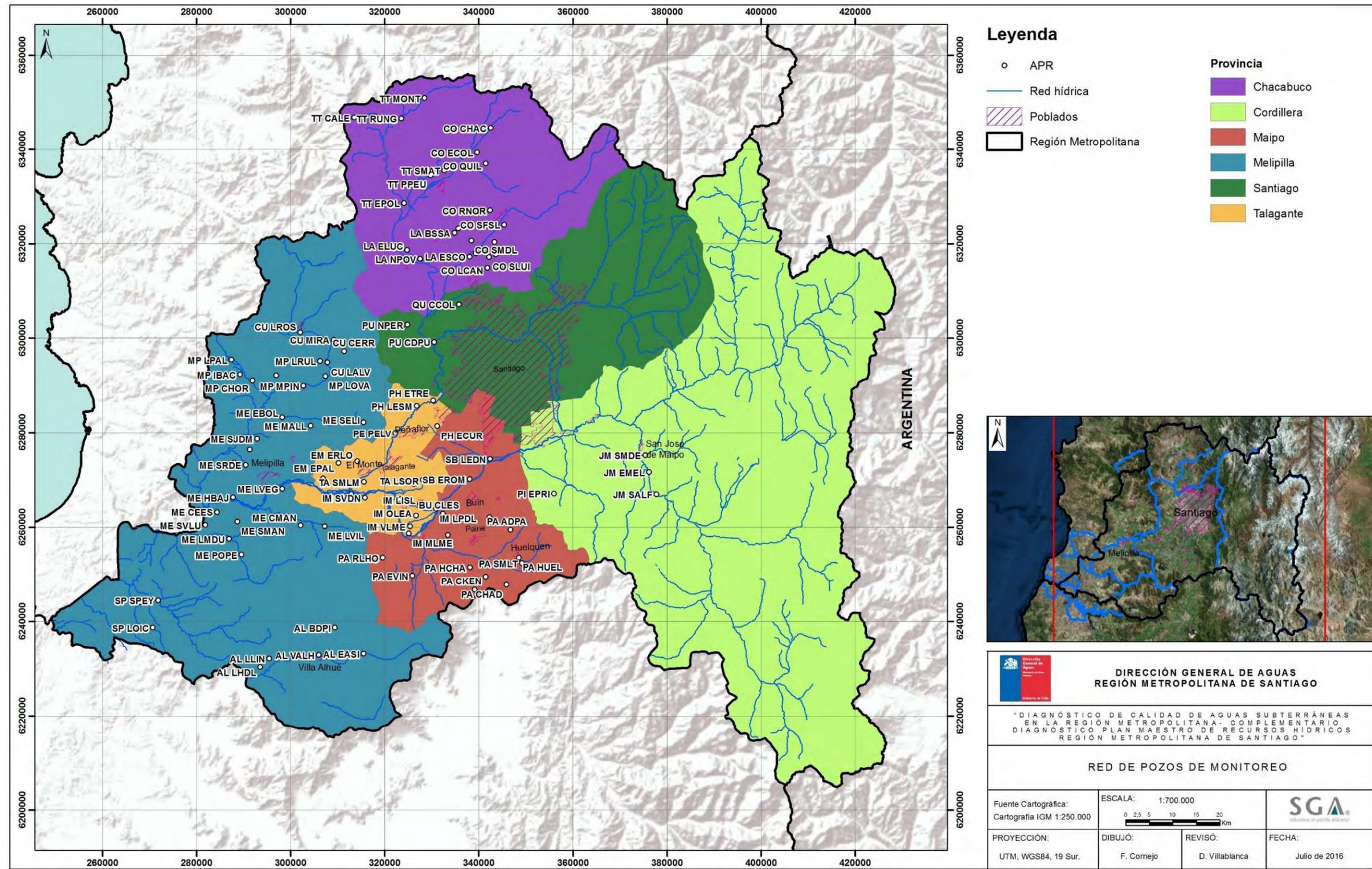
Tabla 6-1. Listado de servicios APR para monitoreo y diagnóstico de calidad de aguas, Región Metropolitana de Santiago

N°	PROVINCIA	COMUNA	SERVICIO	SIGLA	CODIGO		
1	CHACABUCO	COLINA	CHACABUCO	CHAC	1301 CO CHAC -		
2			CO	EJEMPLO CAMPESINO	ECAM	1301 CO ECAM -	
3			CO	EL COLORADO	ECOL	1301 CO ECOL -	
4			CO	HERMANOS CARRERA	HCAR	1301 CO HCAR -	
5			CO	LAS CANTERAS	LCAN	1301 CO LCAN -	
6			CO	LOS DIECISIETE	LDIE	1301 CO LDIE -	
7			CO	MANUEL RODRIGUEZ	MROD	1301 CO MROD -	
8			CO	QUILAPILUN	QUIL	1301 CO QUIL -	
9			CO	REINA NORTE	RNOR	1301 CO RNOR -	
10			CO	SANTA FILOMENA- SAN LUIS	SFSL	1301 CO SFSL -	
11			CO	SANTA LUISA	SLUI	1301 CO SLUI -	
12			CO	SANTA MARTA DE LIRAY	SMDL	1301 CO SMDL -	
13			LA	LAMPA	BATUCO SANTA SARA	BSSA	1301 LA BSSA -
14		LA	EL LUCERO		ELUC	1301 LA ELUC -	
15		LA	ESTACION COLINA		ESCO	1301 LA ESCO -	
16		LA	NUEVO PORVENIR		NPOV	1301 LA NPOV -	
17		TT	TIL TIL	CALEU	CALE	1301 TT CALE -	
18		TT		ESPINALILLO	ESPI	1301 TT ESPI -	
19		TT		ESTACION POLPAICO	EPOL	1301 TT EPOL -	
20		TT		HUECHUN DE TIL-TIL	HUEC	1301 TT HUEC -	
21		TT		MONTENEGRO	MONT	1301 TT MONT -	
22		TT		PUNTA PEUCO	PPEU	1301 TT PPEU -	
23		TT		RUNGUE	RUNG	1301 TT RUNG -	
24		TT	SANTA MATILDE	SMAT	1301 TT SMAT -		
25	CORDILLERA	PI	PIRQUE	EPRI	1302 PI EPRI -		
26		JM	SAN JOSE DE MAIPO	EL MELOCOTON	EMEL	1302 JM EMEL -	
27		JM		SAN ALFONSO	SALF	1302 JM SALF -	
28	JM	SANTA MARIA DEL ESTERO	SMDE	1302 JM SMDE -			
29	MAIPO	BUIN	CAMPUSANO -LA ESTANCILLA	CLES	1303 BU CLES -		
30			BU	EL CERRILLO	ECER	1303 BU ECER -	
31			BU	SANTA FILOMENA-LAS VERTIENT	SFLV	1303 BU SFLV -	
32		PAINE	PAINE	AGUILA NORTE- SUR	ANSU	1303 PA ANSU -	
33				PA	APARICION DE PAINE	ADPA	1303 PA ADPA -
34				PA	CARDONAL BAJO	CBAJ	1303 PA CBAJ -
35				PA	CHADA	CHAD	1303 PA CHAD -
36				PA	COLONIA KENNEDY	CKEN	1303 PA CKEN -
37				PA	EL VINCULO	EVIN	1303 PA EVIN -
38				PA	HOSPITAL-CHAMPA	HCHA	1303 PA HCHA -
39				PA	HUELQUEN	HUEL	1303 PA HUEL -
40				PA	RANGUE LOS HORNOS	RLHO	1303 PA RLHO -
41				PA	SANTA MARTA- LAS TURBINAS	SMLT	1303 PA SMLT -
42		SB	SAN BERNARDO	EL ROMERAL	EROM	1303 SB EROM -	
43		SB		LA ESTANCILLA DE NOS	LEDN	1303 SB LEDN -	

Tabla 6.1. (Continuación) Listado de Pozos APR para monitoreo y diagnóstico de calidad de aguas, Región Metropolitana de Santiago

44	TALAGANTE	EM	EL MONTE	CHIÑIHUE	CHIÑ	1304 EM CHIÑ -
45		EM		EL PAICO ALTO	EPAL	1304 EM EPAL -
46		EM		EL ROSARIO-LOS OLMOS	ERLO	1304 EM ERLO -
47		IM	ISLA DE MAIPO	GACITUA	GACI	1304 IM GACI -
48		IM		LA ISLITA	LISL	1304 IM LISL -
49		IM		LA PUNTILLA DE LONQUEN	LPDL	1304 IM LPDL -
50		IM		MONTE LAS MERCEDES	MLME	1304 IM MLME -
51		IM		OLEA	OLEA	1304 IM OLEA -
52		IM		SAN ANTONIO DE NALTAHUA	SADN	1304 IM SADN -
53		IM		SAN VICENTE DE NALTAHUA	SVDN	1304 IM SVDN -
54		IM		VILLA LAS MERCEDES	VLME	1304 IM VLME -
55		PH	PADRE HURTADO	EL CURATO	ECUR	1304 PH ECUR -
56		PH		EL TREBAL	ETRE	1304 PH ETRE -
57		PH		LA ESPERANZA - SANTA MONICA	LESM	1304 PH LESM -
58		PE	PEÑAFLOR	PELVIN	PELV	1304 PE PELV -
59		TA	TALAGANTE	EL LABRADOR	ELAB	1304 TA ELAB -
60		TA		LONQUEN - SORRENTO	LSOR	1304 TA LSOR -
61		TA		SANTA MARIANA LA MANRESA	SMLM	1304 TA SMLM -
62		MP		MARIA PINTO	CHOROMBO	CHOR
63		MP	EL ROSARIO		EROS	1305 MP EROS -
64	MP	IBACACHE	IBAC		1305 MP IBAC -	
65	MP	LA PALMA	LPAL		1305 MP LPAL -	
66	MP	LAS MERCEDES	LMER		1305 MP LMER -	
67	MP	LO OVALLE	LOVA		1305 MP LOVA -	
68	MP	LOS RULOS	LRUL		1305 MP LRUL -	
69	MP	MARIA PINTO	MPIN		1305 MP MPIN -	
70	AL	ALHUE	BARRANCAS DE PICHÍ	BDPI	1305 AL BDPI -	
71	AL		EL ASIENTO	EASI	1305 AL EASI -	
72	AL		LA LINEA	LLIN	1305 AL LLIN -	
73	AL		LAS HIJUELAS DE LONCHA	LHDL	1305 AL LHDL -	
74	AL	VILLA ALHUE	VALH	1305 AL VALH -		
75	CU	CURACAVÍ	CERRILLOS	CERR	1305 CU CERR -	
76	CU		LAS ROSAS	LROS	1305 CU LROS -	
77	CU		LO ALVARADO	LALV	1305 CU LALV -	
78	CU		MIRAFLORES	MIRA	1305 CU MIRA -	
79	CU	SANTA INES DE PATAGUILLAS	SIDP	1305 CU SIDP -		
80	ME	MELIPILLA	CHOLQUI MANANTIALES	CMAN	1305 ME CMAN -	
81	ME		CODIGUA-EL ESFUERZO	CEES	1305 ME CEES -	
82	ME		CULIPRAN	CULI	1305 ME CULI -	
83	ME		EL BOLLENAR	EBOLL	1305 ME EBOLL -	
84	ME		HUECHUN BAJO	HBAJ	1305 ME HBAJ -	
85	ME		LA LUMBRERA	LLUM	1305 ME LLUM -	
86	ME		LA VEGA	LVEG	1305 ME LVEG -	
87	ME		LA VILUMA	LVIL	1305 ME LVIL -	
88	ME		LAS LOMAS DE CULIPRAN	LDCU	1305 ME LDCU -	
89	ME		LOS MAITENES DE ULMEN	LMDU	1305 ME LMDU -	
90	ME		MALLARAUCO	MALL	1305 ME MALL -	
91	ME		POPEA	POPE	1305 ME POPE -	
92	ME		PUANGUE	PUAN	1305 ME PUAN -	
93	ME		RUMAY- CAMPO LINDO	RCLI	1305 ME RCLI -	
94	ME	SAN JOSE DE MELIPILLA	SJDM	1305 ME SJDM -		
95	ME	SAN MANUEL	SMAN	1305 ME SMAN -		
96	ME	SAN VALENTIN-LA UNION	SVLU	1305 ME SVLU -		
97	ME	SANTA ELISA	SELI	1305 ME SELI -		
98	ME	SANTA ROSA DE ESMERALDA	SRDE	1305 ME SRDE -		
99	SP	SAN PEDRO	EL PRADO	EPRA	1305 SP EPRA -	
100	SP		LOICA	LOIC	1305 SP LOIC -	
101	SP		SAN PEDRO - EL YALI	SPEY	1305 SP SPEY -	
102	SANTIAGO	PU	CASAS DE PUDAHUEL	CDPU	1306 PU CDPU -	
103		PU	NOVIADO - PERALITO	NPER	1306 PU NPER -	
104		QU	QUILICURA	CCOL	1306 QU CCOL -	

Figura 6-1. Red de 104 servicios APR para monitoreo y diagnóstico de calidad de aguas subterráneas en la Región Metropolitana de Santiago



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra una descripción de cada campaña y de los pozos que se monitorearon en cada una de ellas se describe a continuación.

Se destaca que para el muestreo y diagnóstico de cada sistema APR, únicamente se consideró una captación, aunque el sistema dispusiera de más pozos operativos para el abastecimiento de agua potable a la población.

Para la selección del punto de monitoreo, en aquellos APR que disponían de más de una captación, se utilizaron criterios hidrogeológicos, que incluyeron la profundidad del pozo, profundidad del nivel freático y características de las cribas. Esta información se obtuvo en terreno, siendo proporcionada por el operador del APR. En todos los casos, se priorizó aquellos pozos de menor profundidad, cuyos niveles freáticos tienden a ser más someros y más vulnerables a afectaciones al acuífero.

Primera campaña

La primera campaña de terreno llevada a cabo entre los días 5 de Octubre al 4 de Noviembre de 2015, incluyó la visita del total de los 104 servicios APR programados para este estudio. El período efectivo de muestreo fue de 21 días, con un máximo de 8 muestras en una jornada y un mínimo de 4 en los sectores más alejados de la ciudad de Santiago, como es la comuna de Alhué.

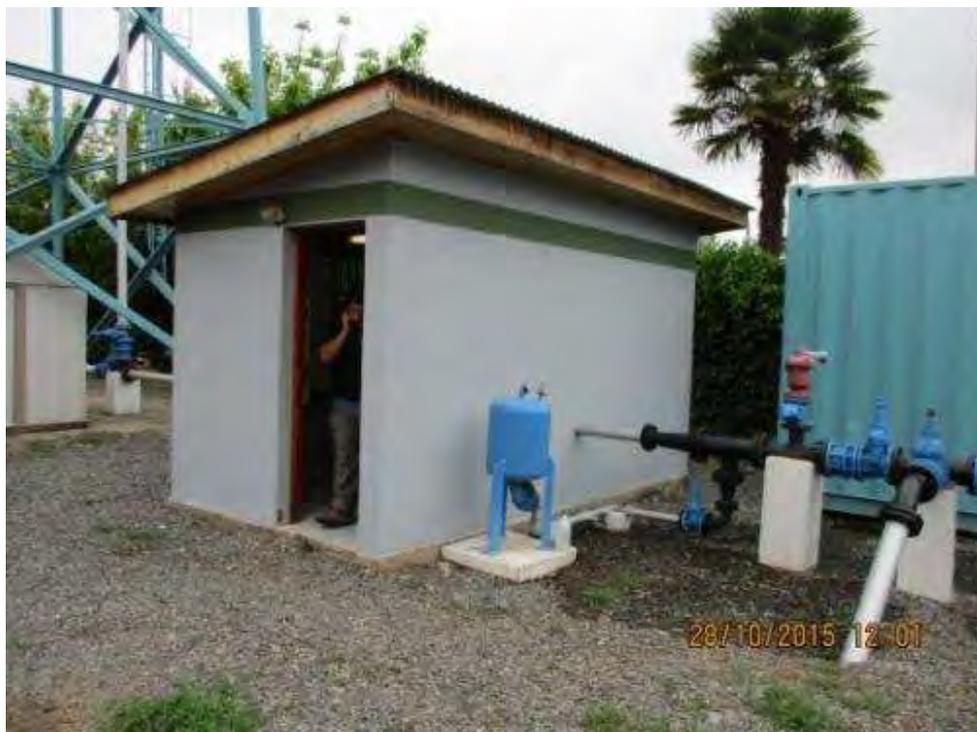
Durante de este monitoreo, se observó lo siguiente:

- Los servicios de APR se abastecen de aguas subterráneas, a excepción del APR Santa María del Estero, ubicada en la comuna de San José de Maipo, Provincia de Cordillera, que se alimenta de agua superficial canalizada desde una vertiente.
- El APR El Colorado, comuna de Colina, Provincia de Chacabuco, dispone de 2 pozos de 80 metros (Pozo 1) y 120 metros (Pozo 2) de profundidad. No obstante, ambos se encontraban secos, por lo que el APR se abastece de agua de pozo de un privado.
- El APR Montenegro, comuna de Til Til, provincia de Chacabuco, dispone de un pozo de 50 metros de profundidad que se encuentra clausurado, por lo que el APR se abastece de agua en camión aljibe.
- El APR La Vega, comuna de Melipilla, Provincia de Melipilla, no posee alimentación eléctrica para el funcionamiento de este servicio.

Como resultado de los 104 servicios APR monitoreados, sólo se obtuvo muestras en 101 de ellos, dado que los pozos APR El Colorado, Montenegro y La Vega no pudieron ser muestreados.

Cabe mencionar que, en algún caso, como es el APR Huelquén, localizado en la Provincia de Maipo, comuna de Paine, el punto más adecuado a los objetivos del estudio (la captación más somera), el pozo La Vega, fue descartado porque la instalación no disponía de toma de muestra de agua cruda para ese punto, siendo substituido por otra captación más profunda (pozo sector Cardonal) del mismo recinto (Fotografía 6-1). No obstante, en la segunda campaña, el pozo del sector La Vega ya disponía de llave de agua cruda, se mantuvo la selección hecha en la primera campaña para establecer una correlación entre los resultados.

Fotografía 6-1. APR Huelquén, comuna de Paine (Sector Cardonal)



Segunda campaña

La segunda campaña se realizó entre los días 22 de febrero y 15 de Marzo de 2016 visitando el total de 104 servicios APR programados. El período efectivo de muestreo fue de 17 días, con un máximo de 7 muestras en una jornada y un mínimo de 5 en los sectores más alejados de la ciudad de Santiago, como es la comuna de Alhué.

En esta segunda campaña, se puede mencionar lo siguiente:

- El APR El Colorado, comuna de Colina, Provincia de Chacabuco, presentó una columna de agua suficiente para el muestreo.
- El APR La Vega, comuna de Melipilla, Provincia de Melipilla, en esta ocasión se encontró operativo, por lo que se logró obtener una muestra representativa del acuífero que abastece a la población.
- El APR Montenegro, comuna de Til Til, Provincia de Chacabuco se mantuvo clausurado y abasteciendo agua a través de camión aljibe.

Como resultado de los 104 servicios APR monitoreados en la segunda campaña, sólo se obtuvo muestras en 103 de ellos, dado que el APR Montenegro se abastece directamente de agua en camión aljibe, por lo que no puede ser utilizado por los objetivos de este estudio.

Las fichas de cada pozo APR con los datos recopilados en ambas campañas están disponibles en el Anexo 4 del presente informe.

6.2 EQUIPOS Y MATERIALES PARA MEDICIONES EN TERRENO

Los equipos y materiales de terreno fueron utilizados para determinar en cada APR los parámetros físico-químicos y la profundidad del agua en el pozo monitoreado.

La medición de niveles se realizó con un pozómetro Geotech midiendo desde la boca del pozo, punto en que el profesional eligió comprobando que éste fuera fijo y permanente en el tiempo. En la Tabla 6-2 se presentan las características del pozómetro utilizado.

Tabla 6-2. Características de instrumento para medición de niveles

EQUIPO	MARCA	MODELO	Nº DE SERIE	CODIGO SGS
POZOMETRO	Geotech	100 mt	5107	10-POZ-06

Se identificó si el nivel a medir correspondía a un nivel estático o dinámico, considerando el propio punto de medición y las condiciones que éste presentó en el momento de la visita a terreno.

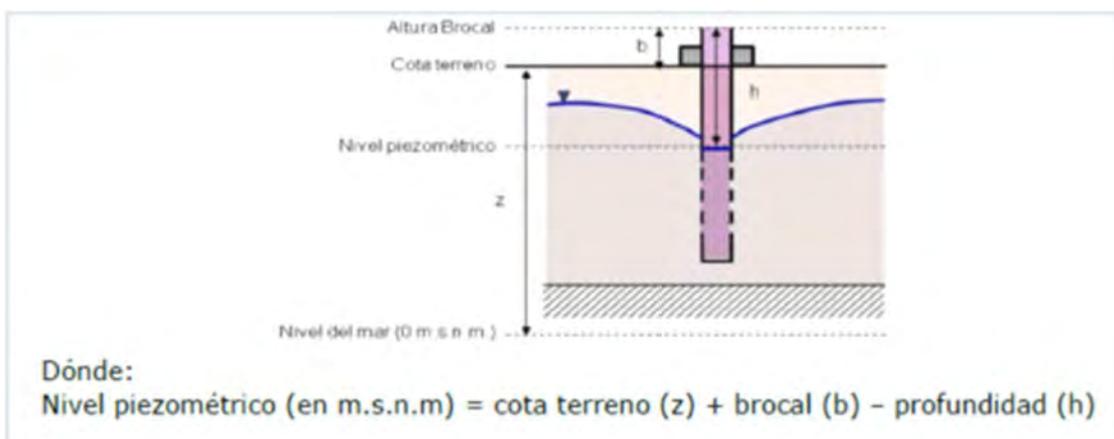
La profundidad del nivel de agua en los pozos se midió en al menos tres oportunidades, verificando que entre cada medida no existiera una diferencia mayor a 1 cm (Fotografía 6-2).

En las respectivas fichas de terreno, se registraron la profundidad del nivel del agua y la altura del brocal (stick up) de cada pozo. En la Figura 6-2 se presenta un esquema referente a estas mediciones.

Fotografía 6-2. Medición de nivel agua en el pozo APR Santa Marta de Liray, Comuna de Colina, Provincia de Chacabuco



Figura 6-2. Esquema medición de la profundidad del agua subterránea



Junto con la medición de niveles, se realizó la medición de parámetros *in situ*, tales como:

- pH
- Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- Potencial REDOX (mV)

Cabe mencionar que los datos de potencial REDOX se determinaron en laboratorio en ambas campañas, y en terreno se midió sólo en la segunda campaña del presente estudio.

El equipo utilizado para este fin se detalla en la Tabla 6-3 y los datos técnicos en el Anexo 7.

Tabla 6-3. Instrumento para medir parámetros físico-químicos *in situ*

EQUIPO	MARCA	MODELO	Nº DE SERIE	CODIGO SGS
MULTIPARAMETRICO	HANNA	HI 991300	N/A	01-MTP-06

Fotografía 6-3. Medición de parámetros físico-químicos en terreno



En cada punto de muestreo se registraron las coordenadas UTM mediante GPS y se tomaron fotografías del pozo, caseta de bombeo, punto de toma de muestra, etc. En la Tabla 6-4 se presentan las características técnicas de los equipos utilizados, y el Anexo 5 del presente estudio se encuentran las fotografías tomadas en cada APR visitado.

Tabla 6-4. Características de equipos de apoyo en terreno

EQUIPO	MARCA	MODELO	Nº DE SERIE	CODIGO SGA
GPS	GARMIN	ETREX10	2DR446192	RH-GPS-05
CÁMARA FOTOGRAFICA	CANON	ELPH160	042061008656	RH-CF-02

6.3 PRESERVACIÓN Y TRANSPORTE DE LAS MUESTRAS

La preservación y el manejo de las muestras se realizaron según las indicaciones del laboratorio certificado para análisis de agua, SGS y laboratorio de la DGA. Las muestras se envasaron en los recipientes entregados por cada laboratorio, los cuales fueron rotulados de forma adecuada, a fin de identificar de manera correcta la muestra y evitar resultados erróneos. También se consideró la aplicación de preservantes de acuerdo a lo establecido por la norma respectiva.

Las muestras se mantuvieron a 4°C hasta su envío al laboratorio encargado de realizar los análisis siguiendo los procedimientos indicados en la Normativa Chilena.

El transporte de las muestras se realizó en las condiciones de embalaje y temperatura recomendadas por el laboratorio para asegurar la calidad de los análisis. Dentro de ellas está el asegurarse sellar y proteger las muestras de manera que no se deterioren ni pierdan parte de su contenido durante el transporte. El material que se utilizó en el transporte para asegurar la temperatura de las muestras fueron cajas Coleman y hielo entregado por el laboratorio SGS Chile Ltda.

6.4 PARÁMETROS QUÍMICOS Y LABORATORIO

Los análisis de las muestras colectadas se realizaron con el laboratorio SGS, que cuenta con la certificación Norma Chilena NCh 17.025, cuyas certificaciones se adjuntan en el Anexo 6 y por el Laboratorio Ambiental de la DGA. Los parámetros analizados por cada laboratorio son los que se indican en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5. Parámetros analizados y laboratorio

Analito	Laboratorio
Cromo (Cr)	
Cianuro (CN ⁻)	
Cloruro (Cl ⁻)	
Fluoruro (F ⁻)	
Nitrato (NO ₃ ⁻)	
Nitrito (NO ₂ ⁻)	
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	SGS
Sodio (Na ⁺)	
Potasio (K ⁺)	
Calcio (Ca ⁺²)	
Amonio (NH ₄ ⁺)	
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	
Fosfato (PO ₄ ⁻³)	
Magnesio (Mg ⁺²)	
Arsénico (As)	
Cobre (Cu)	
Hierro (Fe)	
Mercurio (Hg)	SGS/LADGA
Manganeso (Mn)	
Plomo (Pb)	
Selenio (Se)	
Zinc (Zn)	

Se destaca que los analitos Arsénico, Selenio y Mercurio en la campaña de monitoreo de Octubre de 2015 (primera campaña) fueron determinados en su oportunidad también por el laboratorio SGS, mientras que la segunda campaña éstos fueron realizados en el Laboratorio Ambiental de la DGA.

Las técnicas de análisis aplicadas se realizaron según lo establecido por SISS en el documento "Manual de Métodos de Ensayo para Agua Potable y en las Normas Chilenas NCh-409/1 y NCh-1333".

En la Tabla 6-6 y la Tabla 6-7 se detallan las metodologías de análisis químico según el *Standard Method* (SM).

Tabla 6-6. Metodologías de análisis químico empleados por SGS

Análisis	Metodología
Elementos	SM 3120 B Ed.22, 2012, EPA 200.7, 1994 (Sn)
Cianuro	SM 4500-CN CF Ed.22, 2012
Aniones	SM 4110 B Ed.22, 2012
Amoniaco	SM 4500-NH3 BD Ed.22, 2012
Alcalinidad Total (CaCO3)	SM 2320 B Ed.22, 2012
Fosfato (como Fósforo)	SM 4500-P E Ed.22, 2012

Tabla 6-7. Metodologías de análisis químico empleados por la DGA

Análisis	Metodología
Arsénico	SM 3114B
Cobre	SM 3111B
Hierro	SM 3111B
Mercurio	SM 3112B
Manganeso	SM 3111 B
Plomo	SM 3111 B
Selenio	SM 3114B
Zinc	SM 3111 B

6.5 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFERO SEGÚN ÍNDICE DE CALIDAD

La legislación ambiental chilena no contempla normativas de calidad para las aguas subterráneas sino solamente para determinados usos, como son el Agua Potable o el Agua de Riego. En efecto, las Normas Chilenas 409 y 1333, respectivamente, dictan las concentraciones máximas permitidas para cada elemento y compuesto en las aguas que se destinan a estos usos. Luego, la legislación ambiental considera como aguas contaminadas aquellas que, contrastadas con análisis previos del mismo lugar, han aumentado sus concentraciones químicas producto de una actividad antrópica (directa o indirectamente) como fuente de ese aumento.

Se hace necesario poder clasificar las aguas subterráneas en cuanto a su calidad, para la planificación territorial y particularmente para la gestión del recurso hídrico, para ello existen diferentes índices utilizados en el ámbito internacional, pero en general vinculados a proyectos de investigación o a la gestión de una cuenca en particular.

En Chile, en el año 2009, la DGA licitó un estudio para definir un Índice de Calidad que pudiera ser aplicado para la clasificación de sectores acuíferos en cuanto a la calidad de sus aguas, y que pudiera ser utilizado indistintamente en acuíferos de todo el país con sus particularidades como pueden ser geométricas (acuíferos extensos o encajonados

en quebradas), geológicas (con altas concentraciones de parámetros nocivos para la salud, pero de origen natural), antrópicas (con actividades potencialmente contaminantes diferentes), con o sin intrusión salina, etc. Su resultado fue el estudio S.I.T. N°183 del 2009 llamado "Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos", que diseñó un Índice de Calidad que fue aplicado en tres sectores acuíferos diferentes: Aconcagua, Los Choros y El Loa.

El Índice de Calidad (IC) definido en el estudio mencionado, y que se ha utilizado en el presente trabajo, se basa en los siguientes pilares fundamentales de la aplicación de la metodología:

- Utiliza los resultados de concentraciones químicas del agua subterránea, tanto de parámetros de análisis común como de interés local.
- Compara las concentraciones observadas en el agua subterránea con diferentes normas de calidad.
- Permite la generación y representación espacial y temporal del Índice de Calidad mediante una herramienta de sistemas de información geográfica (SIG).
- Propone utilizar posteriormente el análisis estadístico multivariado para visualizar las agrupaciones y correlaciones de parámetros que posiblemente provienen de una misma fuente.

Se destaca que el análisis estadístico no se realizó en el presente estudio por estar fuera del alcance del mismo, y por considerarse más adecuado realizar este análisis posterior con un mayor número de datos en relación a la temporalidad de la información.

6.5.1 Generalidades y esquema general de la metodología

Tal como se describe en el estudio de referencia, para la aplicación del Índice de Calidad (IC) resulta necesario conocer el medio acuífero evaluado, haciendo especial énfasis en los siguientes aspectos:

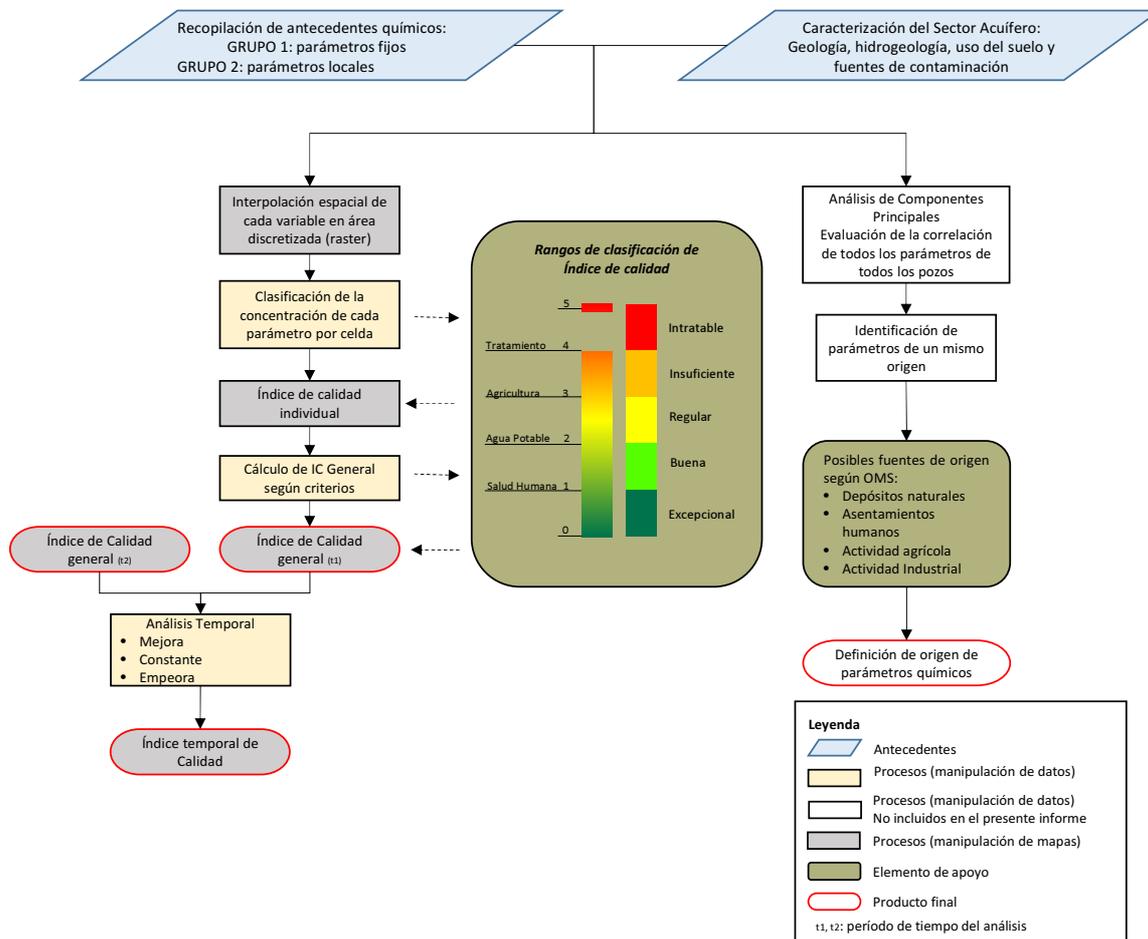
- Identificación y caracterización del medio geológico e hidrogeológico en el que se emplaza la masa de agua, teniendo en consideración la litología, potencia, tipo de acuífero, nivel de explotación, usos del suelo y actividades antrópicas en superficie, así como un análisis de consistencia de datos espacial y temporal y de variables utilizadas.
- La clasificación de la calidad de aguas del acuífero se realiza en base al cálculo de un índice principal único (Índice de Calidad) con categorías cualitativas definidas previamente, que permiten asignar la calidad química a un determinado acuífero, en base a la calidad de sus aguas subterráneas. Este ejercicio es representable en un mapa lo que facilita su interpretación y manejo.
- El Índice de Calidad (IC) es el resultado de la comparación de la concentración de parámetros químicos con normas o referencias oficiales de calidad de aguas respecto a su uso (potable, riego, etc.) y de la consideración de niveles de tratamiento necesarios para corregir una determinada limitación para ese uso. De este modo es posible relacionar los rangos de calidad química del agua con un uso, o potencial uso, de las mismas.

