



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

DIAGNÓSTICO Y CLASIFICACIÓN DE SECTORES ACUÍFEROS

VOLUMEN N° 1

**REALIZADO POR:
GEOHIDROLOGÍA CONSULTORES LTDA.**

S.I.T. N° 183

SANTIAGO, JULIO 2009

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

**Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar Ch.**

**Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.**

**Jefa Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos
Ingeniero Sra. Mesenia Atenas V.**

**Inspector Fiscal
Ingeniero Sra. María Eugenia Molina L.**

GEOHIDROLOGÍA CONSULTORES LTDA.

**Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Sr. José Muñoz P.**

**Especialistas
Ingeniero Civil Sr. José Muñoz P.
Ingeniero Civil Sr. Pablo Rengifo O.
Ingeniero Agrónomo Sr. Cristian Ortiz A.
Geóloga Sra. Laura Vitòria C.**

**Profesionales:
Ingeniero Civil Sr. Carlos Vásquez G.
Ingeniero Civil Sr. Nicolás Ramírez N.
Geógrafo Sr. Rodrigo López A.
Ingeniero Civil Sr. Pedro Sanzana C.
Geólogo Sr. Felipe García-Huidobro C.**

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETIVOS.....	4
3	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	5
4	METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS	10
4.1	ANTECEDENTES Y CRITERIOS DE LA METODOLOGÍA.....	10
4.2	ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA	11
4.2.1	Herramientas SIG y métodos de interpolación	14
4.2.2	Parámetros químicos que utiliza la metodología	20
4.2.3	Depuración de la información química.....	22
4.3	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y QUÍMICA DEL SECTOR DE APLICACIÓN	24
4.4	ELECCIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICOS LOCALES.....	26
4.4.1	Elección de posibles elementos de ocurrencia natural.....	27
4.4.2	Elección de posibles elementos de origen antrópico	29
4.5	CÁLCULO DE ÍNDICE DE CALIDAD	31
4.5.1	Mapas de isoconcentración.....	31
4.5.2	Índice de calidad individual por parámetro	34
4.5.3	Cálculo e interpretación del resultado del IC general	43
4.6	ANÁLISIS TEMPORAL DEL ÍNDICE DE CALIDAD	46
4.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA DETERMINAR EL ORIGEN DE LOS COMPUESTOS DISUELTOS	49
4.7.1	Aplicación del ACP en la metodología	50
4.7.2	Interpretación de resultados del ACP.....	58
4.7.3	Cruce de información	61
4.7.4	Resultado del origen de compuestos disueltos	64
5	APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS....	66
5.1	ELECCIÓN DE SECTORES-ACUÍFERO PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	66
5.2	SECTOR ACUÍFERO EL LOA	76

5.2.1	Antecedentes disponibles.....	76
5.2.2	Elección de parámetros locales.....	78
5.2.3	Análisis de datos medidos.....	78
5.2.4	Determinación del índice de calidad	82
5.2.5	Análisis estadístico ACP	86
5.2.6	Análisis temporal	92
5.2.7	Resultados finales.....	92
5.3	SECTOR ACUÍFERO LOS CHOROS	92
5.3.1	Antecedentes disponibles.....	92
5.3.2	Elección de parámetros locales.....	94
5.3.3	Análisis de datos medidos	94
5.3.4	Determinación del índice de calidad	98
5.3.5	Análisis estadístico ACP	104
5.3.6	Análisis temporal	109
5.3.7	Resultados finales.....	109
5.4	SECTOR ACUÍFERO ACONCAGUA.....	110
5.4.1	Antecedentes disponibles.....	110
5.4.2	Elección de parámetros locales.....	111
5.4.3	Análisis de datos medidos	112
5.4.4	Determinación del índice de calidad	116
5.4.5	Análisis estadístico ACP	121
5.4.6	Análisis temporal	126
5.4.7	Resultados finales.....	127
6	INSTRUMENTOS PARA LA PROTECCIÓN DE LA CALIDAD.....	128
6.1	DESCRIPCIÓN DE INSTRUMENTOS DE PROTECCIÓN.....	129
6.1.1	Conocimiento e investigación	129
6.1.2	Educación.....	136
6.1.3	Medidas políticas y económicas.....	138
6.1.4	Medidas de acción directa	143
6.2	ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DE INSTRUMENTOS DE PROTECCIÓN EN SECTORES DE ESTUDIO	148

6.2.1	Aproximación a medidas de conocimiento e investigación en sectores acuífero estudiados	148
6.2.2	Discusión sobre aplicabilidad de medidas de protección	162
7	PROPUESTA DE MONITOREO	164
7.1	OBJETIVOS Y CRITERIOS DE DISEÑO.....	164
7.1.1	Ubicación y distribución	165
7.1.2	Parámetros de control	167
7.1.3	Frecuencia de muestreo	168
7.1.4	Protocolo de muestreo, transporte y análisis de muestras	169
7.2	REVISIÓN DE LA ACTUAL RED DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA DGA.....	171
7.2.1	Sector acuífero El Loa	171
7.2.2	Sector acuífero Los Choros	172
7.2.3	Sector acuífero Aconcagua	173
7.3	PROPUESTA DE DISTRIBUCIÓN, FRECUENCIA Y PARÁMETROS	174
7.4	CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS	179
7.4.1	Descripción características constructivas actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas	179
7.4.2	Requisitos constructivos de puntos de muestreo	180
7.4.3	Evaluación de características de actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas	183
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	185
8.1	CONCLUSIONES DEL PROYECTO	185
8.1.1	Desarrollo de la metodología	185
8.1.2	Instrumentos de protección	187
8.1.3	Red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas	189
8.2	RECOMENDACIONES DE TRABAJOS FUTUROS	190
9	BIBLIOGRAFÍA	191

