



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DPTO. DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO

REALIZADO POR:

Departamento de Conservación y Protección de Recursos
Hídricos (DCPRH)

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

S.D.T. N° 382

SANTIAGO, MARZO 2016

**Director General de Aguas
Sr. Carlos Estévez Valencia**

**Dpto. de Conservación y Protección de Recursos Hídricos
Ing. Jefa Sra. Mónica Musalem Jara**

Profesionales participantes

**Sr. Carlos Quintana Sotomayor
Sr. Diego San Miguel Cornejo**

**Director General de Aguas
Sr. Carlos Estévez Valencia**

**Estudiantes colaboradores
Byron Riquelme Vásquez**

INDICE DE CONTENIDOS

1. RESUMEN	6
2. INTRODUCCIÓN	7
3. OBJETIVO	7
4. ANTECEDENTES	7
4.1. GEOLOGÍA DE LA V REGIÓN	8
4.1.1. <i>Rocas Fundamentales</i>	9
4.1.2. <i>Sistema Cuaternario</i>	9
4.2. HIDROGEOLOGÍA DE LA V REGIÓN	11
4.2.1. <i>Valle de Petorca y La Ligua</i>	11
4.2.2. <i>Valle del río Aconcagua</i>	14
4.2.3. <i>Cuencas costeras</i>	14
4.3. VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS	15
5. METODOLOGÍA	18
5.1. SELECCIÓN DE POZOS PARA EL MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	18
5.2. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS	19
5.3. USO DE EQUIPOS Y MATERIALES	19
5.4. METODOLOGÍAS ANALÍTICAS Y LÍMITES DE DETECCIÓN	20
5.5. PREPARACIÓN DEL TRABAJO EN TERRENO	21
5.6. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS QUÍMICOS	21
5.7. CÁLCULO DE ÍNDICE DE CALIDAD	23
5.7.1. <i>Índice de calidad individual por parámetro</i>	23
5.7.2. <i>Cálculo e interpretación del Índice de calidad general</i>	24
5.7.3. <i>Descripción general de las actividades en terreno y laboratorio</i>	25
6. RESULTADOS	26
6.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES EN TERRENO Y LABORATORIO	26
6.2. DATOS REGISTRADOS EN TERRENO.....	30
6.3. CÁLCULO DE BALANCE IÓNICO.....	34
6.4. CONCENTRACIÓN DE IONES	35
6.5. NITRATO	41
6.6. MICROELEMENTOS.....	43
6.7. PESTICIDAS	47
7. ÍNDICE DE CALIDAD	48
8. CONCLUSIONES	51
9. RECOMENDACIONES	53
10. BIBLIOGRAFÍA	55

Índice de figuras

Figura 1: Zonificación hidrogeológica de V región de Valparaíso y pozos estudiados. Las líneas grises representan las divisiones de cada sector acuífero.	8
Figura 2: Extracto de Mapa Geológico de Chile de Sernageomin. Representando V región. (Para visualizar la simbología se recomienda revisar la fuente.)	8
Figura 3: Extracto de Mapa hidrogeológico, DGA. Representa la V región. Para tener información más detallada de simbología se recomienda revisar la fuente.	11
Figura 4: Mapa de vulnerabilidad de sector acuífero de Aconcagua. Fuente: Diagnóstico y Clasificación de Acuíferos, DGA 2009.	16
Figura 5. Mapa de vulnerabilidad de la V región. SERNAGEOMIN, 2006.	17
Figura 6: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas	18
Figura 7: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.	22
Figura 8: Cálculo de índice de calidad mediante interpolación lineal entre clases.	24
Figura 9: Fotografías de trabajo en terreno en diferentes zonas de la V Región.	27
Figura 10: Distribución de puntos de muestreo.	28
Figura 11: Distribución de puntos de muestreo en la V región.	29
Figura 12: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles estáticos).....	30
Figura 13: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles dinámicos)	31
Figura 14: Parámetros físico químicos registrados in-situ en aguas de 49 pozos de la V Región. Arriba: datos de T; Abajo: datos de pH.	32
Figura 15: Parámetros físico químicos registrados in-situ en aguas de 49 pozos de la V Región. Arriba: datos de conductividad; Abajo: datos de potencial de óxido reducción. (Único valor negativo APR Valle los Olmos (acuífero de Petorca) ORP= -15 mV).....	33
Figura 16: Distribución porcentual del error del balance iónico de las muestras de agua subterránea.	34
Figura 17: Diagramas de Stiff-modificado para las 49 muestras de aguas subterráneas tomadas en la V región. Los diagramas de aguas bicarbonatadas cálcicas se muestran en color celeste, los de aguas cloruradas sódicas en color rosado y las bicarbonatadas o cloruradas cálcicas en color verde.....	35
Figura 18: Detalle de Diagramas de Stiff en la zona norte de la V Región	36
Figura 19: Detalle de Diagramas de Stiff en la zona sur de la V Región.....	36
Figura 20: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el acuífero Aconcagua. Se puede clasificar entre bicarbonatada o sulfatada cálcica. Lo que indicaría procesos que ocurren en rocas carbonatadas o cristalinas y procesos de reducción de yeso u oxidación de sulfatos.	37
Figura 21: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector de los acuíferos costeros. Se puede clasificar entre bicarbonatada o sulfatada cálcica y/o clorurada o sódica. Lo que indicaría procesos que ocurren en rocas carbonatadas o cristalinas, procesos de reducción de yeso u oxidación de sulfatos e influencia de aguas marinas.....	38
Figura 22: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el acuífero La Ligua. Se puede clasificar como sulfatada o clorurada cálcica. Lo que indicaría procesos de reducción de yeso u oxidación de sulfatos con influencia de aguas marinas.	39

Figura 23: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el Acuífero Petorca. Se puede clasificar como bicarbonatada cálcica. Lo que indicaría procesos que ocurren en rocas carbonatadas o cristalinas.	40
Figura 24: Representación de rangos de concentración de nitrato (NO ₃) detectado en los pozos muestreados en acuíferos de la V Región.....	42
Figura 25: Concentración total de Arsénico detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409).	45
Figura 26: Concentración total de Cobre detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua para riego (NCh 1333).	45
Figura 27: Concentración total de Hierro detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409) y para riego (NCh 1333).	46
Figura 28: Concentración total de Hierro detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409) y para riego (NCh 1333).	46
Figura 29: Concentraciones de arsénico por rango detectadas en los pozos muestreados en la V región.	47
Figura 30: Resultados de Análisis de Índice de calidad de los pozos estudiados en la V Región.	50

Índice de tablas

Tabla 1: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la V Región.....	19
Tabla 2: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio ANALAB	20
Tabla 3 Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio Ambiental de la DGA... ..	20
Tabla 4 : Relación entre clases de calidad y valores de corte	23
Tabla 5: Definición de clases de calidad de agua	24
Tabla 6: Criterios para establecer el IC general.....	25
Tabla 7: Resumen de los resultados de análisis químicos de microelementos en aguas subterráneas de la V Región.....	43
Tabla 8: Índices de calidad General de Pozos APR.....	48
Tabla 9: Pozos APR clasificados como Regulares.....	49
Tabla 10: Resumen del número de pozos que superó alguno de los parámetros normados en la NCh409/2005, por sector acuífero. Se indica también el número de pozos que presentó concentraciones de nitrato mayor a lo esperado en aguas subterráneas (>30 mg NO ₃ /L), pero resultó menor al límite establecido para agua potable (50 mg NO ₃ /L).....	52
Tabla 11 Resumen pozos a incorporar en el seguimiento por parte de la DGA.	53

1. Resumen

El presente informe expone los resultados de un estudio hidroquímico realizado a las aguas subterráneas de la Región de Valparaíso, cuyo objetivo fue diagnosticar la actual condición de la calidad de las aguas subterráneas, identificar la presencia de sustancias atribuibles a fuentes de contaminación difusa, comparar con resultados anteriores y proponer recomendaciones para futuros monitoreos a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA). El área de estudio abarcó los acuíferos Petorca, La Ligua, Aconcagua y los acuíferos costeros. Para estos fines, se llevó a cabo la visita y toma de muestras de agua en 49 pozos, siendo seleccionados en función del espacio de modo que estuvieran uniformemente distribuidos. Dentro de la metodología de trabajo se incluyó el registro de parámetros en terreno (T, pH y Conductividad, Potencial de óxido- reducción) y el análisis de un gran número de parámetros en laboratorio (iones, microelementos y pesticidas). Los resultados se presentan gráficamente mediante el uso de diagramas de Stiff y Piper, permitiendo detectar diferencias en la concentración de iones entre las aguas subterráneas muestreadas. El total de datos químicos fueron comparados con los estándares de las normas de agua potable (NCh409/2005) y riego (NCh1333/1987), llamando la atención algunos pozos donde se identificaron concentraciones más elevadas de nitrato, arsénico, entre otros. Respecto a los resultados de análisis de pesticidas, es importante señalar que, de acuerdo a la metodología analítica utilizada, no se detectó este tipo de sustancias en las aguas subterráneas de la región. Como último trabajo se realizó el cálculo de los diferentes Índices de calidad, individual y general. Finalmente, como parte de las recomendaciones, se plantea un conjunto de medidas tendientes a reforzar el seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas como instrumento relevante para la gestión de los recursos hídricos de la región y del país.

2. Introducción

La Dirección General de Aguas (DGA), de acuerdo a las disposiciones establecidas en el 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. La Dirección General de Aguas es el organismo encargado de operar y mantener el Servicio Hidrométrico Nacional.

Este Servicio cuenta con una red de control de aguas subterráneas, la cual se compone de 70 puntos de monitoreo distribuidos en 12 regiones. Esta red tiene como objetivo monitorear el estado químico actual de los acuíferos, así como detectar sus cambios temporales y espaciales; todo para contar con una caracterización de los recursos hídricos y disponer de información para el desarrollo de instrumentos de gestión.

Considerando las necesidades señaladas y la importancia que tienen las aguas subterráneas para múltiples usos, la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (DGA, 2012) estableció como “objetivo prioritario prevenir la contaminación difusa de las aguas superficiales y subterráneas”, siendo el mejoramiento de la red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas una de las medidas necesarias para avanzar en materia de prevención y detección temprana de sustancias contaminantes en los acuíferos.

3. Objetivo

El objetivo general del Estudio fue conocer la condición actual de calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos de la V Región. Además, como objetivos específicos pueden ser citados los siguientes: Identificar la presencia de sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa y proponer una recomendación de programa de monitoreo futuro.

4. Antecedentes

Todos los antecedentes se obtienen a partir del Departamento de administración de recursos hídricos y su Informe de zonificación hidrogeológica para las regiones Metropolitana y V, 2002:

La V Región de Valparaíso se extiende entre los 32° 02' y 33° 57' de latitud sur y desde 70° 00' de longitud oeste hasta el Océano Pacífico; incluyendo las Islas Esparádicas (Pascua, Salas y Gómez, San Félix, San Ambrosio y el Archipiélago Juan Fernández). Con una superficie es de 16.396,1 km². En el sector norte de la región se desarrollan las cuencas hidrográficas de los ríos Petorca y La Ligua (En color anaranjado y celeste en la **Figura 1** respectivamente), la primera de régimen hidrológico nivopluvial y la segunda francamente nival cuyas superficies corresponden a 1.985 y 1.990 km² y con una extensión de 80 y 100 km respectivamente.

Ya en la zona central de la región encontramos la cuenca del río Aconcagua que es la que presenta mayor importancia en dicha región, pues es la de mayor extensión, y comprende las provincias de Los Andes, San Felipe y Quillota en su totalidad y en forma parcial la de Valparaíso y abarca una superficie de aproximadamente 7.640 Km², y una longitud de 190 km. Su régimen hidrológico es de carácter pluvio-nival, con mayores caudales durante la época invernal, período en el cual se concentra más del 90% de las precipitaciones anuales. La precipitación media anual es del orden de 530 mm. La cuenca del río Aconcagua cuenta con un importante desarrollo agrícola, que actualmente

abarca del orden de 71.000 ha; siendo fuente de abastecimiento de agua potable para una población superior a 850.000 habitantes. El sector hidroeléctrico, industrial y minero son también actividades relevantes desde el punto de vista de los requerimientos hídricos. Se distingue en color rosado en la **Figura 1**.

A lo largo de la franja litoral encontramos las cuencas costeras, una serie de cuencas hidrográficas de menor extensión areal que las señaladas anteriormente, con un gran atractivo turístico por sus balnearios, con un régimen hidrológico de carácter pluvial, donde el 90% de las precipitaciones se concentran principalmente en los meses de invierno. Una cuenca de menor superficie 980 km² y una extensión aproximada de 45 km, la constituye la cuenca del Estero Casablanca, de régimen hidrológico pluvial. (**Figura 1**)

Figura 1: Zonificación hidrogeológica de V región de Valparaíso y pozos estudiados. Las líneas grises representan las divisiones de cada sector acuífero.

4.1. Geología de la V región

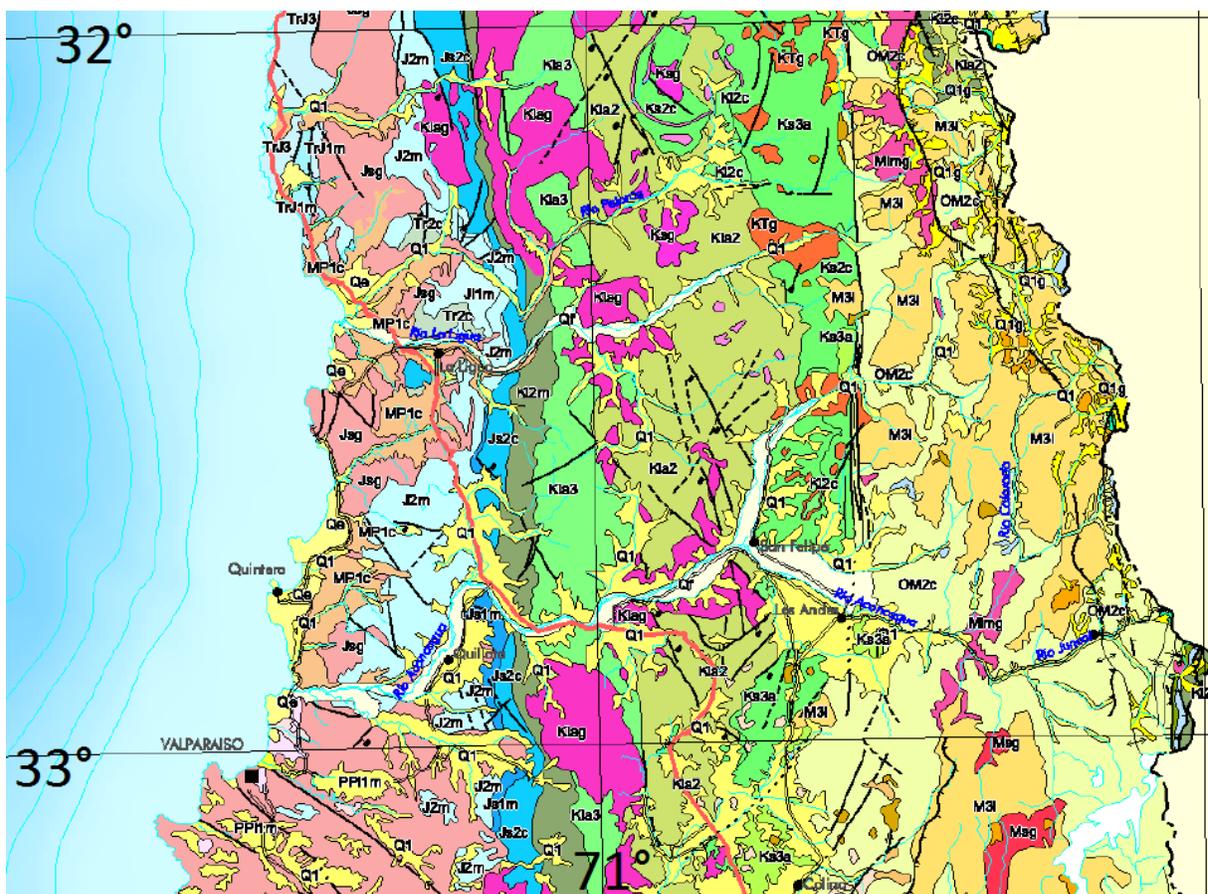


Figura 2: Extracto de Mapa Geológico de Chile de Sernageomin. Representando V región. (Para visualizar la simbología se recomienda revisar la fuente.)

De forma general se puede visualizar que las unidades geológicas se distribuyen en orientación Norte – Sur, por lo que las variaciones en cuanto a geología ocurren de Este a Oeste. A continuación se diferencian los diferentes tipos de litologías, que en la **Figura 2** se representan con diferentes colores.

4.1.1. Rocas Fundamentales

La zona se caracteriza por presentar afloramiento de rocas pertenecientes a las formaciones La Ligua (Tr); Quebrada El Pobre (Jr), Ajial , Abanico (Terciario inferior), Farellones (Mio-Plio).(Sernageomin, 1996). Las características texturales y litológicas de estas rocas permiten clasificarlas como roca no permeable.

4.1.2. Sistema Cuaternario

En el área de los valles de Petorca y La Ligua, el sistema cuaternario está representado por un volcanismo muy restringido y por sedimentos no consolidados que representan potentes acumulaciones

4.1.2.1. Volcanismo

El volcanismo cuaternario está restringido al sector Noreste, en la divisoria de aguas que separa la cuenca del río Pedernal, afluente del río Petorca, de la quebrada Ramadilla, afluente del río Choapa.

4.1.2.2. Sedimentos

Sedimentos Antiguos

Hacia las cabeceras de los valles del río La Ligua y del Petorca se acumulan potentes volúmenes de sedimentos de granulometría heterogéneo. Estos depósitos de tipo morrénico se emplazan desde una cota más o menos de 2.500 m.s.n.m. hacia aguas arriba. Estos procesos depositacionales rellenaron buena parte de las quebradas tributarias y los tramos superiores de los valles principales.

Hacia los cursos inferiores de los valles del Ligua y Petorca estos sedimentos consisten predominantemente, de gravas y arenas fluviales gruesas en las capas existentes por encima del actual piso de ambos valles. Por debajo del nivel anterior y dentro de la región próxima a la línea costera, se encontrarían sucesivamente y de acuerdo con los datos entregados por los sondajes de captación o de reconocimiento, materiales más bien finos y con fuerte proporción de limos y arcillas; más abajo seguiría un espesor de 30 a 50 m de sedimentos en general gruesos, con frecuentes intercalaciones de botones y capas permeables que contienen acuíferos en presión; hacia el fondo de la profundidad alcanzada por los sondajes se localizarían otra vez depósitos de granulometría en general fina y que presumiblemente se continuarían como predominantes hasta el contacto con el lecho de rocas fundamentales.

Los sedimentos fluviales antiguos, en el sector visible de arenas y gravas gruesas, presentan rodados a menudo muy bien redondeados y con especial abundancia de clastos de rocas graníticas, aunque se ubican prácticamente todas las unidades de rocas fundamentales reconocibles en la hoya del río La Ligua y del Petorca.

Las gravas y arenas fluviales antiguas incluyen algunas capas, generalmente con mayor predominio de finos arcillosos, las cuales presentan una mayor descomposición por meteorización y que parecen revelar lapsos relativamente prolongados durante los cuales cesó o disminuyó el ritmo de acumulación, permitiendo un mejor desarrollo de las acciones de meteorización. Es probable que en profundidades, por debajo del piso actual de los valles Petorca y La Ligua, las intercalaciones descompuestas sean más abundantes y ellas justificarían la menor calidad de las aguas de los acuíferos inferiores, confinados. Se ha estimado un espesor total del relleno antiguo en unos 170 a 240 m aproximadamente.

Sedimentos Recientes

Los sedimentos de relleno más recientes son producto de la acción erosiva de los cursos fluviales del área, que conjuntamente con procesos gravitacionales, han trabajado en los accidentes topográficos existentes.