- Mediante el análisis conjunto de la información de calidad química y otras clasificaciones que asocian el origen o explicación de esta calidad se puede complementar el Índice de Calidad, para determinar si la calidad tiene un origen natural o antrópico, industrial, agrícola, procedente de asentamientos humanos, etc.
- Para que los resultados sean comparables a nivel nacional, los parámetros seleccionados en la metodología de cálculo del Índice de Calidad corresponden a parámetros de análisis común, ofreciendo, además, la posibilidad de incluir algunos parámetros específicos de carácter local como podrían ser para determinados sectores el Arsénico, el Boro, el Aluminio, el Hierro, entre otros.
- Es posible realizar la comparación temporal de la calidad química de las aguas de un mismo acuífero, observando los cambios ocurridos en el tiempo, en relación, por ejemplo, al periodo anterior o la línea base.
- Para facilitar la comprensión e interpretación, los resultados del Índice de Calidad se representan en mapas que permiten la lectura también de personas no especialistas.

A continuación, se resume de manera general el esquema metodológico (Figura 6-3) utilizado para el cálculo de los Índices de Calidad por pozo y sector acuífero, levemente modificada del estudio DGA (2009).

Se destaca que el procesamiento de la información y los diferentes cálculos que realiza la metodología, se ejecutan a través de un sistema SIG para la interpolación de variables, y visualización en mapas de resultados, tanto intermedios como finales.

Figura 6-3. Esquema metodológico determinación Índice de Calidad



Fuente: Modificado de DGA, 2009

6.5.2 Cálculo del Índice de Calidad

La metodología de clasificación de aguas en cuanto a su calidad incluye trabajar con dos grupos de parámetros químicos (Figura 6-3).

El primer grupo corresponde a un conjunto de 7 parámetros químicos fijos (Grupo 1), que son los Sólidos Disueltos Totales (SDT), el Magnesio (Mg^{2+}), los Cloruros (Cl^-), el Sulfato (SO_4^{2-}), el Calcio (Ca^{2+}), el Sodio (Na^+) y los Nitratos (NO_3^-). Las concentraciones de estos parámetros permiten calcular un Índice de Calidad (IC) intermedio comparable con la calidad química de los diferentes acuíferos en idénticas condiciones.

El segundo grupo corresponde a un conjunto de 2 parámetros variables (Grupo 2), que permite dar cuenta de las características propias de cada sector acuífero del país (DGA, 2009). Es decir, son parámetros que destacan en el acuífero en estudio, como podrían ser en determinados casos el Arsénico, o el Hierro, y por ello también han sido denominados "parámetros locales".

Para el cálculo del Índice de Calidad (IC) se requiere que inicialmente la información química sea evaluada mediante el balance iónico, límites de detección y valores anómalos, lo que permitirá trabajar con datos confiables y establecer comparaciones con normativas vigentes, tanto a nivel nacional como internacional. Esto, además de considerar su temporalidad y la unidad hidrogeológica de interés, con el fin de confeccionar mapas que permitan realizar un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas a través del IC por pozo y por sector acuífero.

Los pasos para el cálculo del Índice de Calidad son los siguientes:

Generación de mapas de concentración

La interpolación espacial utilizada es el resultado del proceso de manipular información espacial, con el fin de extraer información nueva y significativa a partir de los valores o datos conocidos.

Para el caso del estudio se usaron las herramientas de interpolación espacial de datos puntuales, utilizando los valores de concentración de parámetros químicos en los puntos de muestreo (pozos APR).

Existen distintos métodos de interpolación que pueden ser utilizados, siempre bajo la hipótesis que la concentración de los parámetros físico-químicos es continua en el espacio y que posee correlación espacial. El método de interpolación debe ser elegido bajo criterio experto, tomando en cuenta al menos los siguientes aspectos:

- Cantidad y ubicación de los puntos muestreados.
- Superficie del acuífero.
- Tamaño de la celda de interpolación.
- Relación entre los valores de la medición entre muestras cercanas.
- Geometría del acuífero y consideración de barreras naturales hidrogeológicas.
- Consideraciones especiales por diferencias de acuíferos muestreados.

El método utilizado en este estudio según los aspectos antes descritos, corresponde al *Spline with barriers*, es decir, interpolación con características determinísticas con un análisis a escala más local, en relación a los puntos de muestreo. La selección del método es producto de la compleja geometría de los acuíferos estudiados, debido a la presencia de encajonamientos, cerros isla, etc. Esto, con el fin de obtener los archivos "raster" con las concentraciones para cada parámetro.

Índice de calidad individual por parámetro

Después de generar los archivos "raster" se debe calcular el Índice de Calidad Individual (IC individual) para cada uno de los parámetros, fijos y locales. Este se obtiene mediante la interpolación lineal de las concentraciones, contrastadas con los valores de corte definidos para cada parámetro (VC1, VC2, VC3 y VC4) obteniendo un IC individual de valor discreto, entre 1 y 5, que corresponden a las 5 categorías de calidad del parámetro, de mejor a peor, respectivamente (ver Figura 6-4).

Estas cinco categorías de calidad corresponden a diferentes condiciones cualitativas de la calidad del agua subterránea, basadas en valores límites (valores de corte entre categorías) provenientes de normativas vigentes y/o recomendaciones sanitarias, tal como se presenta a continuación.

Valor de corte 1 (VC1) define la concentración máxima de calidad Excepcional (C1). Se define en base a recomendaciones de concentración máxima de un parámetro químico, que toma en cuenta la salud humana o bien la aceptabilidad del Agua Potable dada por su sabor. Por lo tanto, toma concentraciones que aseguran la no afectación a la salud humana o su percepción de las características organolépticas del agua que consume.

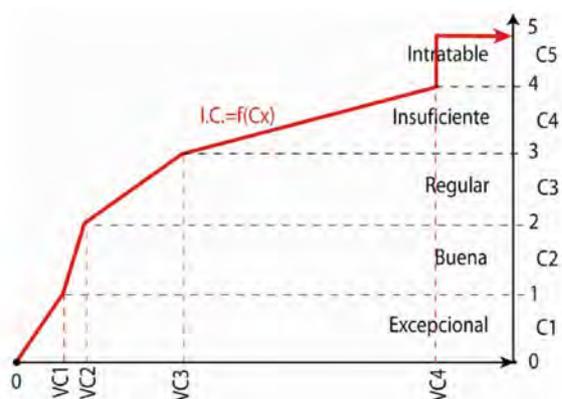
Valor de corte 2 (VC2) define la máxima concentración para la calidad Buena (C2). Se define en base a las exigencias sobre las características de concentración máxima permitida en el Agua Potable por una normativa legal. En este caso, la principal referencia es la normativa chilena respecto a los requisitos del Agua Potable, NCh409/1. Of2005.

Valor de corte 3 (VC3) define la máxima concentración de calidad Regular (C3). Se define en base a recomendaciones y/o especificaciones de concentración máxima de parámetros en el agua subterránea para ser utilizada en la actividad agrícola. La referencia principal proviene de la Water Quality for Agriculture de la FAO (FAO, 1994).

Valor de corte 4 (VC4) define la máxima concentración de calidad Insuficiente (C4). Se define como la concentración máxima de un cierto compuesto o elemento químico presente en el agua subterránea, de modo que permita ser tratada y alcanzar la calidad de Agua Potable definida por la normativa establecida. La estimación de este valor depende de las tecnologías de tratamiento disponibles y de su efectividad de remoción de cada parámetro, considerando aspectos técnicos y económicos.

En el presente estudio, los valores de corte son los definidos por la DGA (2009) para determinar el Índice de Calidad (IC), tanto general de un pozo como de un sector acuífero.

Figura 6-4. Cálculo Índice de Calidad mediante interpolación lineal entre clases



Fuente: DGA, 2009

Cálculo del IC general

A partir de los IC individuales se calcula posteriormente el Índice de Calidad general (IC general) del pozo y sector acuífero mediante la aplicación de los siguientes criterios (Tabla 6-8):

Tabla 6-8. Criterios para establecer el IC general

Condición IC individual		Resultado IC general	Expresión
Si existe un parámetro con IC intratable	→	IC general es Intratable	<i>Si algún $IC_{individual} = 5$ entonces $IC_{general} = 5$</i>
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente	→	IC general es el peor IC individual de todos los parámetros	<i>Si algún $IC_{individual}$ cumple $1 < IC < 4$ entonces $IC_{general} = \max IC_{individual}$</i>
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, presentan un IC Excepcional	→	IC general es Excepcional	<i>Si todos los $IC_{individual} = 1$ entonces $IC_{general} = 1$</i>

Fuente: modificado DGA, 2009

Respecto a la metodología presentada en el estudio DGA (2009) se realiza una modificación a la tercera condición que se presenta en la Tabla 6-8, en cuanto a que todos los IC individuales que presentan una clase Excepcional tienen un valor IC general igual a 1 o Excepcional. En cambio, la metodología original realizaba el promedio de los IC individuales comprendidos entre 0 y 1, siendo el resultado de la operación discretizado y representado con el mismo valor (igual a 1) en el mapa final de IC general obtenido con la modificación. Esto se ha realizado de manera de simplificar los cálculos del IC general, pero obteniendo los mismos resultados que la metodología original de DGA (2009).

El IC General presenta valores entre 1 y 5, y por lo tanto su representación espacial es discretizada en estas 5 clases, que corresponden a: Excepcional, Buena, Regular, Insuficiente e Intratable.

El significado de cada una de estas categorías y cómo se han definido se explica a continuación:

IC Excepcional

- Permite asegurar que, entre los parámetros seleccionados, ninguno afecta a la salud humana o su percepción de las características organolépticas.
- Considerando los parámetros seleccionados, el agua es apta para el consumo humano.
- La calidad del agua, cumple en general con la normativa de calidad de Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) que en general es más estricta que la Norma Chilena de Agua Potable NCh409.
- Referencia principal: OMS (Guidelines for Drinking-water Quality).

IC Buena

- Permite asegurar que, entre los parámetros seleccionados, ninguno afecta a la salud humana o su percepción de las características organolépticas.
- Considerando los parámetros seleccionados, el agua es apta para el consumo humano.
- La calidad del agua, cumple en general con la normativa chilena de calidad de Agua Potable (NCh409/1.Of. 2005).
- Referencia principal: Norma Chilena de Agua Potable (NCh409/1. Of2005).
- Referencia complementaria: OMS, USEPA, Consejo de la Unión Europea.

IC Regular

- El agua no es apta para el consumo humano, pero puede ser utilizada para el agua de riego.
- Referencia principal: FAO (Water Quality for Agriculture).
- Referencia complementaria: Norma Chilena de Riego (NCh1333/Of.78).

IC Insuficiente

- El agua no es apta ni para el consumo humano ni para el riego agrícola.
- Alguno de los parámetros considerados en la metodología no cumple con la legislación nacional e internacional de calidad de aguas para uso agrícola.
- No obstante, las concentraciones medidas de los parámetros seleccionados permiten ser tratados y alcanzar la calidad de Agua Potable definida por la normativa chilena.
- Estas concentraciones máximas tratables dependen de las tecnologías de tratamiento disponibles (procesos de membrana según la SISS) y de su efectividad de remoción de cada parámetro, considerando aspectos técnicos y económicos (literatura).

IC Intratable

- El agua no es apta ni para el consumo humano ni para el riego agrícola.
- El tratamiento requerido para cumplir con la normativa de Agua Potable, de ser posible, sería con procesos que aseguren una mayor eficiencia que los procesos de membrana según la SISS, y que probablemente serían más complejos y costosos.

De este modo, se cuenta con mapas que indican la concentración espacial de cada parámetro químico de interés, mapas que indican el IC individual de cada uno de ellos y un mapa con el IC general de todo el acuífero, además de la calidad química del acuífero analizado para un horizonte temporal dado (año, estación, mes, línea de base, etc.).

Estos resultados permiten objetivamente establecer aquellos sectores más críticos donde se recomendaría incorporar una cierta cantidad de pozos de monitoreo a la actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas de la DGA Región Metropolitana de Santiago.

6.5.3 Interpretación de temporalidad

Cuando existen datos de información de calidad química de fechas distintas en un mismo sector acuífero, pueden elaborarse los mapas de IC general por pozo y sector acuífero para cada una de estas fechas y luego realizar el análisis temporal de estos resultados. Este análisis permite conocer la evolución o tendencia de la calidad del agua en un determinado rango de tiempo, pudiendo ésta empeorar, mejorar o mantenerse (DGA, 2009). De esta manera, analizar el comportamiento en el tiempo del IC general permite complementar el estudio de calidad química de aguas subterráneas en el área de estudio.

Este análisis de temporalidad de la calidad química del agua se realiza comparando el valor IC en el periodo disponible y en la misma celda, es decir, se realiza también mediante el uso de las herramientas SIG. Por lo tanto, es necesario procesar los datos disponibles para obtener los mapas de momentos distintos con la misma discretización (tamaño de celda, número de celdas, método, etc.) para la misma área de estudio.

Los mapas de calidad pueden corresponder tanto a IC individuales como a IC generales, mostrando las clasificaciones de cada parámetro, o general del agua, en las 5 categorías de calidad antes definidas.

Para el caso de este estudio, el análisis temporal se realiza entre las dos campañas de muestreo realizadas en los mismos 104 pozos APR. La evaluación consiste en determinar el cambio porcentual entre el IC inicial y final, con respecto a la situación inicial. La metodología plantea utilizar un porcentaje fijo de T1% para definir empeoramiento (aumento del T1%), mejoramiento (disminución del T1%) o sin cambios significativos (menores a T1% en términos absolutos).

Esta interpretación de temporalidad pretende identificar las fuentes (naturales o antrópicas) que determinan la presencia y/o concentración encontrada de los parámetros químicos en cada sector del acuífero, en base a relaciones existentes entre ellos.

Una vez obtenidos todos los mapas de la metodología, para determinar las posibles fuentes de los parámetros químicos en las aguas, se utilizaron antecedentes públicos y mapas relacionados a uso de suelo y de vulnerabilidad de acuíferos.

7 RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS DE LOS POZOS APR MONITOREADOS

7.1 CALIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

En este acápite se exponen los resultados de laboratorio de las dos campañas de monitoreo realizadas en el marco del presente estudio. En el Anexo 2 se reportan los resultados de los análisis químicos de los analitos necesarios para este estudio.

Para analizar la calidad de la información química obtenida en ambas campañas, para todos los puntos de monitoreo se realizó el cálculo del error de balance, mediante la expresión:

$$error(\%) = 100 \times \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}$$

La estimación del balance iónico se cuantifica mediante la diferencia del balance entre cationes y aniones (expresado en meq/L). Este antecedente se incluye en el Anexo 2. La diferencia del balance se estima debe ser igual o menor a la diferencia admisible indicada en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Diferencia Admisible en cálculo de Error de Balance

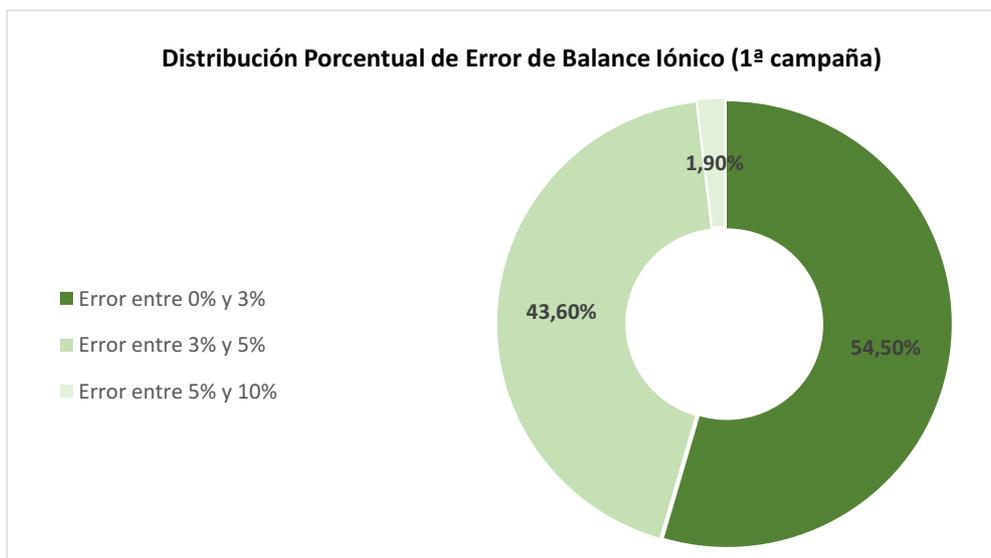
Suma de aniones (meq/L)	Diferencia admisible
0 - 3,0	± 0,2 meq/L
3,0 - 10,0	± 2 %
10,0 - 800	± 5 %

El error de balance iónico en la primera campaña se cuantificó para cada una de las 101 muestras de agua analizadas por el laboratorio SGS. Del total de análisis realizados, 55 muestras (54,5% del total) presentaron un error menor al 3%, 44 muestras de agua (43,6%) mostraron un error entre 3% y 5% y por último únicamente dos muestras un error entre 5% y 10%, es decir por sobre lo admisible. De sobrepasarse la diferencia admisible, se interpreta que los resultados del análisis pierden confiabilidad.

Las muestras con error de balance iónico superior al admisible corresponden al APR Ejemplo Campesino, comuna de Colina, Provincia de Chacabuco, y al APR La Línea, comuna de Alhué, Provincia de Melipilla. En ambos casos se dispone de pozos APR cercanos y representativos, ubicados a 1,2 km y 2,6 km en relación a los mencionados, por lo que se cuenta con información confiable de la calidad del agua subterránea en el sector.

En la Gráfico 7-1 se presenta la distribución porcentual del error de balance iónico obtenido de las 101 muestras de agua analizadas en la primera campaña, de las cuales 100 corresponden a aguas subterráneas y 1 muestra a agua superficial.

Gráfico 7-1. Distribución porcentual del Error de Balance Primera Campaña

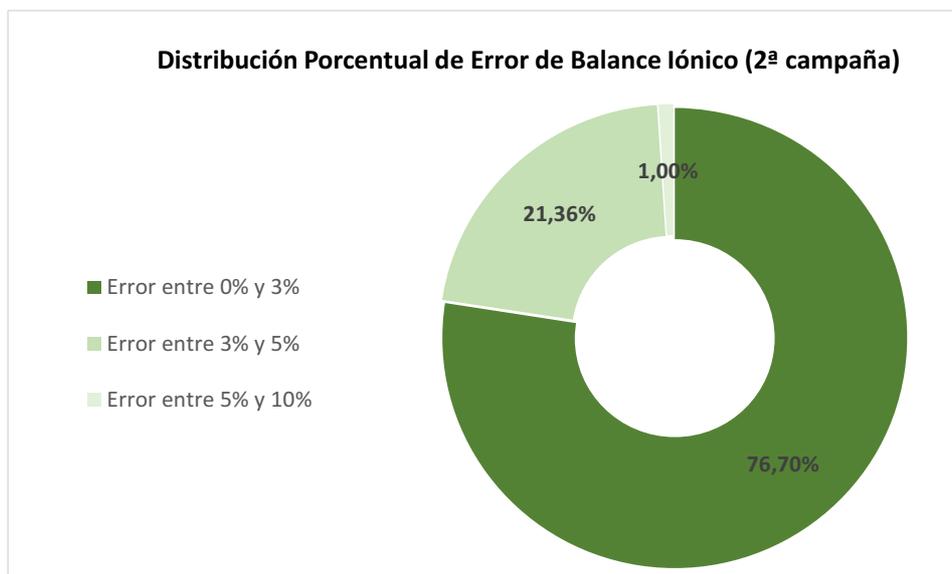


Se realizó el mismo análisis con los resultados obtenidos en la segunda campaña, en la que se analizaron 103 muestras de agua. Del total de muestras, 79 presentaron un resultado de error de balance menor al 3% (77%), 22 muestras de agua mostraron un error entre 3% y 5% (21%) y en último lugar, únicamente 1 muestra se encontró con un error de balance entre 5% y 10% (1%).

En esta campaña la muestra que presentó un error de balance iónico por sobre lo admisible corresponde al punto APR Águila Norte – Sur, comuna de Paine, Provincia de Maipo, que también dispone de otros puntos de observación cercanos.

Se ha elaborado el gráfico de distribución porcentual de error de balance iónico también para esta segunda campaña, el cual se presenta en Gráfico 7-2:

Gráfico 7-2. Distribución porcentual del Error de Balance Segunda Campaña



En resumen, los errores de balance calculados en ambas campañas muestran que los resultados de laboratorio son representativos de la calidad del agua en los sectores estudiados y pueden ser utilizados para la definición del Índice de Calidad, así como para la propuesta de nuevas redes de monitoreo.

7.2 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS

Con el objetivo de tener una caracterización y clasificación general de la composición química de las aguas subterráneas de la Región Metropolitana de Santiago, se elaboraron diagramas de Piper y Stiff correspondientes a las dos campañas de monitoreo llevadas a cabo en el presente estudio. Estos diagramas representan los componentes químicos mayoritarios (Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Bicarbonato, Sulfato y Cloruro), presentes en forma natural en las aguas que abastecen los sistemas APR de la Región.

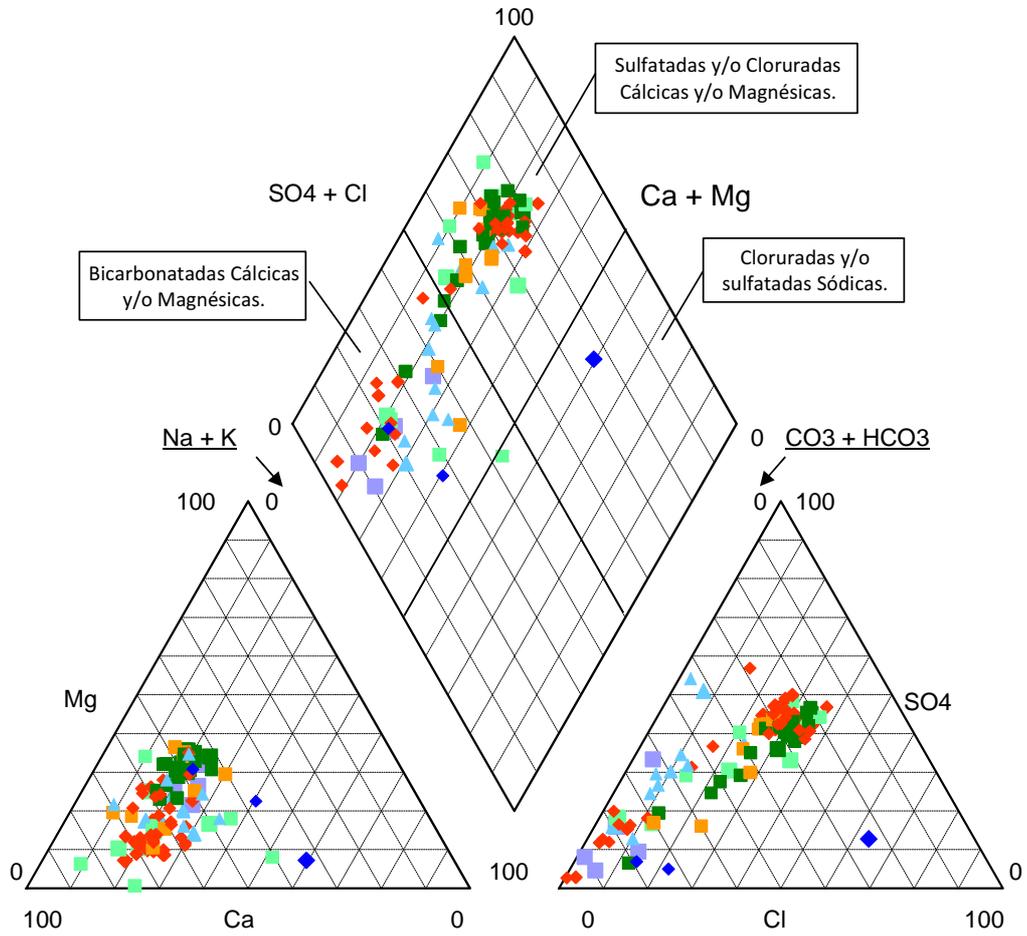
En el Gráfico 7-3 se presenta el diagrama de Piper de la 1^{era} Campaña de Octubre de 2015 y el Gráfico 7-4 el diagrama de Piper de la 2^{da} Campaña realizada en Febrero y Marzo de 2016.

En los diagramas de Piper se representan los datos de los APR según el sistema acuífero al que pertenecen, utilizando una simbología y un color para cada sistema. Cabe recalcar, que sólo APR Santa María del Estero capta agua desde una fuente superficial y ha sido graficado junto con los demás pozos APR con el fin de clasificar la composición química de sus aguas.

Como resultado, se puede observar en los diagramas de Piper (Gráfico 7-3 y Gráfico 7-4) que las aguas de los APR se clasifican principalmente en dos grandes grupos: aguas bicarbonatadas Ca-Mg y sulfatadas y/o cloruradas Ca-Mg; y, excepcionalmente como cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

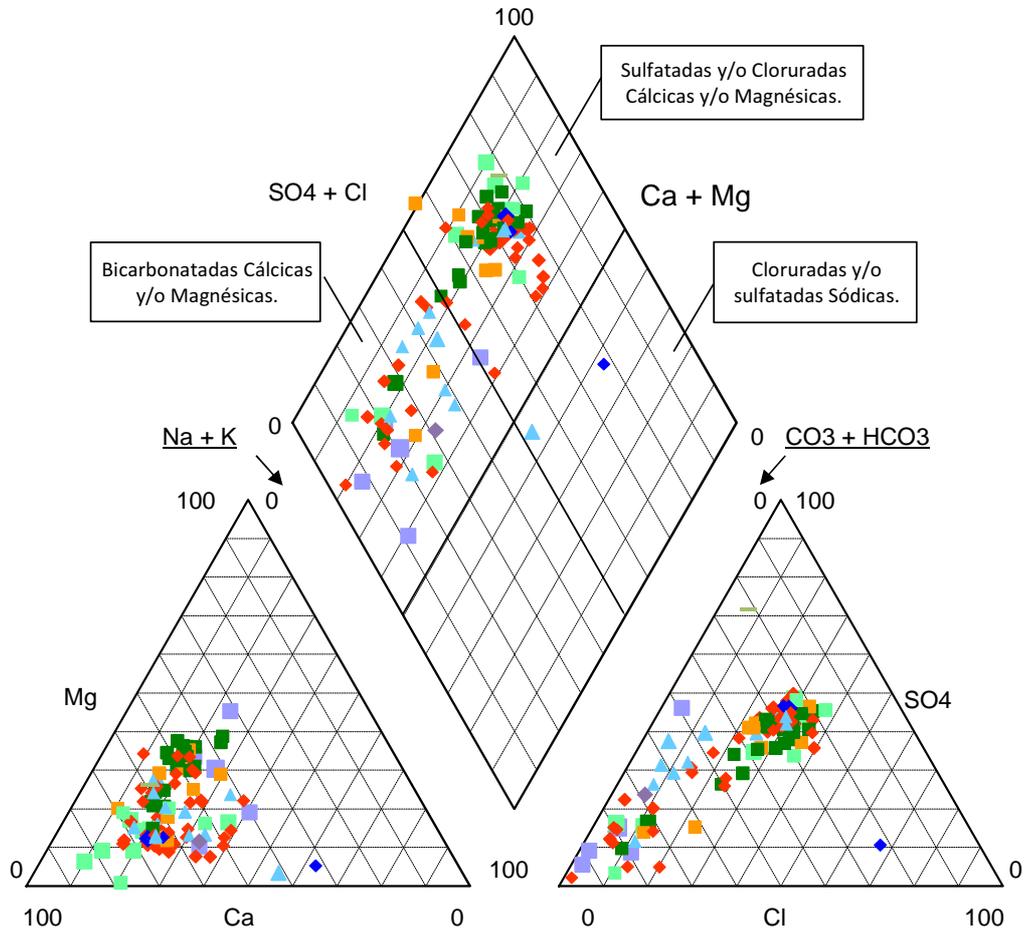
Las aguas del APR Santa María del Estero y de otros pozos APR de la Región, como son las muestras del sistema acuífero Alhué y Yali, tienen un predominio de iones como bicarbonato y calcio, seguido de magnesio. Mientras que en los sistemas acuíferos de Melipilla, Chacabuco y Colina predomina el ion sulfato, por sobre cloruro, y los cationes de calcio, seguido de magnesio. La excepción se identificó en la comuna de San Pedro, en el APR EPRA, acuífero de Yali. En ambas campañas las aguas presentaron un predominio de sulfato, seguido de cloruro, y de sodio, por sobre calcio.