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1: Esquema y diagrama de flujo de la metodología.	13
Figura 4.2: Esquema de interpolación de parámetros químicos.	31
Figura 4.3: Cálculo de índice de calidad mediante interpolación lineal entre clases.	35
Figura 4.4: Gráfico para obtener IC asociado a elementos del Grupo 1.	40
Figura 4.5: Gráfico para obtener IC asociado a Nitratos del Grupo 2.	41
Figura 4.6: Esquema de análisis estadístico.	50
Figura 4.7: Ejemplo de gráfico de sedimentación.	53
Figura 4.8: Matriz de factores o factorial.	54
Figura 4.9: Ejemplo de gráfico Biplot-variables.	56
Figura 4.10: Ejemplo de gráfico Biplot-valores.	58
Figura 4.11: Gráfico Biplot-variables de acuífero ejemplo.	59
Figura 4.12: Gráfico Biplot-valores de acuífero ejemplo.	61
Figura 5.1: Distribución de los puntos de muestreo en sector acuífero El Loa.	77
Figura 5.2: Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte, sector acuífero El Loa.	79
Figura 5.3: Concentración de parámetros Grupo 2 y normativa, sector acuífero El Loa.	81
Figura 5.4: Índice de calidad individual de Ca en el sector acuífero El Loa.	83
Figura 5.5: Índice de calidad individual de Cl en sector acuífero El Loa.	83
Figura 5.6: Índice de calidad individual de Mg en sector acuífero El Loa.	83
Figura 5.7: Índice de calidad individual de Na en sector acuífero El Loa.	83
Figura 5.8: Índice de calidad individual de SDT en sector acuífero El Loa.	84
Figura 5.9: Índice de calidad individual de SO ₄ en sector acuífero El Loa.	84
Figura 5.10: Índice de calidad individual de NO ₃ en sector acuífero El Loa.	84
Figura 5.11: Índice de calidad individual de As en sector acuífero El Loa.	84

Figura 5.12: Índice de calidad general para el sector acuífero El Loa.	86
Figura 5.13: Gráfico de sedimentación ACP en sector acuífero El Loa.....	88
Figura 5.14: Gráfico Biplot-variables en sector acuífero El Loa.	90
Figura 5.15: Gráfico Biplot-valores en sector acuífero El Loa.	91
Figura 5.16: Distribución de los puntos de muestreo en sector acuífero Los Choros.	93
Figura 5.17: Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte, sector acuífero Los Choros.....	95
Figura 5.18: Concentración de parámetros Grupo 2 y valores de corte, Los Choros.....	97
Figura 5.19: Índice de calidad individual de Ca en sector acuífero Los Choros.....	100
Figura 5.20: Índice de calidad individual de Cl en sector acuífero Los Choros.	100
Figura 5.21: Índice de calidad individual de Mg en sector acuífero Los Choros.....	100
Figura 5.22: Índice de calidad individual de Na en sector acuífero Los Choros.....	100
Figura 5.23: Índice de calidad individual de SDT en sector acuífero Los Choros.....	101
Figura 5.24: Índice de calidad individual de SO ₄ en sector acuífero Los Choros.....	101
Figura 5.25: Índice de calidad individual de NO ₃ en sector acuífero Los Choros.	101
Figura 5.26: Índice de calidad individual de Fe en sector acuífero Los Choros.	101
Figura 5.27: Índice de calidad individual de Al en sector acuífero Los Choros.	102
Figura 5.28: Índice de calidad general para el sector acuífero Los Choros.....	103
Figura 5.29: Gráfico de sedimentación ACP, acuífero Los Choros.	105
Figura 5.30: Gráfico Biplot-variables en sector acuífero Los Choros.....	107
Figura 5.31: Gráfico Biplot-valores en acuífero Los Choros.	109
Figura 5.32: Distribución de los puntos de muestreo en sector acuífero Aconcagua.....	111
Figura 5.33: Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte, sector acuífero Aconcagua.	113