Los sedimentos se disponen de modo que conforman un número bastante alto y complejo de estructuras geomorfológicas. En la casi totalidad de las áreas de tribulación de los valles, se aprecian abanicos de deyección disectados en sus tramos terminales por las vías de escurrimiento principales. En las estructuras fluviales mayores se observa un gran número de terrazas, llanuras aluviales, depósitos de pie de monte y taludes de detritos. El espesor de estos sedimentos no supera los 25 m a lo largo de los dos valles, y en los cursos superiores de estos, muestran en profundidad materiales preferentemente gruesos pero son frecuentes las intercalaciones de capas de granulometría fina, menos permeables. En realidad, el conjunto del relleno es esencialmente lenticular y así como el lecho actual del río La Ligua y Petorca señalan una angosta faja de gravas superficiales de elevada permeabilidad, se encuentran en hondura otras fajas, similarmente con depósitos gruesos, las cuales denotan la posición ocupada por el río cuando, en la medida de su acción de acumulación, divaga libremente de uno a otro costado en los valles actuales. Entre estos canales de alta permeabilidad se localizan capas, menos favorables en su calidad de acuíferos, constituidas esencialmente por acumulaciones marginales más finas. Los sedimentos finos, muy poco permeables, del relleno reciente en el tramo inferior del valle de La Ligua y del Petorca engranan hacia las márgenes con materiales igualmente impermeables que son propios del relleno antiguo; en su conjunto configuran, entonces, el estrato confinante superior que motiva los acuíferos en presión de los sectores inferiores de los valles.

4.1.2.3. Rocas Intrusivas

Las rocas intrusivas constituyen varias unidades diferentes, denominadas Batolito de la Costa, Batolito Central y Batolito de la Cordillera de los Andes, que se han desarrollado durante el intervalo de tiempo comprendido entre el Paleozoico y el Terciario Superior.

Batolito de la Costa

El Batolito de la Costa está constituido principalmente por tonalitas. Diversas dataciones radiométricas asignan a esta unidad una edad paleozoica. Se le asigna al Batolito de la costa una edad devónica.

Batolito Central

El batolito central está constituido principalmente por granodiorita y, en menor cantidad, por tonalitas, adamelitas y diversas variedades de pórfidos. Estas rocas se distribuyen en una franja longitudinal ubicada inmediatamente hacia el Este del batolito de la costa. Estos batolitos, que al Sur de la latitud 33°15' conforman un cuerpo complejo, al Norte de esta latitud se bifurcan en dos franjas paralelas. El batolito central es una unidad que engloba las rocas generadas en dos ciclos intrusivos distintos: una durante el Jurásico Superior y el otro, durante el Cretácico Superior - límite Cretácico – Terciario, caracterizado por ser impermeable.

Batolito de la Cordillera de los Andes

Este batolito está constituido principalmente por dioritas, granitos y, en menor cantidad, por granodioritas y adamelitas. Esta roca intrusiva aflora en una franja longitudinal que cubre toda la zona de los valles de Petorca y La Ligua. Estas rocas cortan a las rocas jurásicas, neocomianas y a las rocas de las formaciones Abanico y Farellones. Dataciones radiométricas le asignan una edad Terciaria Superior.

Valle del río La Ligua

La hoya de este valle se desarrolla en su mayor extensión con dirección aproximadamente NESW y su longitud es del orden de 90 Km, en dicho sentido, con lo cual resulta un ancho promedio inferior a 23 Km. En general, el mayor aporte de área drenada se encuentra junto a la vertiente Sur del valle y la mayor amplitud, en dirección Norte-Sur, se localiza frente a San Lorenzo donde alcanza unos 35 Km. debido, principalmente, a la extensión que toma el estero de Los Ángeles.

A partir de su nacimiento, el río principal recibe el nombre de estero de Alicahue, cauce que muestra un rumbo relativamente irregular y se encajona en un valle profundo y angosto, con fuerte pendiente de escurrimiento. Hasta la localidad de Alicahue, el río principal toma un rumbo francamente NE-SW, muy rectilíneo y que sugiere el emplazamiento a lo largo de una zona de fallamiento. Aquí el valle gradualmente se ensancha en la medida de su avance a la costa y disminuye la pendiente de escurrimiento, pero conserva las características propias de un cauce montañoso. En el tramo anterior, los afluentes de la vertiente Sur empiezan a tomar mayor desarrollo y se observa claramente un cierto alineamiento de orientación SE-NW, como el señalado por los cursos inferiores de las quebradas Los Chorrillos y La Cerrada. Aguas abajo de Alicahue el río escurre sobre un valle bien conformado, con ancho variable entre 1 a 2 km, donde las pendientes de escurrimiento son menores que 1,8% río abajo de la curva de los 500 m.s.n.m.

Posteriormente, el valle empieza a adquirir un perfil longitudinal cercano a uno de equilibrio y disminuye sensiblemente el calibre de los materiales acumulados. Los afluentes de ambas vertientes se presentan muy poco desarrollados y esta situación, justificable por el sistema del río Petorca en el costado Norte, se explica en la vertiente Sur por la extensión que toma el estero de Los Ángeles hacia el Este. Hasta la confluencia con el estero de Los Ángeles, el río La Ligua mantiene dirección cercana a E-O y su valle, bien conformado, se ensancha ligeramente con relación a los sectores situados inmediatamente aguas arriba y abajo. En esta parte empiezan a manifestarse, en los costados del valle, remanentes de acumulaciones fluviales más antiguas y las cuales aparecen cortadas y reemplazadas por el relleno más reciente del río. El estero de Los Ángeles representa uno de los afluentes mayores del río La Ligua y su hoya desarrollada en gran parte sobre un relieve de 1.000 a 1.500 m.s.n.m. configura más del 20% de la correspondiente al cauce principal. El curso inferior del estero ha labrado un valle más o menos de 1 Km. de ancho y sugiere, por su rectitud a escala regional, una línea o zona de fallamiento de rumbo NW-SE que se prolongaría, más al Norte, en el curso inferior del estero de Las Palmas que confluye al río Petorca.

Poco antes de la confluencia del estero Los Ángeles con el río Alicahue se encuentra, hacia el centro del valle principal, un cerro isla de naturaleza granítico. Hoy en día, el río Alicahue pasa al Norte de dicho cerro isla y el estero de Los Ángeles al Sur; sin embargo, a juzgar por la fuerte pendiente con que el río Alicahue cruza frente al cerro Isla (1,8%) y aquella con que lo hace el estero (0,95%), es probable que el cauce principal haya escurrido normal y recientemente al Sur. Entre el tramo descrito y la localidad de Cabildo (184 m.s.n.m.), el río La Ligua escurre sobre un valle que forma un gran arco de convexidad hacia el Norte. Importante destacar que en esta zona el cauce principal fluye adosado al costado Sur del valle y que debe haber conservado normalmente esta posición por efecto del cono de la quebrada Las Chacillas emplazado al Norte. Desde Cabildo hasta poco antes de la confluencia con el estero La Patagua, el río principal escurre con dirección NE-SW y sobre un valle relativamente estrecho o de menos de 1.500 m de ancho que en sectores, Monte Grande por ejemplo, se angosta a unos 900 m. La menor amplitud del valle se justifica por las dos razones siguientes:

Existencia de rocas estratificadas donde se alternan capas de materiales altamente resistentes a la erosión y cuya actitud general, de rumbo N-S e inclinación al Este, no favorece el ensanchamiento por acción fluvial ni por fenómenos de remoción en masa.

Disponibilidad de tributarios cortos, a ambas vertientes, los cuales no han sido capaces de contribuir al mayor desarrollo del valle.

Interesa señalar que las características de este tramo son extraordinariamente favorables para la explotación de aguas subterráneas a muy pequeña profundidad, a menudo presentes como vertientes de gran caudal en las épocas de precipitaciones favorables, como también para el posible emplazamiento de embalses. Poco aguas abajo del tramo anterior, el río principal recibe desde el Sur su afluente estero La Patagua el cual, tiene una hoya total del orden de 1000 km². En su desembocadura, ha construido un cono de magnitud suficiente para desplazar, en forma permanente y hacia el Norte, al río principal de este modo ha permanecido, en el costado Sur del valle, acumulaciones fluviales más antiguas y que, en parte corresponden al mismo estero. Desde el estero La Patagua hasta la localidad de La Ligua (50 m.s.n.m.), el valle adopta más o menos un rumbo próximo a NW-SE y aunque se hacen muy nítidas en formas aterrazadas de acumulaciones más antiguas el cauce actual del río. Frente a la ciudad de La Ligua, el valle tiene un ancho total de casi 3 km, en parte, se debe al cono construido por la quebrada El Pobre que confluye desde el Norte.

Entre La Ligua y Pullalli (20 m.s.n.m), el cauce principal tiene dirección E-O y su pendiente de escurrimiento es menor que 0.6% disminuyendo aún a menos de 0,4% cerca de Pullalli. El valle conserva las características del tramo anterior y, son notables las formas aterrazadas dispuestas hacia el costado Sur que engranan, más al Sur, con las acumulaciones cuaternarias que rellenan la cuenca de Catapilco. El estero Jaururo confluye al río la Ligua entre Pullalli y el cerro Trato y su hoya, dispuesta como una especie de rectángulo de unos 20 km de largo, totaliza del orden de 80 km²; el eje mayor de la hoya tiene claramente una orientación NW-SE. Desde Pullalli a la costa, el valle se ensancha considerablemente y los cordones de rocas fundamentales quedan separados en sentido N-S y frente al llano que cruza el camino Pullalli-Papudo, por unos 15 km de sedimentos cuaternarios. En realidad esa parte correspondería a una antigua bahía del mar cuaternario y su relleno ha sido motivado por la acción conjunta de los ríos La Ligua y Petorca.

Cerca de la línea de Costa, el lecho del río La Ligua e igualmente del Petorca, han sido estrechados notoriamente por la acumulación de arenas eólicas. Las dunas correspondientes, muy recientes y formadas probablemente en épocas históricas, han dado, han originado lagunas y vegas como también modificado constantemente la confluencia y desembocadura en el mar de ambos ríos.

Valle del Petorca

La hoya y el valle principal de Petorca, tienen orientación generalizada NE-SW con longitud en dicho sentido de unos 90 km y ancho promedio en dirección N-S, del orden de 20 km; con esto resulta que la gran mayoría de los tributarios son de corto recorrido y especialmente aquellos que se originan en la vertiente Sur, donde también se desarrollan tributarios del río La Ligua. El río Petorca se constituye, con el nombre de tal, aguas abajo de la confluencia de sus dos afluentes cordilleranos de mayor importancia: el río Pedernales o también llamado Estero Chalaco, y el río Del Sobrante, que se juntan en Chincolco (650 m.s.n.m.). Aguas abajo de Chincolco y salvo el denominado estero Las Palmas, todos los tributarios son de importancia menor aunque, evidentemente, contribuyen en su conjunto al desarrollo y recarga del sistema. El estero Las Palmas se desarrolla, al igual que el estero de Chalaco o río Pedernales, en la vertiente N; en su curso inferior presenta un valle extraordinariamente amplio

y probablemente emplazado en una zona de fallas, existiendo una dirección NW-SE, se manifiesta similar orientación en la rama occidental de la gran curvatura, con forma de V, que tipifica el valle del río Petorca entre estero Las Palmas y estero Ossandón. Entre las localidades de Chicolco y Trapiche el valle del río Petorca, considerando como tal el cauce propio del río y también terrazas ribereñas compuestas de sedimentos fluviales cuaternarios, presenta anchura variable entre 500 y poco más de 2.000 m. Aguas abajo de Trapiche, el río Petorca entra a una antigua bahía del mar cuaternario y los terrenos sedimentarios fluviales, en forma de terrazas con gran desarrollo hacia el Sur del cauce del Petorca, pueden seguirse por varios km. en dirección norte-sur. Por último, unos 2 km al Este de la línea costera, el río busca su desembocadura a través de extensos cordones de dunas litorales y la naturaleza blanda y cambiante de tales cordones ha motivado constantemente, cambios acentuados en la desembocadura del río que ahora se produce por la correspondiente al río La Ligua.

4.2.2. Valle del río Aconcagua

Hacia las cabeceras del valle del Río Aconcagua se acumulan grandes volúmenes de sedimentos de variada granulometría. Los depósitos de tipo morrénico se distribuyen por sobre la cota 2500 m.s.n.m. hacia aguas arriba. Depósitos de corrientes de barro originados durante el período de glaciación se exponen hasta la localidad de Santa María. Estos depósitos son los que rellenan gran parte de las quebradas tributarias y los tramos superiores de los valles principales.

Los sedimentos de rellenos más recientes, son producto de la erosión ejercida por los cursos fluviales del área que conjuntamente con los procesos gravitacionales, han retrabajado los accidentes topográficos existentes. Se reconocen estructuras depositacionales como conos de deyección, terrazas, fluviales, llanuras aluviales, depósitos de pie de monte y taludes de detritos.

El origen de los fragmentos clásticos pertenecientes a estos depósitos cuaternarios proviene de la erosión de rocas volcánicas e intrusivas, con un aporte menor de rocas sedimentarias. Los sedimentos en el área conforman una capa que cubre una extensa superficie de aproximadamente 1155 km². Los depósitos exhiben menor amplitud superficial en la desembocadura de los valles de Llay Llay, Rabuco y hacia aguas abajo de la localidad de San Pedro donde el valle se estrecha notoriamente.

Los valles y quebradas tributarias del río Aconcagua, aportan al valle principal importantes volúmenes de sedimentos, que normalmente presentan fracciones finas y que se despliegan a modo de abanico de pendiente baja, que fluctúa entre el 0,6% y el 10%.

4.2.3. Cuencas costeras

La zona costera de la Va Región de Valparaíso se denomina Cuencas Costeras, se extiende entre Los Molles por el Norte y Las Rocas de Santo Domingo por el sur, comprende parte de las provincias de Petorca, Valparaíso y San Antonio. Abarcan una superficie aproximada de 3510 km². El régimen hidrológico presente en la zona es de carácter pluvial, donde el 90 % de la precipitación total se concentra entre los meses de mayo a septiembre. Las características del litoral costero de la Va Región, hacen que sea una zona de gran atractivo turístico, existiendo una gran demanda de recurso hídrico para el abastecimiento de agua potable de los balnearios ya existentes y aquellos con potencial urbano turístico; así como también para satisfacer la demanda impuesta por la actividad agrícola que comprende valles ubicados entre la línea del litoral y la Cordillera de la Costa. Dadas las

características de la zona encontramos que el aporte superficial es escaso y a su vez se encuentra generalmente comprometido en los usos actuales, es por ello que el interés por el recurso subterráneo ha tenido un aumento considerable.

Las cuencas costeras en lo que respecta a la zonificación hidrogeológica se encuentran subdivididas en 42 sectores, los que a su vez se encuentran agrupados en:

a) Cuencas Costeras Norte

Que corresponde a todos los sectores ubicados al Norte del Río Aconcagua.

b) Cuencas Costeras Sur

Correspondiente a los ubicados al sur del Río Aconcagua. Dichas cuencas costeras de la V Región, se caracterizan por presentar rellenos sedimentarios poco desarrollados y una gran presencia de unidades rocosas.

La zona consta de una serie de cuencas que fundamentalmente tienen su nacimiento en la vertiente occidental de Cordillera de la Costa o en estribaciones transversales a ella. La red de drenaje está conformada principalmente de norte a sur, por los esteros Los Molles, Guaquén, Las Salinas, Papudo, Catapilco, Puchuncaví, Pucalán, Reñaca, Marga-Marga o Viña del Mar, El Sauce, Casablanca, El Yugo, El Membrillo, San Jerónimo, El Totoral, El Rosario, Cartagena, El Sauce y Río Maipo en Desembocadura.

Además se debe señalar la existencia de sectores inmediatamente adyacentes a la costa, comprendidos entre el litoral y las divisorias de agua de las cuencas de los esteros antes mencionados, en los cuales la red de drenaje constituye esteros y quebradas de muy corto desarrollo, que alcanzan el mar en forma individual y que, en estricto rigor, cada uno de ellos conforma una pequeña cuenca.

El régimen de escorrentía que caracteriza a los esteros y quebradas, tanto en las cuencas costeras como en los denominados sectores costeros, es esencialmente de origen pluvial, por lo que su escurrimiento está estrechamente asociado a la distribución estacional de las lluvias. El régimen de las lluvias se caracteriza en términos generales por los siguientes aspectos: i) La precipitación media anual oscila entre 250 y 450 mm anuales, incrementándose de norte a sur. ii) Alrededor del 90 % de la precipitación total anual se concentra entre los meses de mayo a septiembre. iii) Destaca por su alta pluviosidad, alrededor de unos 650 mm al año en promedio, el sector alto de la cuenca del estero Marga-Marga o Viña del Mar y de El Sauce-Peñuelas.

4.3. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos

Se dice que un sistema acuífero es vulnerable ante cierta acción cuando ésta puede causar un perjuicio (daño, deterioro o degradación) del acuífero. La vulnerabilidad sería una medida cualitativa o cuantitativa, en general expresada mediante un índice sin dimensiones, de la mayor o menor facilidad con que se puede infligir ese perjuicio (Sernageomin, 2006). Para la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), la vulnerabilidad es definida como una propiedad intrínseca de un sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad de éste frente a impactos humanos o naturales.

Los grados de vulnerabilidad obtenidos se dividen en las siguientes categorías:

- **Extrema:** vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua, con impacto rápido en muchos escenarios de polución.
- **Alta:** vulnerable a muchos contaminantes (a excepción de aquellos fuertemente absorbidos o rápidamente transformados) en muchos escenarios de polución.
- **Moderada:** vulnerable a algunos contaminantes, pero sólo cuando hay descargas continuas o lixiviados.
- **Baja:** sólo vulnerable a contaminantes conservativos, en el largo plazo, cuando son descargados continuamente.
- **Nula:** capas confinantes presentes, sin flujo vertical de agua subterránea de importancia.

Resulta relevante señalar que “en el largo plazo todos los acuíferos son vulnerables a contaminantes persistentes en el tiempo y no degradables, inclusive aquéllos que presentan una baja vulnerabilidad a la contaminación. Estos últimos tienden a ser los más difíciles de limpiar una vez contaminados, por lo que no existen sectores en el acuífero en los que el agua subterránea no se vea afectada por la presencia de contaminantes conservativos y persistentes” (Sernageomin, 2006).