Gráfico 7-3. Diagrama de clasificación de Piper de las aguas de los pozos APR monitoreados en Octubre 2015



CATION										ANION																																																																																						
■ AL BDPI	■ AL EASI	■ AL LHDL	■ AL LLIN	■ AL VALH	◆ BU CLES	◆ BU ECER	◆ CO CHAC	◆ CO ECAM	◆ CO HCAR	◆ CO LKAN	◆ CO LDIE	◆ CO MROD	◆ CO QUIL	◆ CO RNOR	◆ CO SFSL	◆ CO SLUI	◆ CO SMDL	◆ CU CERR	◆ CU LALV	◆ EM CHIÑ	◆ EM EPAL	◆ EM ERLO	◆ IM GACI	◆ IM LISL	◆ IM LPDL	◆ IM MLME	◆ IM OLEA	◆ IM SADN	◆ IM SVDN	◆ IM VLME	◆ JM EMEL	◆ JM SALF	◆ JM SMDE	◆ LA BSSA	◆ LA ELUC	◆ LA ESCO	◆ LA NPOV	◆ ME CEES	◆ ME CMAN	◆ ME CULI	◆ ME EBOL	◆ ME HBAJ	◆ ME LDCU	◆ ME LLUM	◆ ME LMDU	◆ ME LVIL	◆ ME MALL	◆ ME POPE	◆ ME PUAN	◆ ME RCLI	◆ ME SELI	◆ ME SJDm	◆ ME SMAN	◆ ME SRDE	◆ ME SVLU	◆ MP CHOR	◆ MP EROS	◆ MP IBAC	◆ MP LMER	◆ MP LOVA	◆ MP LPAL	◆ MP LRUL	◆ MP MPIN	◆ PA ADPA	◆ PA ANSU	◆ PA CBAJ	◆ PA CHAD	◆ PA CKEN	◆ PA EVIN	◆ PA HCHA	◆ PA HUEL	◆ PA RLHO	◆ PA SMLT	◆ PE PELV	◆ PH ECUR	◆ PH ETRE	◆ PH LESM	◆ PI EPRI	◆ PU CDPu	◆ PU NPER	◆ QU CCOL	◆ SB EROM	◆ SB LEDN	◆ SP EPRA	◆ SP LOIC	◆ SP SPEY	◆ TA ELAB	◆ TA LSOR	◆ TA SMLM	◆ TT CALE	◆ TT EPOL	◆ TT ESPI	◆ TT HUEC	◆ TT PPEU	◆ TT RUNG	◆ TT SMAT

Gráfico 7-4. Diagrama de clasificación de Piper de las aguas de los pozos APR monitoreados en Febrero-Marzo 2016



CATION										ANION																	
■ AL BDPI	■ AL EASI	■ AL LHDL	■ AL LLIN	■ AL VALH	◆ BU CLES	◆ BU ECER	◆ CO MROD	▲ CO CHAC	▲ CO ECAM	▲ CO ECOL	■ CO HCAR	■ CO LKAN	■ CO LDIE	■ CU LALV	■ CU LROS	■ CU MIRA	■ CU SIDP	◆ EM CHIÑ	◆ EM EPAL	◆ EM ERLO	◆ IM GACI	◆ IM LISL	◆ IM LPDL	◆ IM MLME	◆ IM OLEA	◆ IM SADN	◆ IM SVDN
▲ LA NPOV	■ ME CEES	■ ME CMAN	■ ME CULI	■ ME EBOL	■ ME HBAJ	■ ME LDCU	■ ME LLUM	■ ME LMDU	■ ME LVEG	■ ME LVIL	■ ME MALL	■ ME POPE	■ ME PUAN	■ ME RCLI	■ ME SELI	■ ME SJDM	■ ME SMAN	■ ME SRDE	■ ME SVLU	■ MP CHOR	◆ PA ADPA	◆ PA ANSU	◆ PA CBAJ	◆ PA CHAD	◆ PA CKEN	◆ PA EVIN	◆ PA HCHA
■ MP EROS	■ MP IBAC	■ MP LMER	■ MP LOVA	■ MP LPAL	◆ MP LRUL	◆ MP MPIN	◆ PA HUEL	◆ PA RLHO	◆ PA SMLT	◆ PE PELV	◆ PH ECUR	◆ PH ETRE	◆ PH LESM	■ PU EPRI	■ PU CDPU	◆ PU NPER	◆ QU CCOL	◆ SB EROM	◆ SB LEDN	◆ SP EPRA	◆ SP LOIC	◆ SP SPEY	◆ TA ELAB	▲ TA LSOR	▲ TA SMLM	▲ TT CALE	▲ TT EPOL
▲ TT ESPI	▲ TT HUEC	▲ TT PPEU	— TT RUNG	◆ TT SMAT																							

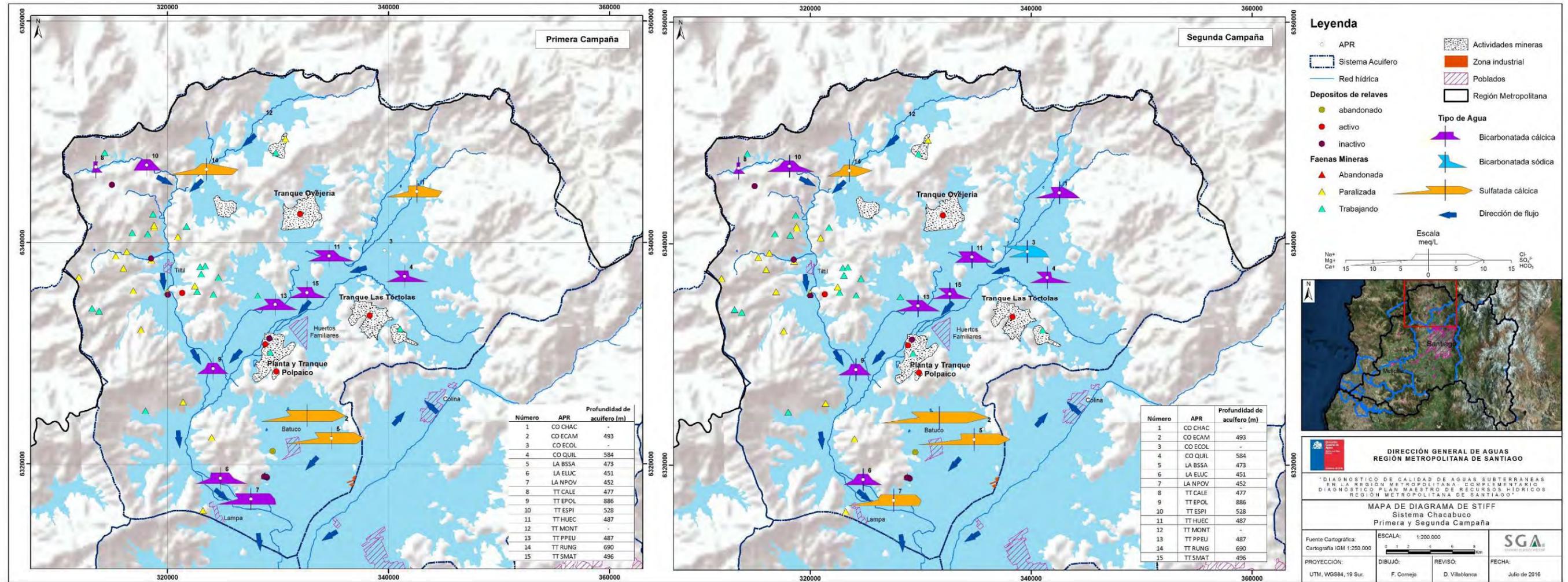
La variación espacial de la composición química de las aguas subterráneas queda mejor representada en mapas a través de la confección de polígonos, conocidos como diagramas de Stiff. Estos están representados por tres rectas divididas en seis segmentos. Los segmentos situados a la izquierda del diagrama representan la concentración en meq/L de cationes (Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+}) y la de los aniones a la derecha (Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^-). Mediante la unión de los extremos de dichos segmentos se forma un polígono cuya forma se asocia a un determinado tipo de agua y su tamaño a la concentración total de estos parámetros disueltos.

Cada punto de monitoreo APR con su respectivo diagrama de Stiff ha sido representado por sistema acuífero, lo que permite interpretar la distribución espacial de la composición química de las aguas subterráneas en el área de estudio y observar la variación temporal de éstas, al comparar la composición química, es decir el polígono de cada APR, entre ambas campañas (Figura 7-1 a la Figura 7-7).

De la interpretación de los diagramas de Stiff, se puede mencionar lo siguiente:

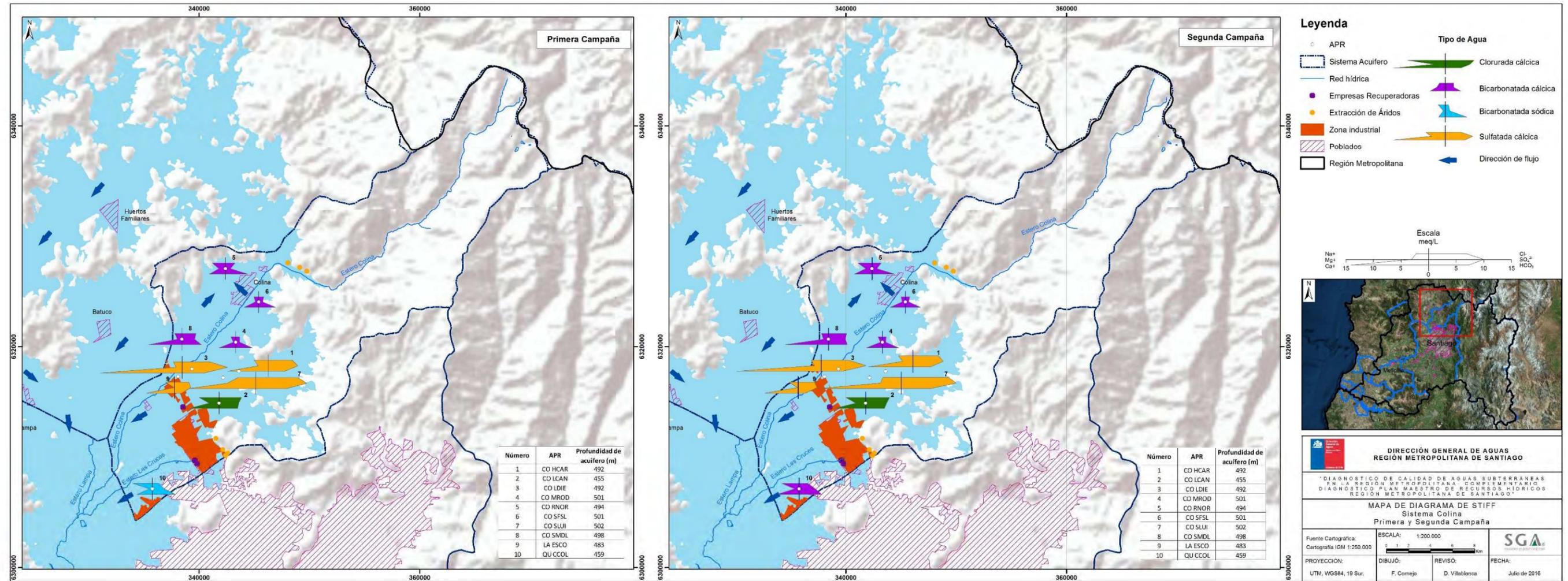
- En ambas campañas predominan las aguas subterráneas del tipo sulfatada cálcica, seguido de las aguas bicarbonatadas cálcicas.
- Localmente, en el sistema acuífero de Yali, la muestra proveniente del APR El Prado, Comuna de San Pedro, mostró una composición clorurada sódica en ambas campañas y, en los otros pozos cercanos, más bien, del tipo bicarbonatado cálcico a sódico.
- De manera similar, se distinguen en el acuífero Colina, uno de los pozos APR con composición de tipo sulfatada sódica, y otro de tipo bicarbonatado sódico.
- En la primera campaña las muestras de los APR Rungue (Comuna de Til Til, Provincia de Chacabuco), Chacabuco (Comuna de Colina, Provincia de Chacabuco) y El Romeral (Comuna de San Bernardo, Provincia de Maipo) se situaron en el campo de las aguas sulfatadas mientras que en la segunda campaña la composición aniónica pasó a mixta o bicarbonatada.

Figura 7-1. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Chacabuco



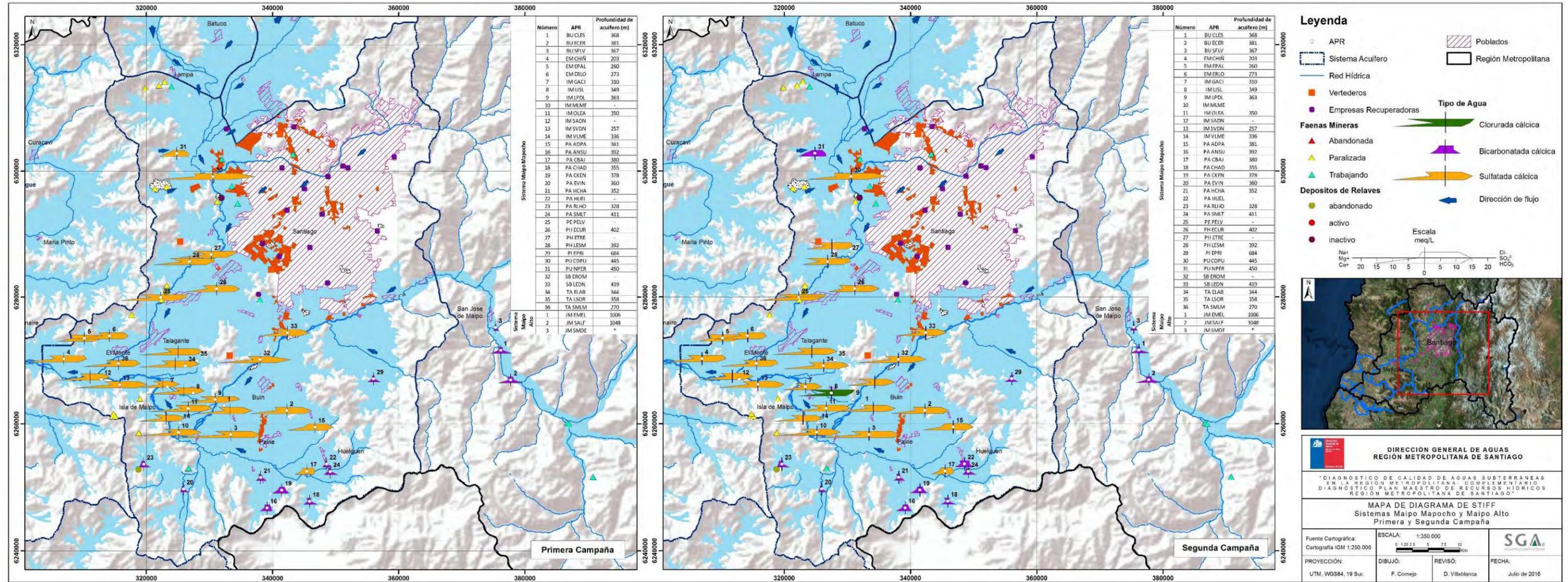
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-2. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Colina



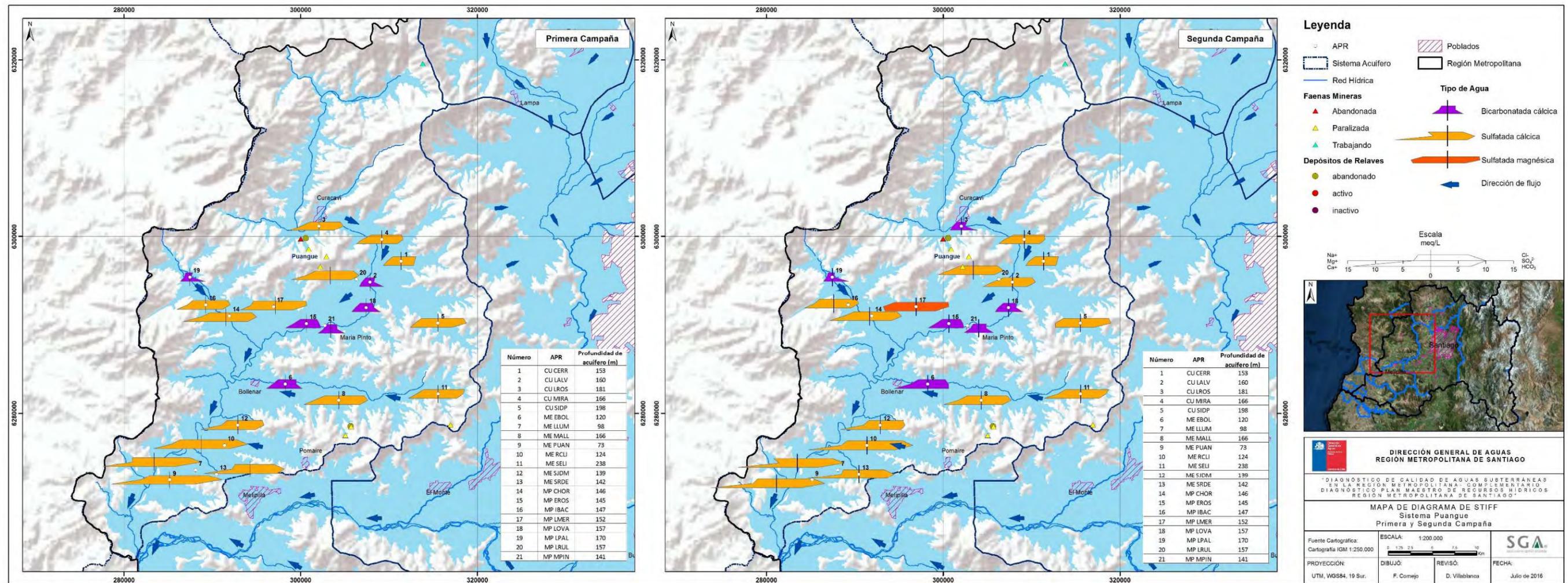
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-3. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Maipo-Mapocho y Maipo Alto



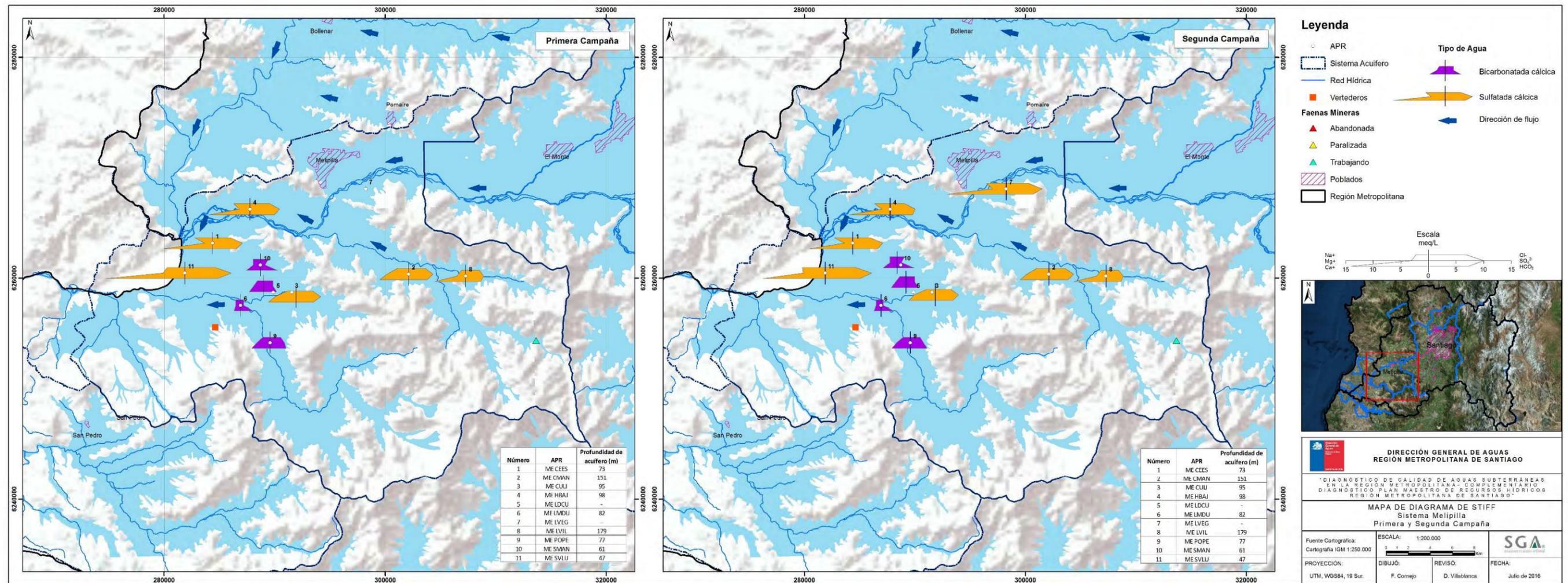
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-4. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Puangue



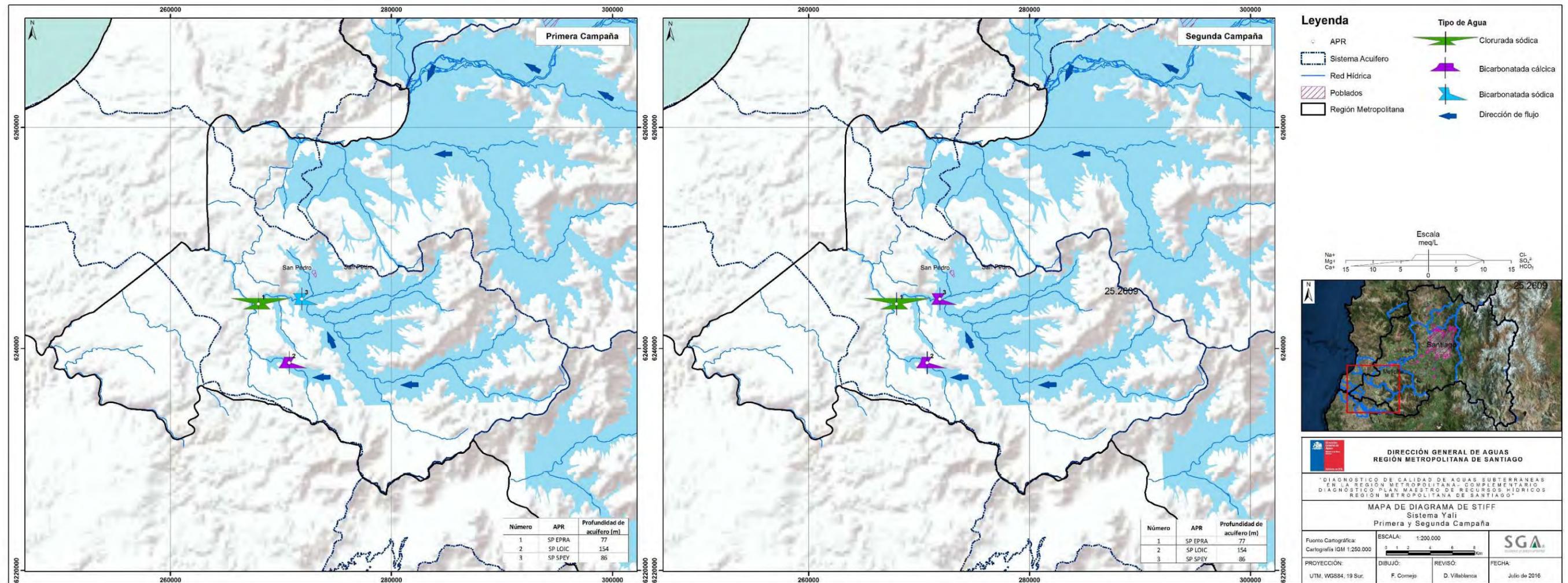
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-5. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Melipilla



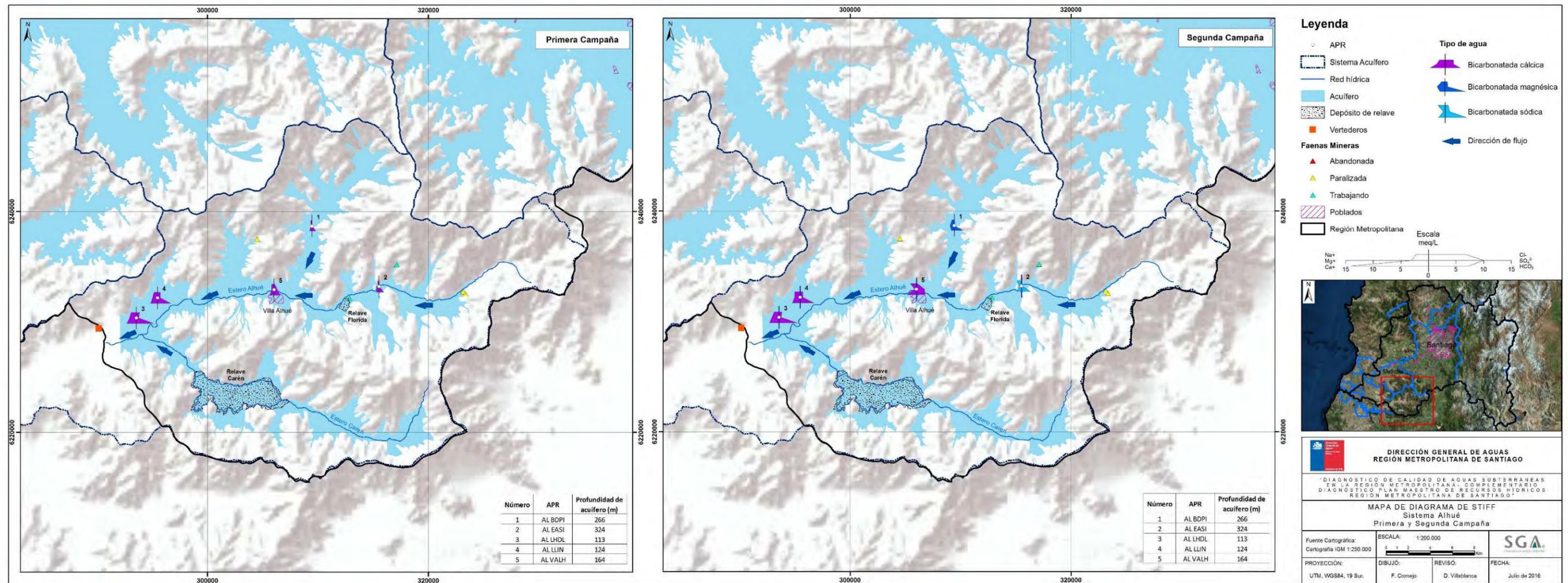
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-6. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Yali



Fuente: Elaboración propia

Figura 7-7. Mapa de diagrama de Stiff primera y segunda campaña- Sistema Alhué



Fuente: Elaboración propia

7.3 CONCENTRACIONES QUÍMICAS

Para analizar la calidad de las aguas se consideró un listado de parámetros, en total 22 analitos. Estos se indican en la Tabla 7-2, junto a sus respectivos límites de detección, de acuerdo a lo reportado por el Laboratorio externo.

Tabla 7-2. Listado de parámetros para caracterizar las aguas y su límite de detección

Analito	Límite detección
Sulfato (SO_4^{-2})	< 0,02
Cloruro (Cl^-)	< 0,02
Bicarbonato (HCO_3^-)	< 1
Sodio (Na^+)	< 0,01
Potasio (K^+)	< 0,01
Calcio (Ca^{+2})	< 0,01
Magnesio (Mg^{+2})	< 0,01
Nitrato (NO_3^-)	< 0,02
Nitrito (NO_2^-)	< 0,02
Amonio (NH_4^+)	< 0,03
Arsénico (As)	< 0,001
Cromo (Cr)	< 0,02
Cianuro (CN^-)	< 0,01
Cobre (Cu)	< 0,02
Hierro (Fe)	< 0,02
Fosfato (PO_4^{-3})	< 0,06
Mercurio (Hg)	< 0,002
Manganeso (Mn)	< 0,02
Plomo (Pb)	< 0,07
Selenio (Se)	< 0,001
Zinc (Zn)	< 0,01

Los parámetros analizados en este estudio se justifican como parte de los elementos definidos en la metodología de obtención del Índice de Calidad y necesarios para el análisis de una posible afectación de origen antrópico en el acuífero.

Considerando ambas campañas se dispone en total de 204 análisis, cuyos resultados completos se encuentran tabulados en las Tablas 1 y 2 del Anexo 2, que corresponden a la primera y segunda campaña de monitoreo, respectivamente.

A modo de referencia en el documento se incluye una tabla resumen (Tabla 7-3) que muestra los valores máximos, mínimos y promedio de todos los parámetros analizados, así como de los resultados de las mediciones *in situ*.

Tabla 7-3. Resumen resultados de parámetros *in situ* y laboratorio

	Primera Campaña (Octubre 2015)			Segunda Campaña (Febrero 2016)		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Temperatura (°C)	12,8	24	17,9	7,4	29,8	18,5
Conductividad (μS/cm)	80	2222	986	150,9	2213	1049
pH	6,36	8,2	7,32	6,68	8,5	7,49
REDOX Terreno (mV)	-	-	-	52,9	758,9	259,65
REDOX Laboratorio (mV)	40	612	312,42	90	692	291,35
Amonio	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bicarbonatos	45,5	436	218,8	71,30	469,00	225,62
Calcio	8,31	369	129,6	11,00	326,00	129,45
Cianuro	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Cloruro	0,29	306	101,6	1,28	284,00	105,63
Cromo	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Fluoruro	0,02	0,23	0,05	0,02	0,33	0,07
Fosfato (como P)	0,06	0,28	0,11	0,06	0,96	0,22
Magnesio	0,52	83,20	26,62	0,83	90,30	26,76
Nitrato	0,07	114,00	23,78	0,09	79,00	24,76
Nitrito	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Potasio	0,16	8,3	2,28	0,02	10,00	2,27
Sodio	4,3	141	55,35	6,46	166,00	59,39
Sulfato	1,59	639	204,14	2,06	542,00	206,22
Mercurio	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,002	<0,002	<0,002
Arsénico	0,001	0,015	0,003	0,001	0,158	0,007
Selenio	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cadmio	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cobre	0,02	0,08	0,06	0,02	0,03	0,03
Hierro	0,02	62,88	0,90	0,02	0,86	0,10
Manganeso	0,02	3,08	0,32	0,02	0,83	0,18
Plomo	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07
Zinc	0,01	0,33	0,07	0,01	0,62	0,08

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se destaca que los parámetros Amonio, Cianuro, Cromo, Nitrito, Mercurio, Selenio, Cadmio y Plomo, se encontraron por debajo del límite de detección en todas las muestras analizadas, para ambas campañas de monitoreo.

Mediante la comparación de los promedios obtenidos en ambas campañas, también se puede concluir que no existen diferencias apreciables entre los valores medidos en la primera y segunda campaña.

En relación a los parámetros físico-químicos medidos *in situ* se observa que, en todos los casos, los rangos determinados corresponden a valores normales en aguas dulces naturales.

7.4 COMPARACIÓN CON NORMATIVA NCH 409

Los parámetros analizados en las muestras de agua corresponden, como ya se indicó, a aguas crudas provenientes directamente del pozo de bombeo sin haber sufrido ningún tratamiento de potabilización. Es por esto que, la comparación con la Norma de Agua Potable NCh 409 es únicamente referencial, dado que las aguas para consumo únicamente están obligadas a cumplir con dicha normativa una vez pasado el proceso de potabilización y distribución en la red de Agua Potable.

De los parámetros químicos que se analizaron en ambas campañas, a continuación se incluye la Tabla 7-4 que indica el límite de referencia definido en la Norma NCh 409 para cada uno de ellos. Todas las muestras analizadas se compararon con estos límites referenciales. Para una mejor visualización se construyeron gráficos de barras que representan las concentraciones de un parámetro dado para cada sistema acuífero en estudio. En cada uno de estos gráficos se incluyó, mediante una línea continua el valor límite de la Norma NCh 409 para cada parámetro correspondiente.

Tabla 7-4. Rango de valores máximos permitidos por la norma chilena de Agua Potable NCh409

Parámetro	Límite máximo	Parámetro	Límite máximo
pH	6,5 < pH < 8,5 (3)	Magnesio	125 mg/L (1)
Amoníaco	1,5 (3)	Manganeso	0,1 mg/L (1)
Arsénico	0,01 mg/L (2)	Mercurio	0,001 mg/L (2)
Cadmio	0,01 mg/L (2)	Nitratos	50 mg/L (2)
Cianuro	0,05 mg/L (2)	Nitritos	3 mg/L (2)
Cloruro	400 mg/L (3)	Plomo	0,05 mg/L (2)
Cobre	2,0 mg/L (1)	Selenio	0,01 mg/L (1)
Cromo	0,05 mg/L (1)	Sulfato	500 mg/L (3)
Fluoruro	1,5 mg/L (1)	Zinc	3,0 mg/L (1)
Hierro	0,3 mg/L (1)		

(1): Sustancias esenciales para la vida

(2): Sustancias No esenciales

(3): Parámetros organolépticos

A continuación, se presentan los sistemas acuíferos definidos en la Región Metropolitana de Santiago y los parámetros que superaron la norma referencial de Agua Potable NCh409. A modo de resumen son los siguientes:

- Sistema Chacabuco: pH, Arsénico, Hierro.
- Sistema Colina: Arsénico, Manganeso, Hierro, Nitrato.
- Sistema Maipo-Mapocho: Hierro, Manganeso, Nitrato, Sulfato.
- Sistema Maipo Alto: Arsénico, Hierro y Manganeso
- Sistema Puangue: Hierro, Manganeso, Nitrato, Sulfato.
- Sistema Melipilla: Hierro, Manganeso.
- Sistema Yali: ninguno supera la norma.
- Sistema Alhué: ninguno supera la norma.