Figura 5.34: Concentración de parámetros Grupo 2 y valores de corte, sector acuífero Aconcagua.	115
Figura 5.35: Índice de calidad individual de Ca en sector acuífero Aconcagua.	118
Figura 5.36: Índice de calidad individual de Cl en sector acuífero Aconcagua.	118
Figura 5.37: Índice de calidad individual de Mg en sector acuífero Aconcagua.	118
Figura 5.38: Índice de calidad individual de Na en sector acuífero Aconcagua.	118
Figura 5.39: Índice de calidad individual de SDT en sector acuífero Aconcagua.	118
Figura 5.40: Índice de calidad individual de SO ₄ en sector acuífero Aconcagua.	118
Figura 5.41: Índice de calidad individual de NO ₃ en sector acuífero Aconcagua.	119
Figura 5.42: Índice de calidad individual de Fe en sector acuífero Aconcagua.	119
Figura 5.43: Índice de calidad individual de Mn en sector acuífero Aconcagua.	119
Figura 5.44: Índice de calidad general para el sector acuífero Aconcagua.	121
Figura 5.45: Gráfico de sedimentación ACP, en sector acuífero Aconcagua.	122
Figura 5.46: Gráfico Biplot-variables en sector acuífero Aconcagua.	124
Figura 5.47: Gráfico Biplot-valores en sector acuífero Aconcagua.	126
Figura 6.1: Captaciones subterráneas y fuentes potenciales de contaminación sector acuífero El Loa.	152
Figura 6.2: Captaciones subterráneas y mapa de índice de calidad sector acuífero Los Choros.	155
Figura 6.3: Vulnerabilidad sector acuífero Los Choros.	156
Figura 6.4: Captaciones subterráneas, fuentes potenciales de contaminación y resultados de la metodología en sector acuífero Aconcagua.	159
Figura 6.5: Uso de suelos sector acuífero Aconcagua.	160
Figura 6.6: Vulnerabilidad sector acuífero Aconcagua.	161

Figura 7.1: Red de monitoreo de calidad de agua subterránea DGA en sector acuífero El Loa.	172
Figura 7.2: Red de monitoreo de calidad de agua subterránea DGA en sector acuífero Los Choros (sector costero).	173
Figura 7.3: Red de monitoreo de calidad de agua subterránea DGA en sector acuífero Aconcagua.	174
Figura 7.4: Propuesta de muestreo sector acuífero El Loa.	176
Figura 7.5: Propuesta de muestreo sector acuífero Los Choros (sector costero).	177
Figura 7.6: Propuesta de muestreo sector acuífero Aconcagua.....	178
Figura 7.7: Esquema constructivo de un punto de control de agua subterránea.	182

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Zonas delimitadas por la DGA para definición de sectores acuíferos del estudio.	3
Tabla 4.1: Principales métodos de interpolación y sus características.	16
Tabla 4.2: Parámetros químicos utilizados en la metodología.	21
Tabla 4.3: Parámetros a medir en caracterización química.	22
Tabla 4.4: Aniones y cationes mínimo necesarios para determinar el balance iónico.	23
Tabla 4.5: Planilla ejemplo con valores químicos para aplicar metodología.	24
Tabla 4.6: Clasificación de representatividad (km^2/punto) de información química, según nivel de explotación y condición del acuífero.	26
Tabla 4.7: Contaminantes naturales típicos de aguas superficiales y subterráneas de Chile. ...	28
Tabla 4.8: Metales asociados a distintos tipos de actividad en la cuenca de Santiago.....	30
Tabla 4.9: Contaminantes asociados a distintas actividades.	31
Tabla 4.10: Propuesta de resolución de grilla para aplicar la metodología.....	33
Tabla 4.11: Porcentajes representativos de eficiencia remoción de procesos de membrana. ...	37
Tabla 4.12: Rangos de remoción de distintos procesos de tratamiento de aguas.....	38
Tabla 4.13: Valores corte de los parámetros fijos de la metodología.....	39
Tabla 4.14: Valores de corte de parámetros no fijos de la metodología.	42
Tabla 4.15: Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud (Tipo II) según NCh409/1Of.2005.	43
Tabla 4.16: Criterios para establecer el IC general.	43
Tabla 4.17: Criterios para establecer la clase temporal.	47
Tabla 4.18: Reclasificación temporal de la calidad química de aguas.	48
Tabla 4.19: Ejemplo de matriz de correlación de parámetros.	52
Tabla 4.20: Posible origen de elementos químicos en el agua.	62

Tabla 4.21: Categorización del origen de elementos químicos en el agua.....	64
Tabla 4.22: Ejemplo de resultado final análisis de origen de compuestos disueltos.....	64
Tabla 5.1: Ficha resumen de información disponible sector acuífero El Loa.	67
Tabla 5.2: Ficha resumen de información disponible sector acuífero Los Choros.	70
Tabla 5.3: Ficha resumen de información disponible sector acuífero Aconcagua.	73
Tabla 5.4: Criterios y comentarios sobre la aplicación en sector acuífero El Loa.	85
Tabla 5.5: Matriz factorial de parámetros en sector acuífero El Loa.	89
Tabla 5.6: Origen principal de parámetros en sector acuífero El Loa.....	91
Tabla 5.7: Criterios y comentarios sobre la aplicación en sector acuífero Los Choros.	102
Tabla 5.8: Matriz factorial de parámetros en sector acuífero Los Choros.	106
Tabla 5.9: Origen principal de parámetros en acuífero Los Choros.....	108
Tabla 5.10: Criterios y Comentarios sobre la aplicación en sector acuífero Aconcagua.	120
Tabla 5.11: Matriz factorial de análisis ACP en sector acuífero Aconcagua.	123
Tabla 5.12: Origen principal de parámetros en sector acuífero Aconcagua.....	125
Tabla 6.1. Perímetros de zonas de protección alrededor de pozos.	144
Tabla 6.2: Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, según lugar.	146
Tabla 6.3: Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, según tipo.	147
Tabla 7.1: Clasificación de condición del acuífero según grado de explotación.	165
Tabla 7.2: Recomendación de densidad de monitoreo (km ² /punto) en acuíferos.	166
Tabla 7.3: Clasificación de distribución espacial de red de monitoreo en acuíferos.....	166
Tabla 7.4: Parámetros mínimos a medir.....	168
Tabla 7.5: Frecuencia mínima de monitoreo según condiciones de acuífero.....	169
Tabla 7.6: Recomendaciones para toma, transporte y análisis de muestras.	170
Tabla 7.7: Descripción de pozos de actual red de monitoreo de calidad.....	180