Ejemplificando con la vulnerabilidad del sector acuífero de Aconcagua (**Figura 4**), se puede decir que la mayor parte de la superficie del sector presenta vulnerabilidades altas debidas a la baja profundidad del agua subterránea. Esto se puede interpolar al resto de los sectores acuíferos, como se ve en la **Figura 5**

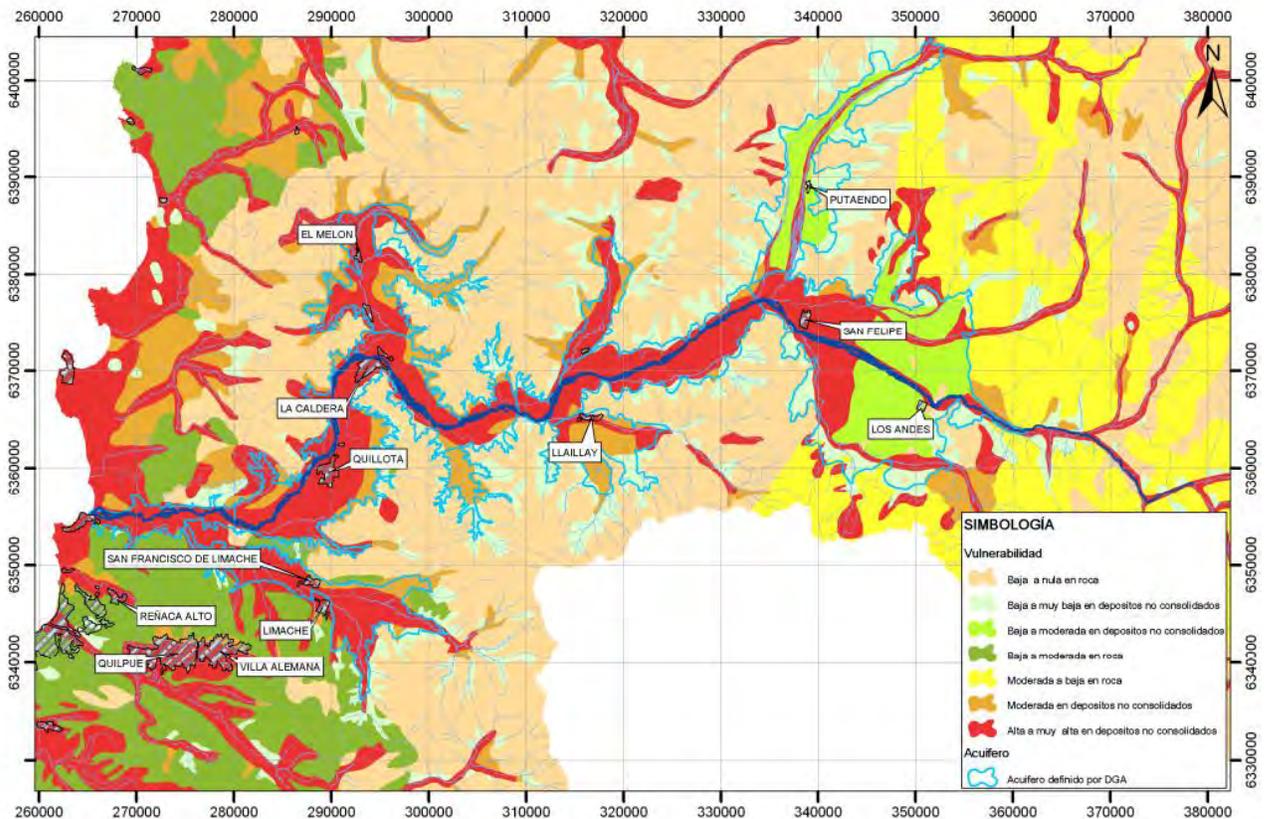
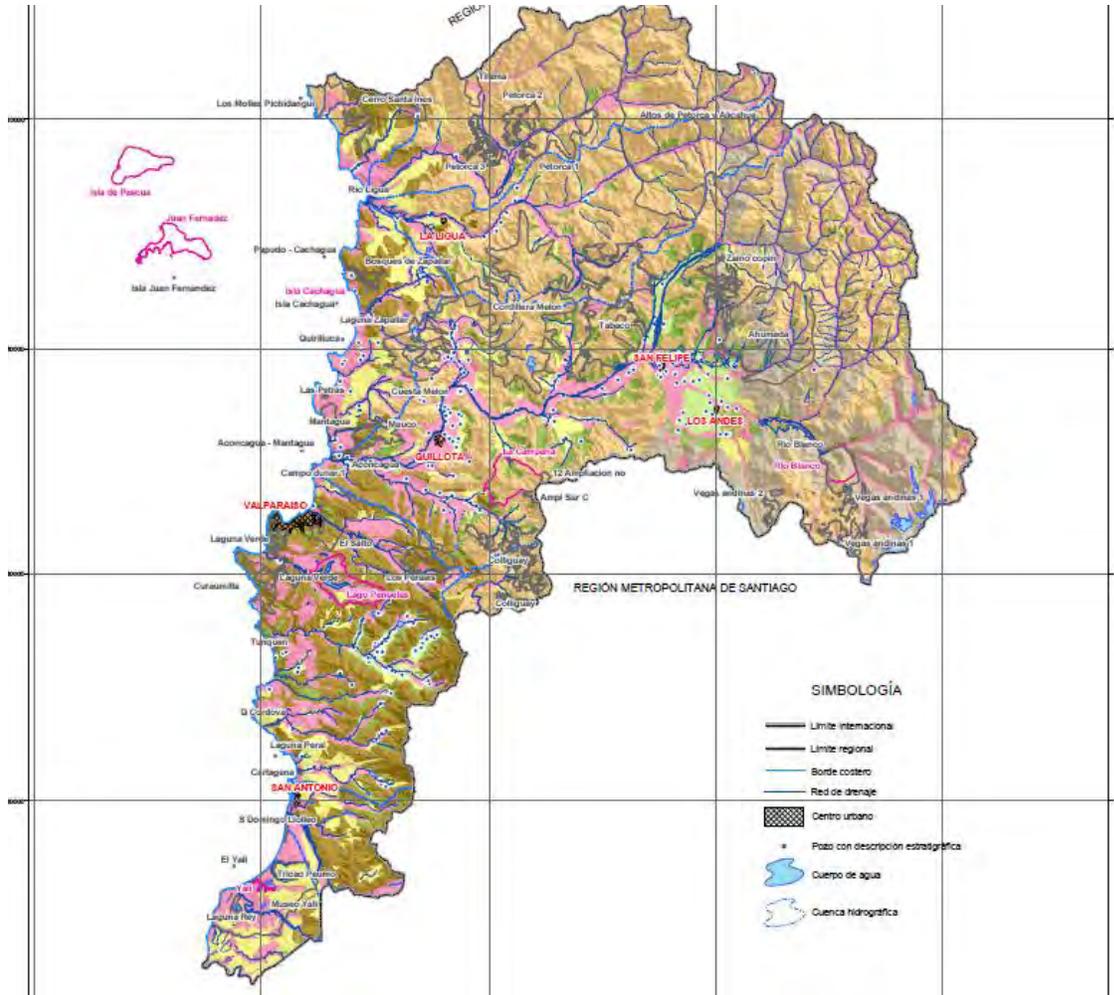


Figura 4: Mapa de vulnerabilidad de sector acuífero de Aconcagua. Fuente: Diagnóstico y Clasificación de Acuíferos, DGA 2009.

Como se observa en las figuras **Figura 4** y **Figura 5**, las zonas de mayor vulnerabilidad se encuentran alrededor de flujos de escorrentía, es decir, lugares donde hay una gran cantidad de depósitos no consolidados. Es por esto que en zonas costeras también hay alta vulnerabilidad. Por otra parte en zonas dominadas por roca en las cuales hay pocos depósitos no consolidados, la vulnerabilidad es baja a nula.



LEYENDA

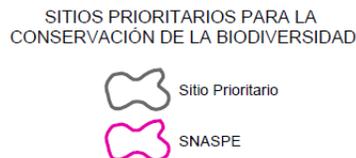


Figura 5. Mapa de vulnerabilidad de la V región. SERNAGEOMIN, 2006.

5. Metodología

5.1. Selección de pozos para el muestreo de aguas subterráneas

Para la selección de los puntos de muestreo de aguas subterráneas se consideraron los pozos construidos en la zona y la disponibilidad de antecedentes mínimos de éstos, ello a partir de la revisión de dos bases de datos: 1) la red de monitoreo de calidad y niveles de la DGA V Región; y 2) los pozos construidos por la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP como parte del programa de abastecimiento de Agua Potable Rural (APR). El proceso de selección se realizó en tres etapas de acuerdo al diagrama que se presenta en la **Figura 6**. Además se consideró la elección de pozos que tuvieran profundidad mayor a 5 metros y menor a 40 metros; al menos un pozo por provincia; al menos un pozo por acuífero; y una distribución espacial homogénea, priorizando los pozos con menor profundidad.

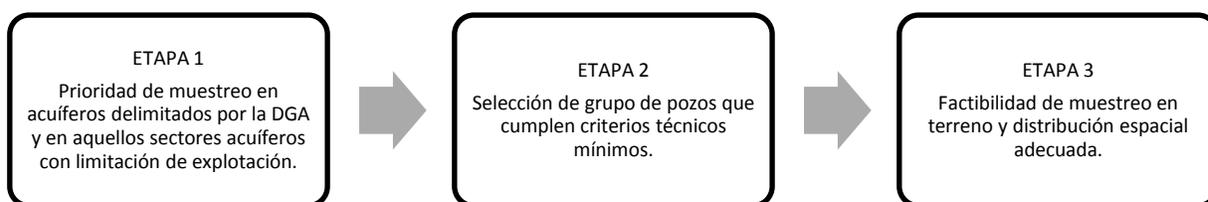


Figura 6: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas

En la Etapa 1 se consideró prioritario seleccionar aquellos pozos ubicados en acuíferos delimitados oficialmente por la DGA y, especialmente, aquellos ubicados en sectores que mantienen alguna limitación de explotación. Este criterio responde a la necesidad de aumentar el conocimiento del estado cualitativo del recurso en aquellas zonas donde resulta escaso.

En la Etapa 2 se seleccionaron pozos que cumplieron con los siguientes criterios técnicos mínimos:

1. Disponibilidad de equipo de bombeo en el pozo para aplicar el procedimiento de muestreo de agua subterránea. Esto posibilita la ejecución adecuada y expedita del procedimiento de muestreo
2. Profundidad máxima del pozo igual a 40 metros. Considerando el conocimiento hidrogeológico de la zona, este criterio permitió incluir aquellos pozos que capturan aguas subterráneas del acuífero libre y, además, que presentan mayor factibilidad de contener sustancias de origen antrópico infiltradas desde la superficie del terreno (contaminantes difusos).

Finalmente, en la Etapa 3 se llevó a cabo una selección práctica de 49 pozos, basada en la factibilidad de ejecutar el muestreo en terreno de forma expedita, cumpliendo con los estándares técnicos requeridos para disponer de muestras representativas del acuífero:

1. Disponibilidad de los datos de contacto del responsable del acceso al pozo y coordinación previa para acceder al pozo.
2. Ubicación en terreno del pozo y constatación de condiciones adecuadas para la toma de muestras.
3. Adecuada distribución espacial de los puntos en el área de estudio.

Considerando las tres etapas descritas anteriormente, además del presupuesto disponible para los análisis químicos, se procedió a muestrear 49 pozos.

5.2. Selección de parámetros de calidad de aguas

Con el objetivo de determinar la actual condición físico-química de las aguas subterráneas en los acuíferos de la V Región, e identificar la presencia de sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa, se seleccionó un conjunto de parámetros que permitiese caracterizarlas adecuadamente (Ver **Tabla 1**).

Tabla 1: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la V Región.

Categoría	Total de parámetros	Parámetro
Físico-químico (medición en terreno)	4	Temperatura, pH, conductividad eléctrica, potencial de óxido reducción.
Iones (análisis en laboratorio)	10	Cloruro (Cl), Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Nitrato (NO ₃), Amonio (NH ₄), Sulfato (SO ₄), Bicarbonato (HCO ₃) y Fosfato (PO ₄)
Microelementos (análisis en laboratorio)	11	Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Mercurio (Hg), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Selenio (Se) y Zinc (Zn)
Pesticidas (análisis en laboratorio)	243	2,4D, Aldrin, Atrazina, DDT, Diazinon, Diuron, Ampa, Glifosato, etc. (ver listado en Anexo 2)

Respecto a la selección de pesticidas, cabe señalar que se tuvo en cuenta la factibilidad de que éstos sean detectados en las aguas subterráneas. Esta factibilidad aumenta para aquellas sustancias que cumplen las siguientes condiciones:

- 1) Mayor solubilidad en agua y por lo tanto aumenta la posibilidad de que un pesticida se infiltre en superficie y llegue hasta el acuífero.
- 2) Menor coeficiente de adsorción, lo que significa que una fracción menor del pesticida pueda ser retenido en el suelo y el resto entre en contacto con el acuífero.
- 3) Mayor vida media (Half-life time, DT50), lo cual indica el tiempo en el que un pesticida es degradado a la mitad y, por lo tanto, una mayor vida media implica una mayor factibilidad de que este llegue al acuífero y pueda ser detectado en los análisis químicos.

En cuanto a los análisis de iones y pesticidas, éstos fueron analizados por un laboratorio externo (ANALAB) contratado mediante licitación pública ID N°1019-101-LE15. El trabajo contratado para este estudio incluyó la visita a terreno de 49 pozos, la toma de muestras de aguas subterráneas para el análisis de iones y pesticidas y la posterior entrega de informes de análisis en los formatos y plazos establecidos en las bases de licitación.

5.3. Uso de equipos y materiales

Durante el trabajo en terreno se utilizaron los siguientes equipos:

- Se utilizó el equipo marca Hanna, modelo HI-98129 para la medida de Temperatura, Conductividad eléctrica y Ph.

- Para la medición del potencial óxido reducción se utilizó un equipo marca Hanna, modelo HI 98.121.

Para las metodologías analíticas se usó el método QUECHERS, de comprobada factibilidad. Las confirmaciones de los resultados positivos se realiza a través el análisis mediante cromatógrafos acoplados a detectores de masa (GC – MS, HPLC- MS/MS y HPLC-MS)

Equipo:

-Marca: Perkin Elmer

-Modelo: Optima 7300DV

-Rango de Lectura: 0,1 -300 mg/l

5.4. Metodologías Analíticas y Límites de Detección

La metodología empleada por ANALAB para la determinación rutinaria de residuos de un amplio espectro de plaguicidas está acreditada por el INN según NCh-ISO 17025 / 2005 y está basada en metodología oficial norteamericana y europea: Pesticide Analytical Manual (PAM) del FDA (método Luke), Método QUECHERS de comprobada confiabilidad. Las confirmaciones de los resultados positivos se realizaron a través el análisis mediante cromatógrafos acoplados a detectores de masa (GC-MS, HPLCMS/MS y HPLC-MS Trampa de Iones).

Tabla 2: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio ANALAB

Parámetro	Metodología de análisis
Cloruro	Metodología ME – 28 – 2007. Manual SISS. Método volumétrico.
Nitrato	Método 4.500 – NO3 – B. Standard Methods, 22th. Ed. 2012. Método espectrofotométrico.
Amonio	Método ME – 27 – 2007. Manual SISS. Método electrodo específico.
Sulfato	Metodología ME – 30 – 2007. Manual SISS. Método gravimétrico.
Bicarbonato	Método 2320 – B. Standard Methods. 22th Ed. 2012. Método volumétrico.
Alcalinidad	Método 2320 – B. Standard Methods. 22th Ed. 2012. Método volumétrico
Sólidos disueltos totales	ME – 31 – 2007. Manual SISS. Método gravimétrico.
Metales (Na, K, Ca, Mg, P)	ICP.

Las metodologías utilizadas por el Laboratorio Ambiental de la DGA corresponden a las siguientes:

Tabla 3 Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio Ambiental de la DGA

Parámetro	Metodología de análisis
Arsénico	Método 3114 – B. Standard Methods. 22th Ed.
Selenio	Método 3114 – B. Standard Methods. 22th Ed.
Mercurio	Método 3112 – B. Standard Methods. 22th Ed.
Cadmio	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Cobalto	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Cobre	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Fierro	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Manganeso	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.

Níquel	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Plomo	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Zinc	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.

5.5. Preparación del trabajo en terreno

Las actividades incluidas dentro de los preparativos de las labores en terreno fueron las siguientes:

- Contactar a los responsables del acceso a los pozos y coordinar el día y hora de visita.
- Revisar rutas de acceso a los distintos puntos y programación de los listados de pozos a visitar cada día.
- Elaborar e imprimir fichas para el registro de datos levantados en terreno.
- Preparar materiales necesarios para la toma de muestras y mantención de éstas en terreno.
- Coordinar el correcto ingreso de muestras al Laboratorio Ambiental de la DGA, de acuerdo con el instructivo LADGA-5.8-01 Procedimiento Ingreso de Muestras.

En las actividades en terreno participaron:

- Laboratorio ANALAB.

La metodología de muestreo se realizó de acuerdo con los estándares de la Norma chilena NCh 411/11 (Guía para el muestreo de aguas subterráneas)

5.6. Análisis y presentación de resultados químicos

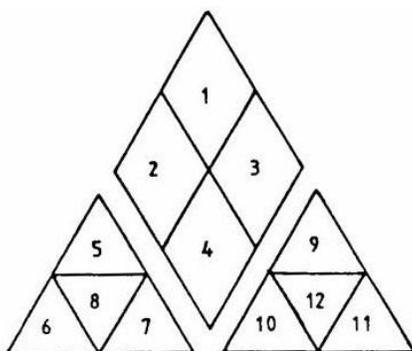
La calidad de los resultados de los análisis químicos de iones fueron verificados mediante el cálculo del balance iónico. Este cálculo considera la sumatoria de cationes y aniones expresados en unidades de miliequivalentes/litro (meq/L). Para aguas con una conductividad eléctrica entre 200 y 500 uS/cm se considera admisible errores cercanos al 10% (Custodio y Llamas, 1996).

$$Error(\%) = 200 \cdot \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Para la presentación de los resultados se utilizaron las siguientes gráficas:

- Parámetros físico-químicos medidos en terreno: gráficas de bolas sobre cartografía.
- Iones mayoritarios: diagrama de Stiff-modificado y diagrama de Piper. Para su construcción se utilizó el software EASY QUIM v5.0 (2012).
- Microelementos: gráficos de barra comparando con estándares de calidad de agua para consumo humano (NCh 409/2005).
- Pesticidas: gráficos indicativos de ausencia o presencia de pesticidas en cada muestra.

La interpretación de los diagramas de Piper se realizó acorde con la siguiente clasificación de las aguas que considera la distribución porcentual de cationes y aniones.



1. Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas.
2. Aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.
3. Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.
4. Aguas bicarbonatadas sódicas.
5. Aguas magnésicas.
6. Aguas cálcicas.
7. Aguas sódicas.
8. Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas.
9. Aguas sulfatadas.
10. Aguas bicarbonatadas.
11. Aguas cloruradas.
12. Aguas sulfatadas, bicarbonatadas y cloruradas.

Figura 7: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.

Para la identificación de cambios en las aguas subterráneas atribuibles a fuentes de contaminación difusa se consideraron las concentraciones de nitrato con magnitud igual o mayor a 30 mg/L.

5.7. Cálculo de Índice de Calidad

5.7.1. Índice de calidad individual por parámetro

Este trabajo se debe realizar con programas que permitan manipular y operar con gran número de celdas, por ejemplo Excel.

El índice de calidad de un pozo, se obtiene mediante la interpolación lineal entre las condiciones límites de cinco clases de calidad (C1, C2, C3, C4 y C5) y los valores de corte (VC1, VC2, VC3, VC4 y VC5), tal como se muestra en la **Figura 8** y en la **Tabla 4**

Tabla 4 : Relación entre clases de calidad y valores de corte

Índice de calidad (IC)		Valor de corte (VC)	
C1	Excepcional	VC1	Según Indicaciones de OMS respecto a la calidad de agua de uso humano.
C2	Buena	VC2	Norma Chilena con respecto a calidad de aguas.
C3	Regular	VC3	Norma para actividad agrícola, y norma chilena de riego.
C4	Insuficiente	VC4	Puede ser tratada para alcanzar la calidad de agua potable definida por la norma establecida.
C5	Intratable	VC5	Aguas que no se pueden tratar. De ser posibles serían mediante procesos muy costosos o complejos.