7.4.1 Sistema acuífero Chacabuco

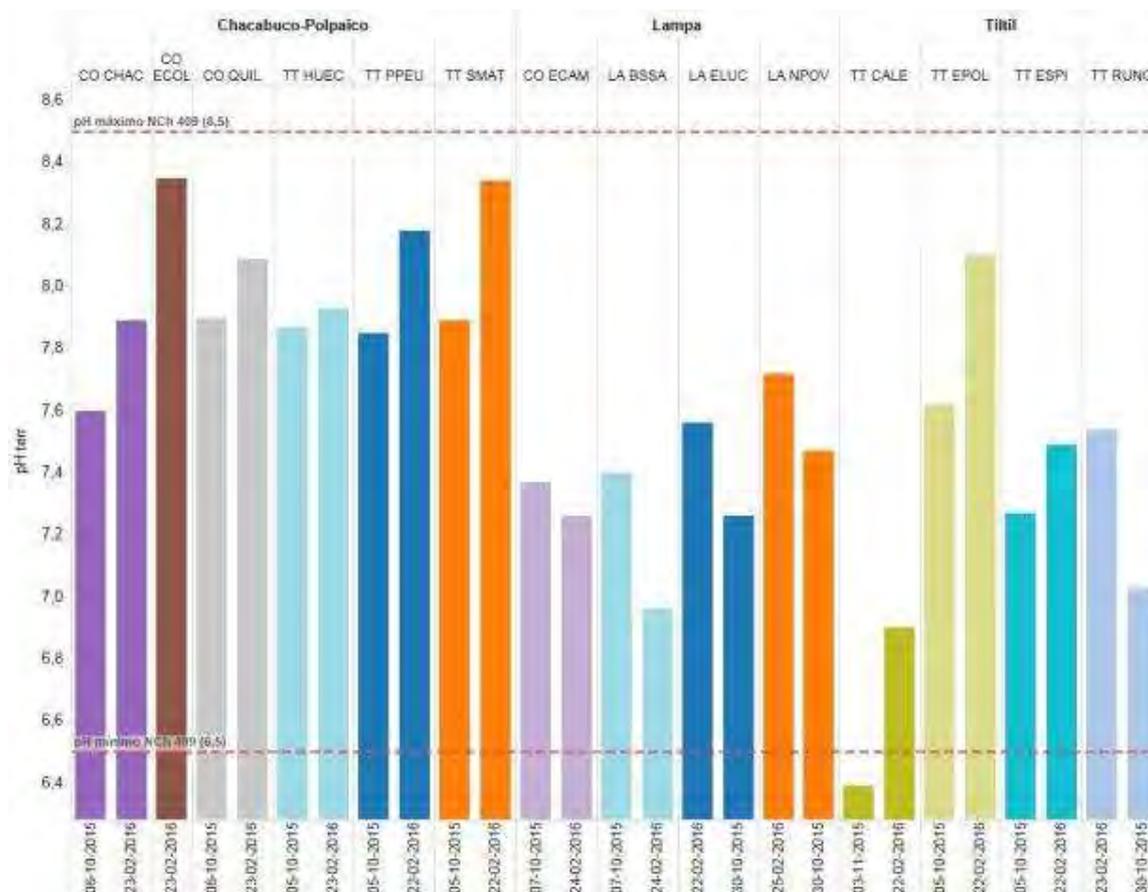
En el sistema Chacabuco se analizaron un total de 14 APR distribuidos en los sectores de Til Til (4 muestras), Lampa (4 muestras) y Chacabuco – Polpaico (6 muestras).

De todas las muestras analizadas en el sistema finalmente se detectaron 3 parámetros que se encuentran fuera del rango de la norma de referencia en alguna de las muestras tomadas en el sistema.

Uno de los parámetros que se midió in situ corresponde al pH, el cual se encuentra en valores normales en las aguas subterráneas en todos los APR del sistema Chacabuco, a excepción de las muestras tomadas en el APR Caleu, que presentaron los valores de pH más bajos, es decir, más ácidos del sistema. En la primera campaña de monitoreo la muestra proveniente del APR Caleu mostró un pH de 6,39 valor ligeramente por debajo del 6,5 que indica la norma. Se indica no obstante, que en la siguiente campaña este mismo APR mostró un valor de pH de 6,9, lo cual se encuentra dentro del rango de la Norma NCh 409.

A continuación, se incluye el Gráfico 7-5 que muestra los valores de pH medidos en todos los APR del sistema Chacabuco y donde es posible observar lo descrito en relación a las muestras del APR Caleu.

Gráfico 7-5. Valores de pH en Sistema Chacabuco. Campañas 2015 y 2016

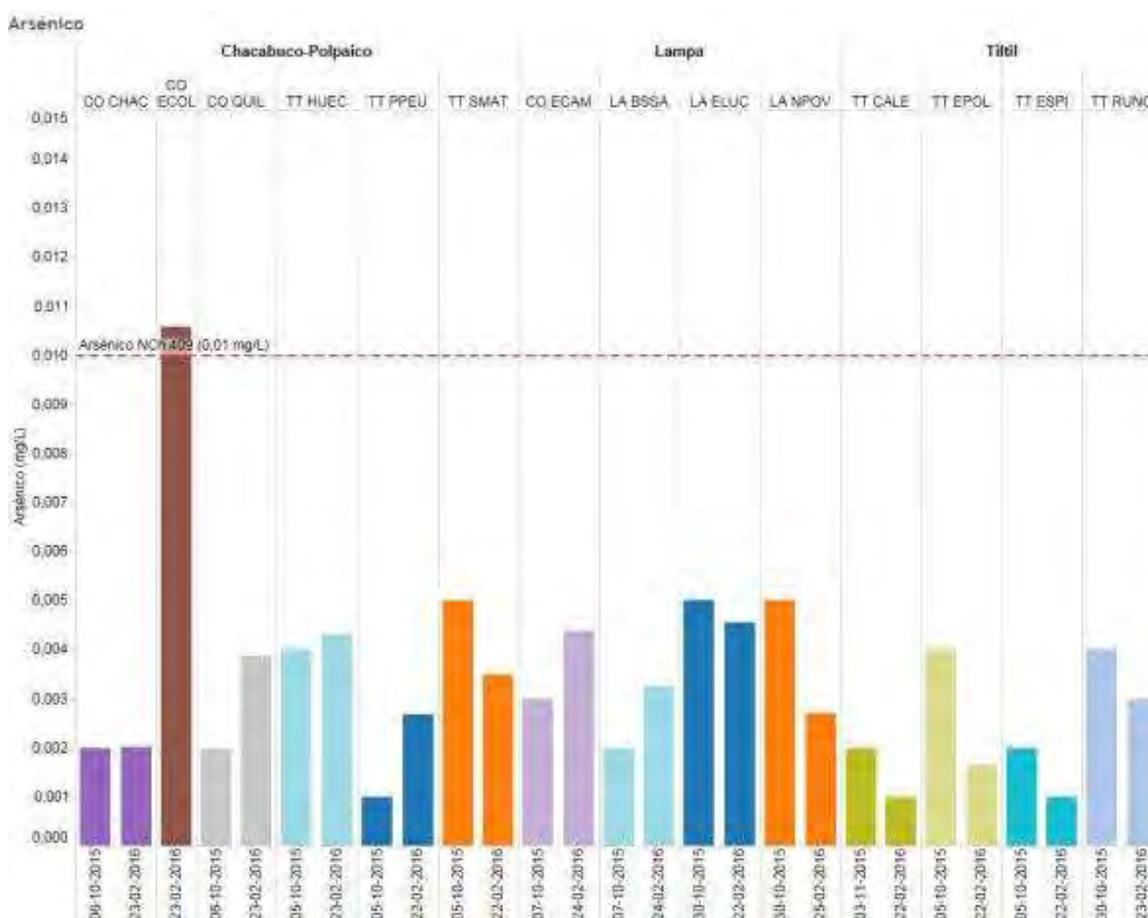


Fuente: Elaboración propia

Otro parámetro que se detectó en concentraciones superiores a la NCh 409 en una de las muestras del sistema Chacabuco es el Arsénico (Gráfico 7-6). Este metal se encuentra en concentraciones inferiores a los límites de referencia de la norma en todas las muestras, a excepción de la muestra proveniente del APR El Colorado, tomada en la segunda campaña de monitoreo.

Como se observa en el Gráfico 7-6, la concentración límite de Arsénico que indica la norma es de 0,01 mg/L y la concentración detectada en el agua proveniente del pozo fue de 0,011 mg/L, valor muy próximo al límite de referencia.

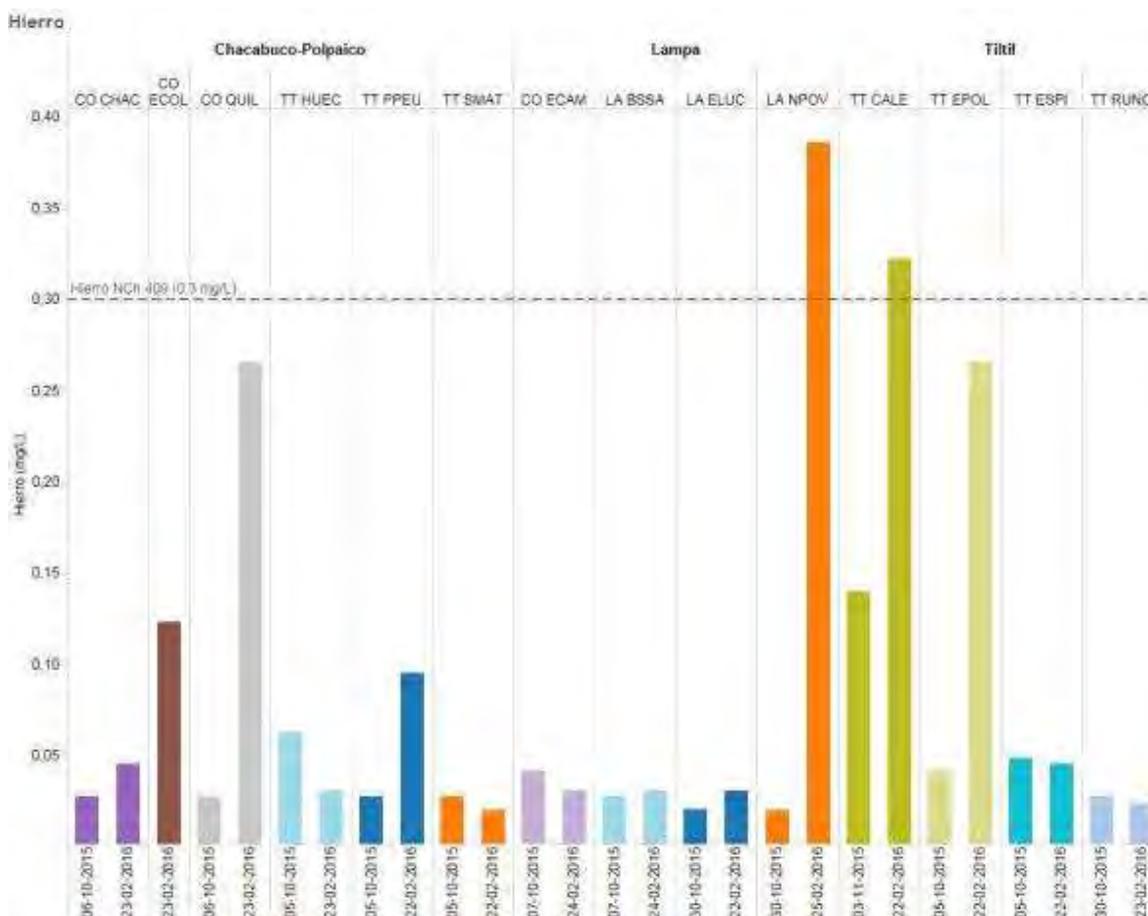
Gráfico 7-6. Concentraciones de Arsénico (mg/L) en Sistema Chacabuco. Campañas 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

El siguiente parámetro detectado por encima del nivel de referencia de la norma en los pozos APR del sistema Chacabuco fue el Hierro (Gráfico 7-7), que superó el valor de 0,3 mg/L en dos de las muestras analizadas. En primer lugar, destaca la muestra tomada en la segunda campaña, en el APR Nuevo Porvenir, que mostró una concentración de 0,39 mg/L, así como la muestra del APR Caleu (2ª campaña) que presentó un valor de 0,32 mg/L de Hierro, siendo el límite de la norma de 0,3 mg/L.

Gráfico 7-7. Concentraciones de Hierro (mg/L) en Sistema Chacabuco. Campañas 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

El resto de parámetros analizados en los 14 APR ubicados en el sistema y que disponen de límite de referencia en la norma de agua de potable, se encontraron en concentraciones aceptables, es decir, dentro de los límites de referencia.

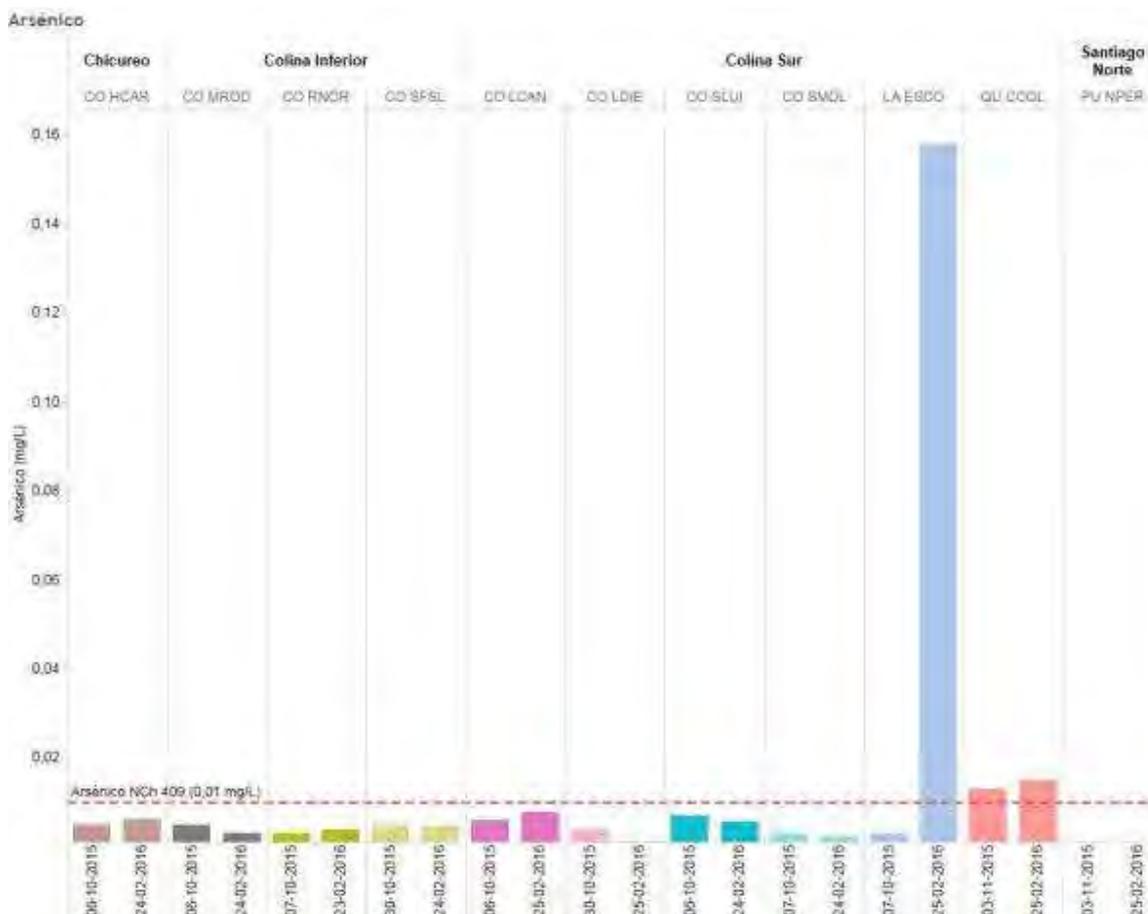
7.4.2 Sistema acuífero Colina

El Sistema Colina dispone del monitoreo de 11 pozos APR, distribuidos en 4 sectores acuíferos, que son como ya se indicó: Chicureo (1), Colina Inferior (3), Colina Sur (6) y Santiago Norte (1).

La calidad del agua para uso potable en el Sistema Colina presentó algunas desviaciones respecto a la norma, pero únicamente en algunos de los pozos monitoreados.

Por ejemplo, el Arsénico (Gráfico 7-8) se detectó en concentraciones superiores a la norma en el pozo del APR Colo Colo en ambas campañas de monitoreo y en el pozo del APR Estación Colina. En este último APR se observa un incremento de la concentración de este metal en la segunda campaña, pasando de 0,003 mg/L a 0,155 mg/L. Tal como se indicó en el Capítulo 5.6 Uso de Suelo por Sector Acuífero, el APR se encuentra en el límite entre suelos agrícolas e industriales, mientras que Colo Colo se encuentra en un entorno de actividad urbana e industrial.

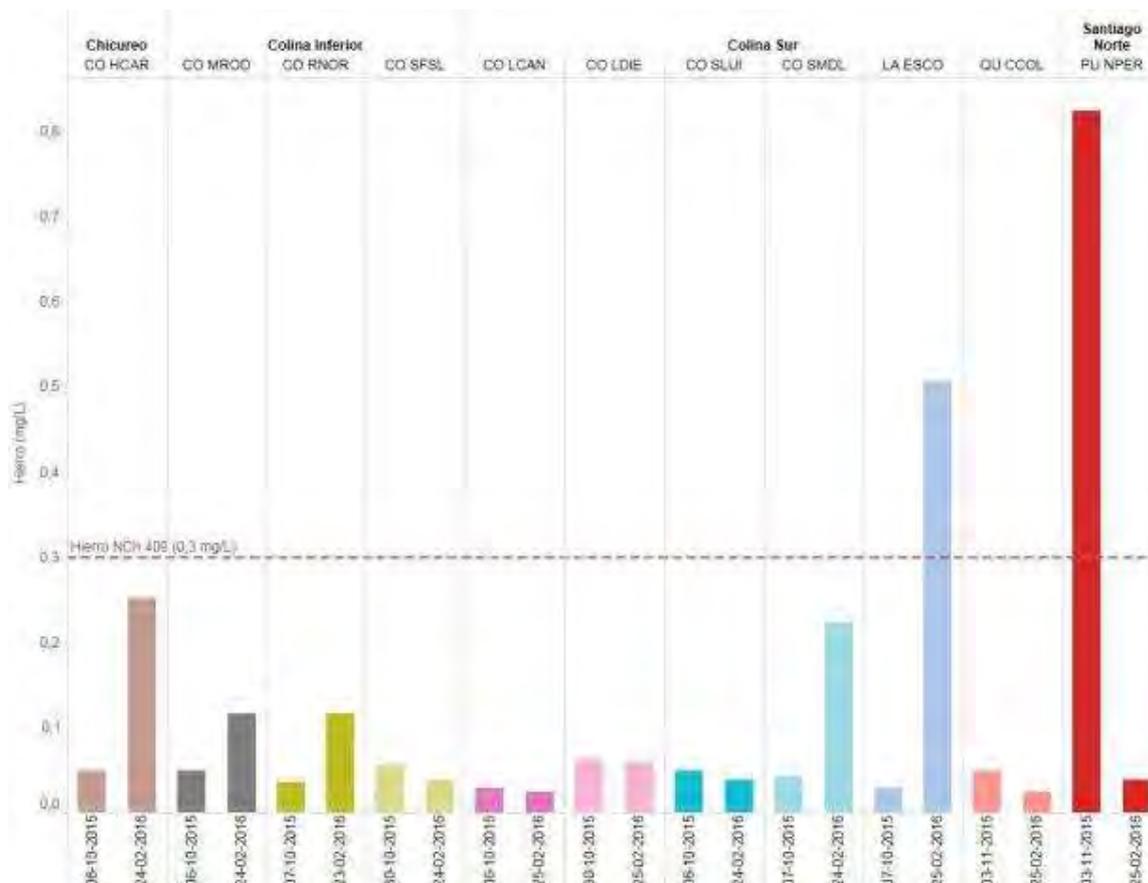
Gráfico 7-8. Concentraciones de Arsénico (mg/L) en Sistema Colina. Campañas 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

Otro parámetro detectado por sobre la Norma de Agua Potable fue el Hierro (Gráfico 7-9), particularmente en dos pozos del Sistema Colina, APR Noviciado Peralito y Estación Colina, en la primera y segunda, respectivamente. La mayor concentración se detectó en el APR Noviciado en la primera campaña, con un valor de 0,82 mg/L.

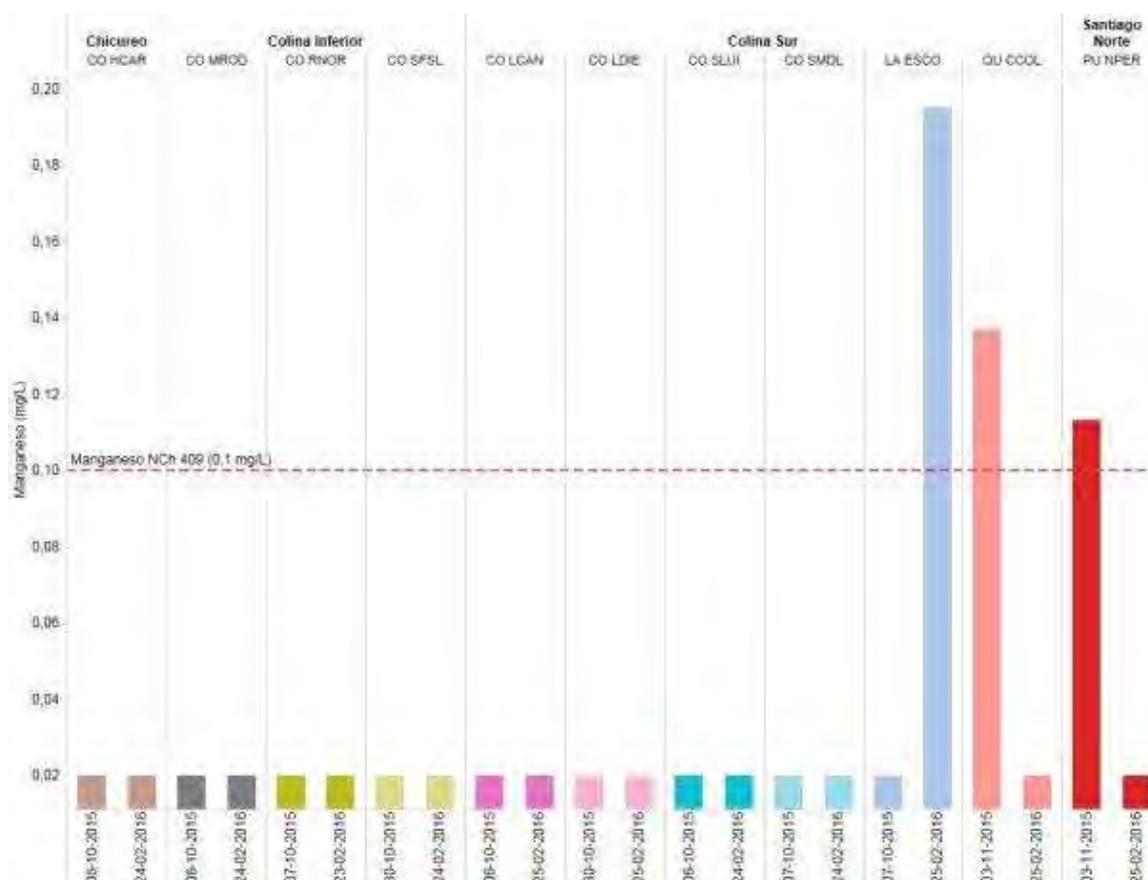
Gráfico 7-9. Concentraciones de Hierro (mg/L) en Sistema Colina. Campañas 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

Estos dos APR, APR Estación Colina y Noviciado Peralito, además del APR Colo Colo presentaron niveles de Manganeso superiores a la Norma de Agua Potable, que fija un límite de 0,1 mg/L (Gráfico 7-10). Para este parámetro la máxima concentración se detectó en el APR Estación Colina, en el monitoreo realizado en la segunda campaña con 0,19 mg/L.

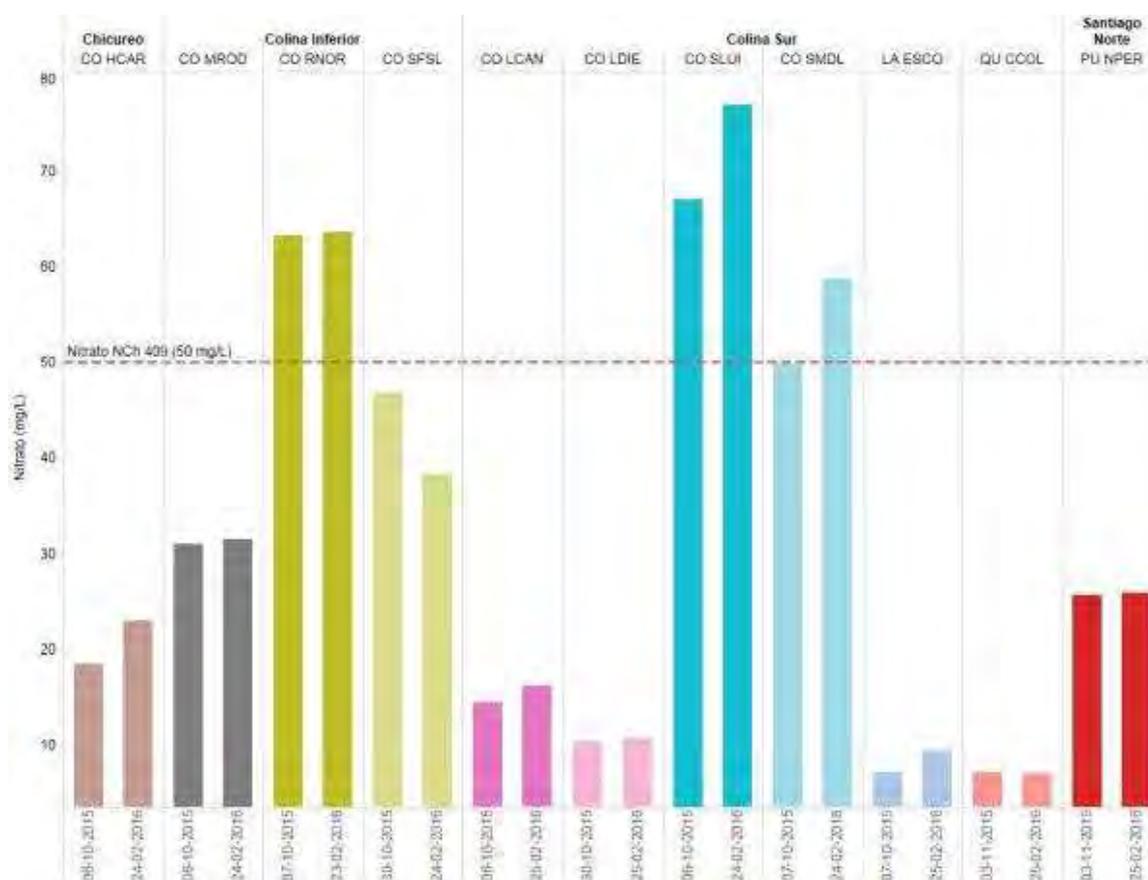
Gráfico 7-10. Concentraciones de Manganeso (mg/L) en Sistema Colina. Campañas 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

El Nitrato es un compuesto que guarda estrecha relación con la actividad agrícola, lo que se refleja en las concentraciones obtenidas en los pozos APR del Sistema Colina. A diferencia de los parámetros anteriores que se detectaron en suelos con uso preferencialmente urbano o industrial, el Nitrato se ha detectado en concentraciones superiores a la Norma de Agua Potable en los APR Reina Norte, Santa Luisa y Santa Marta de Liray (Gráfico 7-11). La máxima concentración de este compuesto se detectó en el pozo del APR Santa Luisa en la segunda campaña de monitoreo, con un valor de 76,9 mg/L, siendo el límite de la norma de 50 mg/L.

Gráfico 7-11. Concentraciones de Nitrato (mg/L) en Sistema Colina. Campañas 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

7.4.3 Sistema acuífero Maipo-Mapocho

En el sistema Maipo Mapocho se monitorearon cinco sectores acuíferos, mediante el muestreo de 35 servicios APR ubicados en el acuífero de Buin, El Monte, Paine, Pirque y Santiago Central.

En este sistema se detectó Hierro en concentraciones superiores a la Norma de Agua Potable en tres ocasiones (Gráfico 7-12). En el Sector Acuífero de Buin, el APR Romeral (Comuna de San Bernardo) en la primera campaña mostró un valor de 0,58 mg/L siendo el límite definido de 0,3 mg/L. Este APR se ubica muy próximo al cauce del río Maipo y es uno de los pozos más profundos que se monitoreó en la Región Metropolitana de Santiago alcanzando 140 metros y un nivel freático que supera los 100 metros de profundidad.

Otro APR que superó el valor de referencia para el Hierro se encontró en el sector Acuífero El Monte con una concentración de 1,17 mg/L. Este valor se detectó en la primera campaña en el pozo Rangue Los Hornos, si bien se destaca que el sistema APR dispone de filtro para abatimiento de Hierro en funcionamiento. El APR Rangue Los Hornos se encuentra a poco más de 1 km de la Laguna Acúleo y aguas abajo de un depósito de relaves abandonado que sirvió para la extracción de Oro y Plata.

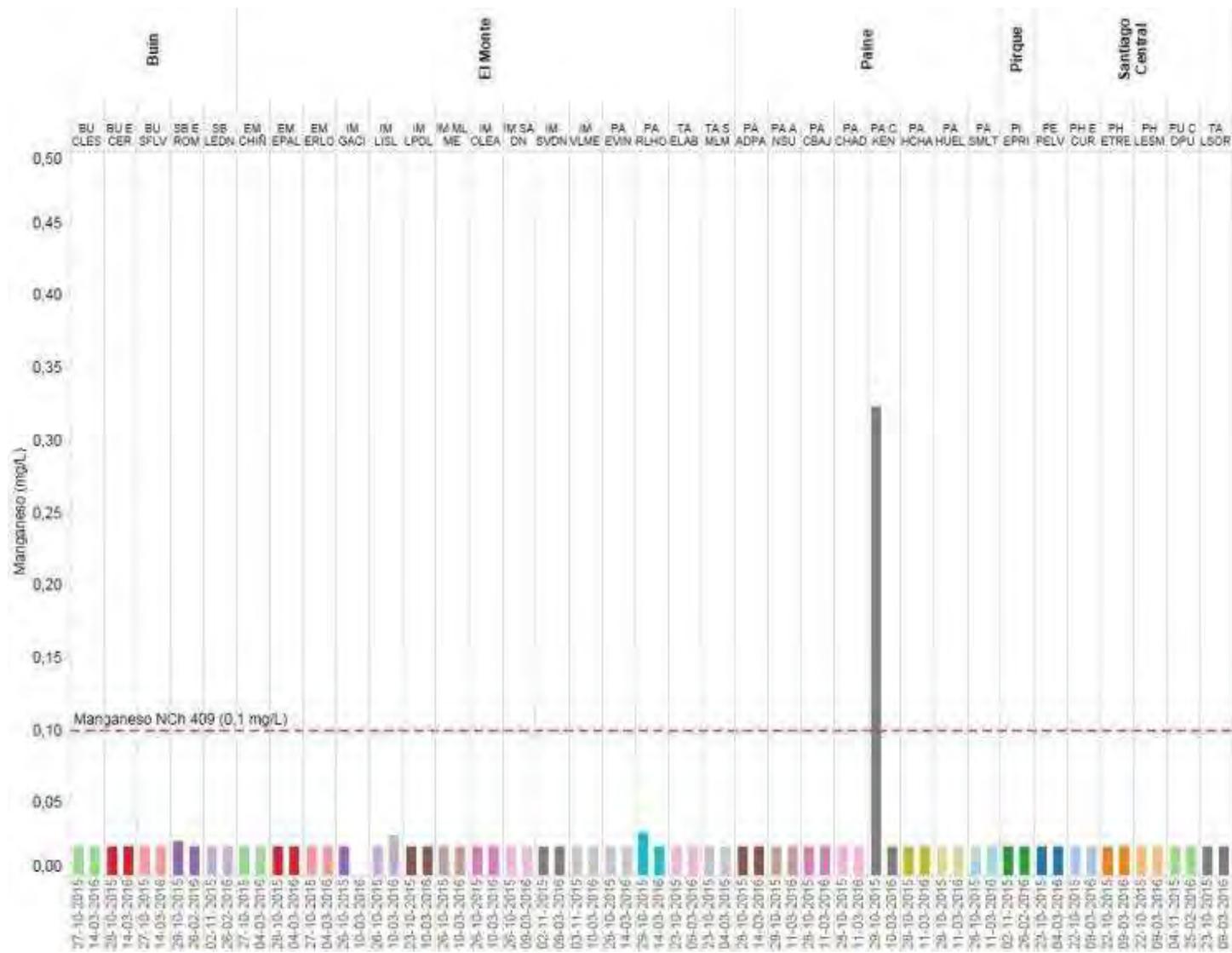
Por último, el APR Hospital Champa también presentó valores de Hierro levemente sobre la Norma de Agua Potable con una concentración de 0,34 mg/L.

El Manganeseo se detectó con concentraciones superiores a la Norma de Agua Potable (0,1 mg/L) solo en el APR Colonia Kennedy, con 0,32 mg/L, y en la primera campaña de monitoreo (Gráfico 7-13). El resto de los APR del Sistema Maipo-Mapocho, cumplen con el límite de la norma para este parámetro.

En el Gráfico 7-14, el parámetro Nitrato en el Sistema Maipo- Mapocho se presenta con concentraciones superiores a la norma en varios de los pozos monitoreados en el sistema, entre estos: APR El Cerrillo, El Paico Alto, El Labrador, Pelvin, El Trebal, La Esperanza Santa Mónica, Casas de Pudahuel.