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 01: Índices de calidad sector acuífero El Loa.

Mapa 02: Índices de calidad sector acuífero Los Choros.

Mapa 03: Índices de calidad sector acuífero Aconcagua.

Mapa 04: Red de muestreo propuesta y mapa de suelos sector acuífero El Loa.

Mapa 05: Red de muestreo propuesta sector acuífero Los Choros.

Mapa 06: Red de muestreo propuesta y mapa de suelos sector acuífero Aconcagua.

1 INTRODUCCIÓN

Desde 1990, Chile ha experimentado un crecimiento económico rápido, crecientemente diversificado y liderado por las exportaciones, con un incremento del 108% del PIB. Este desarrollo económico ha tenido como consecuencia una reducción significativa de la pobreza, pero asimismo, ha ejercido una considerable presión sobre algunos recursos naturales, sobre todo en los sectores de mayor auge como la minería, la silvoagricultura y la acuicultura (OCDE, 2005).

Este acelerado desarrollo económico del país ha generado una creciente demanda de agua, provocando en algunos casos efectos negativos sobre los sistemas hídricos no sólo en su disponibilidad sino que también en su calidad. A partir de 1990, junto con la completa re inserción de Chile en el concierto económico internacional, las evidencias de una creciente degradación ambiental, condujeron a dar mayor énfasis a la protección ambiental.

Actualmente, en algunas zonas del país existe una explotación intensiva del agua subterránea, la que puede provocar el deterioro de su calidad química por diferentes causas, entre ellas la intrusión salina, contaminación difusa, drenajes salinos, etc. Además, la intensidad de la reutilización del recurso implica el deterioro de la calidad del agua de recarga a los acuíferos, incorporándose elementos potencialmente perjudiciales tales como fertilizantes, pesticidas, metales, elementos procedentes de la lixiviación de suelos, etc.

A pesar de la calidad aceptable de la mayor parte de los cuerpos de agua subterránea de Chile, ésta puede ser mala en algunos acuíferos debido a los vertidos urbanos e industriales de residuos líquidos no tratados. También existe la presión de metales pesados de la minería en el norte, y los agroquímicos en las zonas rurales del país. Del mismo modo debe tenerse en cuenta que especialmente en la zona norte existen masas de agua subterránea que presentan altos contenidos naturales de algunos iones, incluso en niveles nocivos, simplemente producto de la interacción agua-roca, es decir, su origen es geológico (natural).

Entre las atribuciones de la Dirección General de Aguas (DGA) está la investigación, planificación y medición de la calidad de las aguas continentales del país. Para ello, la DGA opera y mantiene el Servicio Hidrométrico Nacional, dentro del cual se encuentra la Red de

Monitoreo de la Calidad de Aguas Subterráneas. A su vez, el artículo 33 de la Ley 19.300, obliga a los servicios del Estado con competencia ambiental a desarrollar programas de medición y control de la calidad ambiental del aire, agua, suelo, para los efectos de velar por el derecho de vivir en un medio ambiente libre de contaminación que garantiza la Constitución de Chile. Por otra parte, el D.S. N°46/2002 "Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas" que regula las descargas de efluentes provenientes de procesos productivos, le asigna a la Dirección General de Aguas la responsabilidad de la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos y del contenido natural de la zona saturada del acuífero. Esto último, deberá ser realizado teniendo en cuenta los datos de la Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas de la DGA.

Adicionalmente, el Código de Aguas y la Resolución DGA N°425 de fecha 31 de diciembre de 2007 le entrega la facultad a la DGA de limitar una solicitud de exploración, y declarar área de restricción o zona de prohibición para nuevas explotaciones cuando se compruebe que la explotación está produciendo la contaminación de las aguas del sector.

En este contexto, la DGA licitó el estudio de "Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos" en búsqueda de desarrollar las bases para la caracterización, en términos de calidad, de los recursos hídricos subterráneos. En este estudio se busca desarrollar las bases para la caracterización, en términos de calidad, de los recursos hídricos subterráneos, además de desarrollar metodologías que permitan proponer cuerpos normativos respecto a la protección de los recursos hídricos subterráneos.