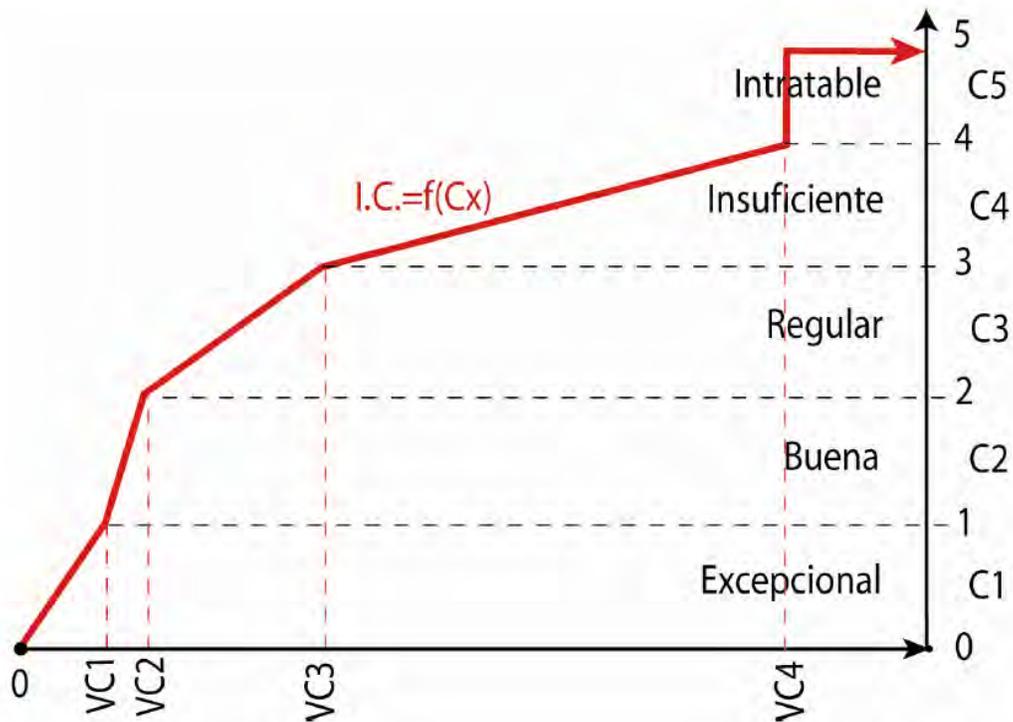


Figura 8: Cálculo de índice de calidad mediante interpolación lineal entre clases.

Para más detalle se recomienda revisar el Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos, DGA 2009.

En el caso de este estudio, los valores de cada clase dependen de los valores de corte mostrados en la **Tabla 5** para cada componente químico

Tabla 5: Definición de clases de calidad de agua

N°	CLASE	Cloruro	Sulfato	Calcio	Sodio	Magnesio	Nitrato	Arsénico
1	Excepcional	≤ 250	≤ 250	≤ 100	≤ 200	≤ 100	≤ 10	$\leq 0,01$
2	Buena	≤ 400	≤ 500	≤ 200	≤ 200	≤ 125	≤ 50	$\leq 0,01$
3	Regular	≤ 1064	≤ 961	≤ 401	≤ 920	≤ 250	≤ 133	$\leq 0,10$
4	Insuficiente	≤ 1600	≤ 10000	≤ 4000	≤ 6000	≤ 2500	≤ 200	$\leq 4,00$
5	Intratable	> 1600	> 10000	> 4000	> 6000	> 2500	> 200	$\leq 4,00$

5.7.2. Cálculo e interpretación del Índice de calidad general

Una vez que se dispone el Índice de calidad (IC) individual de cada parámetro es posible obtener el IC general del sector acuífero. Se definió que los criterios para definir el IC general dependieran principalmente de los elementos químicos que, de acuerdo a la norma chilena de agua potable vigente (INN), afecten a la salud humana y busquen reflejar que la calidad del acuífero esté definida por el parámetro de peor calidad. Los criterios se presentan en la **Tabla 6**: Criterios para establecer el IC general y se aplican para cada celda del sector acuífero de acuerdo a la interpolación generada.

Tabla 6: Criterios para establecer el IC general

Condición IC individual	Resultado IC general	Expresión
Si existe un parámetro con IC Intratable	IC general es Intratable	$Si IC_{individual} > 4$ $IC_{general} = 5$
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente	IC general es el peor IC individual de todos los parámetros	$Si 1 < IC_{individual} \leq 4$ $IC_{general} = Max (IC_{individual})_{i=parámetro}$
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Excepcional.	IC general es el promedio del IC individual de todos los parámetros	$Si 1 \geq IC_{individual}$ $IC_{general} = \frac{\sum_{i=parámetro} IC_{individual}}{n^{\circ} parámetros}$

A partir de lo anterior se obtiene un valor para el índice de calidad general del sector acuífero en el rango continuo entre 0 y 5, sin embargo para efectos de la visualización se utiliza una escala discreta de las cinco clases establecidas. La interpretación de la calidad según el IC general está definida en base a los criterios utilizados para su determinación, es decir, los parámetros que afectan la salud humana y/o que presenten la peor calidad química. Para mayor información se recomienda revisar el Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos, 2009.

5.7.3. Descripción general de las actividades en terreno y laboratorio

Los 49 pozos muestreados, actividad que se realizó en el transcurso del mes de Octubre de 2015, fue un trabajo abordado por personal calificado con amplia experiencia en este tipo de actividades, durante el período de un mes, en semanas corridas.

Los pozos muestreados corresponden a pozos utilizados para abastecimiento de la población rural (Programa Agua Potable Rural – APR, de la Dirección de Obras Hidráulicas).

Los pozos seleccionados provinieron de un acuerdo tomado con Inspección Fiscal de la licitación ID N°1019-101-LE15.

Previamente al muestreo se verificó el cumplimiento de las condiciones mínimas que aseguren la calidad de las muestras.

La DGA gestionó la autorización previa para el acceso y los pozos dispusieron de un equipo de bombeo y una llave o válvula para recoger la muestra de agua cruda desde la superficie.

Se mantuvo un estrecho contacto con los encargados de APR para la confirmación de lugares muestreados, fechas de muestreo, imponderables de última hora para efectuar algún muestreo y eventuales cambios de algunos pozos a muestrear.

6. Resultados

6.1. Descripción general de las actividades en terreno y laboratorio

Los 49 pozos muestreados, actividad que se realizó en el transcurso del mes de Octubre/Noviembre de 2015, fue un trabajo abordado por personal calificado de ANALAB, con amplia experiencia en este tipo de actividades, durante el período de un mes, en semanas corridas.

La totalidad de los pozos muestreados corresponden a pozos utilizados para abastecimiento de la población rural (Programa Agua Potable Rural – APR, de la Dirección de Obras Hidráulicas).

Los pozos seleccionados provinieron de un acuerdo tomado con Inspección Fiscal de la DGA.

Previamente al muestreo se verificó el cumplimiento de las condiciones mínimas que aseguren la calidad de las muestras.

La DGA gestionó la autorización previa para el acceso y que los pozos dispusieran de un equipo de bombeo y una llave o válvula para recoger la muestra de agua cruda desde la superficie.

Se mantuvo un estrecho contacto con los encargados de APR para la confirmación de lugares muestreados, fechas de muestreo, imponderables de última hora para efectuar algún muestreo y eventuales cambios de algunos pozos a muestrear.



Valle Los Olmos



Manzanar



Las Salinas



Las Palmas de Olmue

Figura 9: Fotografías de trabajo en terreno en diferentes zonas de la V Región.

Los pozos muestreados se distribuyeron entre las diferentes provincias de las V región: Petorca, Los Andes, San Felipe, San Antonio, Valparaíso y Quillota, abarcando 25 comunas y un total de 49 pozos. (Ver **Figura 10** y **Figura 11**)

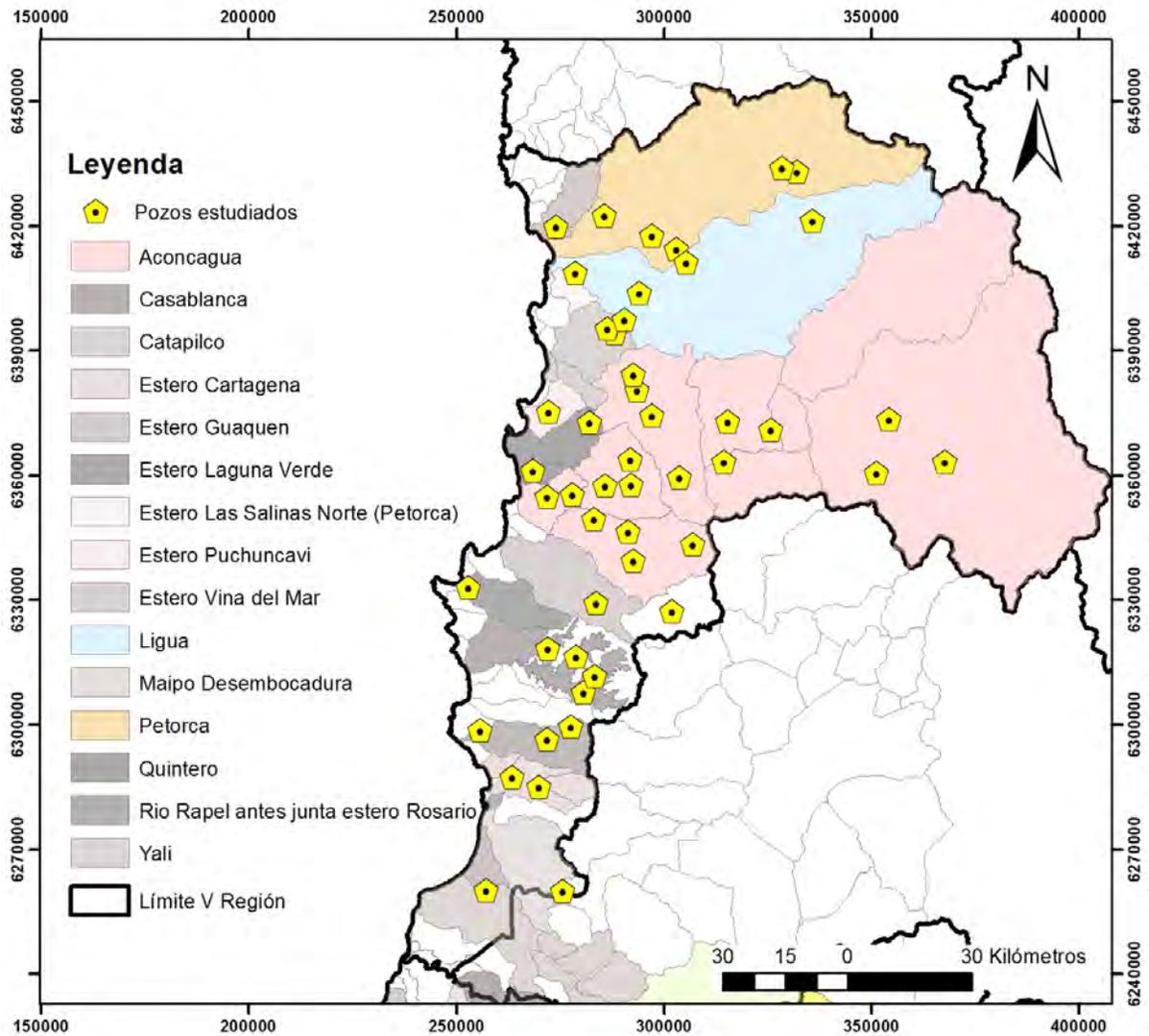


Figura 10: Distribución de puntos de muestreo.

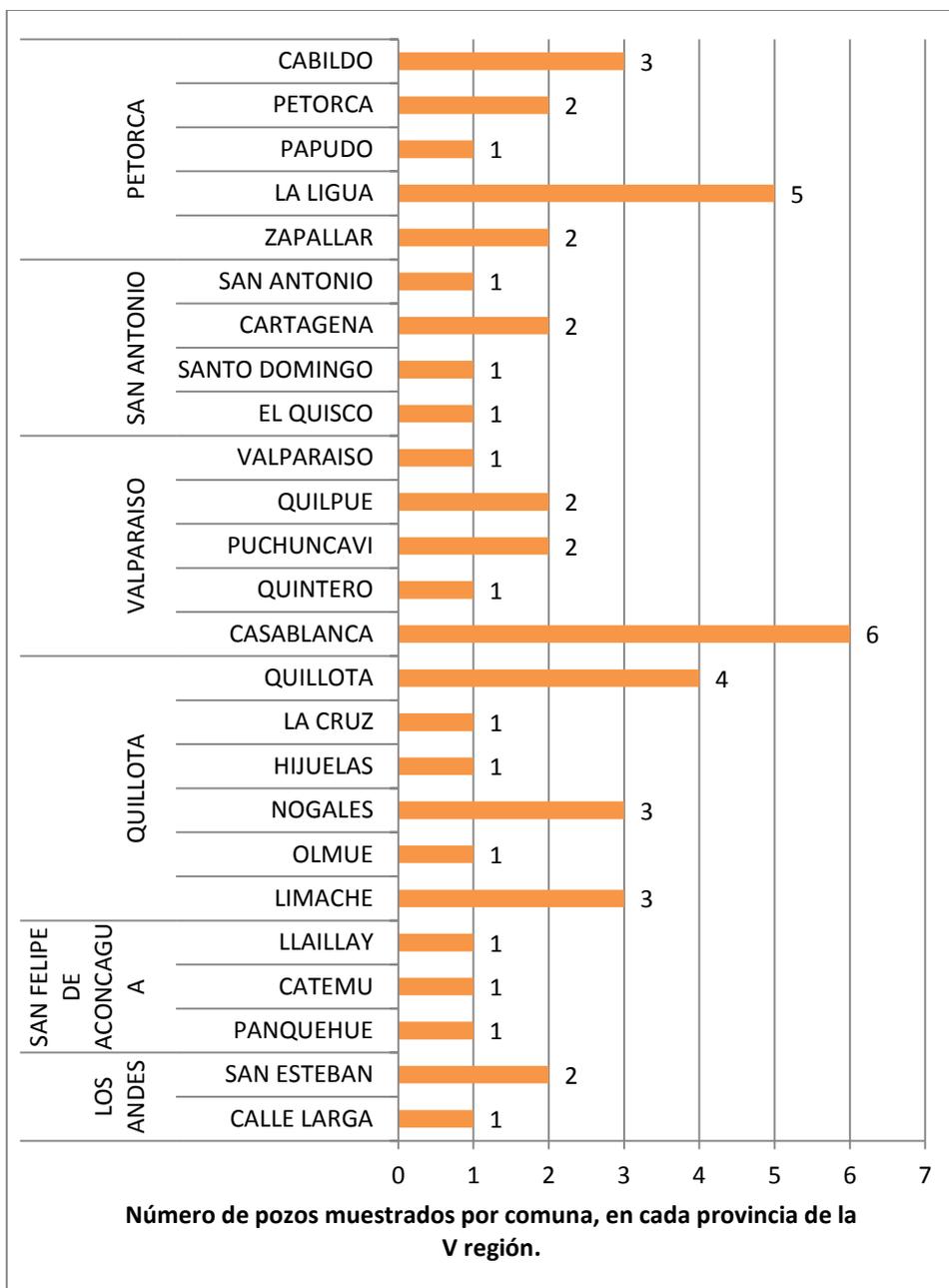


Figura 11: Distribución de puntos de muestreo en la V región.

6.2. Datos registrados en terreno

Se registraron los siguientes parámetros físico-químicos del agua en los lugares de muestreo:

- Temperatura del agua (°C)
- Conductividad eléctrica del agua (uS/cm)
- pH (unidad de pH)
- Potencial óxido reducción

Los equipos requeridos y sus sensores fueron calibrados con frecuencia diaria, para asegurar la calidad de los datos.

Los tres primeros parámetros fueron medidos con equipo marca Hanna, modelo HI-98129.

Temperatura: lectura directa por el equipo. Resolución 0,5(°C)

Conductividad eléctrica: calibrado con patrón de 1413 uS/cm (Hi 7031). Resolución 1.

pH: calibrado con 3 soluciones buffers, valores 4, 7 y 10. Resolución 0,01.

Para la medición del potencial óxido reducción, se utilizó un equipo de marca Hanna, modelo HI 98.121. Resolución ORP 1mV.

En la **Figura 12** y **Figura 13** se presentan comparaciones entre los registros de la profundidad de agua medida en terreno y su respectiva profundidad constructiva.

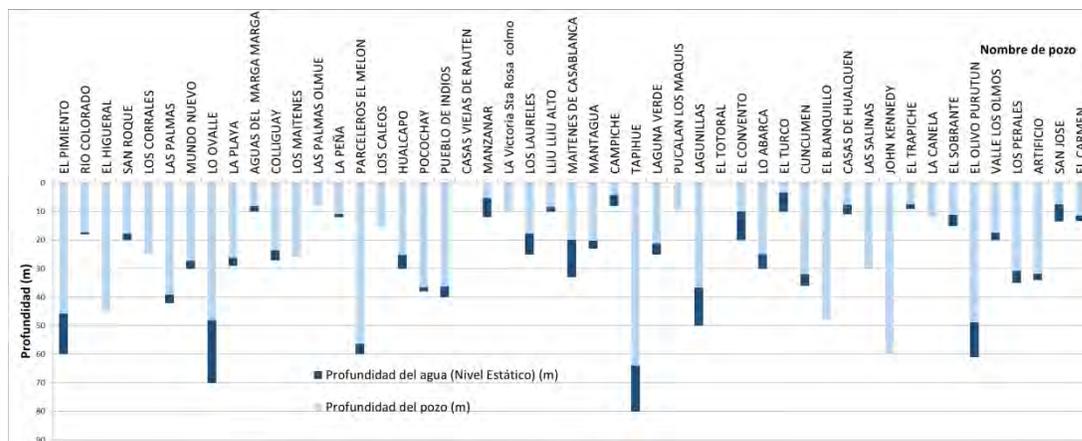


Figura 12: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles estáticos)

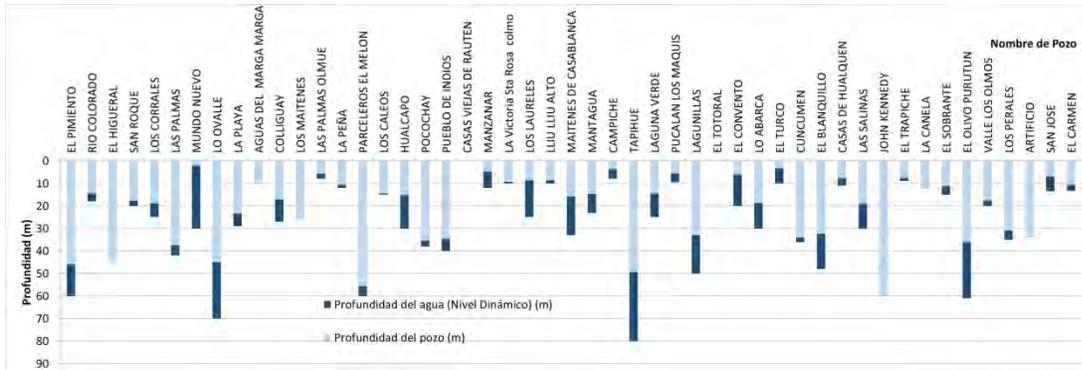


Figura 13: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles dinámicos)

Los parámetros físico-químicos medidos en terreno (temperatura, pH, conductividad eléctrica y potencial óxido reducción) se detectaron, en general, dentro de rangos típicos esperables para aguas subterráneas. (Figura 14 y Figura 15)