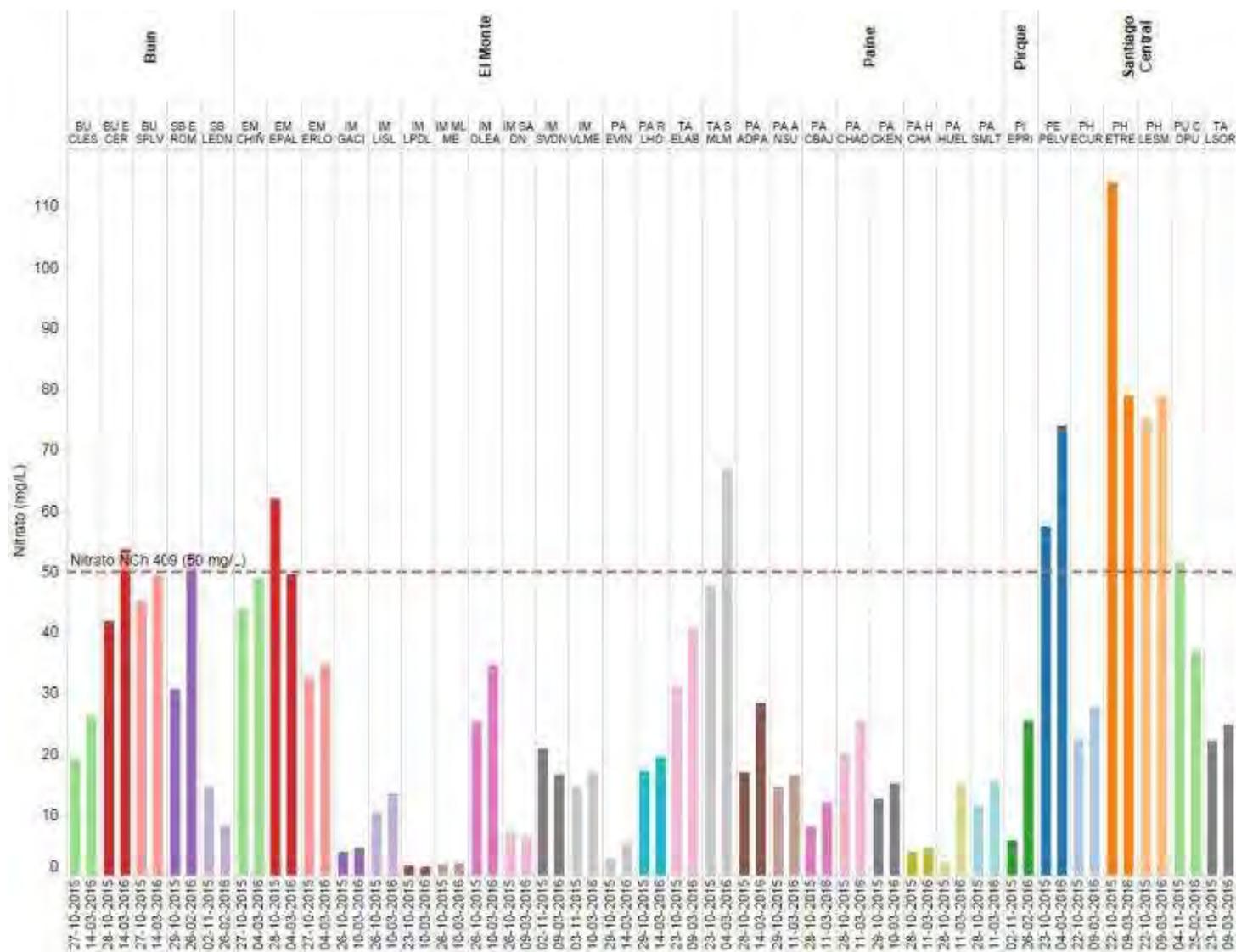
El pozo con los niveles más elevados de Nitrato, tal como se observa en el Gráfico 7-14, corresponde al APR El Trebal que se encuentra a menos de 1 km al suroriente de la Planta de Tratamiento de Aguas del mismo nombre. Este pozo presentó concentraciones superiores a la norma en ambas campañas de monitoreo.

Gráfico 7-13. Concentración de Manganeso (mg/L) en Sistema Maipo Mapocho. Campaña 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 7-14. Concentración de Nitrato (mg/L) en Sistema Maipo Mapocho. Campaña 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

7.4.4 Sistema acuífero Melipilla

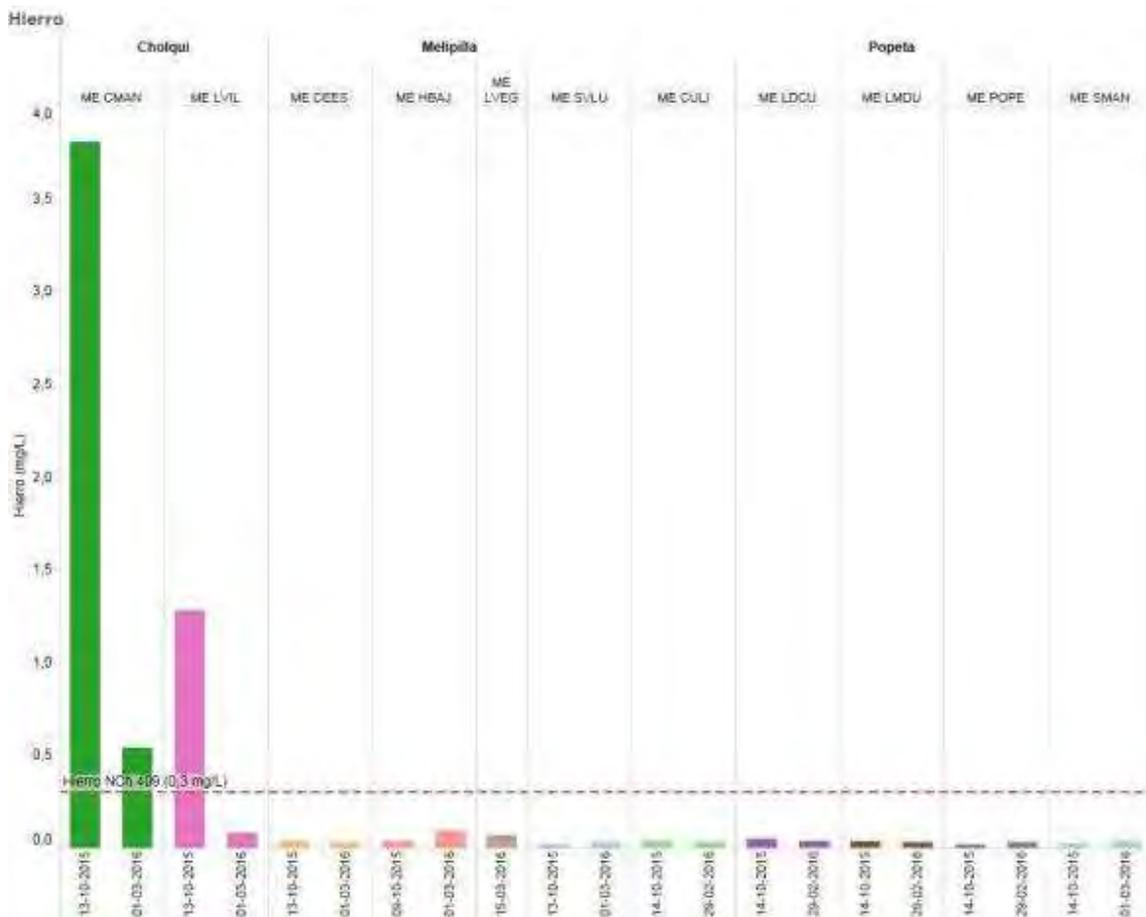
El sistema acuífero Melipilla dispone, para el presente estudio, del monitoreo de un total de 11 APR. Cabe puntualizar que el APR La Vega, únicamente se muestreó durante la segunda campaña, al no encontrarse operativo en la primera.

Los parámetros que superaron la norma de referencia en este acuífero fueron el Hierro y el Manganeseo.

En el Gráfico 7-15, el APR Cholqui Manantiales presenta concentraciones de Hierro superiores a la norma de Agua Potable NCh409 en ambas campañas, y el APR La Viluma sólo en la primera campaña de monitoreo.

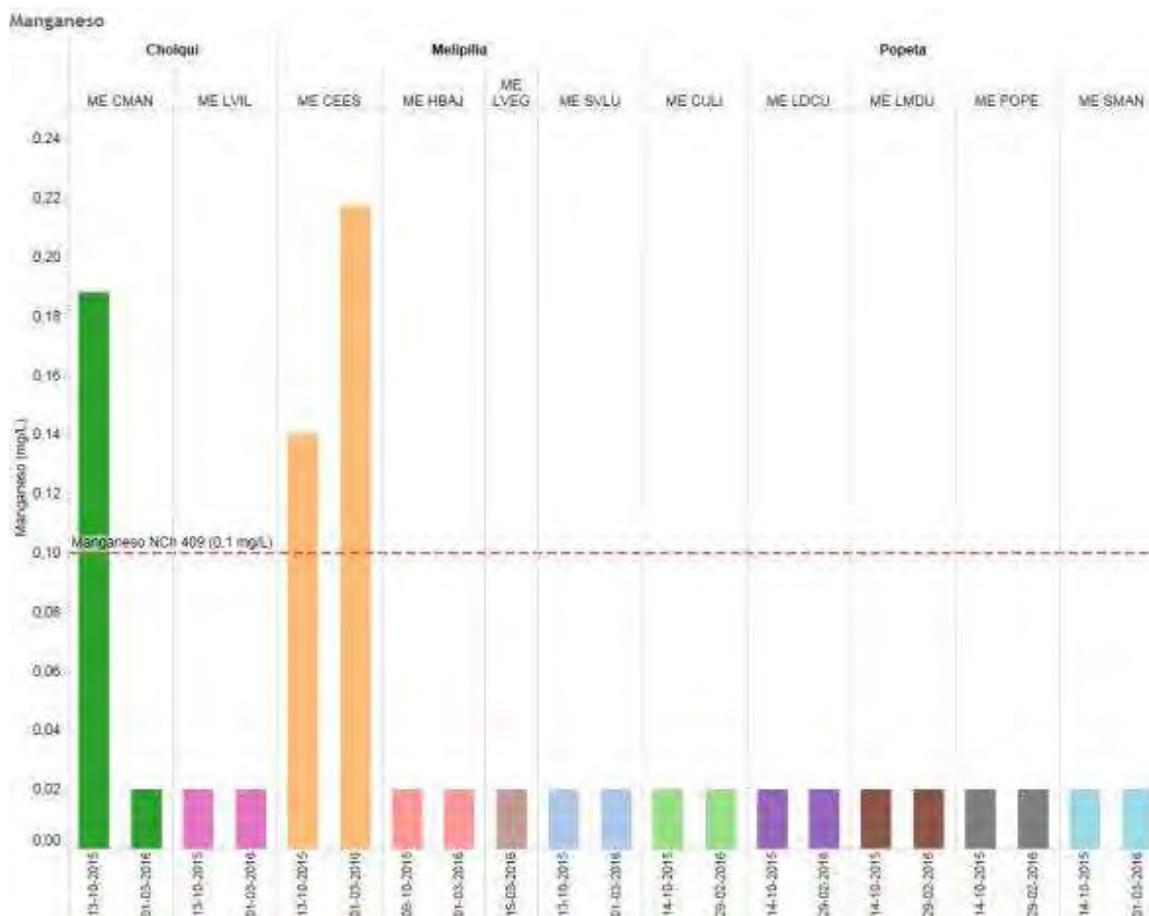
En cuanto al Manganeseo (Gráfico 7-16), los APR que presentaron concentraciones superiores a la Norma NCh 409 fueron APR Cholqui Manantiales (primera campaña) y APR Codigua El Esfuerzo, en ambas campañas de monitoreo.

Gráfico 7-15. Concentración de Hierro (mg/L) en Sistema Melipilla. Campaña 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 7-16. Concentración de Manganeso (mg/L) en Sistema Melipilla. Campaña 2015 y 2016



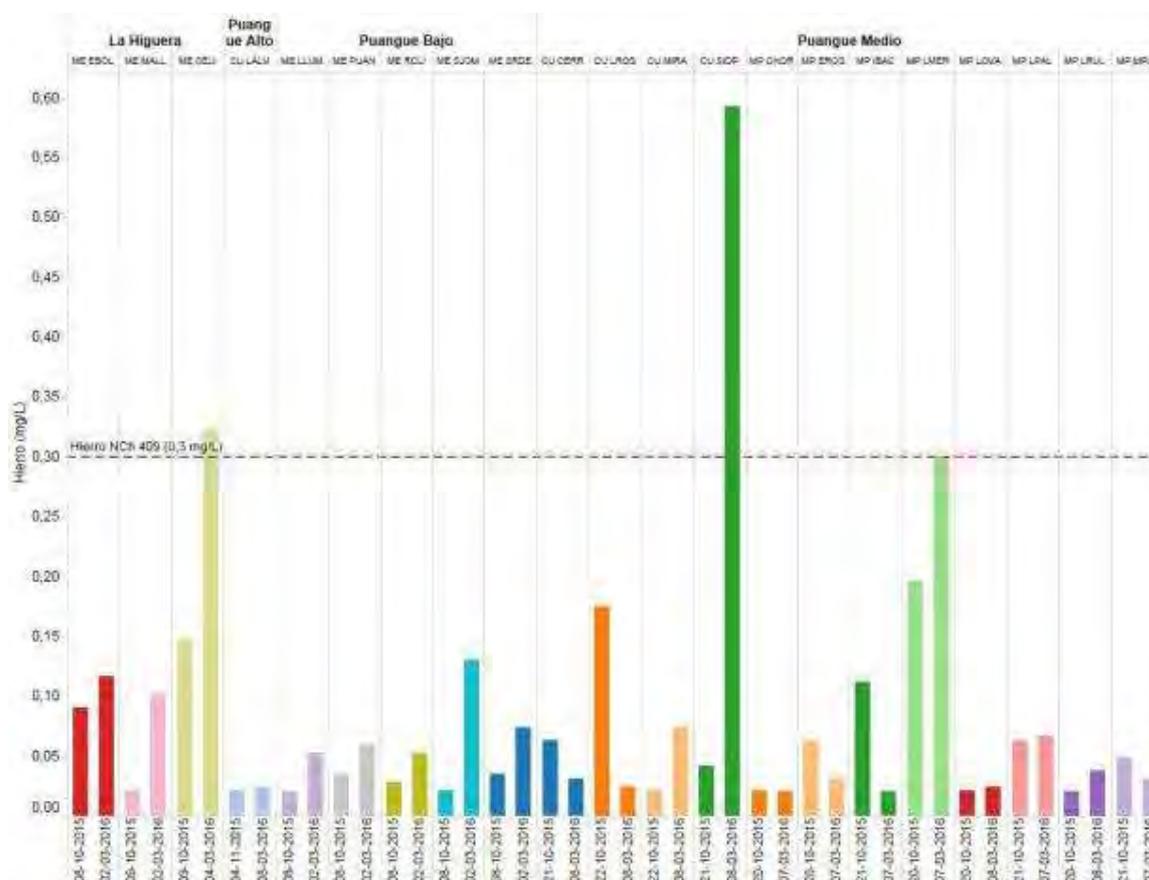
Fuente: Elaboración propia

7.4.5 Sistema acuífero Puangue

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes al Sistema Puangue, y únicamente aquellos que en algún caso superan los valores de referencia de algún parámetro de la Norma de Agua Potable NCh 409.

En primer lugar, en el Gráfico 7-17 se muestran las concentraciones de Hierro, donde se observa que en la segunda campaña de monitoreo, únicamente dos APR superaron el valor de referencia de la norma con valores de 0,32 mg/L y 0,59 mg/L, representados por los APR Santa Elisa y Santa Inés de Pataguilla, respectivamente.

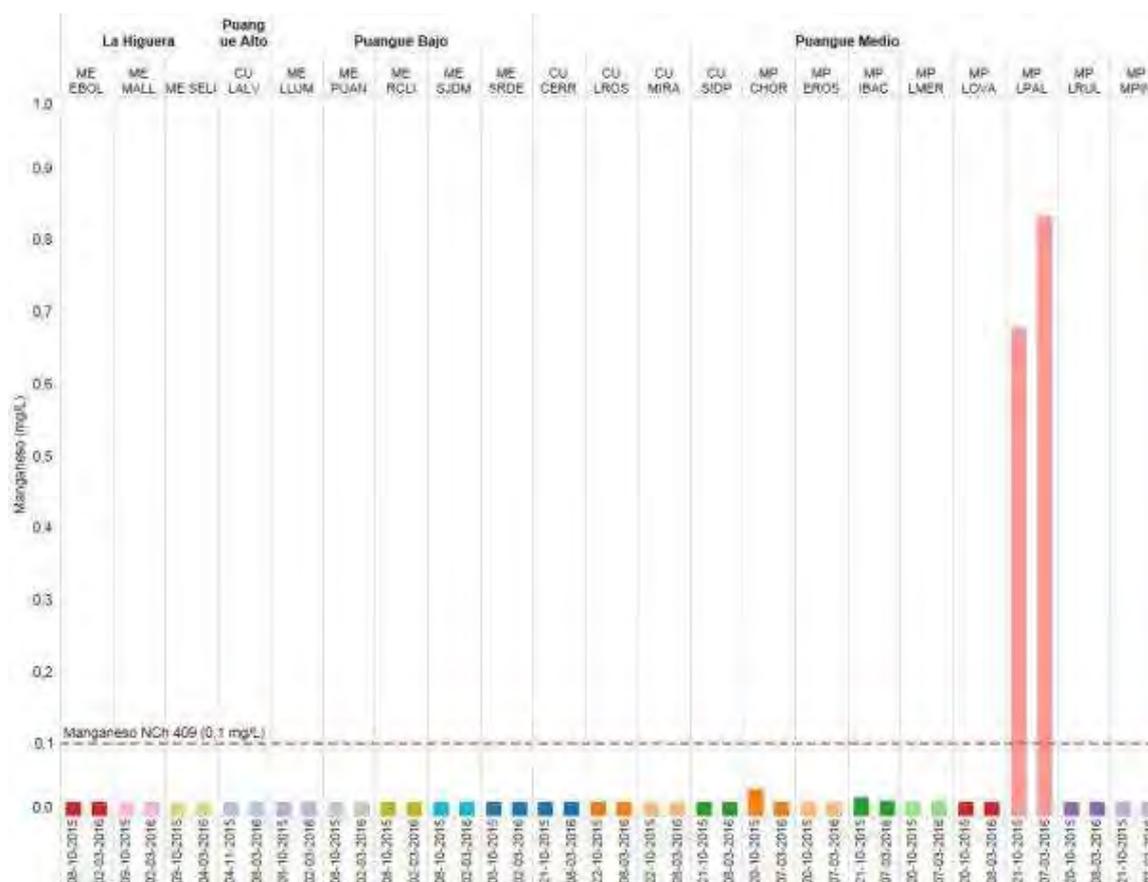
Gráfico 7-17. Concentración de Hierro (mg/L) en Sistema Puangue. Campaña 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

En el caso del Manganeso (Gráfico 7-18) se detectó un único pozo APR en todo el sistema Puangue con valores superiores a la Norma de Agua Potable NCh409, que corresponde al APR La Palma, ubicado en el sector acuífero de Puangue Medio. Este pozo presentó concentraciones de Manganeso de 0,67 mg/L y 0,83 mg/L para la primera y segunda campaña respectivamente, siendo el límite de la norma de 0,1 mg/L.

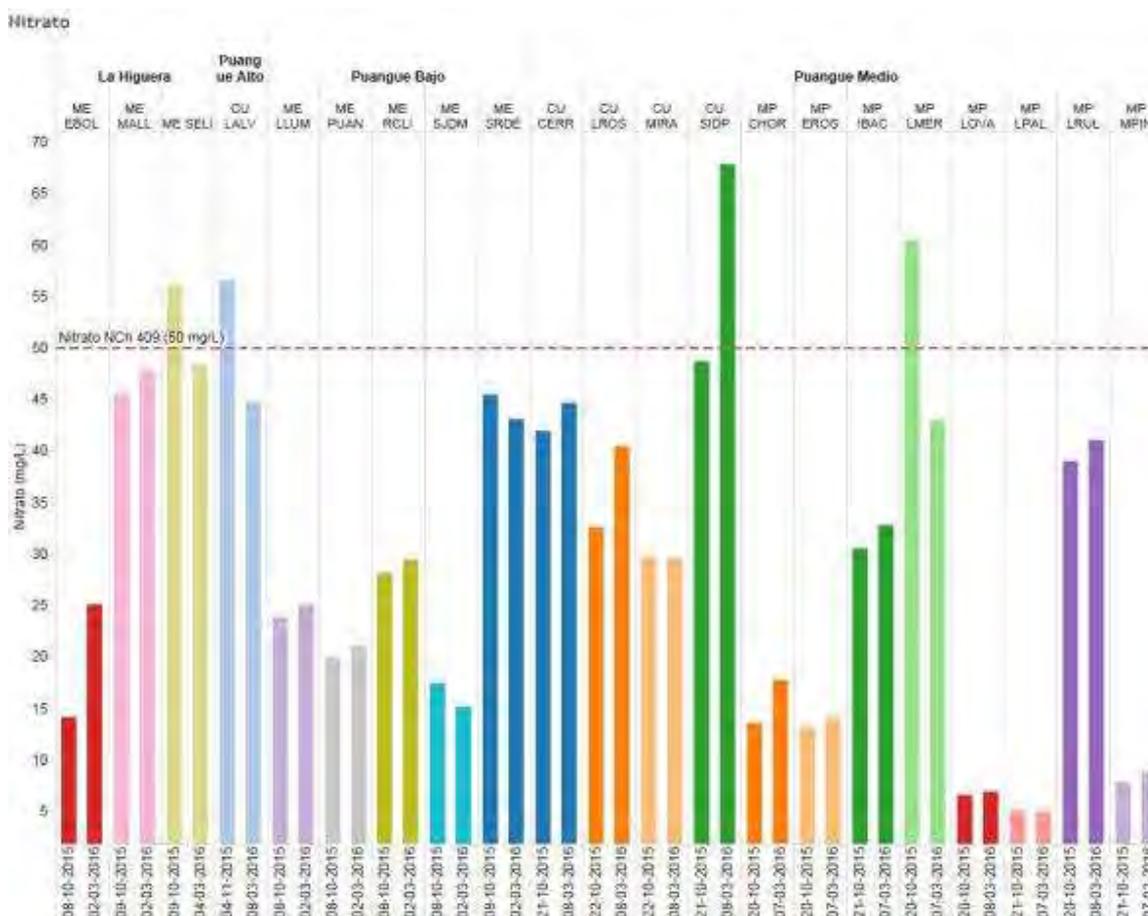
Gráfico 7-18. Concentración de Manganeso (mg/L) en Sistema Puangue. Campaña 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 7-19, el Nitrato se muestra sobre la norma de referencia en varios pozos del Sistema Puangue, ubicados en los sectores de La Higuera, Puangue Alto y Puangue Medio. Tal como se observa en el gráfico los APR que superaron la norma fueron Santa Elisa, Lo Alvarado, Santa Inés de Patagüilla y Las Mercedes. La máxima concentración se detectó en Santa Inés de Patagüilla con 67,9 mg/L, siendo el límite de referencia de 50 mg/L.

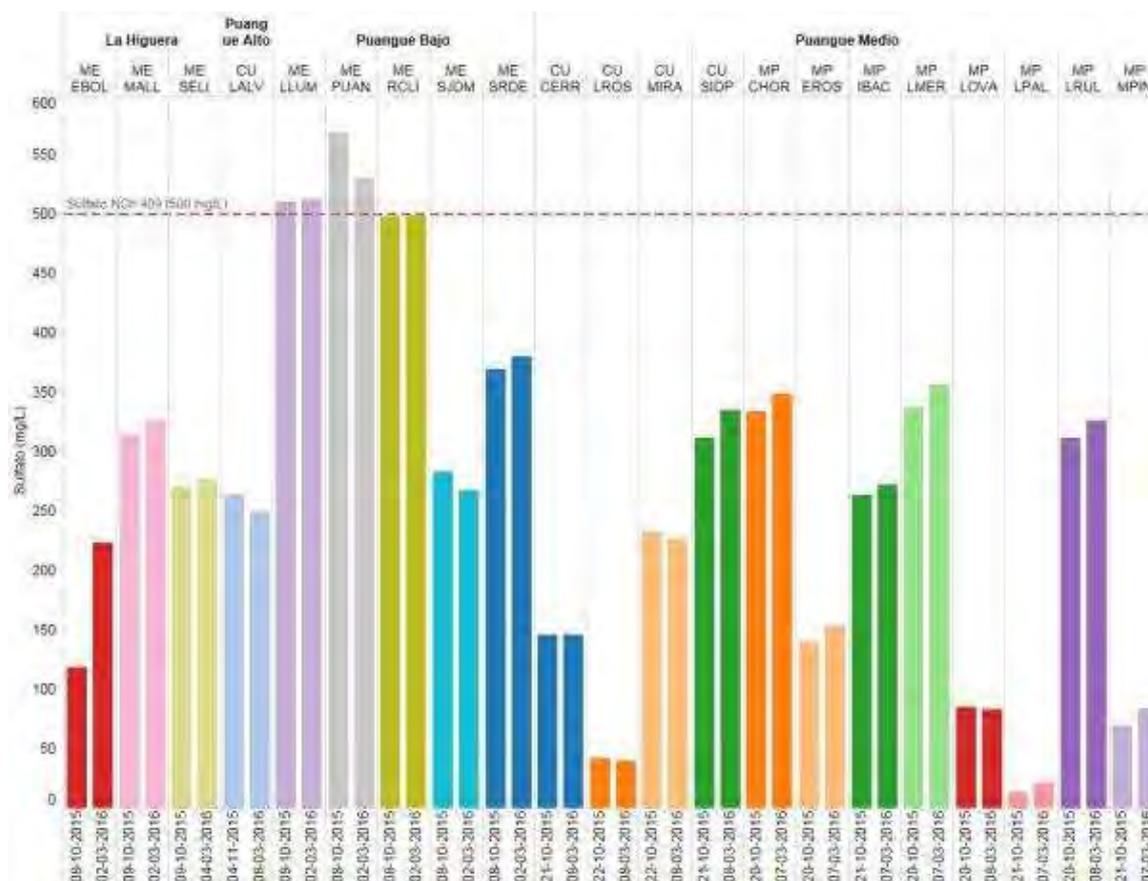
Gráfico 7-19. Concentración de Nitrato (mg/L) en Sistema Puangue. Campaña 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

En este sistema, el sector acuífero de Puangue Bajo es el único de la Región que presentó valores de Sulfato superiores a la norma de referencia NCh 409 (Gráfico 7-20). Los APR que presentaron una concentración superior a la norma NCh409 fueron el APR La Lumbre y el APR Puangue, este último con un valor máximo de 569 mg/L.

Gráfico 7-20. Concentración de Sulfato (mg/L) en Sistema Puangue. Campaña 2015 y 2016



Fuente: Elaboración propia

En síntesis, de todo lo expuesto anteriormente, se desprende que los parámetros que superan con más frecuencia la Norma de Agua Potable en los APR de la Región Metropolitana de Santiago son principalmente el Hierro, Manganeseo y Nitrato. El Arsénico, Sulfato y el pH también se detectaron por sobre la norma NCh 409 solo en algunos APR analizados.

Se han elaborado una serie de tablas resumen (Tabla 7-5 a Tabla 7-9) que muestran numéricamente los datos que superaron como referencia la norma de Agua Potable (en rojo), incluyendo además los valores de concentración máxima y mínima obtenida para cada parámetro, en ambas campañas de monitoreo.

Tabla 7-5. Resumen parámetros excedidos Sistema Chacabuco

Sistema Acuífero	Sistema Chacabuco					Resumen rangos concentración máxima y mínima		Límite Norma NCh 409
Acuífero	Chacabuco-Polpaico	Lampa		Til Til		Mínimo	Máximo	
NOMBRE APR	El Colorado	Nuevo Porvenir		Caleu				
Fecha	23-02-2016	30-10-2015	25-02-2016	03-11-2015	22-02-2016	Mínimo	Máximo	
pH terreno	8,35	7,47	7,72	6,39	6,90	6,39	8,35	6,5-8,5
Arsénico	0,011	0,005	0,003	0,002	0,001	0,001	0,011	0,01
Hierro	0,12	0,02	0,39	0,14	0,32	0,02	0,39	0,30

Tabla 7-6. Resumen parámetros excedidos Sistema Colina

Sistema Acuífero	Sistema Colina											Resumen rangos concentración máxima y mínima		Límite Norma NCh 409	
Acuífero	Colina Inferior		Colina Sur						Santiago Norte			Mínimo	Máximo		
NOMBRE APR	Reina Norte		Colo Colo		Estación Colina		Santa Luisa		Santa Marta de Liray		Noviciado-Peralito				
Fecha	07-10-2015	23-02-2016	03-11-2015	25-02-2016	07-10-2015	25-02-2016	06-10-2015	24-02-2016	07-10-2015	24-02-2016	03-11-2015	25-02-2016	Mínimo	Máximo	
Arsénico	0,003	0,004	0,01	0,02	0,003	0,16	0,007	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,160	0,01
Hierro	0,04	0,12	0,05	0,02	0,03	0,51	0,05	0,04	0,04	0,22	0,82	0,04	0,024	0,824	0,30
Manganeso	0,02	0,02	0,14	0,02	0,02	0,20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,11	0,02	0,02	0,20	0,10
Nitrato	63,20	63,60	7,24	7,09	7,22	9,44	67,00	76,90	49,90	58,80	25,70	25,90	7,09	76,9	50,00

Tabla 7-7. Resumen parámetros excedidos Sistema Melipilla

Sistema Acuífero	Sistema Melipilla						Resumen rangos concentración máxima y mínima		Límite Norma NCh 409
Acuífero	Cholqui				Melipilla		Mínimo	Máximo	
NOMBRE APR	Cholqui Manantiales		La Viluma		Codigua El Esfuerzo				
Fecha	13-10-2015	01-03-2016	13-10-2015	01-03-2016	13-10-2015	01-03-2016	Mínimo	Máximo	
Hierro	3,81	0,54	1,28	0,08	0,04	0,03	0,02	3,81	0,30
Manganeso	0,19	0,02	0,02	0,02	0,14	0,22	0,02	0,22	0,10

Tabla 7-8. Resumen parámetros excedidos Sistema Maipo- Mapocho y Maipo Alto

Sistema Acuífero	Sistema Maipo Mapocho																							Resumen rangos concentración máxima y mínima		Límite Norma NCh 409			
	Maipo Alto		Buin				El Monte				Paine				Santiago Central														
	NOMBRE APR	Santa María del Estero	El Cerrillo		El Romeral		El Paico Alto		Rangue Los Hornos		Santa Mariana La Manresa		Colonia Kennedy		Hospital Champa		Casas de Pudahuel		El Trebal			La Esperanza - Santa Mónica			Pelvín			Mínimo	Máximo
Fecha	02-11-2015	26-02-2016	28-10-2015	14-03-2016	29-10-2015	26-02-2016	28-10-2015	04-03-2016	29-10-2015	14-03-2016	23-10-2015	04-03-2016	29-10-2015	10-03-2016	28-10-2015	11-03-2016	04-11-2015	25-02-2016	22-10-2015	09-03-2016	22-10-2015	09-03-2016	22-10-2015	09-03-2016	23-10-2015	04-03-2016	Mínimo	Máximo	
Arsénico	0,015	0,003	0,003	0,001	0,002	0,001	0,004	0,001	0,002	0,001	0,002	0,003	0,002	0,001	0,003	0,008	0,004	0,005	0,003	0,004	0,003	0,002	0,003	0,004	0,003	0,004	0,001	0,015	0,01
Hierro	62,88	0,86	0,02	0,02	0,59	0,19	0,09	0,18	1,17	0,02	0,03	0,02	0,02	0,07	0,34	0,10	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,09	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02	62,88	0,30
Manganeso	3,08	0,07	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	3,08	0,10
Nitrato	8,32	<0,02	41,80	53,70	30,70	52,90	61,90	49,50	17,30	19,50	47,70	67,00	12,60	15,10	3,92	4,59	51,60	36,90	114,00	78,90	75,00	79,00	57,50	74,00	0,02	114	50,00		
Sulfato	1,59	18,20	375,00	357,00	464,00	421,00	277,00	283,00	27,20	21,40	327,00	325,00	64,30	62,60	18,20	18,20	639,00	542,00	331,00	324,00	378,00	353,00	391,00	376,00	1,59	639	500,00		

Tabla 7-9. Resumen parámetros excedidos Sistema Puangue

Sistema Acuífero	Sistema Puangue														Resumen rangos concentración máxima y mínima		Límite Norma 409
	La Higuera		Puangue Alto		Puangue Bajo				Puangue Medio								
	NOMBRE APR	Santa Elisa	Lo Alvarado		La Lumbraera		Puangue		La Palma		Las Mercedes		Santa Inés de Patagüilla		Mínimo	Máximo	
Fecha	09-10-2015	04-03-2016	04-11-2015	08-03-2016	08-10-2015	02-03-2016	08-10-2015	02-03-2016	21-10-2015	07-03-2016	20-10-2015	07-03-2016	21-10-2015	08-03-2016	Mínimo	Máximo	
Hierro	0,15	0,32	0,02	0,02	0,02	0,05	0,04	0,06	0,06	0,07	0,20	0,30	0,04	0,59	0,02	0,59	
Manganeso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,68	0,83	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,83	
Nitrato	56,10	48,40	56,60	44,80	23,90	25,10	19,90	21,20	5,05	4,97	60,50	43,00	48,80	67,90	4,97	67,9	
Sulfato	271,00	277,00	265,00	250,00	511,00	513,00	569,00	530,00	13,60	21,30	337,00	357,00	312,00	335,00	13,6	569	

8 CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA DE SECTORES ACUÍFEROS DE LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

8.1 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS LOCALES

Los parámetros locales representan la segunda parte de este trabajo, y son aquellos que dan cuenta de la calidad química del acuífero, en cuanto a las características hidrogeoquímicas de ocurrencia natural o de actividades locales que se desarrollen en el sector acuífero. La elección de los parámetros químicos locales se realizó siguiendo los siguientes pasos mencionados por la DGA (2009), en su estudio "Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos". Estos son:

- 1) Recopilación de antecedentes de posibles efectos que eleven el valor de la concentración de parámetros químicos en un sector acuífero. Para ello, en cada sector acuífero de la Región Metropolitana de Santiago, se interpretaron los posibles efectos, tales como:
 - Efectos de origen natural: geología, volcanes, interacción con agua de río, y termas.
 - Efectos de origen antrópico: derrames industriales, depósitos de residuos industriales líquidos (RILes), tranques de relave, vertederos, actividades agrícolas, ganaderas, etc.
- 2) Estudio de posibles fuentes que modifiquen la química natural del agua subterránea. Se consideró los parámetros químicos asociados y su relación con valores propuestos por normas nacionales e internacionales de Agua Potable y de Riego, y su porcentaje de remoción mediante un tratamiento tradicional para agua potable, ya definido en el estudio de la DGA (2009).
- 3) Selección de dos parámetros siguiendo uno o más criterios establecidos. Entre estos:
 - Parámetros más abundantes con respecto a una de las normas consideradas,
 - Parámetros más riesgosos para la salud,
 - Parámetros minoritarios de mayor concentración,
 - Parámetros no correlacionados y representativos de actividades antrópicas distintas.