La importancia del estudio radica, en primer lugar, en disponer de una metodología que permita clasificar sectores acuíferos en cuanto a la calidad del recurso hídrico subterráneo. En segundo lugar, generar los antecedentes necesarios para la postulación de una normativa ambiental tendiente a la protección de los recursos hídricos subterráneos. Y por último permitir mejorar y potenciar la Red de Monitoreo de la Calidad de Aguas Subterráneas del Servicio.

El alcance geográfico del estudio consiste en sectores acuífero que incluyan las zonas delimitadas por la Dirección General de Aguas en la Tabla 1.1. La mayoría de los acuíferos considerados corresponden al tipo detríticos, sin embargo poseen características bastante

particulares que los diferencian. Por un lado, la localización geográfica en la que se encuentran, afecta a su recarga, tiempo de residencia de las aguas, disponibilidad de recurso y características hidroquímicas, y por otro, las actividades que se realizan sobre ellos, y la tasa extractiva a las que están sometidos también influyen en su estado químico.

Tabla 1.1: Zonas delimitadas por la DGA para definición de sectores acuíferos del estudio.

N°	Sector acuífero	Tipo	Región	Resolución	Fecha DGA	Toma de razón
1	Azapa	Zona de Prohibición	I	DGA 202	19-03-1996	09-04-1996
2	Lluta		I			
3	Pampa del Tamarugal		I			
4	Salar de Coposa	Área de Restricción	I	DGA 655	10-7-2002	31-7-2002
5	El Loa		II			
6	Los Choros		IV			
7	Maipo	Área de Restricción	RM	DGA 286	01-09-2005	15-09-2005
		Área de Restricción	RM	DGA 540	21-09-2001	10-10-2001
		Área de Restricción	RM	DGA 62	23-01-2001	07-02-2001
8	Mapocho Alto	Área de Restricción	RM	DGA 293	27-07-2004	16-09-2004
9	La Ligua		V			
10	Maitenlahue		V			
11	Río Aconcagua		V			
12	Estero Las Cadenas	Área de Restricción	VI	DGA 381	15/11/2005	14-12-2005

2 OBJETIVOS

El presente estudio tiene por motivación central desarrollar las bases metodológicas para la caracterización, en términos de calidad química, de los cuerpos de aguas subterráneas del país, de modo de establecer con posterioridad criterios para su control, gestión y protección. Así, los objetivos generales del proyecto son:

- Desarrollar una metodología que permita caracterizar sectores acuíferos en cuanto a la calidad química de los recursos hídricos subterráneos, estableciendo criterios para la protección de ellos.
- Aplicar esta metodología en sectores acuíferos previamente definidos en conjunto con la Autoridad, considerando los niveles de explotación, la calidad química, el riesgo de contaminación que presenten.

En el estudio se distingue una serie de objetivos específicos o tareas concretas para la consecución del objetivo general, y que se mencionan a continuación:

- Recopilar antecedentes de calidad de aguas en sectores acuíferos delimitados por la DGA y su caracterización de los sectores acuíferos en cuanto a la calidad de sus aguas, niveles de explotación y carga de contaminantes.
- Revisar la experiencia nacional e internacional en cuanto a instrumentos de protección de acuíferos y metodologías de clasificación de los mismos.
- Identificar variables que representen amenazas potenciales para la calidad del agua subterránea de los acuíferos.
- Desarrollar una metodología de clasificación de acuíferos y su aplicación en acuíferos pilotos.
- Establecer y validar instrumentos de protección de acuíferos.
- Analizar y diagnosticar las características constructivas de los pozos de la Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas de la DGA, para luego mejorarla y potenciarla.

3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El estudio fue desarrollado mediante la ejecución de seis etapas, todas conducentes a alcanzar los objetivos generales del proyecto. A continuación se presenta un detalle de las tareas realizadas en cada una de ellas.

Etapas 1: Recopilación de antecedentes y análisis de la información

- Definición de límites de sectores acuíferos en conjunto con la DGA.
- Recopilación de información de la DGA:
 - Niveles piezométricos y de calidad química de aguas subterráneas proveniente de la red de monitoreo.
 - Cartografía.
 - Estudios y documentos del Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH).
- Recopilación de información de otras instituciones públicas:
 - Vulnerabilidad de acuíferos y límites de acuíferos a partir de estudios del SERNAGEOMIN.
 - Caudales y coordenadas de descargas a acuíferos a partir de informes de la SISS.
- Recopilación de información de universidades y centros regionales:
 - Estudios realizados por distintas universidades (Católica del Norte, Arturo Prat, de Antofagasta, de la Serena, de Valparaíso, de Coquimbo, de Tarapacá).
 - Estudios realizados por centros de investigación regionales, CEAZA (Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas) y CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe).
- Sistematización y diagnóstico de la información para cada sector acuífero:
 - Respecto de la calidad química proveniente de la DGA: i) revisión de balance iónico, y ii) cálculo de densidad de estaciones de monitoreo.