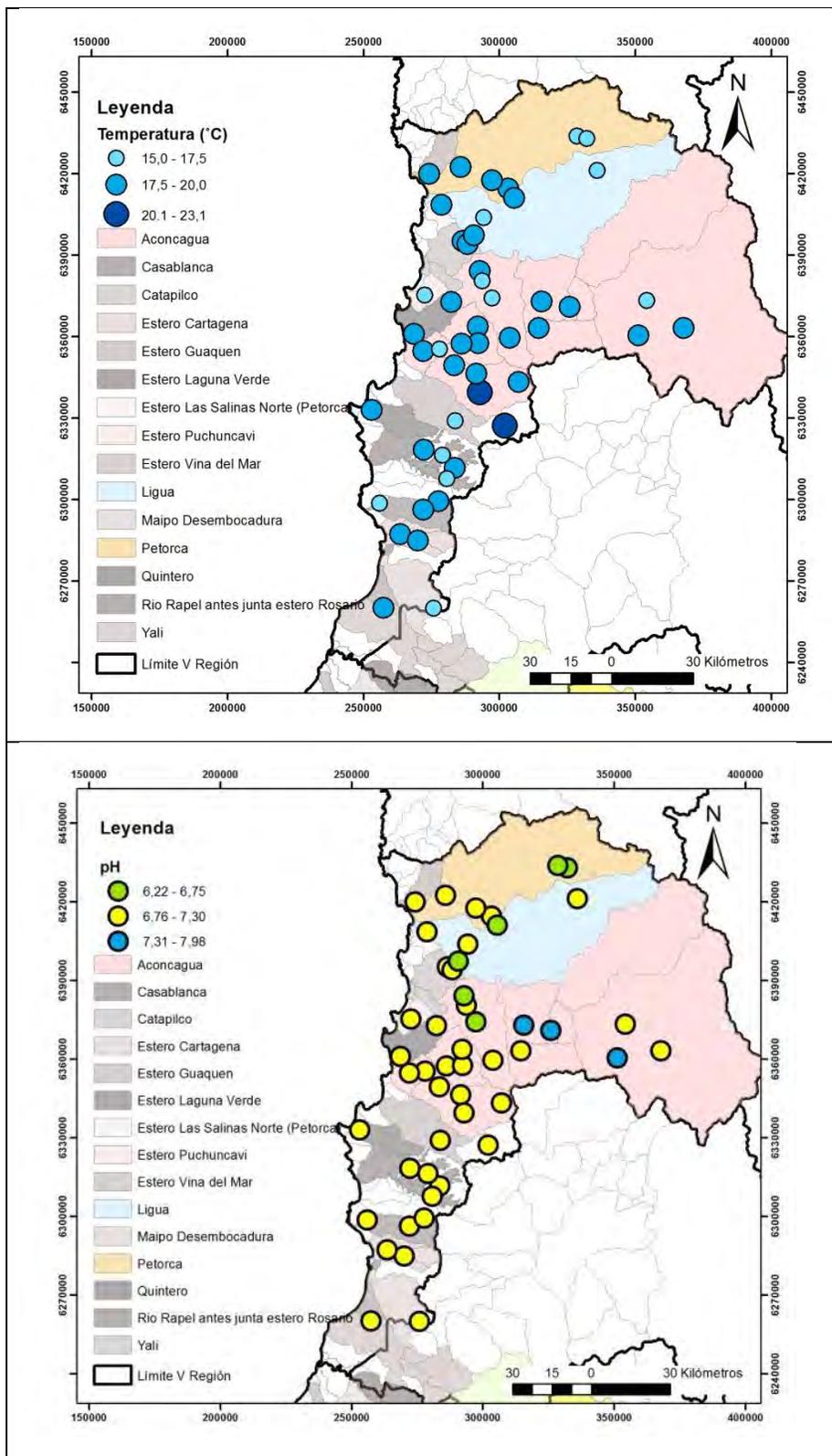


Figura 14: Parámetros físico químicos registrados in-situ en aguas de 49 pozos de la V Región. Arriba: datos de T; Abajo: datos de pH.

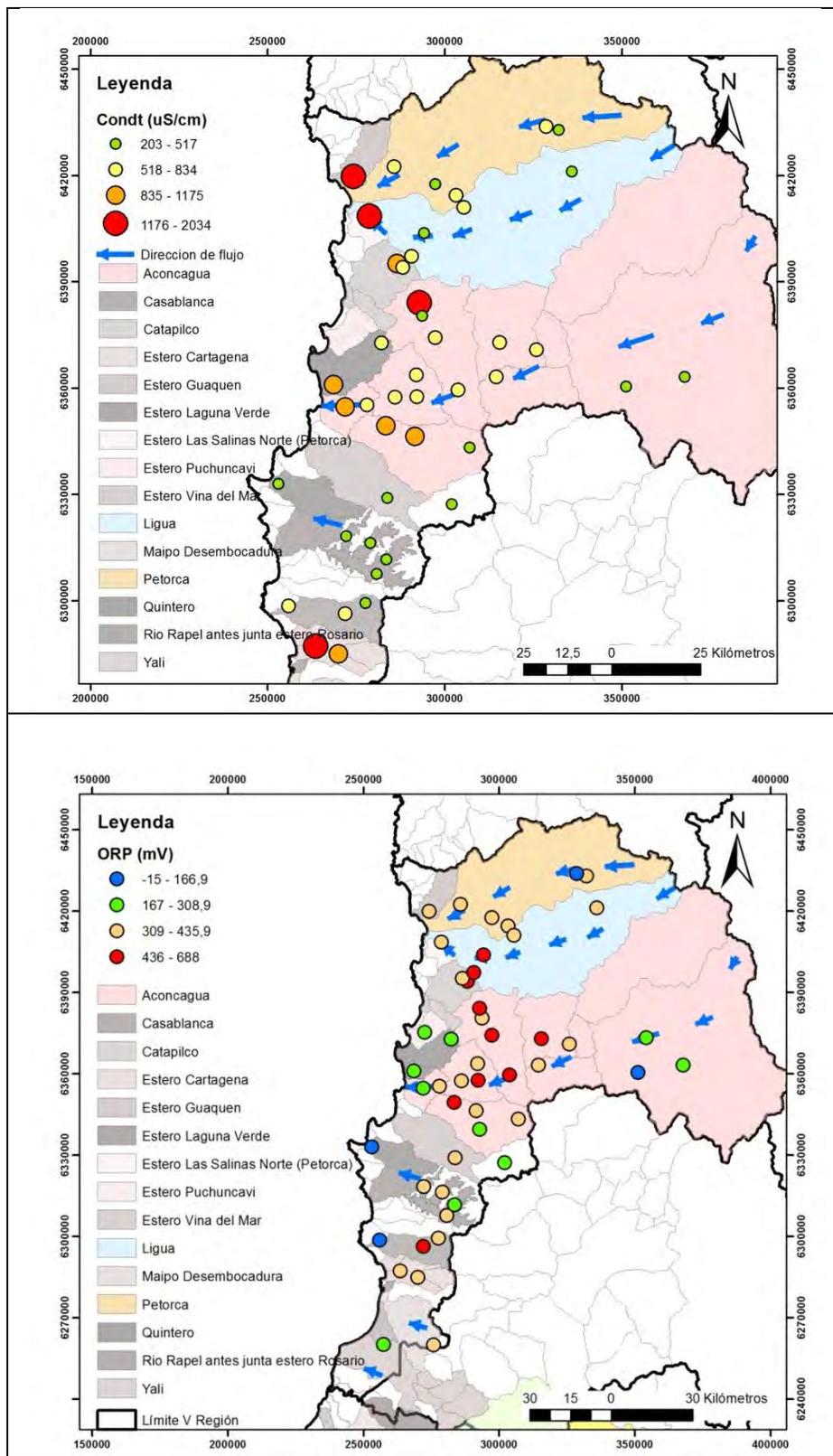


Figura 15: Parámetros físico químicos registrados in-situ en aguas de 49 pozos de la V Región. Arriba: datos de conductividad; Abajo: datos de potencial de óxido reducción. (Único valor negativo APR Valle los Olmos (acuífero de Petorca) ORP= -15 mV)

6.3. Cálculo de balance iónico

El error de balance iónico fue cuantificado por el laboratorio ANALAB a partir de los resultados de análisis químicos que informaron para cada una de las 49 muestras. Al respecto se detectó 19 casos (39%) con un error menor al 1%, 30 casos (61%) con un error entre 1% y 5% lo que se observa en la **Figura 16**. En vista de los resultados, se consideró adecuado utilizar el total de los datos de análisis químicos de las muestras de agua tomadas en los 49 pozos para analizar la situación de contaminación difusa en la región.

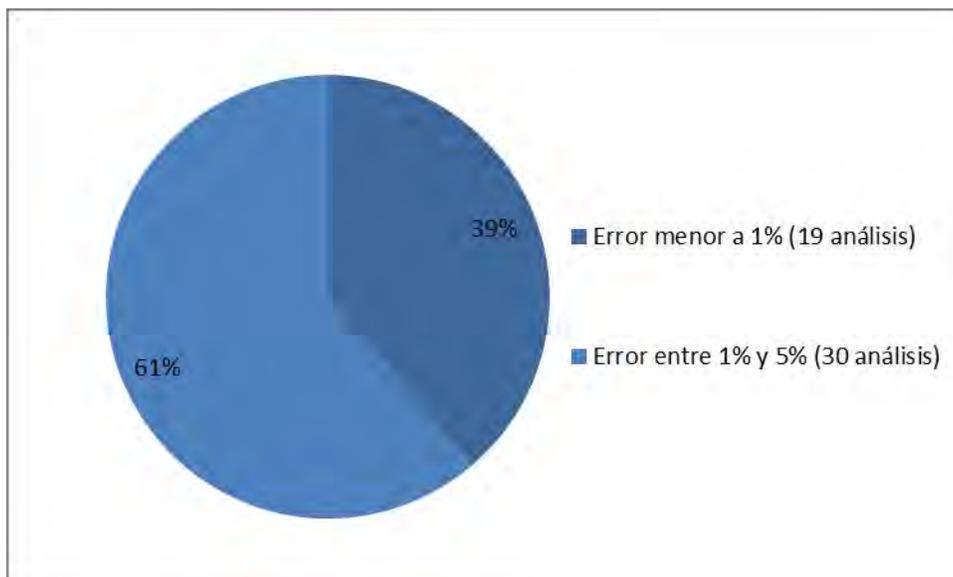


Figura 16: Distribución porcentual del error del balance iónico de las muestras de agua subterránea.

6.4. Concentración de iones

El análisis de iones mayoritarios y sus resultados son presentados mediante diagramas de Stiff-modificado y diagramas de Piper.

Una primera interpretación de los diagramas de Stiff-modificado, permite destacar el incremento en sentido Este-Oeste de la concentración total de iones, obteniendo valores más altos en los acuíferos costeros, lo que, como norma general, se relaciona con un mayor tiempo de permanencia del agua en el terreno. (Figura 17)

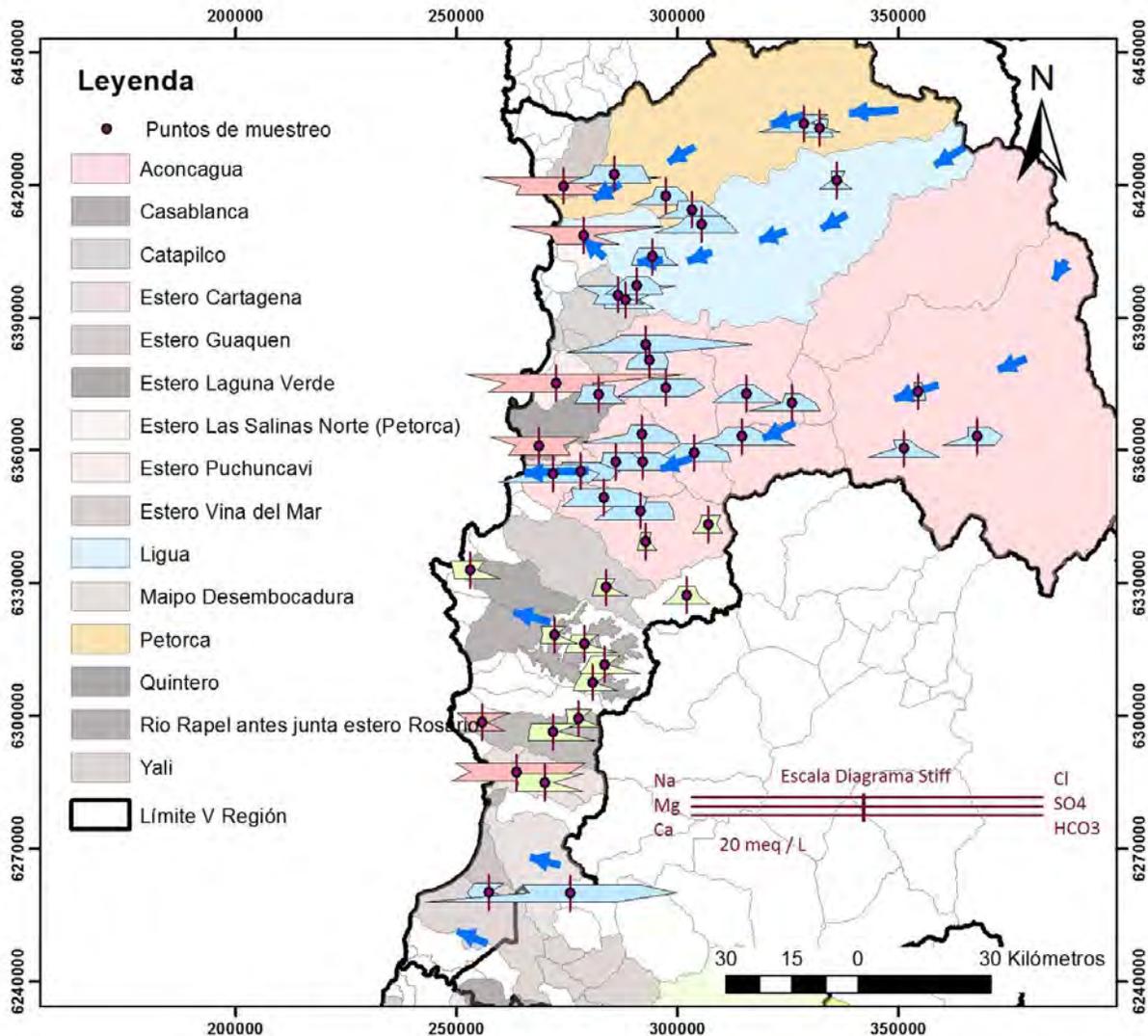


Figura 17: Diagramas de Stiff-modificado para las 49 muestras de aguas subterráneas tomadas en la V región. Los diagramas de aguas bicarbonatadas cálcicas se muestran en color celeste, los de aguas cloruradas sódicas en color rosado y las bicarbonatadas o cloruradas cálcicas en color verde.

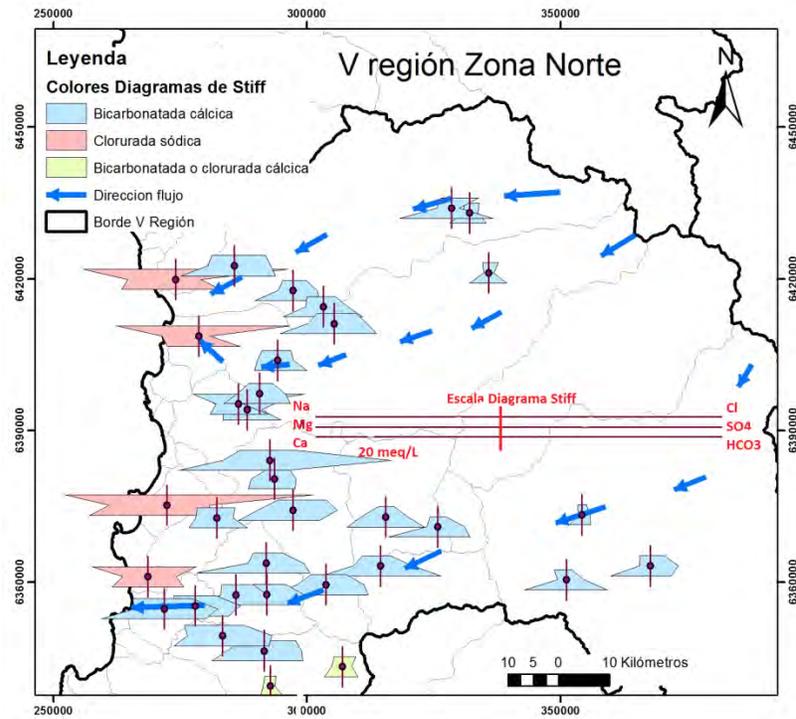


Figura 18: Detalle de Diagramas de Stiff en la zona norte de la V Región

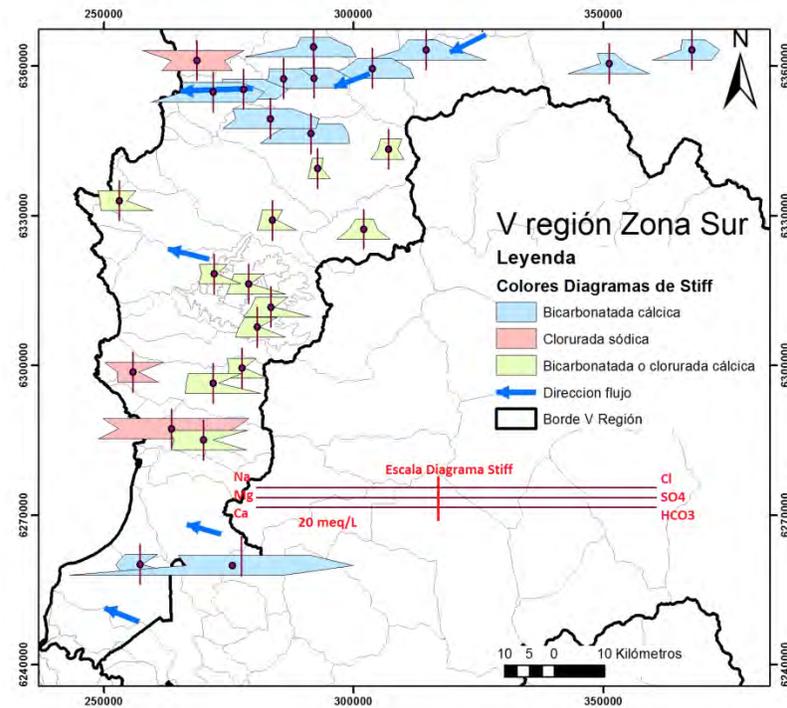
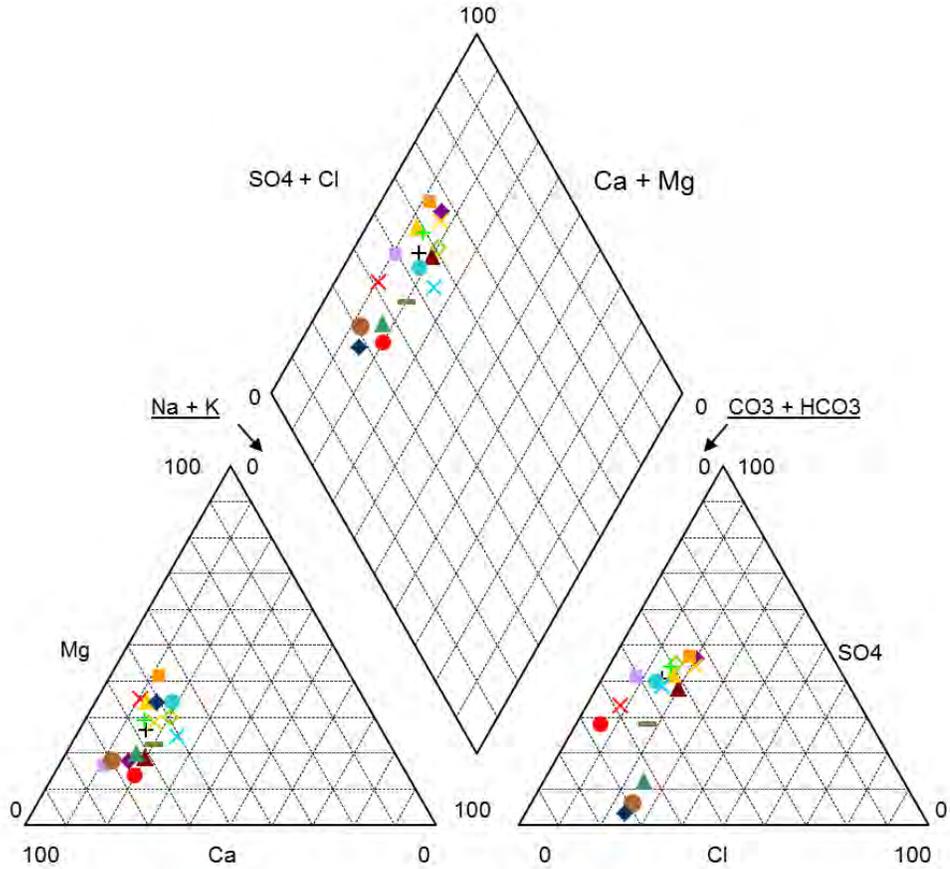


Figura 19: Detalle de Diagramas de Stiff en la zona sur de la V Región



CATION

- EL PIMIENTO
- ◆ RÍO COLORADO
- ▲ EL HIGUERAL
- SAN ROQUE
- × LOS CORRALES
- + HUALCAPO
- POCOCHAY
- LA TETERA-PUEBLO DE INDIOS
- ▲ RAUTÉN BAJO
- MANZANAR-EL MAUCO-CAROLMO-HUAPE (MANZANAR)
- LA VICTORIA
- + LOS LAURELES (EL MAQUI-HUERTO SANTA CAROLINA)
- MUNDO NUEVO
- ◆ LO OVALLE
- ▲ AGUAS DEL MARGA MARGA
- COLLIGUAY (EL MOLINO-LOS YUYOS)
- × CASAS DE PUCALÁN (EL OLIVO)

ANION

Figura 20: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el acuífero Aconcagua. Se puede clasificar entre bicarbonatada o sulfatada cálcica. Lo que indicaría procesos que ocurren en rocas carbonatadas o cristalinas y procesos de reducción de yeso u oxidación de sulfatos.