Con los antecedentes recopilados respecto a la geología, hidrogeología, uso de suelos, entre otros aspectos, que se presentaron en los capítulos anteriores del presente estudio, y los resultados químicos de las aguas de los pozos APR de la Región Metropolitana de Santiago, a continuación se caracterizan los posibles orígenes asociados a efectos de ocurrencia natural y de origen antrópico de los parámetros locales a escoger para determinar su Índice de Calidad por pozo y por sector acuífero.

8.1.1 Caracterización de posibles contaminantes de ocurrencia natural

La calidad físico química depende principalmente de la composición del agua de recarga, las interacciones entre el agua-suelo, suelo-gas y las rocas con las cuales se encuentra en contacto en la zona no saturada, tiempo de residencia y de las distintas reacciones

que se producen en el sector acuífero. Por lo tanto, la calidad puede ser variable incluso en una misma área si existen rocas de distinta composición y solubilidad (DGA, 2009).

Los antecedentes geológicos e hidrogeológicos y las características químicas de los flujos de agua, a escala nacional, señalan que en general, salvo ciertas excepciones en algunas regiones extremas de Chile, donde se desarrollan grandes cuencas sedimentarias, la litología puede no tener un rol importante como elemento responsable de la concentración ciertos parámetros en disueltos en el agua (DGA, 2009).

Los parámetros contaminantes de origen natural potencialmente estarían relacionados con las concentraciones naturalmente anómalas de parámetros en la corteza terrestre, que corresponde a las zonas donde se ubican por ejemplo los yacimientos minerales. El mayor riesgo de contaminación por causas de origen natural se presenta en las regiones del norte de Chile debido a las bajas tasas de precipitación (DGA, 2009).

En la Tabla 8-1 se presentan los principales posibles parámetros contaminantes de origen natural (según DGA, 2009). En esta Tabla se observa, que la Región Metropolitana de Santiago, lugar de estudio, los contaminantes naturales típicos para uso de Agua Potable corresponden a las concentraciones de Hierro, tanto en aguas superficiales como subterráneas.

Tabla 8-1. Posibles Compuestos Contaminantes debido a fenómenos naturales

REGIÓN	Contaminantes Naturales Típicos de Agua Superficial y Subterránea en Chile	
	Considerados en la NCh 409/1	No Considerados en la NCh 409/1
XV y I	Cl, SO ₄ , SDT, As, Mn	Al, B, Li, Mo, Ag, Ba, Asbesto, Sb, Na, U
II	As, Cl	Al, B, Li, Mo, Ag, Be, Ba, Sb, Na, U
III	SO ₄ , SDT	Al, B, Li, Mo, Va, Ag, Ba, Sb, Na, U
IV	-	Mo, Va, Ag, Ba, Asbesto, Sb, U
V	Fe, Mn	Al, Mo, Ba
RM	Fe	Al, Mo, Ba
VI	-	Al, Mo, Sb, U
VII	Fe	Al, Li, Va, Asbesto
VIII	Fe, Mn	Al, Ni, Asbesto
IX	Fe, Mn	Al, Mo, Ni, Asbesto
X	-	Al, Ni, Asbesto, Sb
XI	Fe	Mo, Ag, U
XII	-	Sb

Fuente: DGA, 2009

En la Región Metropolitana de Santiago, los contaminantes naturales típicos de aguas superficiales y subterráneas pueden estar asociados a la ocurrencia de fuentes termales y a la litología del área.

De los puntos APR monitoreados, ninguno se localiza cerca de fuentes termales, pero sí en sectores donde cierta litología puede dar origen a la lixiviación de metales y descenso del pH, como lo son las rocas andesíticas y algunos minerales, como sulfuros de hierro (Pirita). Los antecedentes geológicos de la Región (Acápite 5.2 del presente informe), señalan la ocurrencia de rocas volcánicas, las que afloran principalmente en el sector andino, y como "cerros-isla" en la Depresión Central de la Región.

8.1.2 Caracterización de posibles contaminantes de origen antrópico

Las principales fuentes contaminantes corresponden a residuos industriales líquidos y aguas servidas domésticas, cuya cantidad se ha ido incrementando en el tiempo correlacionándose con la industrialización y crecimiento del país. Los efectos de la actividad agrícola también son causa del deterioro de la calidad de las aguas producto de la lixiviación de las sales del suelo y a la incorporación de fertilizantes y pesticidas al sistema (DGA, 2009).

La Tabla 8-2 muestra un resumen con los metales pesados asociados a distintas actividades antrópicas realizadas en la Cuenca de Santiago, y parámetros químicos que pudieran estar relacionados a estas actividades.

De los antecedentes recopilados en la Región Metropolitana de Santiago, respecto al uso del suelo, desarrollo de industrias y obras mineras, entre otros, se concluye que las principales actividades que potencialmente podrían afectar la calidad de las aguas subterráneas en sectores acuíferos, corresponden a los siguientes tipos de actividades:

- Agricultura: Sector acuífero Maipo-Mapocho, Sector acuífero Chacabuco y Sector acuífero Alhué.
- Rellenos sanitarios: Sector acuífero Chacabuco.
- Minería: Sector acuífero Alhué, Sector acuífero Chacabuco y Sector acuífero Puangue.

Los resultados químicos que se presentan en el Capítulo 8, indican que de los metales pesados que se mencionan en la Tabla 8-2 y que fueron analizados en el presente estudio, entre estos: Arsénico, Cadmio, Cobre, Hierro, Manganeso, Mercurio, Plomo, Selenio y Zinc, los que superaron la norma de Agua Potable (NCh409) fueron:

- Arsénico
- Manganeso
- Hierro

Tabla 8-2. Metales y parámetros químicos asociados a distintos tipos de actividad antrópica

Actividad	Tipo de Actividad	Metales Asociados	Parámetros Químicos Asociados
Industria	Metalúrgica	As, Be, Bi, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, V, Zn	
	Química	Ba, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Sn, V, Zn	
	Papel	Cr, Cu, Pb, Hg, Ni	
	Textiles	As, Ba, Cd, Cu, Pb, Hg, Ni	
	Agroquímicos	As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Mn, Ni, Zn	
Agricultura	Fertilizantes	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn	K, NO ₃ , PO ₄ y SO ₂
	Pesticidas	Cu, As, Hg, Pb, Mn, Zn	
	Abonos	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	
	Líquidos Percolados	Cd, Ni, Cu, Pb, Zn	
Ganadería	Residuos orgánicos		NH ₄ , NO ₃ y TOC
Residuos Urbanos	Aguas Servidas	Pb, Cu, Zn, Cr	
	Rellenos Sanitarios	Cd, Cu, Pb, Sn, Cr, Hg, Co	NH ₄ , PO ₄ y TOC
Otros	Preservantes de la madera y corrosión de objetos metálicos	As, Cu, Zn, Cd	

Fuente: Modificado de DGA, 2009

Siguiendo los criterios de selección de parámetros locales que se menciona en el Sección 8.1, a continuación se describen brevemente los metales de interés y se realiza una comparación de éstos en la Tabla 8-3 para su selección y posterior análisis de Índice de Calidad por pozo y por sector acuífero.

Hierro

Se ha observado que el contenido de Hierro en las aguas subterráneas de la cuenca de Santiago tiende a ser mayor que en las aguas superficiales, lo que se ha interpretado como debido al mayor tiempo de residencia y superficie específica de contacto entre el agua y los sedimentos (DGA-Cade-Idepe, 2004).

De los pozos APR monitoreados la concentración máxima de Hierro alcanzó a 3,8 mg/L, y se representa como uno de los parámetros minoritarios de mayor concentración, cumpliendo con el criterio iii) de la Tabla 8-3 .

Aunque el Hierro puede tener un origen natural, producto de la lixiviación de rocas o minerales como piritita (FeS_2), también puede estar relacionado a la corrosión de los tubos de Hierro y a la disolución de este metal dentro de un sistema de abastecimiento APR. Si bien, las muestras representan agua del acuífero, no se descarta que el material de construcción de antiguos pozos podría incorporar cierto contenido de Hierro al agua.

Tabla 8-3. Criterios de selección de parámetros locales en la Región Metropolitana de Santiago

Criterios de selección parámetros locales	HIERRO	ARSÉNICO	MANGANESO
i) Parámetros más abundantes con respecto a una de las normas consideradas.			✓
ii) Parámetros más riesgosos para la salud.		✓	
iii) Parámetros minoritarios de mayor concentración.	✓		✓
iv) Parámetros no correlacionados y representativos de actividades antrópicas distintas.		✓	✓

Fuente: Elaboración propia

Manganeso

El Manganeso no se encuentra normalmente en las aguas naturales, solamente y en casos excepcionales en las aguas ácidas, generalmente asociado al Hierro y en el caso de alguna polución ambiental (Catalán, 1969; Custodio y Llamas, 1983). En la Tabla 8-2, la presencia de Manganeso se asociaría a los productos que se utilizan en la agricultura, que es una de las principales actividades en la Región, particularmente al uso de pesticidas.

De los pozos APR monitoreados se puede mencionar, que el Manganeso se detectó como referencia por sobre la norma NCh409 en cuatro de los siete sistemas acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago (Colina, Maipo-Mapocho, Puangue y Melipilla), con concentraciones de hasta 3,08 mg/L, siendo el parámetro más abundante y frecuente, con respecto a esta norma. De esta manera, este metal cumple con el criterio i) y iii) de la Tabla 8-3.

Cabe recalcar, que el Hierro y el Manganeso tienen un comportamiento químico similar, pudiendo tener un mismo origen, como son la formación de complejos orgánicos estables (Custodio y Llamas, 2001).

Arsénico

El Arsénico es uno de los parámetros que puede llegar a ser muy tóxico, particularmente en su forma inorgánica, para salud pública que utiliza el agua para beber, para preparar alimentos y regar cultivos. Y, al ser un parámetro riesgoso para la salud, cumple entonces con el criterio ii) de la Tabla 8-3.

De los pozos APR monitoreados, la concentración máxima de Arsénico fue de 0,16 mg/L, y se detectó superando la norma en dos sistemas acuíferos: Chacabuco y Colina.

El Arsénico puede tener más de un origen. Este puede provenir de la minería del oro y otros metales base. En el caso de la agricultura, puede estar relacionado a la aplicación excesiva de fertilizantes en el suelo, herbicidas y pesticidas. Y, en el área industrial como producto inorgánico que actúa como conservante para la madera (IGME, 2008). Dado estas características, este parámetro cumple además con el criterio IV) de la Tabla 8-3.

En resumen, se puede concluir que en base a los criterios del estudio de la DGA (2009) para la elección de los parámetros locales, se puede determinar para la Región Metropolitana de Santiago, 2 parámetros locales que son los contenidos de Arsénico y Manganeso (Tabla 8-3).

8.2 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD

8.2.1 Índice de Calidad por APR

Para la determinación del Índice de Calidad por pozo, se utilizó la concentración de los parámetros generales y locales de cada pozo APR monitoreado durante el presente estudio.

Las concentraciones de cada parámetro fueron clasificadas según el valor de corte propuesto para cada parámetro químico que se presenta en la metodología propuesta por la DGA (2009). En la Tabla 8-4 se presentan los valores de corte (VC) de los parámetros fijos y locales que se utilizarán para el cálculo del Índice de Calidad.

Tabla 8-4. Valores de corte de los parámetros fijos y locales

	Parámetro	Unidad	VC1	VC2	VC3	VC4
Fijos	SDT	mg/L	1.200 ^a	1.500 ^c	2.000 ^f	6.000 ^g
	Cloruro	mg/L	250 ^a	400 ^c	1.064 ^f	1.600 ^g
	Sulfato	mg/L	250 ^a	500 ^c	961 ^f	10.000 ^g
	Calcio	mg/L	100 ^a	200 ^d	401 ^f	4.000 ^g
	Sodio	mg/L	200 ^a	200 ^e	920 ^f	6.000 ^g
	Magnesio	mg/L	100 ^a	125 ^c	250 ^f	2.500 ^g
	Nitratos	mg/L	10 ^b	50 ^c	133 ^f	200 ^g
Locales	As	mg/L	0,01 ^a	0,01 ^d	2,00 ^e	4,00 ^k
	Mn	mg/L	0,05 ^c	0,10 ^d	0,20 ^e	40,00 ^k

Fuente: Modificado de DGA (2009)²

² Notas:

a: Fuente OMS. A excepción de Nitratos, para el resto de parámetros no existe un valor que afecte a la salud humana, por lo que valor límite es propuesto en base a aceptabilidad dada por el sabor. En caso del Calcio y Magnesio se adoptó criterios respecto a la dureza.

Los resultados del Índice de Calidad por parámetro de cada APR monitoreado se presentan en el Anexo 8, Apéndice 3, Tablas 1 y 2. Para el cálculo del Índice general por APR, se procedió a la elección del IC más alto entre los parámetros fijos y locales analizados en el presente estudio. Como resultado, ver Tablas 1 y 2, columna IC Máximo del Anexo 8, Apéndice 3, donde se obtiene un IC General que varía entre índices de calidad Excepcional a Insuficiente. La mayoría de los APR monitoreados presentan un IC Bueno, seguido por el IC de tipo Regular, Excepcional, y escasos de estos con IC de Insuficiente. (Gráfico 8-1) Cabe mencionar, que ninguno de los APR monitoreados en ambas campañas alcanzo un valor IC Intratable.

En la Figura 8-1 y Figura 8-2 se presenta los IC Generales por APR monitoreado en la 1^{era} Campaña de Octubre 2015 y 2^{da} Campaña de Febrero-Marzo 2016.

b: Fuente OMS. Valor máximo observado en zonas sin afectación antrópica, por lo que nivel inferior indicaría un origen natural.

c: Fuente NCh409. Valores límites en base a normativa chilena

d: Fuente OMS. Valor límite propuesto para la dureza, bajo el cual se reduce posible depositación de minerales en cañerías de agua potable y artefactos.

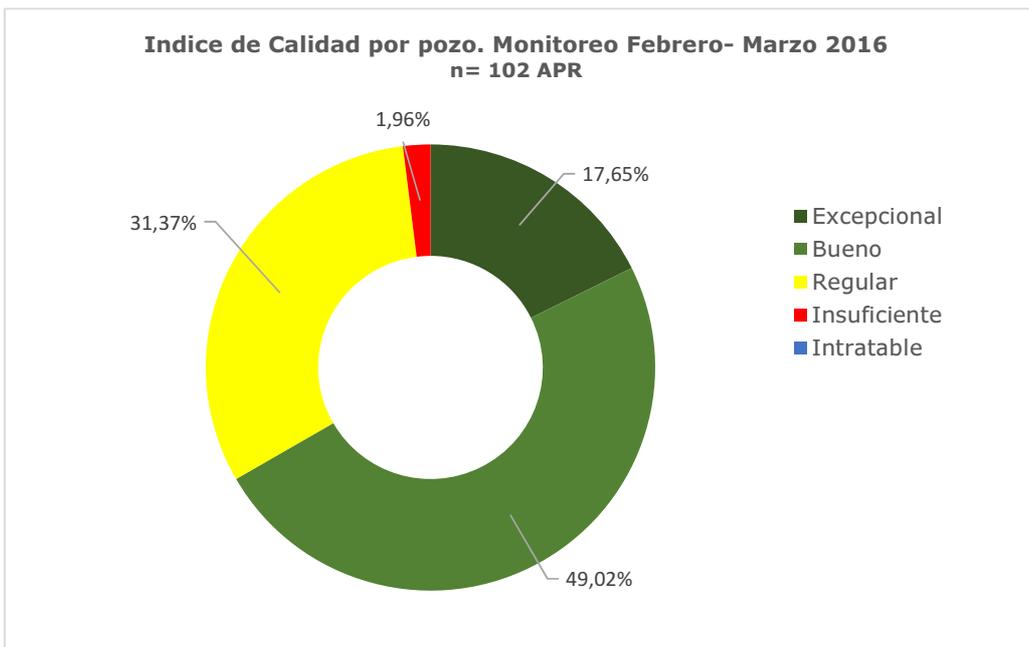
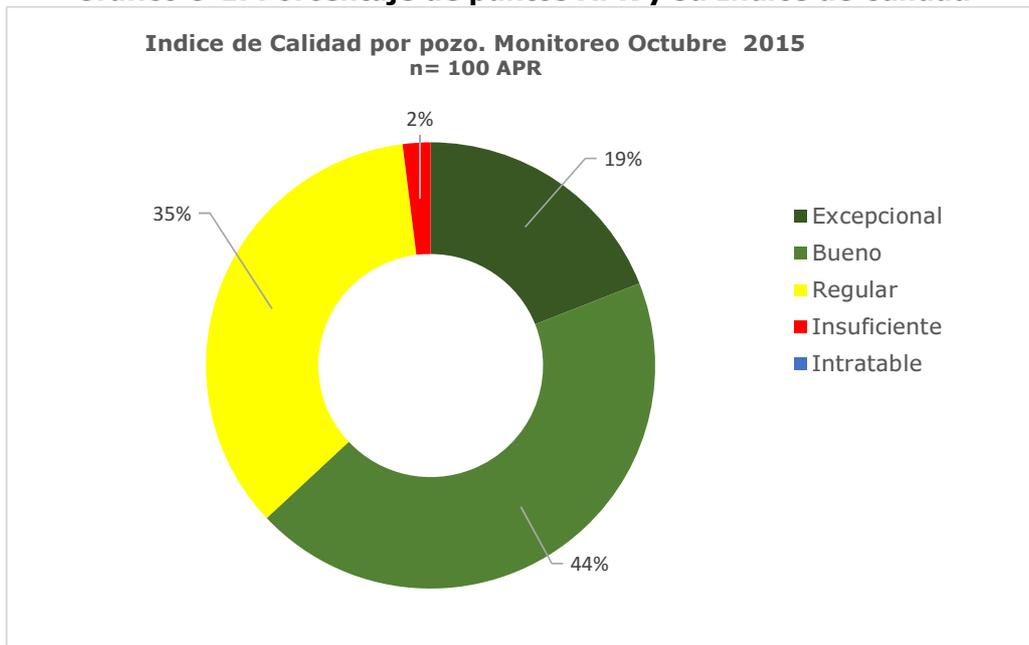
e: Fuente CE. Valor límite para el agua potable, y que coincide con valor propuesto por OMS.

f: Fuente FAO. Valor máximo entre aquellos que indican: a) potenciales problemas de irrigación, b) rangos normales de uso, y c) potencial riesgo para animales.

g: Fuente SISS (NCh777/1), Ec. 2 y Tabla 4.11. El valor VL coincide con valor de NCh409/1, excepto para el Calcio en que el valor adoptado es C2, y para el Sodio en que el valor adoptado es igual al C2 de SDT.

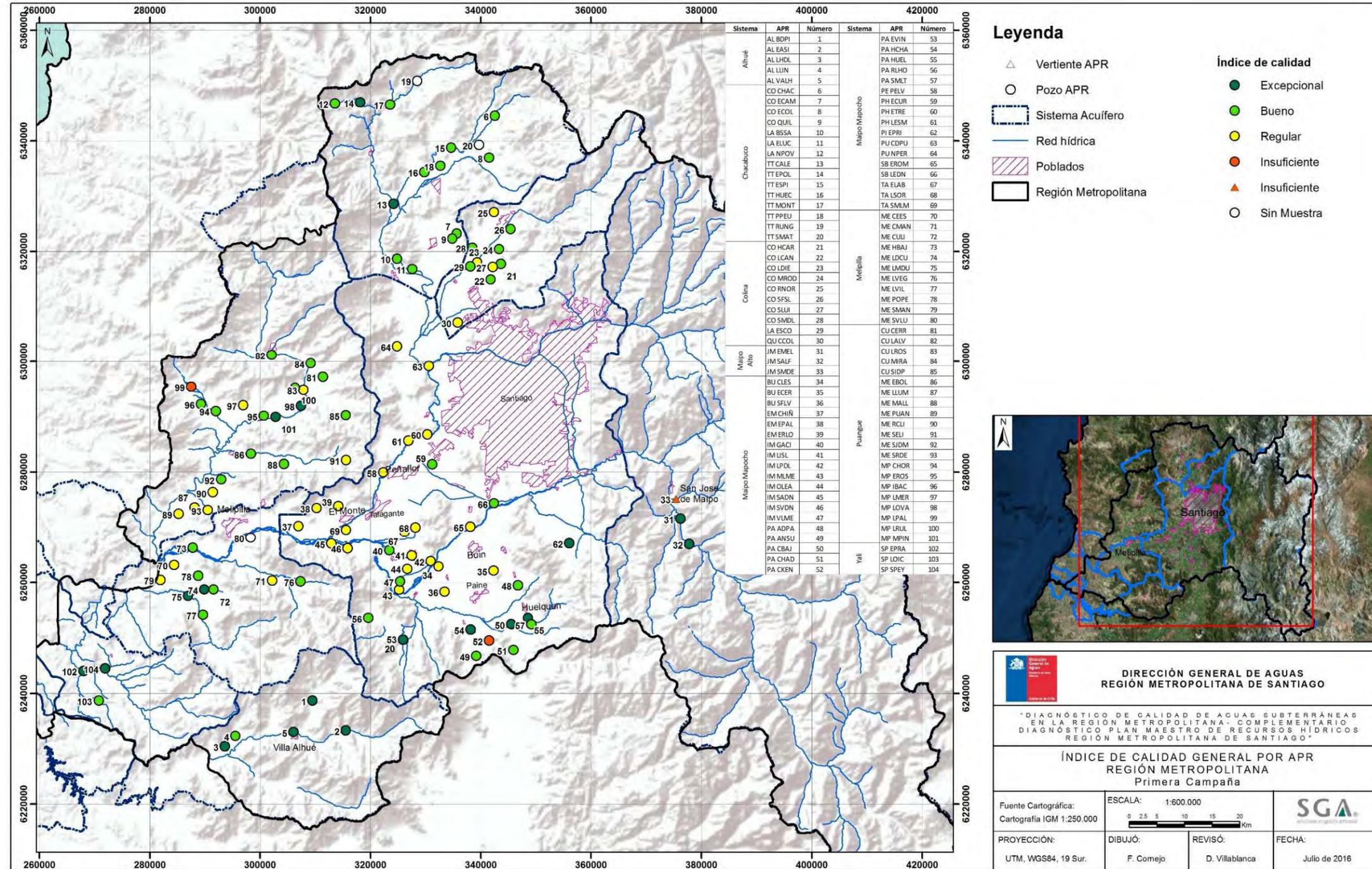
k: Estimación en base al valor límite y al porcentaje de eficiencia de remoción de este elemento. En el caso del manganeso y arsénico se adopta el valor límite de 10 mg/L y 1 mg/L, de acuerdo a concentración que define la SISS (NCh777/1) como tipo III.

Gráfico 8-1. Porcentaje de puntos APR y su Índice de Calidad



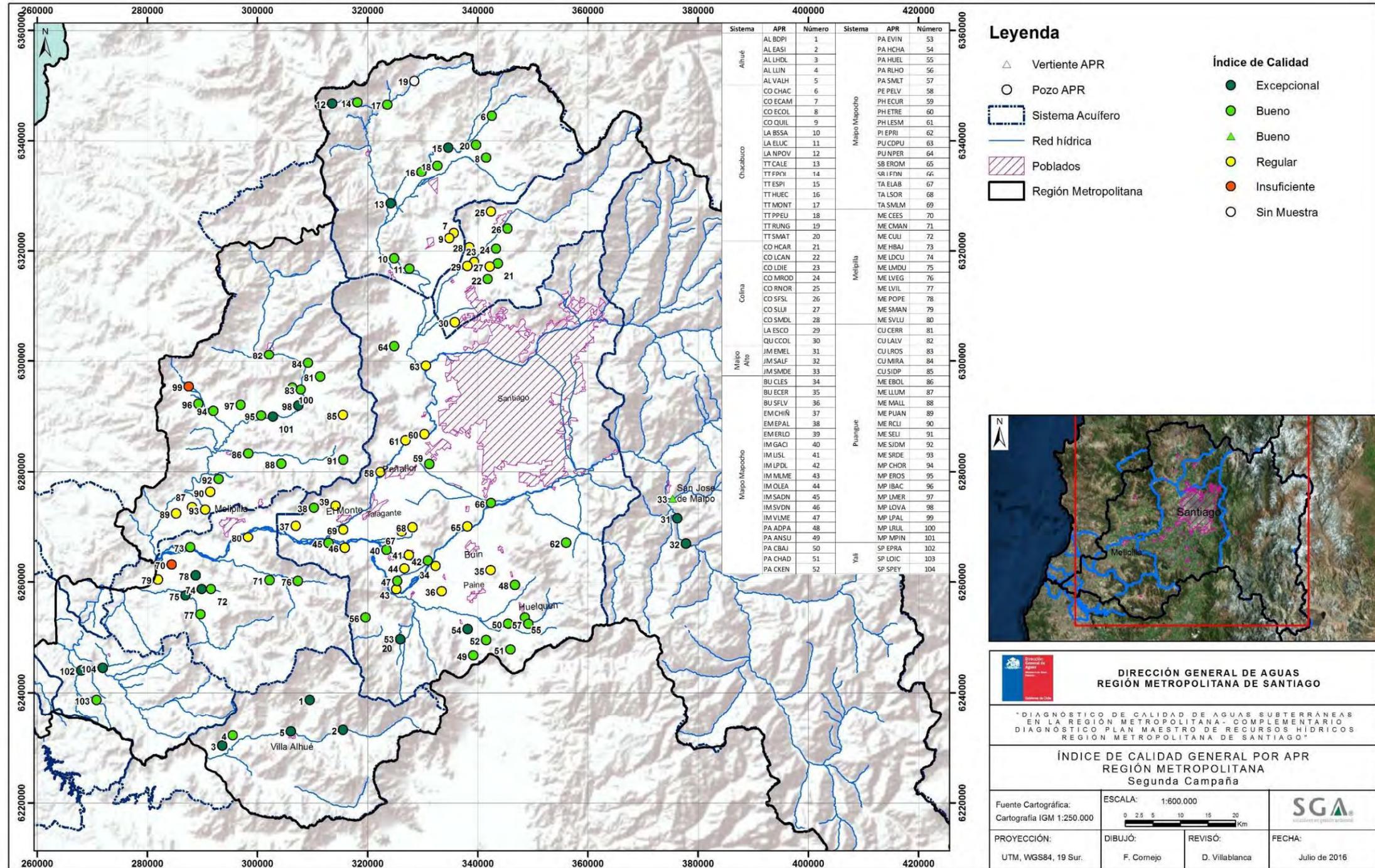
Fuente: Elaboración propia

Figura 8-1. Índice de Calidad General por APR. 1^{era} Campaña 2015



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-2. Índice de Calidad General por APR. 2^{da} Campaña 2016



Fuente: Elaboración propia

8.2.2 Índice de Calidad por Sistema acuífero

A continuación, se presentan los índices de calidad por sistema acuífero. Esto, en base a la elaboración de mapas de isoconcentraciones, que consiste en la interpolación de los resultados de las concentraciones de cada parámetro por pozo. Una vez obtenido el mapa de isoconcentración por parámetro se hizo una reclasificación por los valores de corte obteniendo el IC por parámetros químicos. (Ver Figuras en Anexo 8, Apéndice 3).

A través del análisis espacial se puede mencionar las siguientes características:

Sistema Chacabuco

Gran parte del acuífero presenta IC Excepcional. No obstante, en el sector sur de este sistema, a la altura de Batuco, se observan variaciones hacia IC inferior, de Bueno a Regular, principalmente en las concentraciones de Calcio, Nitrato, Arsénico y Manganeso.

Sistema Colina

Presenta un Índice de Calidad heterogéneo, siendo los parámetros de Nitrato, Arsénico y Manganeso los que más influyen en la porción sur del acuífero.

Sistema Maipo-Mapocho

Presenta un Índice de Calidad entre bueno y regular, principalmente en su porción central donde las concentraciones son más altas en Calcio, Sulfato y Nitrato.

Sistema Maipo Alto

El Sistema Maipo Alto presenta un IC Excepcional, estable, para todos los parámetros químicos considerados para este análisis. Se destaca que para el cálculo del Índice de Calidad no fue considerado el servicio APR Santa María del Estero, dado que se trata de un sistema de abastecimiento de agua superficial.

Sistema Puanque

En general presenta IC Excepcional en SDT, Sodio, Magnesio y Arsénico. Sin embargo, se observa que en una buena parte de este sistema, las altas concentraciones de Sulfato, Calcio y Nitrato hacen que el IC varía entre Bueno y Regular. El parámetro más crítico es el IC de Manganeso en el sector de Puanque Alto.

Sistema Yali

El Sistema Yali presenta un IC Excepcional, estable, y en caso todos los parámetros químicos considerados para este análisis. Solo el IC del Nitrato presenta una calidad relativamente buena, en ambos periodos monitoreados.

Sistema Melipilla

Este acuífero presenta un Excepcional Índice de Calidad en STD, Cloruros, Sodio, Magnesio y Arsénico. Sin embargo, tiende a variar entre Bueno y Regular en los parámetros de Calcio, Sulfato y Nitrato. Por otra parte, el IC de Manganeso en un área más local presenta un valor de Insuficiente.

Sistema Alhué

Casi toda la porción del acuífero Alhué tiene características de un IC Excepcional. Sólo una porción bastante local, al Oeste de Villa Alhué, presenta un IC Bueno en ambos períodos de monitoreo.

8.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL IC GENERAL

A través del análisis espacial y considerando los IC más altos de los parámetros por cada sector acuífero se puede mencionar las siguientes características:

Sistema Chacabuco

Gran parte del acuífero presenta una IC entre Excepcional y Bueno. No obstante, sectores entorno a la localidad de Batuco muestra una tendencia a un IC Regular.

Sistema Colina

Presenta un IC que varía en el tiempo y en gran parte del acuífero, desde IC Excepcional a Bueno, hasta Regulares en una misma área, incluso IC Insuficientes en áreas más restringidas.