- Respecto al nivel piezométrico proveniente de la DGA: i) verificación de información topográfica, y ii) análisis de tendencia temporal.
- Respecto a la información obtenida de fuentes distintas a la DGA, se verificó: i) la existencia de nivel piezométrico y los análisis químicos e isotópicos, ii) los datos de uso de suelo, iii) el comportamiento general del acuífero, y iv) los principales riesgos ambientales. La información de estudios realizados por fuentes distintas a la DGA fueron resumidos en fichas y se presentan en Anexos (Sección 1.1).
- Toda la información obtenida fue sintetizada en fichas resumen de cada sector acuífero.
- Manejo y análisis de la información mediante programa GIS.

Etapa 2: Revisión de experiencia nacional e internacional

- Revisión de normativas ambientales (Norma Chilena, Directiva de las Comunidades Europeas, Estándares Nacionales Primarios y Secundarios de Agua Potable para E.E.U.U., y directrices de la Organización Mundial de la Salud para el agua potable).
- Revisión de los siguientes aspectos fundamentales relativos a clasificación y protección de acuíferos abarcando los siguientes aspectos fundamentales: i) criterios de clasificación de los acuíferos e información mínima requerida, ii) metodologías de clasificación, iii) estándares de calidad de aguas subterráneas utilizados en otros países, e iv) instrumentos de protección de acuíferos existentes en otros países.
- Análisis crítico de los documentos revisados con el objetivo de proponer una metodología de clasificación de calidad e instrumentos de protección de acuíferos adecuados a la realidad nacional.

Etapa 3: Desarrollo de una metodología de clasificación de sectores acuífero

- Elaboración de una propuesta metodológica para la clasificación de sectores acuíferos, en base a la realidad chilena y a la experiencia internacional.
- Aplicación preliminar de metodologías internacionales y de propuesta metodológica en un acuífero piloto y evaluación crítica de resultados.

- Evaluación crítica de: i) la información disponible para aplicar la metodología propuesta, y ii) la necesidad de realizar muestreos de calidad de aguas subterráneas en sectores acuífero seleccionados para ello.

Etapa 4: Diseño de la metodología y aplicación en sectores acuífero

- Ejecución y análisis de campañas de muestreo realizadas en acuíferos pilotos, con el objetivo de contar con una base de datos actualizada y acorde a los requerimientos de la metodología diseñada.
- Diseño final de una metodología para la clasificación de la calidad de aguas subterráneas en sectores acuífero, en base a los resultados obtenidos en etapas anteriores, incluyendo una caracterización de la calidad química de las aguas de un sector acuífero, así como una caracterización de su origen y de su tendencia temporal.
- Aplicación de la metodología en tres sectores acuífero piloto de distintas características con el objetivo de evaluar su desempeño.

Etapa 5: Instrumentos para la protección de la calidad del agua subterránea y revisión de actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas de la DGA

- Discusión de las medidas de protección que aborden la calidad del agua y del régimen de explotación sustentable clasificadas en: i) conocimiento e investigación, ii) educacionales, iii) políticas y económicas, y iv) de acción directa.
- Definición de instrumentos de protección en sectores acuífero seleccionados y evaluación de su factibilidad de implementación.
- Análisis de la actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas de la DGA en sectores acuífero seleccionados en base a criterios constructivos y de representatividad.
- Proposición de una nueva red de monitoreo de la calidad química de aguas subterráneas en los sectores acuíferos seleccionados que permita la correcta aplicación de la metodología propuesta.

Etapa 6: Informe final y difusión

- Desarrollo de informe final del proyecto que contenga todos los aspectos tratados en las etapas anteriores del proyecto, con especial énfasis en aquellos aspectos que dan cumplimiento a los objetivos generales del proyecto.
- Difusión del proyecto en base a un Informe ejecutivo que presente sus principales resultados, y talleres de difusión para profesionales de la DGA y personal de otros servicios públicos.

El presente informe final forma parte de las actividades de la Etapa 6 y está compuesto por dos volúmenes. El primer volumen está estructurado en cinco capítulos, tal como se detalla más adelante, mientras que el segundo volumen está conformado por los Anexos.

Los capítulos 1, 2 y 3 corresponden a la introducción, los objetivos y la metodología general de trabajo.

El Capítulo 4 describe la metodología de clasificación de calidad de sectores acuífero, en su forma final y revisada por la DGA. Aquí se menciona los criterios de la metodología y su esquema general, los requerimientos de información, la determinación del índice de calidad químico, el análisis temporal de dicho índice y el análisis estadístico para determinar el origen de compuestos disueltos.

El Capítulo 5 presenta la aplicación de la metodología diseñada en los tres sectores acuíferos seleccionados, estos son El Loa, Los Choros y Aconcagua. Para cada sector acuífero seleccionado se presenta los antecedentes disponibles, la elección de parámetros, el análisis de los parámetros usados, la determinación del índice de calidad química, el análisis estadístico y el análisis temporal.

El Capítulo 6 presenta los instrumentos de protección de la calidad de aguas subterráneas. Primero se realiza una descripción de tales instrumentos de protección, para luego analizar su aplicabilidad en los sectores acuíferos seleccionados.

El Capítulo 7 presenta una propuesta de red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas para los sectores acuíferos seleccionados, en base a criterios de diseño y a la revisión de la

actual red de monitoreo de la calidad de aguas subterráneas que posee la DGA. Adicional a la propuesta de distribución espacial, en este capítulo se indica otros aspectos como frecuencia de medición, parámetros a analizar y características constructivas.