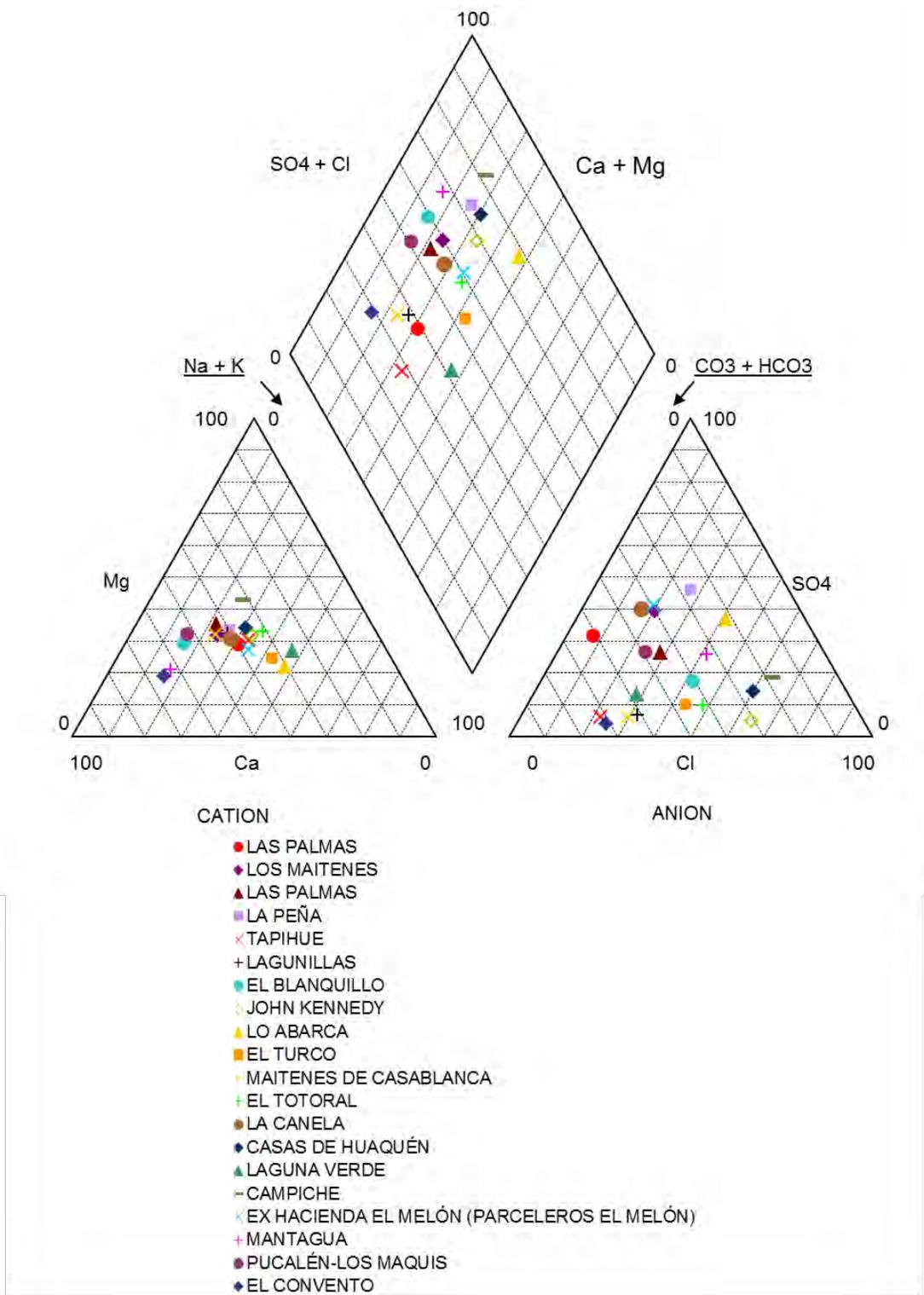


Figura 21: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector de los acuíferos costeros. Se puede clasificar entre bicarbonatada o sulfatada cálcica y/o clorurada o sódica. Lo que indicaría procesos que ocurren en rocas carbonatadas o cristalinas, procesos de reducción de yeso u oxidación de sulfatos e influencia de aguas marinas.

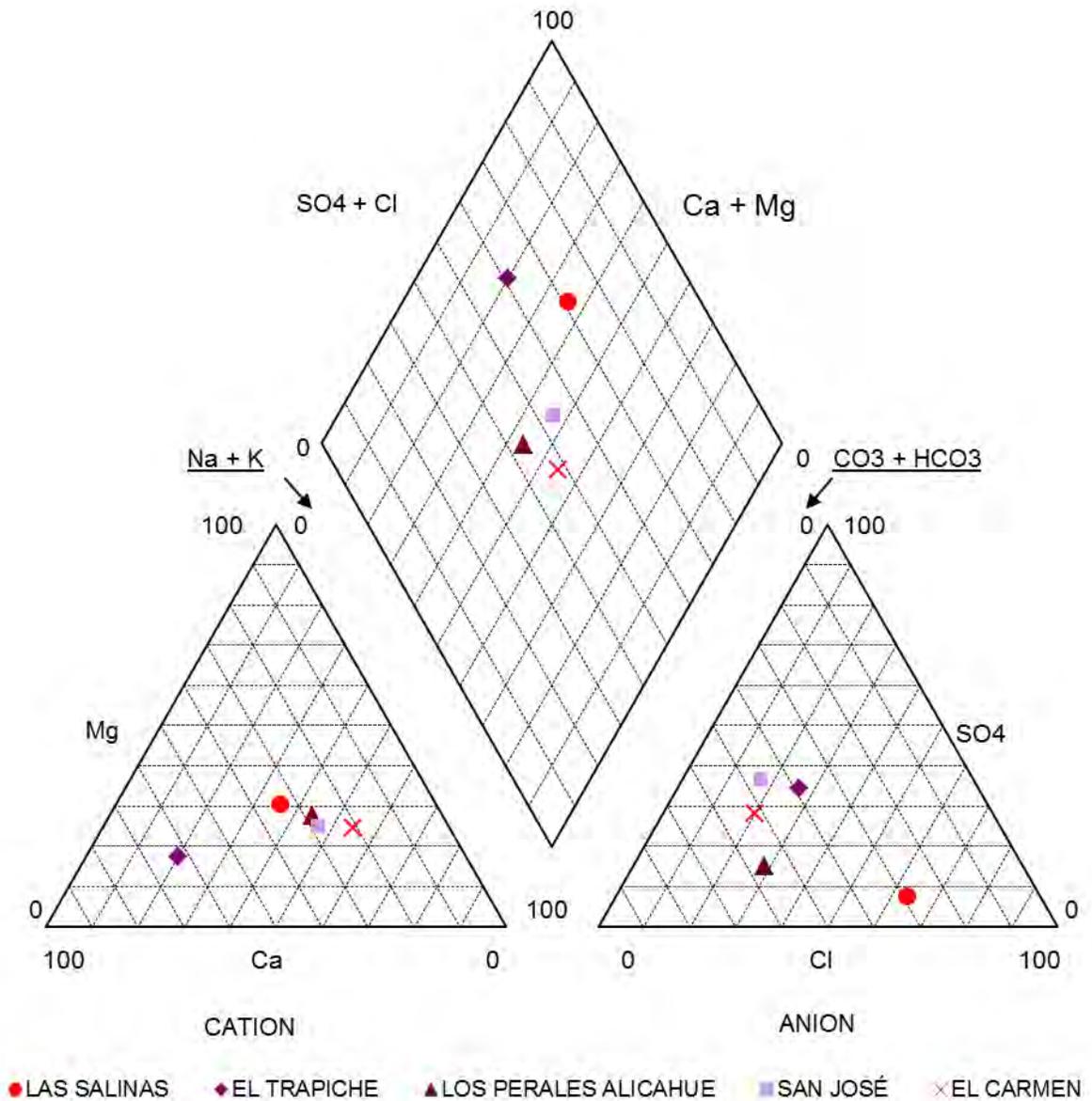


Figura 22: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el acuífero La Ligua. Se puede clasificar como sulfatada o clorurada cálcica. Lo que indicaría procesos de reducción de yeso u oxidación de sulfatos con influencia de aguas marinas.

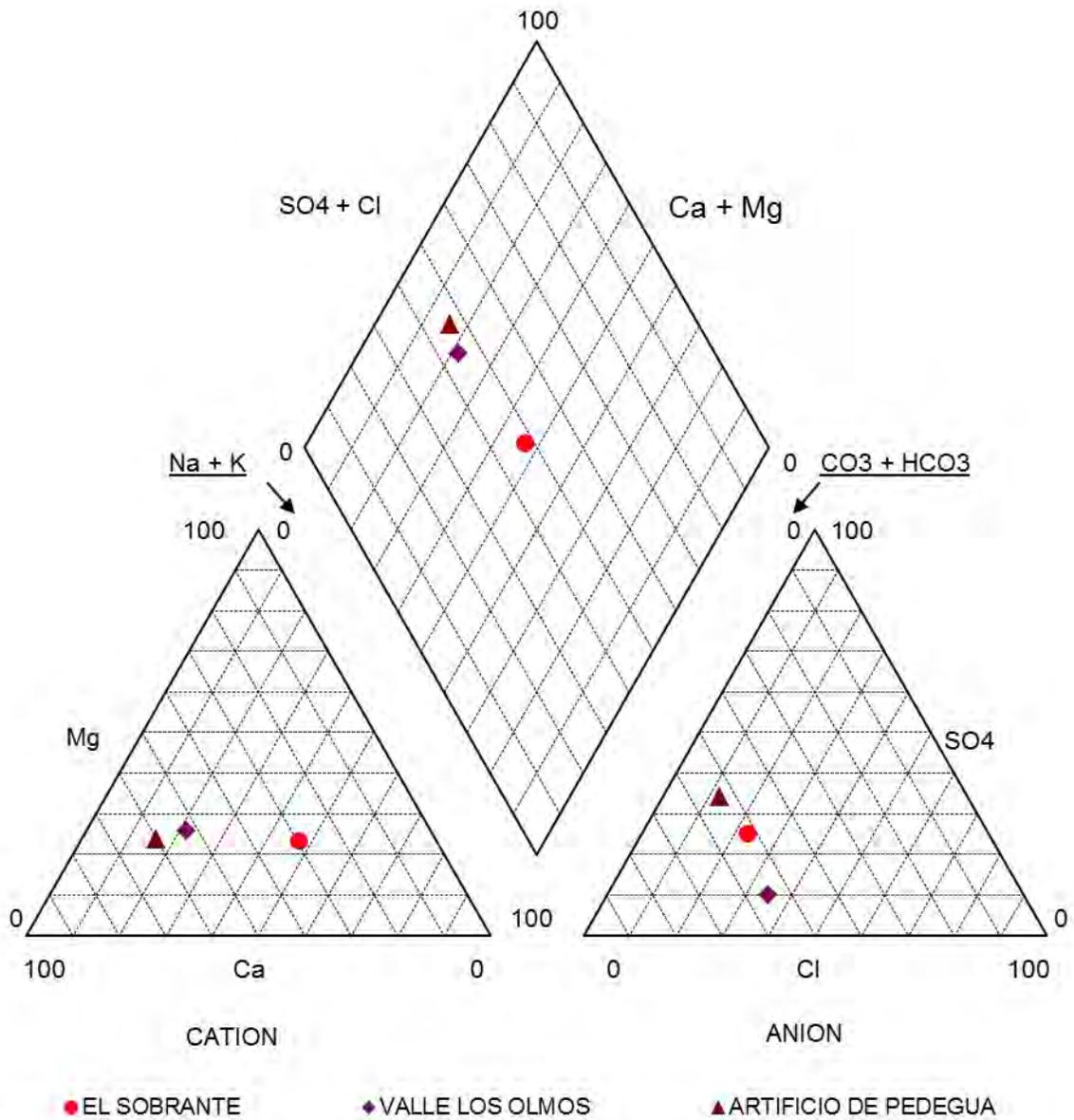


Figura 23: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el Acuífero Petorca. Se puede clasificar como bicarbonatada cálcica. Lo que indicaría procesos que ocurren en rocas carbonatadas o cristalinas.

6.5. Nitrato

Respecto al origen del nitrato, se puede señalar que una parte importante proviene de fuentes de materia orgánicas como depósitos de estiércol, alcantarillados, fosas sépticas, etc., y de productos de origen químico que se utilizan en agricultura (fertilizantes). El nitrato se puede movilizar fácilmente con el agua, infiltrarse hasta alcanzar el acuífero.

Como referencia se suelen considerar afectadas aquellas aguas que superan o puedan alcanzar la concentración indicada en la norma de agua potable (50 mg/L de NO₃).

En la **Figura 24** se representan los resultados puntuales de nitrato detectado en cada pozo, agrupado en cuatro rangos de concentraciones. A partir de esta figura se evidencian concentraciones más elevadas en las comunas de Casablanca y Limache. Al considerar el estándar de agua potable (NCh409/2005), se puede concluir que en dos pozos (APR Mundo nuevo (59.4 mg/l) y APR Los Maitenes (72 mg/L)) la concentración de Nitratos fue superior a 50 mg/L.

Las mayores concentraciones se observan en los acuíferos cercanos a la costa, por ejemplo en la zona cercana a la costa del acuífero Aconcagua, y en el acuífero Casablanca. Mientras que aquellos acuíferos cercanos a la cordillera y los de la depresión central, presentan en general concentraciones menores a 30 mg/L.

Al cruzar los resultados con los mapas de vulnerabilidad (Sernageomin) se observa que ambos pozos que superaron la norma en (NCh409/2005) APR Mundo Nuevo y APR los Maitenes se encuentran en una zona de vulnerabilidad alta.

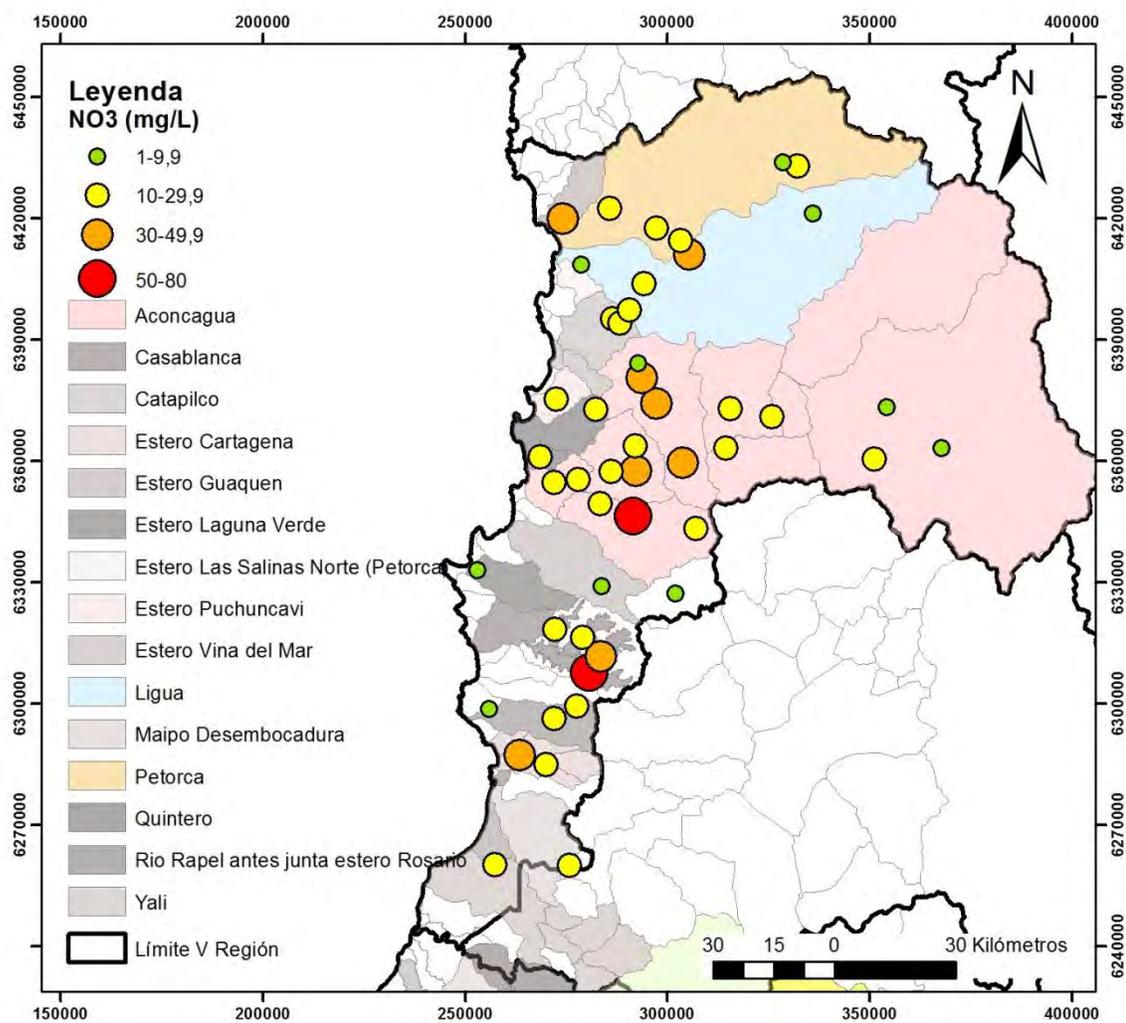


Figura 24: Representación de rangos de concentración de nitrato (NO₃) detectado en los pozos muestreados en acuíferos de la V Región.

Amonio (NH₄) y Fosfato (PO₄)

Los análisis de Amonio (NH₄) informaron que este ion fue detectado en 4 de los 49 pozos estudiados alcanzando concentraciones entre 0,02 mg/L y 0,03 mg/L en 3 pozos, y un valor anómalo de 5,4 mg/L en un pozo.

Los análisis de fosfato (PO₄) detectaron la presencia de este ion en 4 de los 49 pozos, con concentraciones de 0,013 mg/L en el pozo Los Maitenes en la comuna de Limache; 0,17 mg/L en la comuna de Quillota en el pozo Santa Rosa de Colmo; 0,15 mg/L en el pozo pueblo de Indios en la comuna de Quillota; y una concentración de 1,2 en el pozo Valle de los Olmos en la comuna de Petorca. En términos generales, el fosfato en el agua subterránea tiene su origen en los aportes que hace la materia orgánica existente en el suelo, además de los aportes de fertilizantes y sustancias de origen industrial que pueden lixiviar hasta llegar al acuífero. Los pozos donde se detectó fosfato presentaron niveles de agua subterránea en general próximos a la superficie.