Sistema Maipo-Mapocho

Entorno a las localidades de Peñaflor, Talagante, El Monte y Buin, el IC se mantiene Regular en el periodo de monitoreo de este estudio. No obstante, existen zonas, como lo es al sur de Paine, que las calidades pueden ser del tipo Insuficientes.

Sistema Maipo Alto

Este acuífero es de muy buena calidad, con IC principalmente Excepcional y localmente con IC Bueno, en ambos períodos de monitoreo.

Sistema Puanque

El acuífero resulta tener características de IC Buenas a Regulares, incluso con IC de Insuficiente en la porción occidental de uno de sus tributarios.

Sistema Yali

Este acuífero es de muy buena calidad, con IC principalmente Excepcional y localmente con IC Bueno, en ambos períodos de monitoreo.

Sistema Melipilla

Presenta características de IC Buenas a Regulares, y localmente de Insuficiente.

Sistema Alhué

Presenta características de muy buen acuífero, teniendo gran parte de este un IC Excepcional, y en menor proporción, y de manera restringida, un IC Bueno.

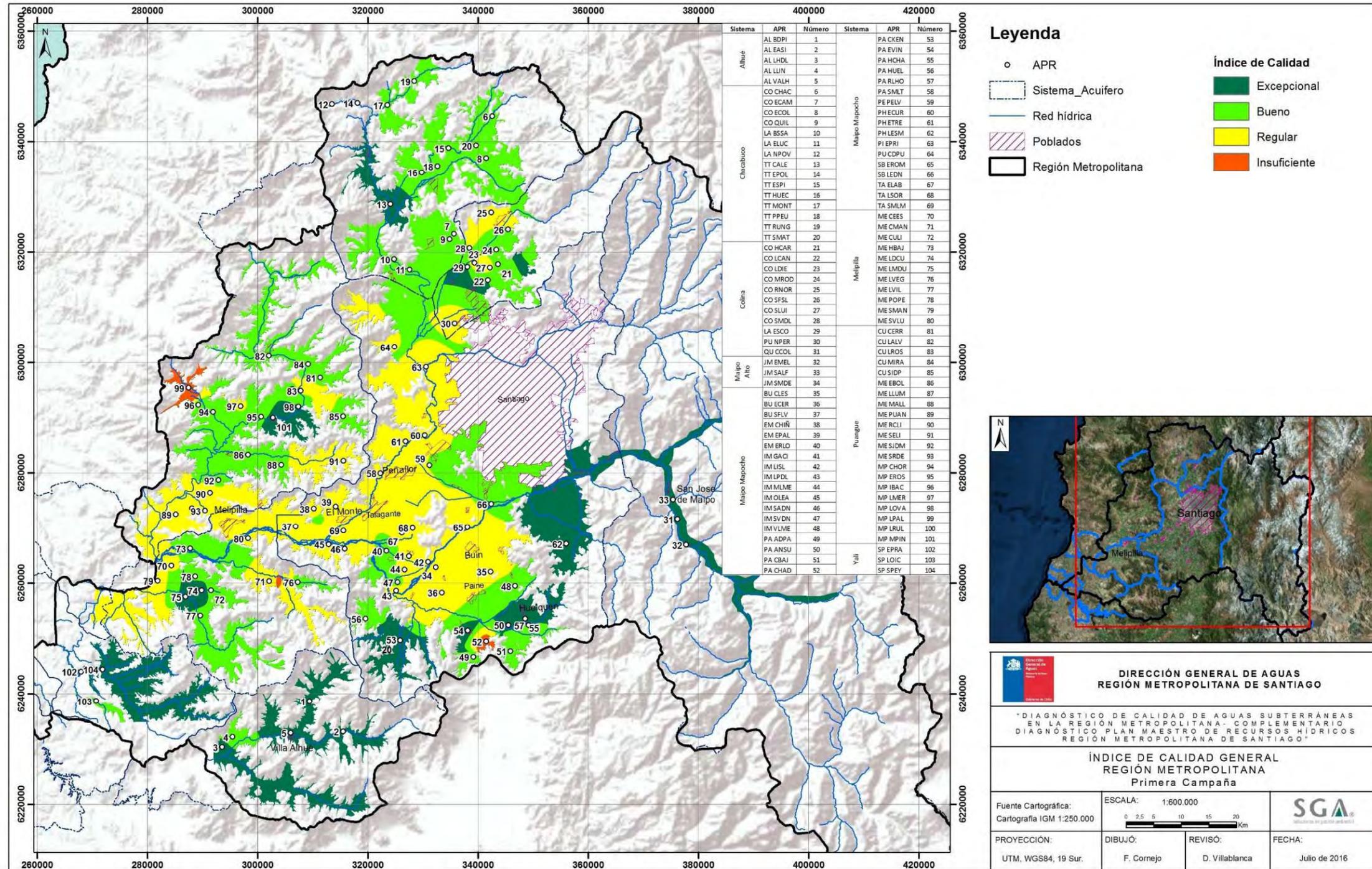
8.4 MAPAS REGIONALES DE CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE LAS AGUAS

En un contexto regional, el sistema acuífero en la porción central de la cuenca de Santiago, presenta un IC Regular, particularmente al Este y Sur de la localidad de Santiago. Los Índices de Calidad de los acuíferos al Norte de la localidad de Santiago tienden a ser de regulares a buenos, de igual manera el sistema acuífero más hacia el Oeste, definido como Sistema Puangue, aunque localmente presenta sectores restringidos que indican un constante IC de tipo Insuficiente.

Los mejores acuíferos, con un IC principalmente Excepcional, quedan representados en gran parte por los sistemas de Alhué y Yali.

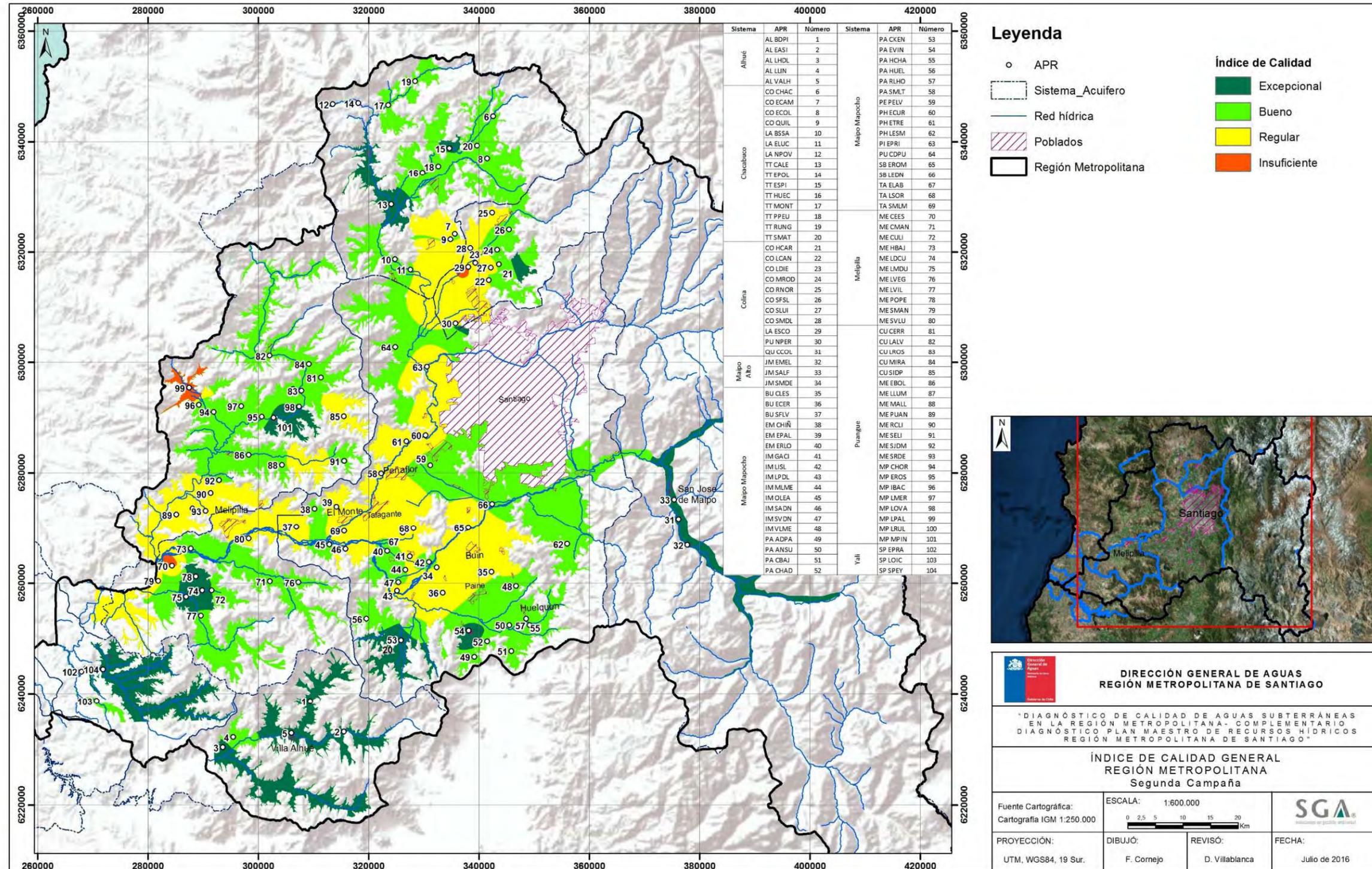
Por otro lado, son de interés los pozos APR que presentaron un empeoramiento en sus índices de calidad desde un IC Regular o Excepcional a un IC Insuficiente, como son los APR de Estación Colina (APR LA ESCO), comuna Lampa, y Codigua El Esfuerzo (ME CEES) en la comuna Melipilla. En ambos casos, también ocurrió por las concentraciones de Manganeseo, los que se reportaron en el límite o por sobre las normas de Riego y Agua Potable.

Figura 8-3. Índice de Calidad General de la Región Metropolitana de Santiago. 1^{era} Campaña 2015



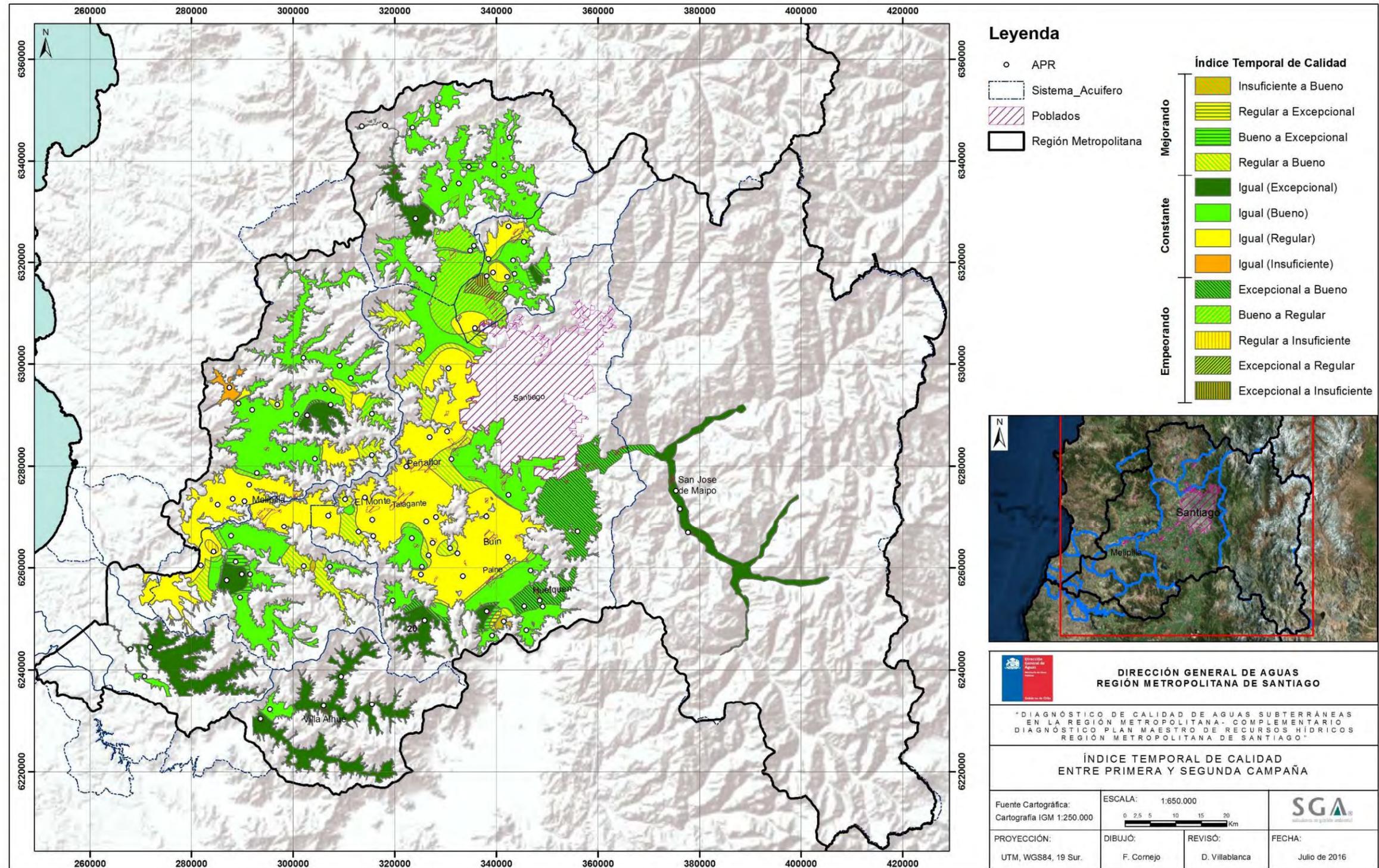
Fuente: Elaboración propia

Figura 8-4. Índice de Calidad General de la Región Metropolitana de Santiago. 2^{da} Campaña 2016



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-5. Índice Temporal de Calidad entre primera y segunda campaña



Fuente: Elaboración propia

9 PROPUESTA AMPLIACIÓN RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

9.1 DIAGNÓSTICO DE LA RED ACTUAL

La red de monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas consiste actualmente en la medición de 15 pozos en la Región Metropolitana de Santiago (Tabla 9-1), localizados principalmente alrededor de la ciudad de Santiago. La red incluye 14 pozos de observación y 1 pozo APR (APR Colo Colo, comuna de Quilicura), en los cuales se determinan parámetros físico-químicos *in situ*, iones mayoritarios y minoritarios, estos últimos comparables con las normas de Agua Potable NCh409 y de Riego NCh1333.

Tabla 9-1. Red actual de monitoreo de calidad de aguas subterráneas DGA

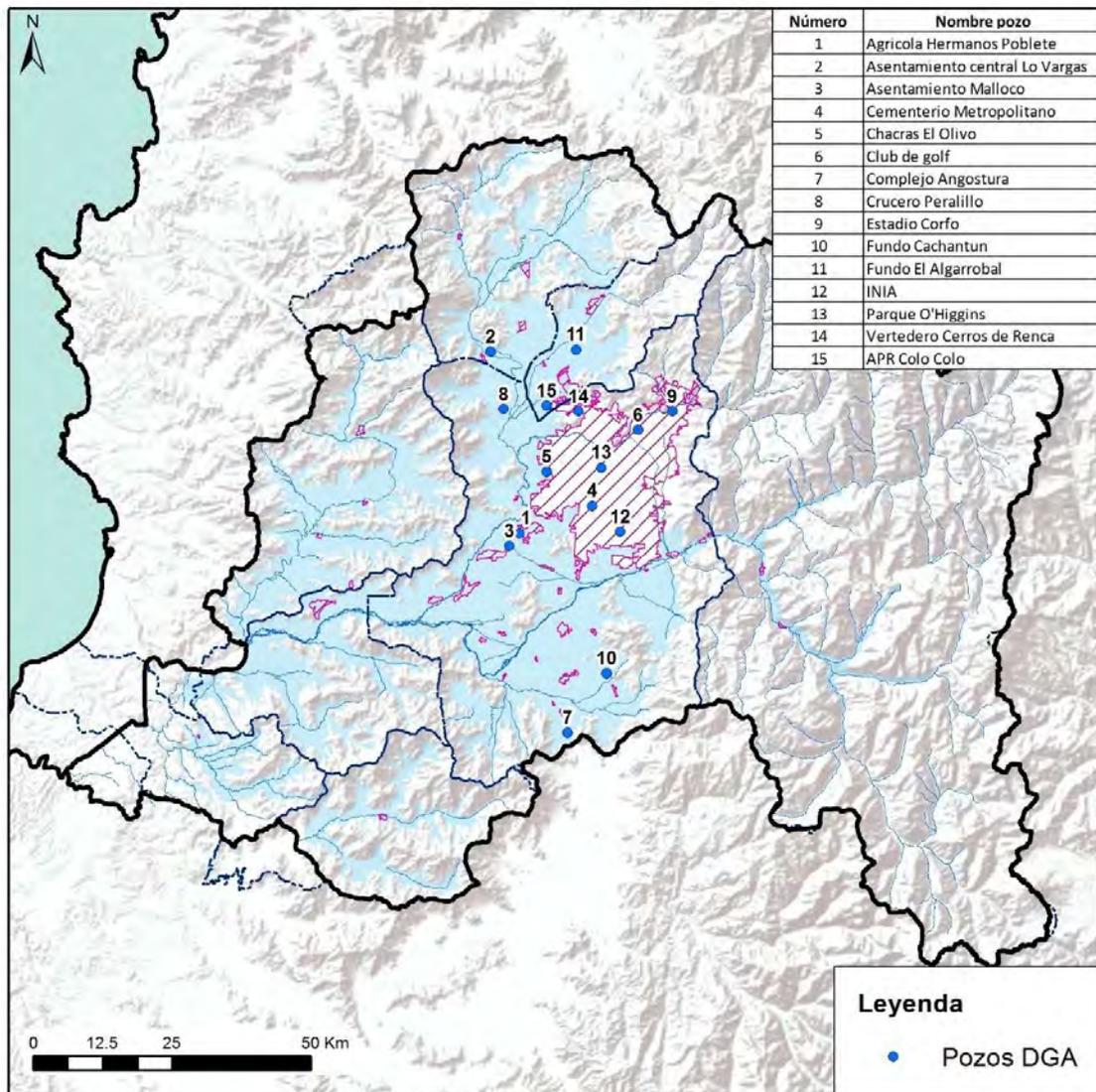
Número	Nombre pozo	Comuna
1	Agrícola Hermanos Poblete	Padre Hurtado
2	Asentamiento central Lo Vargas	Lampa
3	Asentamiento Malloco	Talagante
4	Cementerio Metropolitano	Lo Espejo
5	Chacras El Olivo	Maipú
6	Club de Golf	Vitacura
7	Complejo Angostura	Paine
8	Crucero Peralillo	Lampa
9	Estadio Corfo	Las Condes
10	Fundo Cachantún	Paine
11	Fundo El Algarrobal	Colina
12	INIA	La Pintana
13	Parque O'Higgins	Santiago
14	Vertedero Cerros de Renca	Quilicura
15	APR Colo Colo	Quilicura

Fuente: DGA

Se observa en la Figura 9-1, que la red actual de monitoreo de la DGA concentra gran parte del sistema Maipo-Mapocho (12 pozos) y, en menor proporción, en los sistemas acuíferos de Colina y Chacabuco, 2 pozos y 1 pozo, respectivamente.

En detalle, se aprecia que la red actual concentra 6 pozos dentro del área urbana de la Región Metropolitana de Santiago. De estos, solo el APR Colo Colo presenta un uso residencial e industrial, el resto de los pozos se desarrolla en áreas verdes de la ciudad de Santiago. Por ejemplo, Parque O'Higgins y Club de Golf.

Figura 9-1. Red actual de monitoreo de calidad de aguas subterráneas DGA



Fuente: DGA, 2009

A continuación, se presenta una nueva propuesta de ampliación de la red actual de monitoreo de calidad de aguas, a fin de ejercer la prevención y detección temprana de la presencia de sustancias que generen un aumento en las concentraciones químicas de ciertos parámetros que son nocivos, o que en ciertas concentraciones pueden llegar ser tóxicos, para la salud pública en los acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago.

9.2 PROPUESTA DE INCORPORACIÓN DE NUEVOS POZOS

La propuesta de nuevos pozos para ampliar la red actual de monitoreo de la DGA se refiere principalmente a la ubicación de éstos en la Región Metropolitana de Santiago. Los criterios para proponer esta nueva red se basan en la metodología elaborada por el estudio de la DGA (2009). Estos son cuatro criterios, que incluyen los siguientes aspectos:

- i. *Representación de pozos dentro de un radio óptimo, menor a 25 km* (Tabla 9-2). Para ello se ha considerado la geometría del acuífero, considerando que algunos sistemas están determinados por la morfología de valles, los cuales poseen una geometría compleja debido a la presencia de barreras hidrogeológicas, particularmente los que se desarrollan en el entorno de la cuenca de Santiago, por ejemplo el sistema Puangue. Es por ello, que se ha estimado un buffer de 5 km para los pozos de interés en un mismo sistema acuífero, como un radio más conservativo para su análisis, lo que permite que el radio de un pozo no se interponga en otro sistema.

Tabla 9-2. Densidad óptima de puntos de monitoreo según representatividad y grado de explotación del acuífero

Condición del Acuífero		Descripción		
Sobreexplotada		Niveles piezométricos poseen una tendencia temporal sostenida a la disminución. Poseen limitaciones a la explotación según resoluciones de la DGA.		
Sustentable		Niveles no han disminuido en el tiempo. Niveles muestran un comportamiento más o menos constante en el tiempo. No posee limitaciones a la explotación según resoluciones de la DGA.		

Condición del Acuífero		Densidad (puntos por km ²)		
		Óptima	Regular	Deficiente
Sin Intrusión Salina	Sobreexplotada	Menor a 25*	Entre 25 y 150	Mayor a 150
	Sustentable	Menor a 100*	Entre 100 y 200	Mayor a 200
Con Intrusión Salina	Sobreexplotada	Menor a 5**	Entre 5 y 15	Mayor a 15
	Sustentable	Menor a 10**	Entre 10 y 20	Mayor a 20

*: (EUROWATERNET, 1998); **: (DGA, 2005).

Fuente: DGA, 2009

- ii. *Definición de sectores o pozos con Índice de Calidad más deficiente.* El análisis de IC de temporalidad de este informe aporta antecedentes respecto a los sectores acuíferos con un marco de IC Insuficiente, como lo es el sector Las Palmas en el sistema acuífero Puangue, y otros que presentaron un aumento en la concentración de algún parámetro medido en este Estudio, como es el sector sur del acuífero Colina.

- iii. *Condición del acuífero respecto al grado de explotación.* DGA da cuenta que casi toda la Región Metropolitana de Santiago se encuentra con restricción, y particularmente con agotamiento al noreste de la ciudad de Santiago, por lo que para este estudio esta condición no es relevante.
- iv. *Cubrir la mayor superficie de los sistemas acuíferos.* La actual red de monitoreo en la Región Metropolitana de Santiago cubre principalmente el acuífero Maipo-Mapocho, por lo que resulta insuficiente para llevar cabo un diagnóstico y seguimiento adecuado de la calidad de las aguas subterráneas de la Región. De manera similar a otras regiones, el acceso a pozos de particulares y pozos de abastecimiento de Agua Potable Rural (APR) de la Dirección de Obras Hidráulicas hace posible aprovechar esta infraestructura para la ampliación de la actual red de monitoreo de calidad de aguas de la Región.

Considerando los criterios antes descritos, para cumplir con un correcto monitoreo de los acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago, se identifican 48 nuevos puntos de monitoreo, adicionales a los pozos que actualmente muestrea la DGA, los que se presentan en la Tabla 9-3. La ubicación de estos 48 pozos se presenta en la Figura 9-2.

Tabla 9-3. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo químico DGA

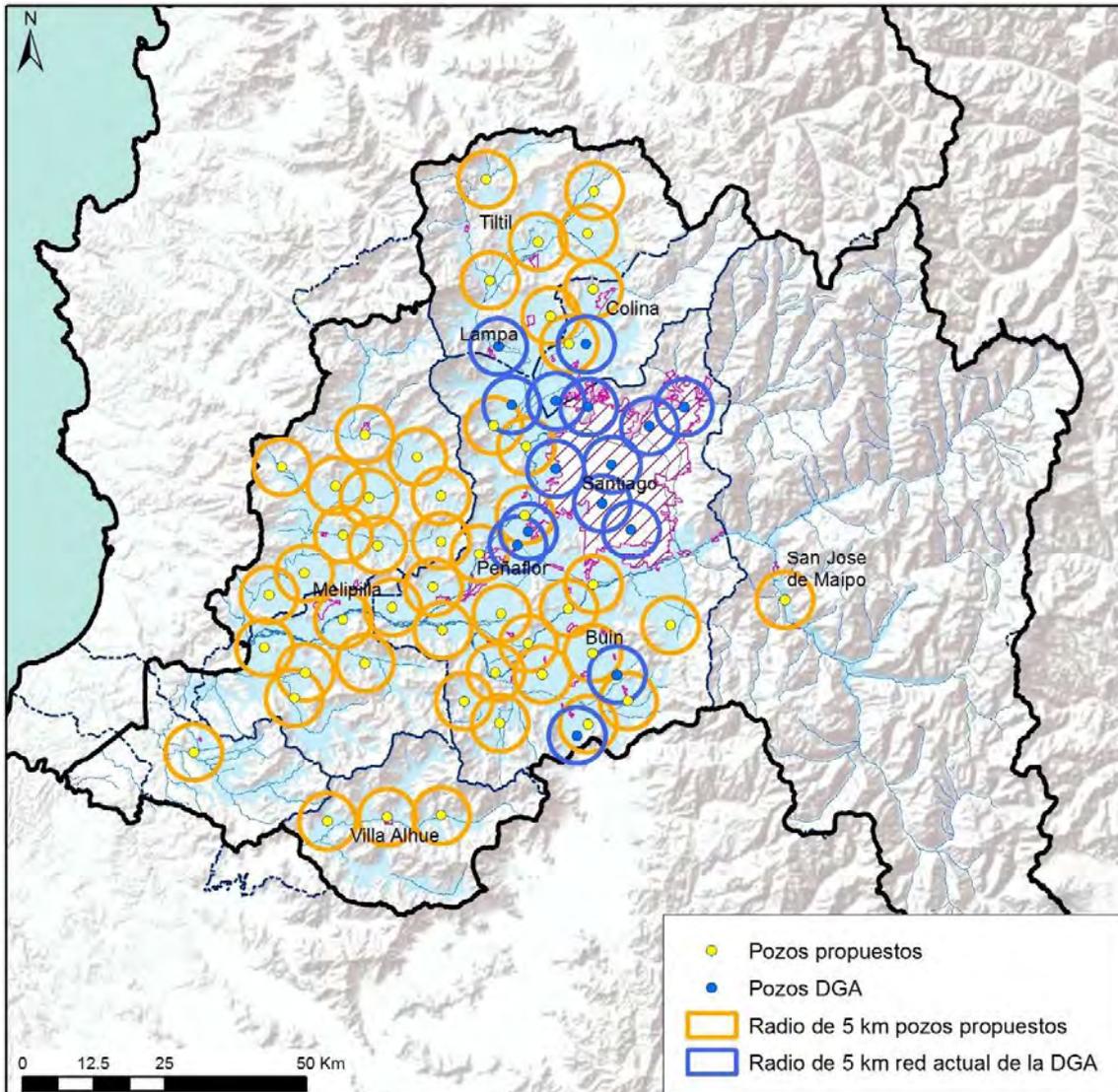
Número	Código APR	Nombre	Sistema Acuífero	Sector Acuífero
1	AL EASI	El Asiento	Sistema Alhué	Estero Alhué
2	AL LLIN	La Línea	Sistema Alhué	Estero Alhué
3	AL VALH	Villa Alhué	Sistema Alhué	Estero Alhué
4	CO CHAC	Chacabuco	Sistema Chacabuco	Chacabuco-Polpaico
5	CO QUIL	Quilapilún	Sistema Chacabuco	Chacabuco-Polpaico
6	LA BSSA	Batuco - Santa Sara	Sistema Chacabuco	Lampa
7	TT EPOL	Estación Polpaico	Sistema Chacabuco	Til Til
8	TT RUNG	Rungue	Sistema Chacabuco	Til Til
9	TT SMAT	Santa Matilde	Sistema Chacabuco	Chacabuco-Polpaico
10	CO RNOR	Reina Norte	Sistema Colina	Colina Inferior
11	LA ESCO	Estación Colina	Sistema Colina	Colina Sur
12	BU ECER	El Cerrillo	Sistema Maipo Mapocho	Buin
13	BU SFLV	Santa Filomena Las Vertientes	Sistema Maipo Mapocho	Buin
14	EM CHIÑ	Chíñique	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
15	EM ERLO	El Rosario Los Olmos	Sistema Maipo Mapocho	El Monte

Tabla 9-3. (continuación). Pozos propuestos para incorporar al monitoreo químico DGA

Número	Código APR	Nombre	Sistema Acuífero	Sector Acuífero
16	IM LPDL	La Puntilla de Lonquén	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
17	IM MLME	Monte Las Mercedes	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
18	IM SVDN	San Vicente de Naltahua	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
19	JM EMEL	El Melocotón	Sistema Maipo Mapocho	Alto Maipo
20	PA CKEN	Colonia Kennedy	Sistema Maipo Mapocho	Paine
21	PA EVIN	El Vinculo	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
22	PA HUEL	Huelquén	Sistema Maipo Mapocho	Paine
23	PA RLHO	Rangue Los Hornos	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
24	PE PELV	Pelvin	Sistema Maipo Mapocho	Santiago Central
25	PH ETRE	El Trebal	Sistema Maipo Mapocho	Santiago Central
26	PI EPRI	El Principal	Sistema Maipo Mapocho	Pirque
27	PU CDPV	Casas de Pudahuel	Sistema Maipo Mapocho	Santiago Central
28	PU NPER	Noviciado Peralito	Sistema Maipo Mapocho	Santiago Norte
29	SB EROM	El Romeral	Sistema Maipo Mapocho	Buin
30	SB LEDN	La Estancilla de Nos	Sistema Maipo Mapocho	Buin
31	TA ELAB	El Labrador	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
32	ME CEES	Codigua El Esfuerzo	Sistema Melipilla	Melipilla
33	ME CMAN	Cholqui Manantiales	Sistema Melipilla	Cholqui
34	ME CULI	Culiprán	Sistema Melipilla	Popeta
35	ME POPE	Popeta	Sistema Melipilla	Popeta
36	ME LVEG	La Vega	Sistema Melipilla	Melipilla
37	CU CERR	Cerrillos	Sistema Puangue	Puangue Medio
38	CU LROS	Las Rosas	Sistema Puangue	Puangue Alto
39	CU SIDP	Santa Inés de Patagüilla	Sistema Puangue	Puangue Medio
40	ME EBOL	El Bollenar	Sistema Puangue	La Higuera
41	ME MALL	Mallarauco	Sistema Puangue	La Higuera
42	ME PUAN	Puangue	Sistema Puangue	Puangue Bajo
43	ME RCLI	Rumay - Campo Lindo	Sistema Puangue	Puangue Bajo
44	ME SELI	Santa Elisa	Sistema Puangue	La Higuera
45	MP LMER	Las Mercedes	Sistema Puangue	Puangue Medio
46	MP LPAL	La Palma	Sistema Puangue	Puangue Medio
47	MP MPIN	María Pinto	Sistema Puangue	Puangue Medio
48	SP SPEY	San Pedro - El Yali	Sistema Yali	San Pedro

Fuente: Elaboración propia

Figura 9-2. Red de pozos propuestos para monitoreo de calidad química de aguas subterráneas DGA



Fuente: Elaboración propia

En consideración, a que un aumento de la red actual de monitoreo de 48 pozos es compleja, en términos de logística y tiempo óptimo de ejecución, es que se procede a indicar una priorización de los pozos, en términos de corto, mediano y largo plazo de implementación. Esto aplicando como criterios el Índice de Calidad general por pozo APR, la información de vulnerabilidad de acuíferos, y la norma chilena de Agua Potable NCh409, que se utiliza como referencia para caracterizar la calidad del agua subterránea, además de ser la más restrictiva para uso de consumo humano.

9.2.1 Incorporación a corto plazo

Los pozos prioritarios para ser añadidos a la red en el corto plazo serán los que cumplan una de las siguientes condiciones.

- En un primer criterio se incluirán los pozos que durante el presente estudio hayan mostrado un IC Insuficiente, para cualquiera de las dos campañas de monitoreo realizadas.
- El segundo criterio propone incluir a los pozos de los APR que hayan presentado en el análisis químico dos o más parámetros superiores a la norma NCh 409 (Ver desde Tabla 7-5 a la Tabla 7-9).