Por último, se menciona las conclusiones del informe, y por ende del proyecto completo, tanto referidas a la metodología de clasificación de sectores acuífero como de los instrumentos de protección. Además, dada la experiencia alcanzada durante la ejecución de este estudio, se propone recomendaciones para futuros trabajos.

4 METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS

La metodología diseñada para la clasificación de acuíferos en cuanto a la calidad de sus aguas, toma como base el análisis crítico de todas las metodologías estudiadas y los antecedentes revisados en las primeras etapas del proyecto (Capítulo 2, Anexos). Esta metodología se ha desarrollado en base a los siguientes pilares fundamentales:

- El análisis de las concentraciones químicas del agua subterránea, tanto de parámetros de análisis común como de interés local.
- La comparación de las concentraciones observadas en el agua subterránea con diferentes normas de calidad.
- La generación y representación espacial y temporal de un índice de calidad mediante una herramienta de sistemas de información geográfica (SIG).
- El análisis estadístico multivariado para visualizar las agrupaciones y correlaciones de elementos que posiblemente provienen de una misma fuente.

El detalle de los criterios adoptados para el diseño de la metodología y la descripción de su estructura y funcionamiento se detalla en las siguientes secciones de este capítulo. La validación de esta metodología ha sido realizada a través de su aplicación en los sectores acuífero El Loa, Los Choros y Aconcagua.

4.1 Antecedentes y criterios de la metodología

Los criterios y antecedentes necesarios para aplicar la metodología se obtuvieron de acuerdo a una revisión y análisis crítico de las metodologías internacionales (Capítulo 2, Anexos) de clasificación de calidad química de acuíferos, incorporando el tipo de información que se dispone en nuestro país. A continuación se describe los principales criterios y características de la metodología diseñada:

- Requiere de una caracterización geológica e hidrogeológica del acuífero (tipo de acuífero, nivel de explotación, etc.) y un análisis de consistencia de datos (espacial, temporal y de variables analizadas).

- Clasifica la calidad química de un determinado acuífero en base a la calidad química de sus aguas subterráneas, donde se calcula un índice principal único (índice de calidad), con categorías cualitativas y que es representable espacialmente mediante un mapa.
- El índice de calidad se genera a partir 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 respecto a niveles de tratamiento necesarios para corregir una determinada limitación al uso. De este modo, los rangos de calidad química de las aguas pueden ser relacionados con un uso, o potencial uso de las mismas.
- El índice de calidad es complementado con clasificaciones adicionales que dan cuenta del origen o explicación de ésta; por ejemplo, si una determinada agua debe su calidad a un origen natural o antrópico (industrial, agrícola, asentamientos humanos, etc.).
- Para el cálculo del índice de calidad, la metodología utiliza parámetros de análisis común, que habitualmente están disponibles para su aplicación a lo largo del país. De este modo los resultados son comparables entre acuíferos de distintas zonas y regiones. También es posible incluir algunos parámetros específicos de carácter local, como son ciertas condiciones naturales (Arsénico, Aluminio, Hierro, Manganeso, etc.) o de riesgos industriales (hidrocarburos, pesticidas).
- Incorpora análisis estadístico de las relaciones que pueden existir entre los distintos parámetros para definir un origen común.
- Permite la comparación temporal de la calidad química de las aguas para un mismo acuífero, de modo que se indiquen los cambios que sufre ésta en el tiempo, por ejemplo con el período anterior o la línea base.
- Los resultados finales de la calidad se visualizan, a través de mapas facilitando la lectura e interpretación de personas no especialistas, con las clases de calidad previamente definidas y descritas.

4.2 Esquema general de la metodología

La Figura 4.1 muestra un esquema general de la metodología, la cual permite por una parte, obtener los mapas de calidad de las aguas del acuífero a partir del cálculo del índice de calidad

(IC) para un instante o período dado, y por otro, determinar la o las fuentes de origen de los distintos parámetros químicos disueltos en ellas. También indica la potencialidad de realizar comparaciones temporales de la calidad en un mismo acuífero.

Para el cálculo del índice de calidad (IC), la metodología necesita obtener mapas de isoconcentración de cada uno de los parámetros químicos involucrados en el cálculo, los cuales representan también resultados parciales de la misma metodología. Estos mapas se utilizan para clasificar la calidad química de cada parámetro químico involucrado en el cálculo (IC individual) según la clasificación propuesta. Esta clasificación presenta un rango de variación continuo entre 0 (mejor) y 5 (peor), dividido en cinco clases de calidad: excepcional, buena, regular, insuficiente e intratable. Posteriormente, a partir del IC individual se obtiene la calidad global del acuífero (IC general) adoptando criterios adecuados, presentados más adelante, que consideren como base aquellos elementos químicos que presentan mayor riesgo para la salud humana. El IC general también toma valores en el rango continuo de 0 a 5, sin embargo su representación espacial es discretizada sólo en 5 clases. 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. Todos estos mapas son reflejo de la calidad química del acuífero analizado para un horizonte temporal dado (año, estación, mes, línea de base, etc.).