6.6. Microelementos

Los resultados de los análisis de microelementos se resumen en la **Tabla 7**

Dentro de los resultados, la concentración de Arsénico supera el valor normado para el agua potable (NCh 409/2005) en el pozo A.P.R. Valle de los Olmos, que tiene una profundidad de 20 m, nivel estático de 2,5 m y nivel dinámico de 2,56 m. Este pozo se ubica en la localidad de Petorca, en una zona de alta vulnerabilidad. (**Figura 29**)

Tabla 7: Resumen de los resultados de análisis químicos de microelementos en aguas subterráneas de la V Región.

Analito	Símbolo	Límite de detección de laboratorio (mg/L)	Límite de agua potable (NCh 409/2005) (mg/L)	Límite de agua de riego (NCh 1333) (mg/L)	Observación
Arsénico	As	0,001	0,01	0,1	Sobrepasa norma de agua potable en 1 pozo: APR Valle de los Olmos (0,26mg/L)
Mercurio	Hg	0,002	0,002	0,001	No detectado
Selenio	Se	0,001	0,01	0,02	No detectado
Cadmio	Cd	0,01 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L	No detectado
Cobalto	Co	0,04 mg/L	-	0,050 mg/L	No detectado
Cobre	Cu	0,02 mg/L	2 mg/L	0,2 mg/L	Sobrepasa norma de agua de riego en 1 pozo: APR La canela (0,41 mg/L)
Hierro	Fe	0,02 mg/L	0,3 mg/L	5 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 6 pozos: APR Mantagua (0,40mg/L) APR Lliu Lliu alto (0,79mg/L) APR El Totoral (0,83mg/L)

Analito	Símbolo	Límite de detección de laboratorio (mg/L)	Límite de agua potable (NCh 409/2005) (mg/L)	Límite de agua de riego (NCh 1333) (mg/L)	Observación
					<p>APR Laguna verde (1,22mg/L) APR Colliguay (1,40mg/L) APR Campiche (6,46 mg/L)</p> <p>Sobrepasa norma de agua de riego en 2 pozos: APR Valle olmos (5,56mg/L) APR Campiche (6,46mg/L)</p>
Manganeso	Mn	0,02 mg/L	0,1 mg/L	0,2 mg/L	<p>Sobrepasa norma de agua potable en 9 pozos: APR Santa Rosa de Colmo (0,13mg/L) APR El turco (0,17mg/L) APR Laguna Verde (0,23mg/L) APR Lliu Lliu Alto (0,79mg/L) APR El Totoral (1,54mg/L) APR Cuncumen (1,76mg/L) APR Lo Abarca (0,79mg/L) APR Campiche (2,59mg/L) APR Valle Los Olmos (6,32mg/L)</p> <p>Sobrepasa norma de agua de riego en 7 pozos: APR Laguna Verde (0,23mg/L) APR Lliu Lliu Alto (0,79mg/L) APR El Totoral (1,54mg/L) APR Cuncumen (1,76mg/L) APR Lo Abarca (0,79mg/L) APR Campiche (2,59mg/L) APR Valle Los Olmos (6,32mg/L)</p>
Níquel	Ni	0,05 mg/L	-	0,2 mg/L	No Detectado
Plomo	Pb	0,07 mg/L	0,05 mg/L	5 mg/L	No Detectado
Zinc	Zn	0,01 mg/L	3 mg/L	2 mg/L	Detectado, no supera valores de norma

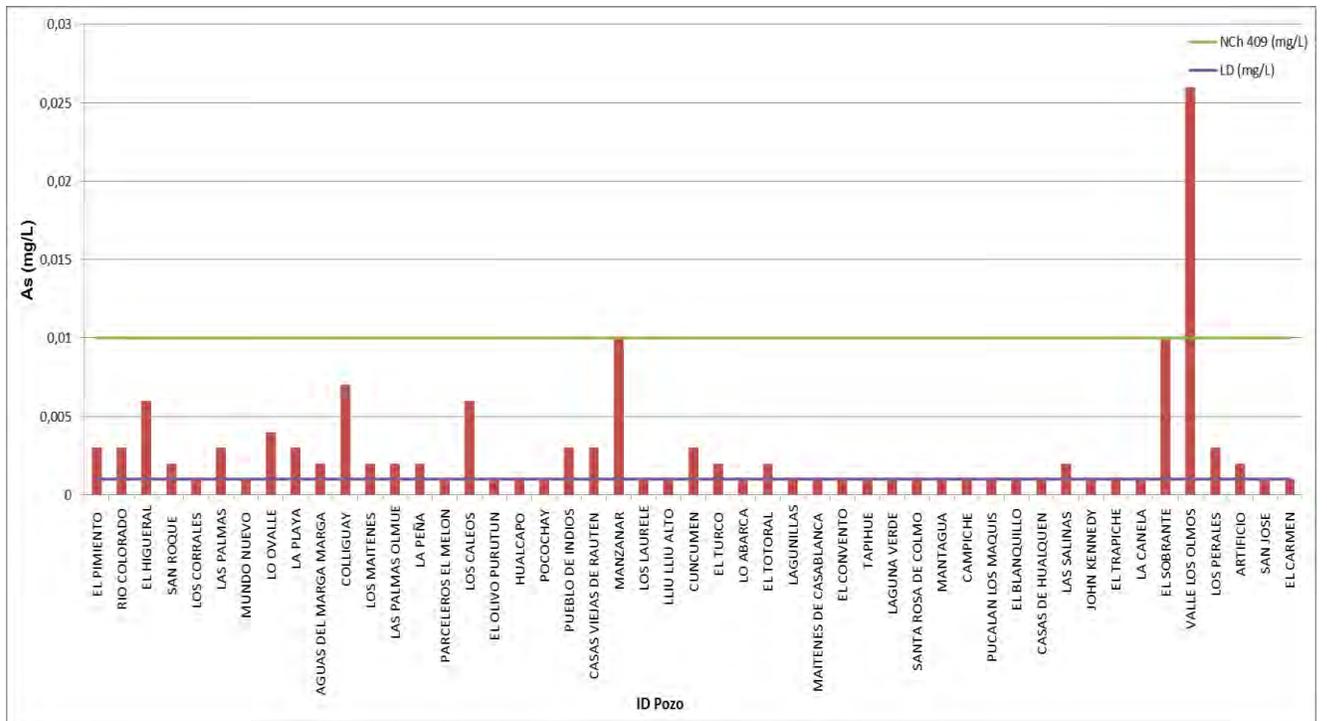


Figura 25: Concentración total de Arsénico detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409).

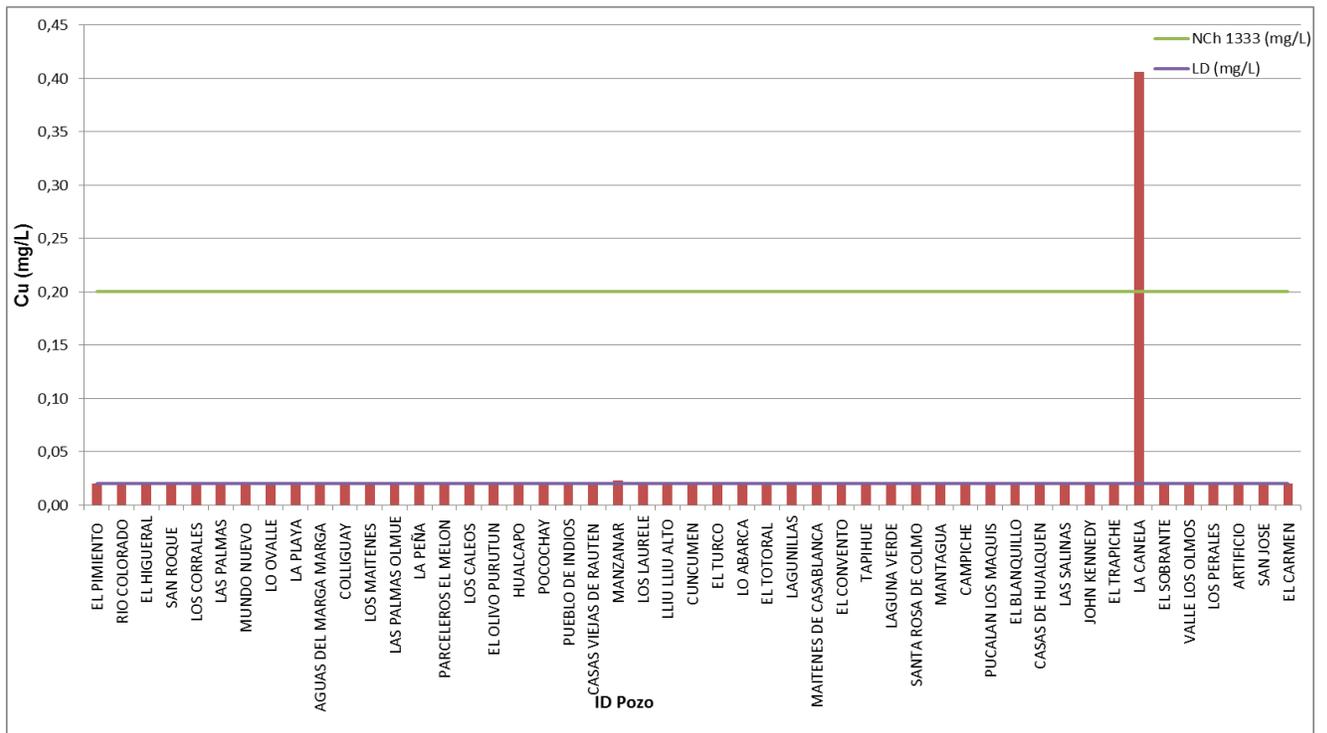


Figura 26: Concentración total de Cobre detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua para riego (NCh 1333).

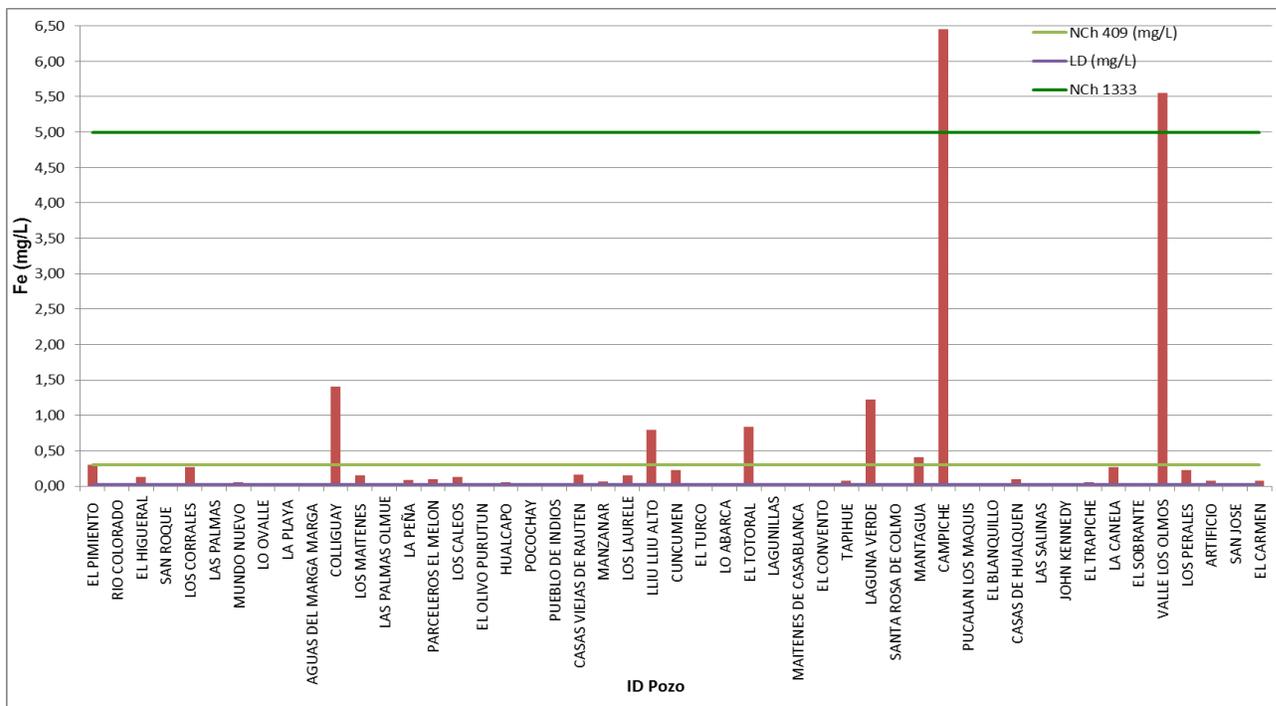


Figura 27: Concentración total de Hierro detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409) y para riego (NCh 1333).

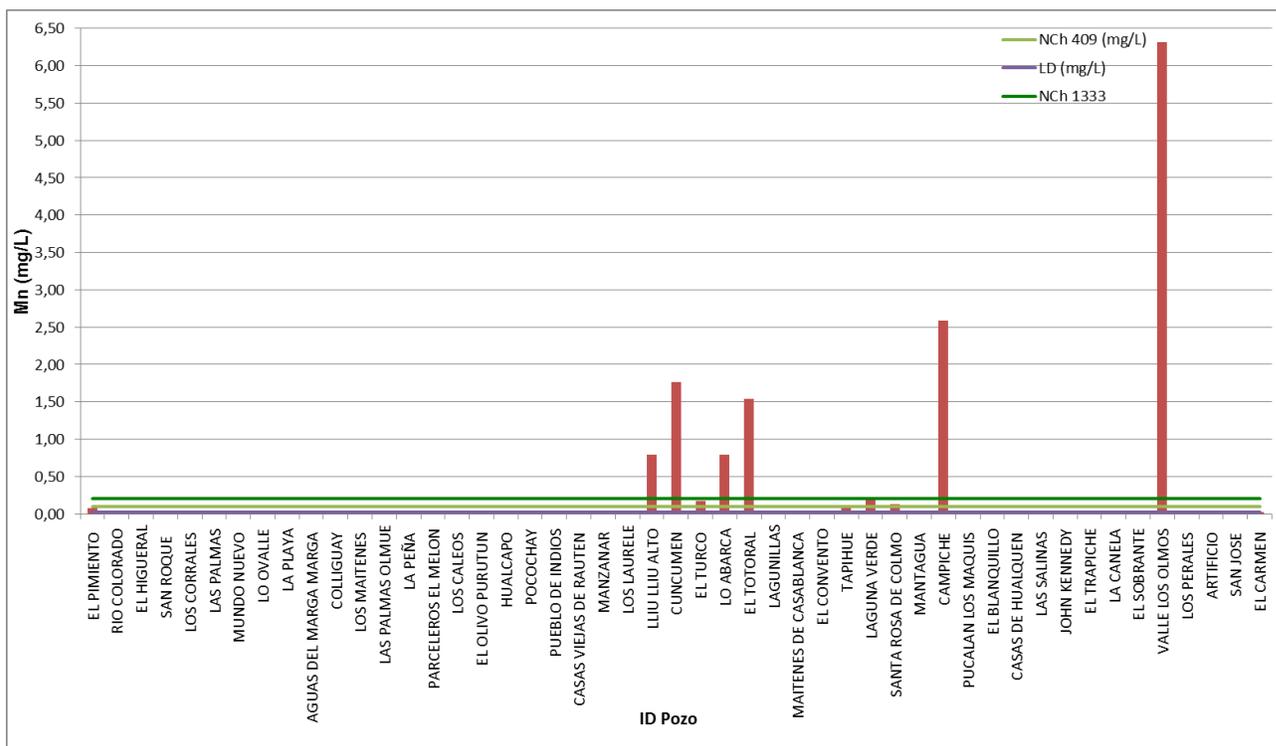


Figura 28: Concentración total de Manganese detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409) y para riego (NCh 1333).

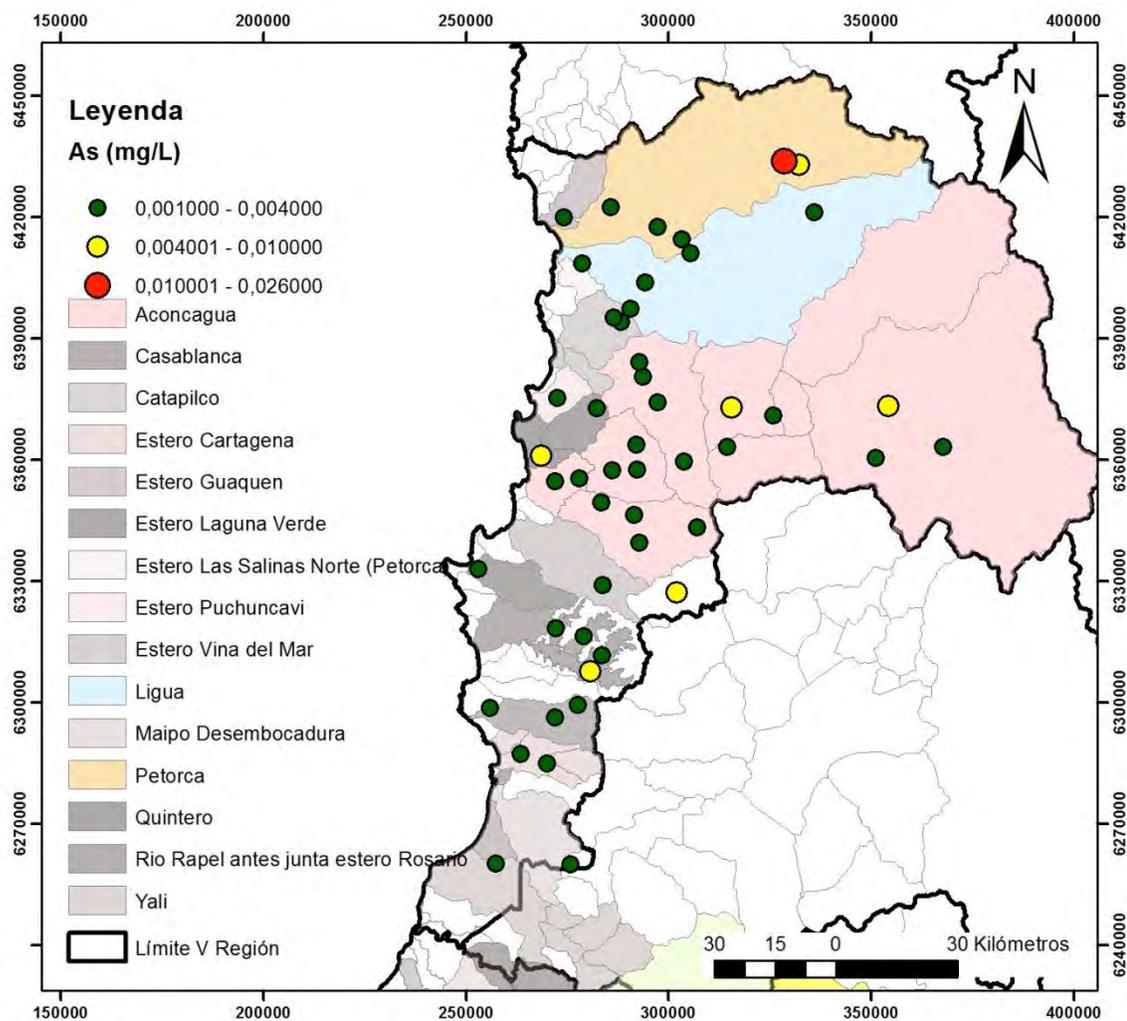


Figura 29: Concentraciones de arsénico por rango detectadas en los pozos muestreados en la V región.