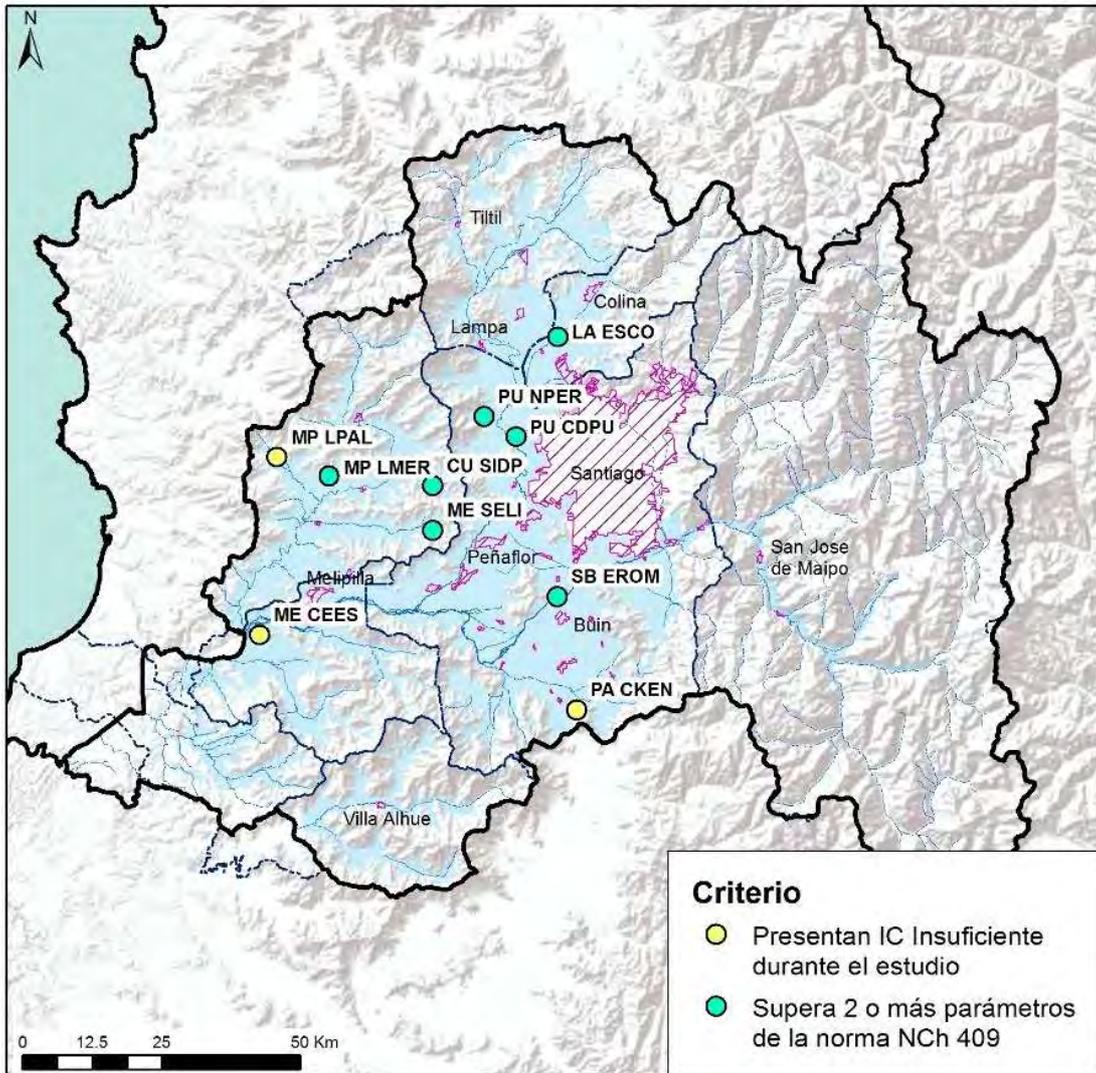
Los pozos que cumplen los criterios antes mencionados son 10 pozos APR y son la primera opción para ser incluidos en el monitoreo en un corto tiempo. Estos se listan en la Tabla 9-4 y se observan en la Figura 9-3.

Tabla 9-4. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en corto plazo

Criterio	Código APR	Nombre	Sistema Acuífero	Sector Acuífero
Presentan IC Insuficiente durante el estudio	ME CEES	Codigua El Esfuerzo	Sistema Melipilla	Melipilla
	MP LPAL	La Palma	Sistema Puangue	Puangue Medio
	PA CKEN	Colonia Kennedy	Sistema Maipo Mapocho	Paine
Superar 2 o más parámetros de la NCh 409	CU SIDP	Santa Inés de Patagüilla	Sistema Puangue	Puangue Medio
	LA ESCO	Estación Colina	Sistema Colina	Colina Sur
	ME SELI	Santa Elisa	Sistema Puangue	La Higuera
	MP LMER	Las Mercedes	Sistema Puangue	Puangue Medio
	PU CDPU	Casas de Pudahuel	Sistema Maipo Mapocho	Santiago Central
	PU NPER	Noviciado Peralito	Sistema Maipo Mapocho	Santiago Norte
	SB EROM	El Romeral	Sistema Maipo Mapocho	Buin

Fuente: Elaboración propia

Figura 9-3. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en corto plazo



Fuente: Elaboración propia

9.2.2 Incorporación a mediano plazo

Los pozos para ser añadidos a la red en el mediano plazo serán los que cumplan una de las siguientes condiciones.

- Un primer criterio, incluye los pozos que durante el presente estudio hayan mostrado para cualquiera de las dos campañas de monitoreo realizadas un IC Regular en 2 o más parámetros (fijos o locales),
- Un segundo criterio propone incluir a los pozos APR que hayan presentado en el análisis químico un parámetro superior a la norma NCh 409 (ver desde Tabla 7-5 a la Tabla 7-9),

- Un tercer criterio, engloba los pozos APR que se localizan en una zona de “Muy Alta” de vulnerabilidad de acuífero, según se aprecia en la Figura 5-14.

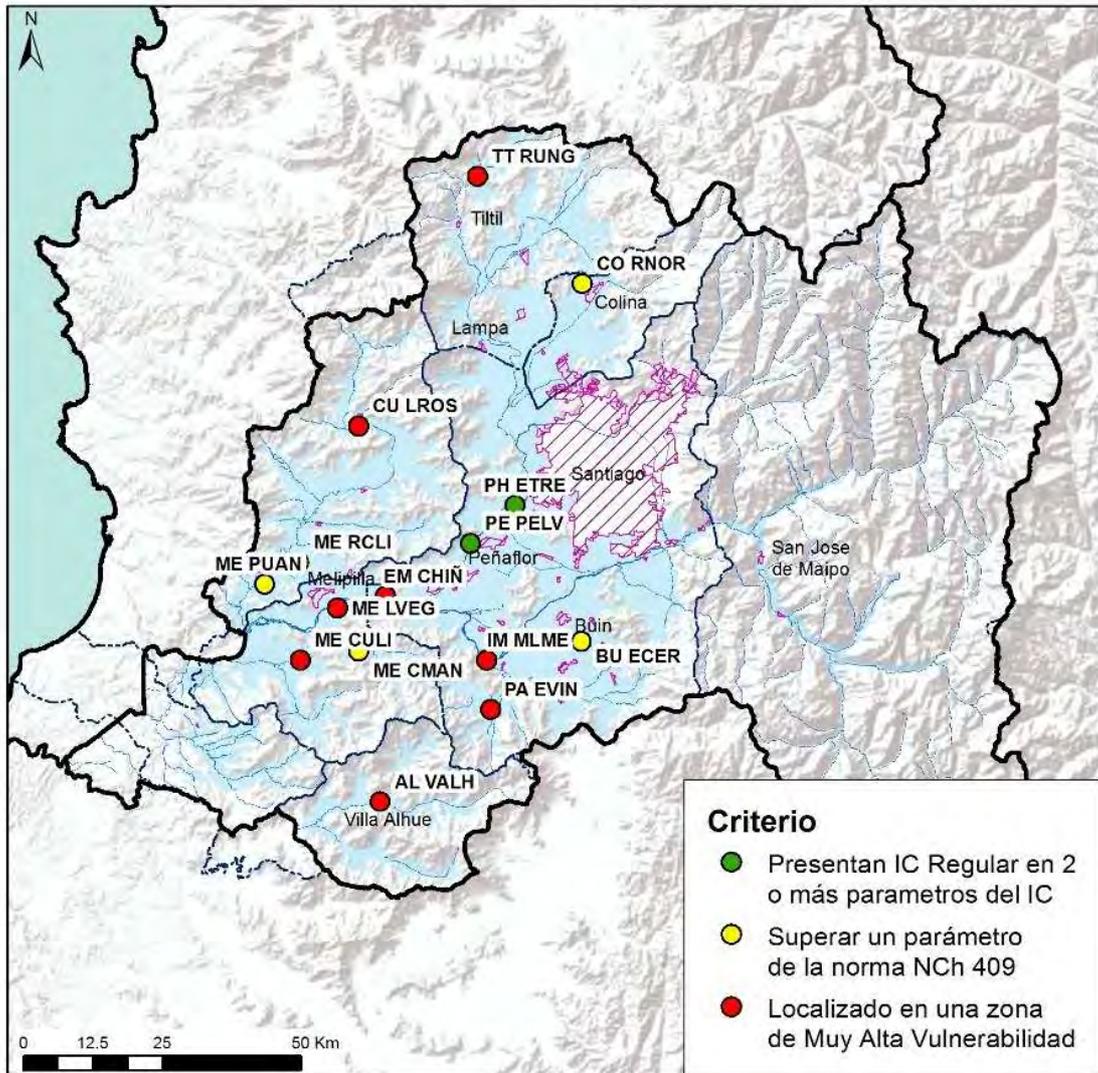
Los pozos que cumplen los criterios antes mencionados son 15 pozos APR y son los seleccionados para ser incluidos en el monitoreo en un mediano plazo. Estos se presentan en la Tabla 9-5 y Figura 9-4.

Tabla 9-5. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en un mediano plazo

Criterio	Código APR	Nombre	Sistema Acuífero	Sector Acuífero
Presentan IC Regular en 2 o más parámetros del IC	PE PELV	Pelvin	Sistema Maipo Mapocho	Santiago Central
	PH ETRE	El Trebal	Sistema Maipo Mapocho	Santiago Central
Superar un parámetro de la NCh 409	BU ECER	El Cerrillo	Sistema Maipo Mapocho	Buin
	CO RNOR	Reina Norte	Sistema Colina	Colina Inferior
	ME CMAN	Cholqui Manantiales	Sistema Melipilla	Cholqui
	ME PUAN	Puangue	Sistema Puangue	Puangue Bajo
	ME RCLI	Rumay - Campo Lindo	Sistema Puangue	Puangue Bajo
Localizado en una zona de Muy Alta Vulnerabilidad del acuífero	AL VALH	Villa Alhué	Sistema Alhué	Estero Alhué
	CU LROS	Las Rosas	Sistema Puangue	Puangue Alto
	EM CHIÑ	Chiñique	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
	IM MLME	Monte Las Mercedes	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
	ME CULI	Culiprán	Sistema Melipilla	Popeta
	ME LVEG	La Vega	Sistema Melipilla	Melipilla
	PA EVIN	El Vínculo	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
	TT RUNG	Rungue	Sistema Chacabuco	Til Til

Fuente: Elaboración propia

Figura 9-4. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en un mediano plazo



Fuente: Elaboración propia

9.2.3 Incorporación a largo plazo

Los pozos para ser añadidos a la red a largo plazo serán los que cumplan una de las siguientes condiciones.

- Como primer criterio, se incluye los pozos que durante el presente estudio hayan mostrado IC Regular en 1 parámetro (fijo o local) para cualquiera de las dos campañas de monitoreo,
- El siguiente criterio incluye los pozos APR que se localicen en una zona de "Alta vulnerabilidad", según lo descrito en la Figura 5-14.

- El último criterio involucra los pozos APR que permiten cumplir la cobertura máxima del acuífero de la Región Metropolitana de Santiago.

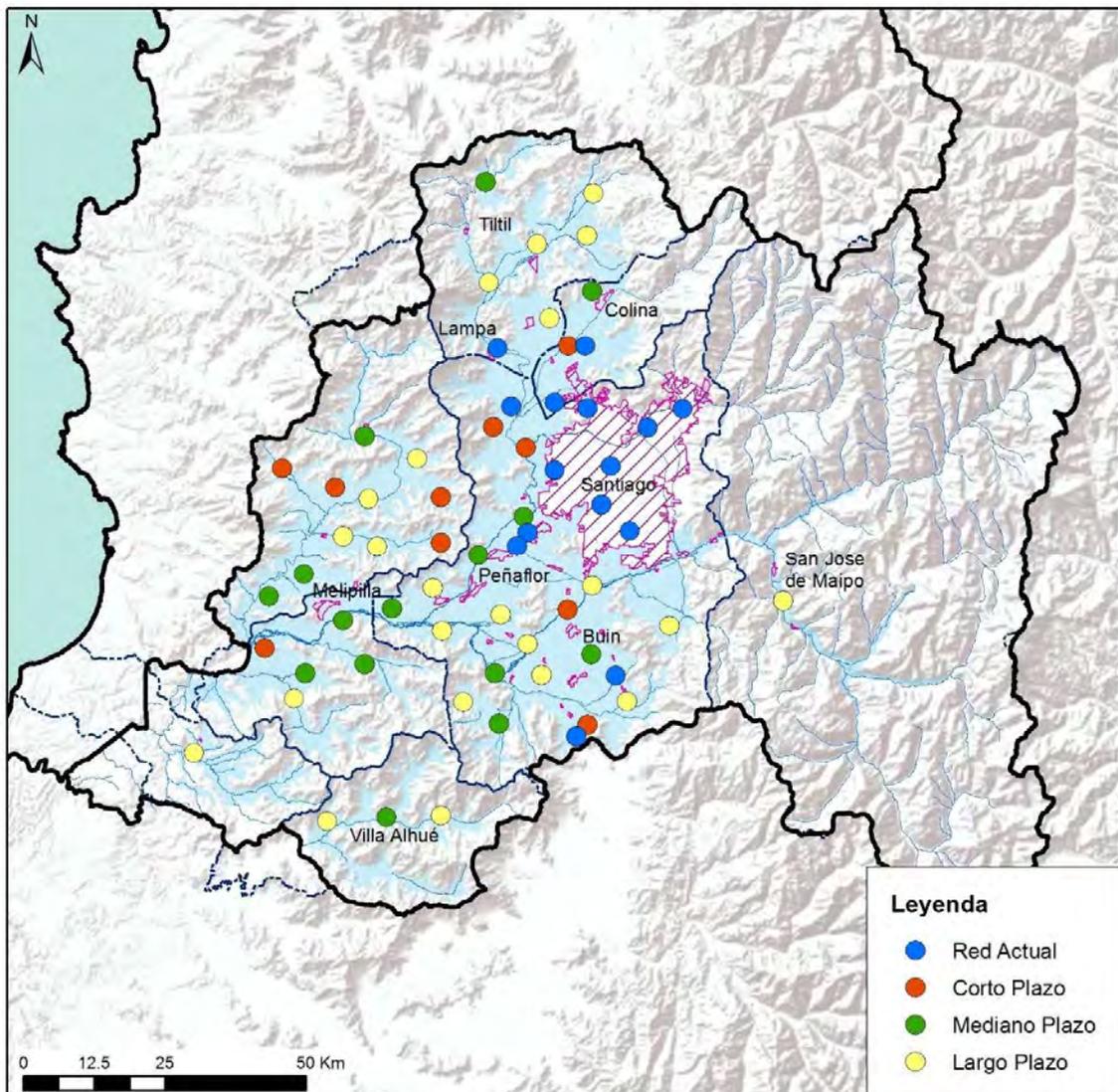
Con estos criterios a largo plazo se añadirían 23 pozos APR, como se aprecia en la Tabla 9-6 y Figura 9-5. Con esto se completan en total 48 pozos seleccionados. Un resumen de la ubicación de estos se presenta en la Figura 9-6.

Tabla 9-6. Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en largo plazo

Criterio	Código APR	Nombre	Sistema Acuífero	Sector Acuífero
Presentan IC Regular un parámetro del IC	BU SFLV	Santa Filomena Las Vertientes	Sistema Maipo Mapocho	Buin
	EM ERLO	El Rosario Los Olmos	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
	IM LPDL	La Puntilla de Lonquén	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
	IM SVDN	San Vicente de Naltahua	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
	TA ELAB	El Labrador	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
Localizado en una zona de Alta Vulnerabilidad	AL EASI	El Asiento	Sistema Alhué	Estero Alhué
	AL LLIN	La Línea	Sistema Alhué	Estero Alhué
	CO CHAC	Chacabuco	Sistema Chacabuco	Chacabuco-Polpaico
	CU CERR	Cerrillos	Sistema Puangue	Puangue Medio
	ME EBOL	El Bollenar	Sistema Puangue	La Higuera
	ME MALL	Mallarauco	Sistema Puangue	La Higuera
	PA RLHO	Rangue Los Hornos	Sistema Maipo Mapocho	El Monte
Cobertura máxima de los acuífero de la Región Metropolitana de Santiago	CO QUIL	Quilapilún	Sistema Chacabuco	Chacabuco-Polpaico
	JM EMEL	El Melocotón	Sistema Maipo Mapocho	Alto Maipo
	LA BSSA	Batuco - Santa Sara	Sistema Chacabuco	Lampa
	ME POPE	Popeta	Sistema Melipilla	Popeta
	MP MPIN	María Pinto	Sistema Puangue	Puangue Medio
	PA HUEL	Huelquén	Sistema Maipo Mapocho	Paine
	PI EPRI	El Principal	Sistema Maipo Mapocho	Pirque
	SB LEDN	La Estancilla de Nos	Sistema Maipo Mapocho	Buin
	SP SPEY	San Pedro - El Yali	Sistema Yali	San Pedro
	TT EPOL	Estación Polpaico	Sistema Chacabuco	Til Til
	TT SMAT	Santa Matilde	Sistema Chacabuco	Chacabuco-Polpaico

Fuente: Elaboración propia

Figura 9-6. Resumen de Pozos propuestos para incorporar al monitoreo de calidad química DGA en largo plazo



Fuente: Elaboración propia

10 CONCLUSIONES

El presente estudio permite obtener información acerca del estado físico-químico actual de las aguas subterráneas en la Región Metropolitana de Santiago, a partir del monitoreo de 104 servicios APR, efectuado en Octubre de 2015 y Febrero-Marzo 2016.

Los resultados químicos son representativos de los APR más superficiales, es decir del horizonte acuífero más somero de cada sistema acuífero de la Región Metropolitana de Santiago. En general, las aguas subterráneas de donde se abastecen los APR son de composición bicarbonatada a sulfatada cálcica, con valores de Conductividad y Sólidos Disueltos Totales (SDT) que son característicos de aguas dulces, con pH en torno a lo neutral. Del estudio de parámetros minoritarios se observó que los parámetros Amonio, Cianuro, Cromo, Nitrito, Mercurio, Selenio, Cadmio y Plomo se encontraron por debajo del límite de detección en todos los pozos APR monitoreados durante ambas campañas, a excepción de Arsénico, Hierro y Manganeso.

Los antecedentes geológicos, hidrogeológicos y de uso de suelo permiten mencionar que parámetros como Hierro pueden tener un origen natural, asociado a la lixiviación de las rocas que se encuentran en el entorno de los APR, así como también, un aporte menor de Hierro a la solución producto del desgaste de los materiales de construcción de los pozos. En el caso del Arsénico y Manganeso estos pueden tener un origen más bien antrópico relacionado a las propias actividades donde se emplazan los APR, entre estos destacan las actividades agroindustriales, donde el uso de fertilizantes a base de fosfatos y compuestos fitosanitarios como pesticidas, herbicidas, a lo largo de los años de aplicación pueden aportar metales como As, Mn, entre otros.

El cálculo del Índice de Calidad general, para cada pozo y sector acuífero de la Región Metropolitana, permitió realizar un diagnóstico regional de la calidad del agua, para lo cual se indica lo siguiente:

- El 65% de los APR monitoreados presentan un IC Bueno a IC Excepcional, los que se localizan principalmente en los sistemas acuíferos Yali, Alhué y Chacabuco. Esto significa que las aguas de los APR en estos sectores cumplen excepcionalmente con la normativa de la OMS para Agua Potable y de buena manera con la norma chilena NCh409, esto como consecuencia de un bajo impacto de actividad antrópica.
- Entre un 31 y 35% de los pozos APR monitoreados se clasificaron con un IC Regular, los que se encuentran principalmente en los sistemas acuíferos de Maipo-Mapocho y Colina. Esto implica que los pozos APR pueden ser aptos para uso de riego, según los requisitos establecidos por la FAO. Sin embargo, dado que pueden superar en uno o más parámetros el máximo permitido por la norma chilena de Agua Potable NCh409, el agua subterránea que abastece estos APR necesita ser tratada mediante métodos convencionales para ser considerada como potable.

- En menor proporción, y en torno a un 2%, se identificaron pozos APR (APR La Palma, Codigua El Esfuerzo y Colonia Kennedy) con IC Insuficiente. Estos se identificaron en el sistema acuífero de Puangue, Melipilla y Maipo-Mapocho. Aunque de manera constante en las dos campañas, sólo se identificó en el APR La Palma (acuífero Puangue). Los otros dos APR (Codigua El Esfuerzo y Colonia Kennedy) podrían tener un comportamiento de tipo estacional por lo que se tendrían que evaluar en futuras campañas. Estos pozos con categoría de IC Insuficiente contienen manganeso, cuyas concentraciones caracterizan a un agua que no puede ser utilizada para riego según los requisitos establecidos por la FAO. Esto implica que los parámetros que superaron esta normativa no pueden ser tratados con métodos convencionales y es necesario acudir a métodos especiales. Su uso, como tal, pudiera ser industrial, aunque se recomienda evaluar los inconvenientes que ésta pueda generar en la actividad de un determinado proyecto. Cabe mencionar, que por el hecho de que estos APR se localizan en zonas de vulnerabilidad "Muy Alta" a "Alta" son de gran interés para continuar su monitoreo, ya que se desarrollan además en un entorno agrícola o agroindustrial, los que eventualmente podrían contribuir con sustancias ricas en manganeso a las aguas subterráneas.
- Cabe destacar, que ningún APR presentó un IC Intratable, es decir, que no se reconocieron pozos APR con parámetros que necesitaran un tratamiento demasiado complejo y costoso, para lograr cumplir con la normativa de Agua Potable.

El diagnóstico de calidad por pozo y sector acuífero permite proponer nuevos pozos para ampliar la actual red de monitoreo de la DGA en la Región Metropolitana de Santiago. Principalmente en base criterios de Índice de Calidad, vulnerabilidad de acuíferos y representatividad areal, es que se propone la inclusión adicional de 48 nuevos puntos de monitoreo a los que actualmente monitorea la DGA. En detalle estos se ubican en los siguientes sistemas acuíferos:

- Sistema Chacabuco: 6 APR
- Sistema Colina: 2 APR
- Sistema Maipo-Mapocho: 19 APR
- Sistema Maipo Alto: 1 APR
- Sistema Puangue: 11 APR
- Sistema Melipilla: 5 APR
- Sistema Yali: 1 APR
- Sistema Alhué: 3 APR

Finalmente, de todos estos puntos, los sectores y pozos APR que necesitarían de mayor control son aquellos que mantuvieron un IC Insuficiente en las dos campañas de monitoreo, como destacó el APR La Palma (CU LPAL), por sus concentraciones de Manganeso, en la comuna de Curacaví, sistema acuífero Puangue.

Por otra parte, son de interés los pozos APR que presentaron empeoramiento en sus índices de calidad desde un IC Regular o Excepcional a un IC Insuficiente, como son los APR de Estación Colina (APR LA ESCO), en la comuna de Lampa y Codigua El Esfuerzo (ME CEES) en la comuna de Melipilla. En ambos casos, también por las concentraciones de Manganeso, los que se reportaron en el límite o por sobre las normas de Riego y Agua Potable.

11 RECOMENDACIONES

Para una selección más detallada de los puntos APR se recomienda realizar una caracterización de uso de suelos e hidrogeológico de los sectores acuíferos que presentaron un Índice de Calidad (IC) de categoría Insuficiente, es decir que no cumplen con los requerimientos para uso de agua potable y riego.

Para la modificación y ampliación de la Red actual de Monitoreo de Calidad de Aguas de la DGA se sugiere la confección de fichas, tanto para los pozos actuales monitoreados por la DGA como los que eventualmente se incorporen a la red, como la sugerida en el presente informe (ver Anexo 4), que incluye las características de los pozos, su ubicación y una actualización de los datos de los operarios.

La positiva recepción de los encargados de los pozos APR a este tipo de estudios y su fácil acceso permite también sugerir la incorporación de este tipo de puntos de monitoreo a la red de monitoreo de DGA. La ventaja también es la constante extracción de agua subterránea de estos sistemas, lo cual favorece tener una muestra representativa del acuífero, que en el caso de los APR monitoreados serían representativos de la parte más somera del sistema acuífero. Sin embargo, para los pozos APR que presentaron concentraciones de Hierro por sobre la norma chilena de agua potable, antes de su tratamiento, se tendría que realizar un estudio para distinguir si sus concentraciones se deben a problemas de corrosión asociados al propio sistema APR o a una fuente antrópica.

Se recomienda ampliar la red actual de monitoreo a todos los sistemas acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago, particularmente en aquellas comunas donde el Índice de Calidad de parámetros químicos de origen antrópico presentaron un IC Regular o IC Insuficiente, entre estos Nitratos, Arsénico y Manganeseo

Finalmente, para un análisis temporal de los índices de calidad se recomienda mantener la periodicidad de los parámetros fijos y locales mencionados en el presente estudio, es decir, analizar los Sólidos Disueltos Totales (SDT), Magnesio (Mg^{2+}), Cloruros (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Calcio (Ca^{2+}), Sodio (Na^+) y Nitratos (NO_3^{2-}), además de iones minoritarios que se presentan en la norma chilena de agua potable, tales como Arsénico, y los parámetros físico-químicos de Conductividad eléctrica y pH. Estos con una frecuencia mínima de dos veces al año, de preferencia a fines del período invernal y estival para observar efectos estacionales y anuales.

12 BIBLIOGRAFIA

1. Aguirre, I.; Iriarte, S.; Welkner, D. y Antinai, J.L. Mapa: Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de la Región Metropolitana de Santiago. Santiago. SERNAGEOMIN, 2004. escala 1:250.000.
2. Catalán, J. Química del Agua. Talleres Gráficos Alonso S.A. Madrid España. 1969. ISBN 84-300-5132-5.
3. Coira, B.; Davidson, J.; Mpodozis, C. and Ramos, V. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. 1982. Earth Sci Rev 18: 303-332.
4. Consejo de la Unión Europea. Resolución 2000/60/CE Directiva Marco del Agua. 2000.
5. Custodio, E. y Llamas, R. Hidrología Subterránea. Ed. Corr. Ediciones Omega S.A., Barcelona. 1983. ISBN 84-282-0446-2. (Tomo I y II).
6. Dirección General de Aguas. Declaración de agotamiento de la Primera Sección del Río Mapocho. Región Metropolitana, Resolución 383/83, Santiago, DGA, 1983.
7. Dirección General de Aguas. Estudio Mapa hidrogeológico Escalas 1:1000.000 y 1:2500.000, DGA, 1986.
8. Dirección General de Aguas. S.D.T. N°133, Informe de Zonificación Hidrogeológica para las Regiones Metropolitana y V. Santiago, DGA, 2002.
9. Dirección General de Aguas. Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Maipo. Informe Cade Idepe para DGA, 2004a.
10. Dirección General de Aguas. S.D.T. N° 171, Determinación de la Disponibilidad de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la Cuenca del río Maipo hasta la confluencia con el Estero Puangue. Santiago, DGA, 2004b.
11. Dirección General de Aguas. S.D.T. N°189, Determinación de la Disponibilidad de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la Cuenca del Estero Yali hasta sector El Prado (Región Metropolitana). Santiago, DGA, 2005.
12. Dirección General de Aguas. Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Valle del Estero Puangue: Diagnóstico Situación actual. Santiago, DGA, 2006.
13. Dirección General de Aguas. S.D.T. N°250, Evaluación de la Explotación Máxima sustentable del Acuífero Puangue-Melipilla. Santiago, DGA, 2007a.
14. Dirección General de Aguas. S.I.T. N°119, Evaluación de la Explotación Máxima sustentable del acuífero Santiago Sur, Modelación Hidrogeológica de las Cuencas Maipo Mapocho. Santiago, DGA, 2007b.
15. Dirección General de Aguas. S.D.T. N°259, Actualización Modelación Hidrogeológica del Estero Yali. Santiago, DGA, 2008a.
16. Dirección General de Aguas. S.I.T. N°133, Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos. Cuenca del Maipo. Santiago, DGA, 2008b.

17. Dirección General de Aguas. S.D.T. N°279, Evaluación de los recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Estero Maitenlahue. Santiago, DGA, 2009a.
18. Dirección General de Aguas. S.I.T. N° 183, Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos. Santiago, DGA, 2009b.
19. Dirección General de Aguas. S.I.T. N°227, Diagnóstico de la Red de Aguas Subterráneas Región del Libertador Bernardo O'Higgins, DGA, 2011.
20. Dirección General de Aguas.
http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx
Visitado junio 2016. DGA, 2016
21. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Irrigation and drainage paper N°29: Water Quality for Agriculture, Italia Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1994. 186 p.
22. Fock, A. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y 34° S". Tesis para optar al grado de Magister en ciencias, mención Geología. Universidad de Chile. Santiago, 2005.
23. Gana, P.; Wall, R. y Gutiérrez, A. Mapa geológico del área de Valparaíso-Curacaví, regiones de Valparaíso y Metropolitana. Santiago. 1996, Escala 1:100.000.
24. Godoy, E.; Schilling, M.; Solari, M. y Fock A. Geología del área de Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua, Región del Libertador Bernardo O'Higgins. 2009. Escala 1:100.000.
25. Instituto Nacional de Normalización, NCh-1333. Norma Chilena de calidad del agua para riego, INN modificada en 1987.
26. Instituto Nacional de Normalización, NCh-409/1. Norma Chilena de calidad del Agua Potable. INN 2005a.
27. Instituto Nacional de Normalización, NCh-17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. INN 2005b.
28. Instituto Nacional de Normalización, NCh 777/1 c. R2008. Agua Potable, Fuentes de abastecimiento y obras de captación, Parte 1 Captación de aguas superficiales INN 2008.
29. Ministerio de Obras Públicas. Informe Técnico N° 168. Declaración Área de Restricción Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Comuna de Paine. Santiago, MOP, 2008.
30. Morales, F. Definición de Acuíferos en la cuenca del río Maipo. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile. 2002.
31. Moreno, L.; Garrido, E.A.; Azcón, A. y Durán, J.J. Hidrogeología urbana de Zaragoza. España. IGME, 2008. 196 p. ISBN: 9788478407408.
32. Organización Mundial de la Salud. Guidelines for drinking-water quality. WHO press. Ginebra Suiza.2011. ISBN 978-92-4-154815-1.

33. Rivano, S.; Godoy, E.; Vergara, M. y Villarroel, R. Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central. Revista Geológica de Chile Volumen 17 Numero 2. Santiago, 1990.
34. San Juan, A. Caracterización Hidrogeoquímica de los recursos hídricos de la cuenca de Santiago. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago, 2015.
35. Sellés, D. y Gana, P. Geología del Área Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, No. 74, 30 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago. 2001.
36. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa Geológico de Chile: versión digital. SERNAGEOMIN, 2003, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003).
37. Superintendencia de Servicios Sanitarios., Manual de Métodos de Ensayo para Agua Potable y en las Normas Chilenas NCh-409/1 y NCh-1333. Santiago. 2007.
38. Thiele, R. Carta Geológica de Chile Nº 29 Región Metropolitana. Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería, 1980. 21p.
39. US Environmental Protection Agency. Drinking water contaminants, Standards and regulations. <https://www.epa.gov/dwstandardsregulations> Visitado Junio 2016. USEPA, 2009.
40. Wall, R.; Gana, P. y Gutiérrez, A. 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, 1996. escala 1:100.000.
41. Wall, R.; Sellés, D. y Gana, P. Área Til Til, Santiago, Región Metropolitana. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, 1999. escala 1: 100.000.
42. Yañez, G.; Muñoz, M.; Flores-Aqueveque, V. y Bosch, A. Gravity derived depth to basement in Santiago Basin, Chile: implications for its geological evolution, hydrogeology, low enthalpy geothermal, soil characterization and geo-hazard. Andean Geology 42 (2): 190-212, May, 2015.