6.7. Pesticidas

En cuanto a los 243 pesticidas analizados, resulta relevante señalar que en todos los pozos muestreados el año 2015 el resultado fue “no detectado” para cada uno de los parámetros. Cabe señalar que las metodologías utilizaron un límite de detección igual a 0,003 mg/L (3 µg/L).

Estos resultados se consideran muy positivos desde el punto de vista de la protección ambiental y de la población que se abastece de los 49 pozos monitoreados en la Región de Valparaíso.

Así también, los resultados plantean el desafío de incrementar las exigencias en los futuros análisis químicos de estas sustancias, apuntando a la reducción de los límites de detección con el fin de descartar la presencia de estas sustancias en concentraciones aún menores (trazas), especialmente en sectores acuíferos con mayor vulnerabilidad a la contaminación.

7. Índice de calidad

En el estudio de índice de calidad se consideraron los parámetros de Cloruro, Sulfato, Calcio, Sodio, Magnesio, Nitrato y Arsénico. Como se mencionó en metodología, el análisis se realizó pozo a pozo, por lo que no se rasterizó la zona para formar resultados continuos.

Desde el punto de vista general de cada pozo y a la vez de cada parámetro estudiado, solamente 6 pozos clasifican como regulares, debido a que diferentes parámetros individuales se clasificaron como tal. (**Tabla 8**)

Tabla 8: Índices de calidad General de Pozos APR.

N°	NOMBRE APR	ICA 2015 (POR POZO)
1	EL PIMIENTO	Buena
2	RIO COLORADO	Excepcional
3	EL HIGUERAL	Excepcional
4	SAN ROQUE	Buena
5	LOS CORRALES	Buena
6	LAS PALMAS	Buena
7	MUNDO NUEVO	Regular
8	LO OVALLE	Buena
9	LA PLAYA	Buena
10	AGUAS DEL MARGA MARGA	Excepcional
11	COLLIGUAY	Excepcional
12	LOS MAITENES	Regular
13	LAS PALMAS OLMUE	Buena
14	LA PEÑA	Buena
15	PARCELEROS EL MELON	Buena
16	LOS CALEOS	Regular
17	HUALCAPO	Buena
18	POCOCHAY	Buena
19	PUEBLO DE INDIOS	Buena
20	CASAS VIEJAS DE RAUTEN	Buena
21	MANZANAR	Buena
22	La Victoria Sta Rosa colmo	Buena
23	LOS LAURELES	Buena
24	LLIU LLIU ALTO	Excepcional
25	MAITENES DE CASABLANCA	Buena
26	MANTAGUA	Buena
27	CAMPICHE	Regular
28	TAPIHUE	Buena
29	LAGUNA VERDE	Excepcional
30	PUCALAN LOS MAQUIS	Buena
31	LAGUNILLAS	Buena
32	EL TOTORAL	Excepcional
32	EL CONVENTO	Buena

34	LO ABARCA	Buena
35	EL TURCO	Buena
36	CUNCUMEN	Regular
37	EL BLANQUILLO	Buena
38	CASAS DE HUALQUEN	Regular
39	LAS SALINAS	Buena
40	JOHN KENNEDY	Buena
41	EL TRAPICHE	Buena
42	LA CANELA	Buena
43	EL SOBRANTE	Buena
44	EL OLIVO PURUTUN	Buena
45	VALLE LOS OLMOS	Regular
46	LOS PERALES	Excepcional
47	ARTIFICIO	Buena
48	SAN JOSE	Buena
49	EL CARMEN	Buena

Algo positivo que se puede obtener es que los índices resultaron con valores cualitativos que permiten reconocer las aguas de los pozos hasta regulares, no resultaron insuficientes ni intratables. A su vez analizando los regulares por si solos, los parámetros que hacen que los índices generales resultan regulares son muy variados como se observa en la Tabla 8

Tabla 9: Pozos APR clasificados como Regulares

Pozos	Calidad general regular	Debido a qué Parámetros Individuales Regulares
Los Maitenes	→	Nitrato
Casas de Hualquen	→	Sodio
Mundo Nuevo	→	Nitrato
Los Caleos	→	Sulfato
Campiche	→	Cloruro y Sodio
Cuncumen	→	Sulfato y Calcio
Valle Los Olmos	→	Arsénico

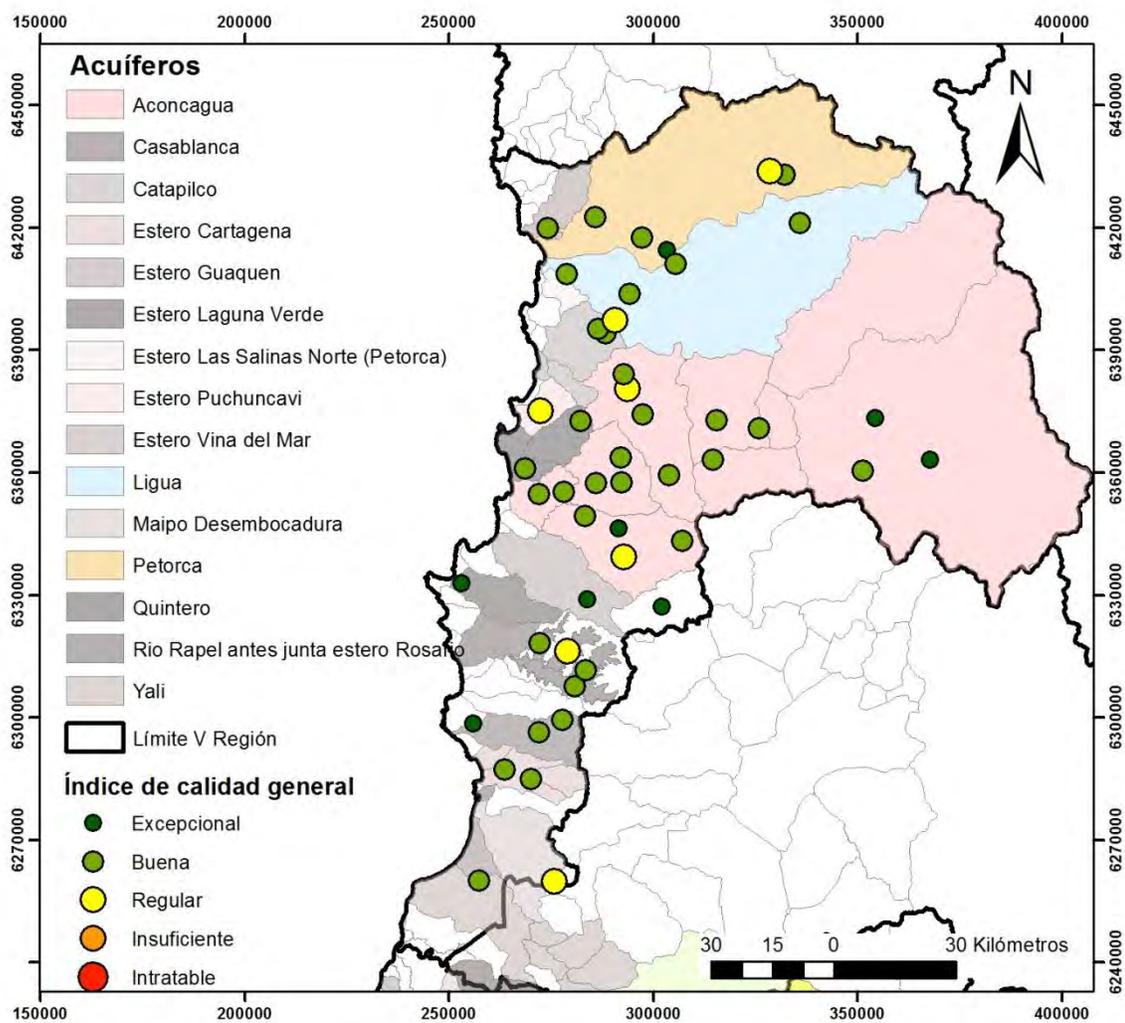


Figura 30: Resultados de Análisis de Índice de calidad de los pozos estudiados en la V Región.

En general, desde el punto de vista espacial, salvo unos pocos pozos con calidad de aguas excepcional y regular, la mayoría son de calidad buena. Lo que significa que no afectan a la salud humana, sin embargo podrían presentar concentraciones elevadas en algunos parámetros que reflejen afectación antrópica o limiten su uso. **(Figura 30)**

8. Conclusiones

El presente estudio permitió conocer la condición actual de calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos Petorca, La Ligua, Aconcagua y los acuíferos costeros, ubicados en la Región de Valparaíso (V Región). A partir de los resultados químicos obtenidos, se identificaron diferencias entre las aguas de los distintos sectores acuíferos estudiados, permitiendo identificar cambios paulatinos en las características de las aguas subterráneas.

Con respecto a los análisis de iones mayoritarios, se destacan diferencias en las aguas de las diferentes acuíferos, en el caso de los acuíferos Petorca y Aconcagua las aguas fueron clasificadas como bicarbonatadas cálcicas, mientras que en La Ligua fueron clasificadas como sulfatadas cálcicas. Por otra parte se observó mayor influencia de cloro en los acuíferos costeros, esto debido a su cercanía al mar. Si bien estos parámetros pueden ser usados para clasificarlos como se hizo, hay que tener en consideración que las muestras no son suficientes en algunos casos para tener resultados decisivos, como por ejemplo en el acuífero de Petorca solo se estudiaron 3 pozos.

Se detectaron concentraciones de Nitrato superiores a la norma de agua potable en 2 pozos: Los Maitenes y Mundo Nuevo (concentración sobre 50 mg/L). Mientras que los siguientes pozos APR presentaron concentraciones superiores a 30 mg/l y menores que el límite normativo, por lo son considerados de relevantes estos son; La Peña, Parc. E Melon, Hualcapo, Pueblo de Indios, Tapihue, Lo Abarca, Casas de Hualquén y San José.

Dentro de los microelementos, se encontraron concentraciones de Arsénico (As), Cobre (Cu), Hierro (Fe) y Manganeseo (Mn) superiores a la norma de agua potable (7 pozos), entre los que se destacan, Valle los Olmos, La Canela, Mantagua, Lliu Lliu alto, El Totoral, Laguna verde, Colliguay, Campiche, Santa Rosa de Colmo, El turco, Cuncumen y Lo Abarca, , hay que tener en consideración que el pozo Valle Olmos es poco profundo (aproximadamente 2,5 m), por lo que es muy susceptible a contaminarse. Otros dos pozos están en el límite de la norma de agua potable, ellos son A.P.R. El Sobrante y A.P.R. Manzanar, ubicados en zonas vulnerables a contaminarse, como en las cercanías de flujos de escorrentía.

En cuanto a los pesticidas estudiados, ninguno de ellos fue detectado en este informe, lo que por una parte resulta positivo, mientras que por otra, podría ser un indicador de que para estudiarlos es necesario usar instrumentos con menor índice de detección.

En la siguiente tabla se presenta un resumen del número de pozos por sector acuífero que superó al menos uno de los parámetros regulados en la norma de agua potable (NCh409/2005). La tabla señala también el número de pozos por acuífero que presentó una concentración de nitrato (NO_3) dentro de un rango de precaución, por cuanto las concentraciones resultaron entre 30 y 50 mg/L de NO_3

Tabla 10: Resumen del número de pozos que superó alguno de los parámetros normados en la NCh409/2005, por sector acuífero. Se indica también el número de pozos que presentó concentraciones de nitrato mayor a lo esperado en aguas subterráneas (>30 mg NO₃/L), pero resultó menor al límite establecido para agua potable (50 mg NO₃/L).

Sector Acuífero	Parámetros que superan la Norma 409/2005					Riesgo de Contaminación antrópica
	As	Cu	Fe	Mn	NO ₃	30<mg/lit de NO ₃ <50
Aconcagua			2 pozos	2 pozos	1 pozo	4 pozos
Estero el Rosario			1 pozo	1 pozo		
Quintero			1 pozo			
Estero Puchuncaví			1 pozo	1 pozo		
Casablanca					1 pozo	1 pozo
Estero Laguna Verde			1 pozo	1 pozo		
Estero Cartagena				2 pozos		1 pozo
Petorca	1 pozo			1 pozo		1 pozo
Estero Guaquén		1 pozo				
Maipo Desembocadura				1 pozo		
La Ligua						1 pozo

9. Recomendaciones

✓ Implementar un seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en los diez (10) sectores acuíferos donde se detectaron pozos cuyas aguas sobrepasaron al menos en un parámetro la norma de agua potable (NCh409/2005), dando prioridad a los pozos que superaron el máximo permitido para el parámetro Arsénico, Nitrato, Cobre, Hierro y Manganeso. Con el objeto de mantener las condiciones de entorno y constructivos de los pozos, se debe priorizar la inclusión de los mismos puntos de muestreo, lo cual permitirá disponer de datos que den cuenta de los cambios temporales de las aguas subterráneas. A continuación se presenta el resumen del monitoreo a

Tabla 11 Resumen pozos a incorporar en el seguimiento por parte de la DGA.

Pozo APR	Sector Acuífero	Vulnerabilidad	Frecuencia
Valle de los Olmos	Sector 3 Petorca Río sobrante	Alta	2 veces por año
La Canela	Sector 4 Petorca poniente	Alta	2 veces por año
Mantagua	Sector 3 Petorca Río sobrante	Alta	2 veces por año
Lliu Lliu alto	Sector 9 Aconcagua Limache	Alta	2 veces por año
El Totoral	Estero el Rosario	Alta	2 veces por año
Laguna Verde	Estero Laguna Verde	Alta	2 veces por año
Colliguay	Sector 9 Aconcagua Limache	Alta	2 veces por año
Campiche	Estero Puchuncavi	Alta	2 veces por año
Santa Rosa de Colmo	Sector 8 Aconcagua desembocadura	Alta	2 veces por año
El Turco	Estero Cartagena	Alta	2 veces por año
Cuncumen	Maipo desembocadura	Alta	2 veces por año
Lo Abarca	Estero Cartagena	Alta	2 veces por año
Maitenes	Sector 9 Aconcagua Limache	Alta	2 veces por año
Mundo Nuevo	Casablanca Sector la Vinilla	Alta	2 veces por año
La Peña	Sector 6 Aconcagua Nogales Hijuelas	Alta	1 vez por año
Parc. El Melón	Sector 7 Aconcagua Quillota	Alta	1 vez por año
Hualcapo	Sector 6 Aconcagua Nogales Hijuelas	Alta	1 vez por año
Pueblo de Indios	Sector 7 Aconcagua Quillota	Alta	1 vez por año
Tapihue	Casablanca Sector los Perales	Alta	1 vez por año
Casas de Halquén	Estero Guaquen	Alta	1 vez por año
San José	Sector 7 La Ligua Cabildo	Alta	1 vez por año

Los parámetros mínimos a medir son *in-situ*: Cond Eléctrica, pH, Temp, ORP. Metales: As, Fe, Mn, Cu, Zn, Hg. Nutrientes: Nitrato, Amonio y Fosfato. Macroelementos: Sulfato, Cloruro, Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Bicarbonato

✓ Como se describe en la Tabla N °10 implementar un monitoreo de observación de las aguas subterráneas en cinco (5) sectores incluidos en el presente estudio donde se detectaron concentraciones de nitrato en un rango próximo al máximo permitido para agua potable (entre 30 y 50 mg/L de NO₃). Los pozos APR corresponden a: La Peña, Parc. El Melón, Hualcapo, Pueblo de Indios, Tapihue, Lo Abarca, Casas de Hualquén y San José.

✓ Profundizar el análisis de los resultados, especialmente en cuanto a la detección de posibles relaciones entre el origen de los contaminantes y la calidad del agua subterránea. En esta línea, resulta relevante considerar antecedentes de los usos de suelo, tipología de cultivos agrícolas, existencia de redes de canales de riego, antecedentes de prácticas de riego, tipología y ubicación de industrias y la cartografía de vulnerabilidad de acuíferos.

- ✓ Para asegurar la calidad de los datos generados, se recomienda seguir llevando a cabo los muestreos de acuerdo con los estándares de la Norma chilena NCh 411/11 (Guía para el muestreo de aguas subterráneas) y realizar los análisis en un laboratorio acreditado bajo la norma chilena NCh-ISO 17.025. Esto permite reducir la incertidumbre de los resultados y contar con datos representativos de la condición del acuífero.
- ✓ Para mejorar la capacidad de detectar la presencia de sustancias contaminantes de origen agrícola, se recomienda evaluar la factibilidad técnica y económica de minimizar los límites de detección en los análisis químicos de pesticidas en las aguas subterráneas.
- ✓ Igualmente, se recomienda revisar la lista de pesticidas a incluir en futuros análisis, ello en atención a enfocar esfuerzos en la detección de sustancias que resultan más probables de encontrarse en las aguas subterráneas. Para tales efectos, puede considerarse el índice GUS u otro similar.
- ✓ Como un criterio general, se recomienda enfocar los muestreos en pozos con la menor profundidad posible y que se encuentren ubicado en sectores que tengan una vulnerabilidad media, alta o extrema de acuerdo a mapa SERNAGEOMIN, por ser éstos más sensibles a modificaciones por fuentes de contaminación puntual o difusa existentes en la zona.
- ✓ En cuanto a los parámetros, se recomienda llevar a cabo análisis químicos diferenciados según la ubicación de los pozos, es decir, definir un conjunto de parámetros comunes para toda la red de pozos y realizar análisis específicos (por ejemplo: pesticidas, nitratos o determinados metales) en aquellas zonas con mayor riesgo de alteración por efectos antrópicos.
- ✓ En cuanto a la frecuencia de monitoreo, se debe evaluar la factibilidad de realizar un seguimiento periódico que permita comprender los cambios en la calidad del agua en los acuíferos. En este sentido, resulta esperable que los mayores cambios ocurran en zonas con mayor vulnerabilidad a la contaminación. En principio, los monitoreos podrían realizarse con una periodicidad anual y evaluarse el incremento de esta frecuencia (por ejemplo, estacional) según las necesidades de información y las capacidades técnicas y económicas existentes.
- ✓ Evaluar la factibilidad técnica y económica de extender los muestreos de aguas subterráneas a pozos situados en sectores acuíferos no incluidos en el presente estudio, por ejemplo a sectores como Putaendo, Sector 11 Acuífero Río la Ligua Costa, Sector Lo Orozco y Quintay. Para efectos de priorización, se puede incluir sectores acuíferos que presenten una mayor vulnerabilidad a la contaminación o sectores acuíferos con limitación de explotación.

10. Bibliografía

1. Acuña, A. 2005. Presencia de Pesticidas en Fuentes de Agua Potable en Chile. Tesis Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil.
2. Custodio, E., Llamas, R. 1996. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Segunda Edición Corregida. Barcelona.
3. Dirección General de Aguas (DGA). 2009. Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos. Geohidrología Consultores Ltda.
4. Dirección General de Aguas (DGA). 2015. Diagnóstico de la calidad de las Aguas Subterráneas VI Región.
5. Dirección General de Aguas (DGA). 2012. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos.
6. Dirección General de Aguas (DGA). 2013. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas.
7. Dirección General de Aguas (DGA). 2013. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Minuta Técnica DCPRH N° 26/2013, "Definición preliminar de una red de monitoreo de contaminación difusa y plaguicidas a monitorear".
8. INIA, 2007. Caracterización del Manejo de Herbicidas en Aguas Subterráneas. Boletín N°167, cap. 9, pág. 101-110. Centro Regional de Investigación La Platina.
9. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 2003. MAPA Geológico de Chile [versión digital]. Subdirección Nacional de Geología. Escala 1:1.000.000.
10. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). 2007. Informe de venta de plaguicidas de uso agrícola en Chile.
11. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 2006. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad: Identificación de zonas críticas.
12. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 1996. Geología de las Hojas Quillota y Portillo.
13. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 2003. Mapa geológico de Chile