En caso de contar con clasificaciones de calidad en períodos de tiempo distintos, para un mismo acuífero, es posible evaluar los cambios entre ellos, indicando si la calidad mejora, se mantiene o empeora, lo que constituye el análisis temporal de la metodología.

Por otra parte, mediante un análisis estadístico se 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.

A partir de la combinación de los resultados de cada análisis, químico, temporal y estadístico, se obtiene mapas de la calidad química del acuífero, caracterizadas según su origen y/o tendencia temporal.

Los distintos pasos de la aplicación de la metodología se describen en los siguientes apartados de este informe.

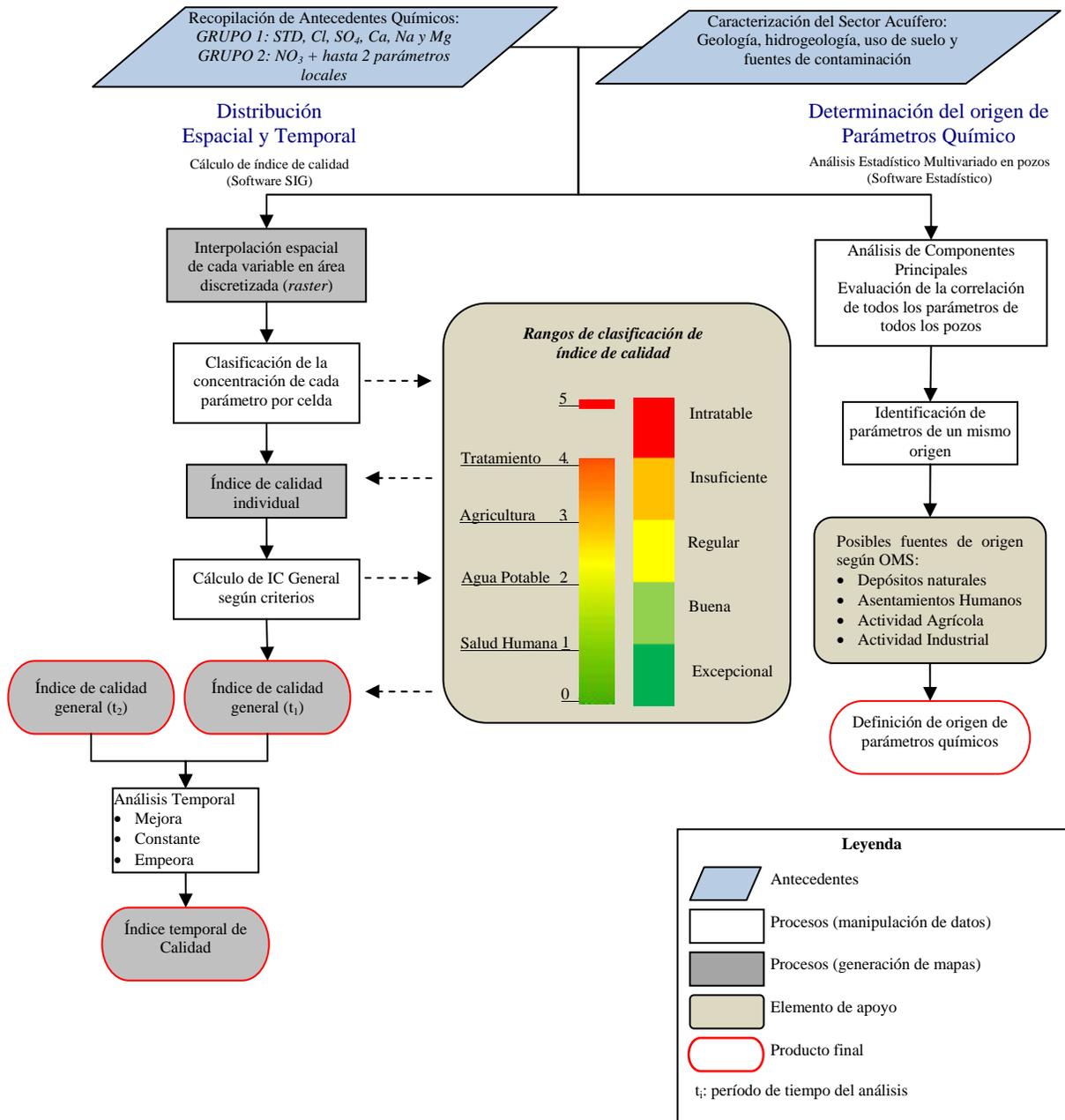


Figura 4.1: Esquema y diagrama de flujo de la metodología.

4.2.1 Herramientas SIG y métodos de interpolación

Previo a la aplicación de la metodología a un acuífero es necesario disponer de información general hidrogeológica e hidrológica relevante de éste para su estudio y comprensión, como: la red de drenaje, topografía, geología, puntos de monitoreo, centros urbanos e industriales, etc. En este sentido, usar programas computacionales de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es indispensable para controlar y manejar esta información. Estos programas además de superponer mapas con distinta información del acuífero, permiten construir nuevos mapas que visualizan características espaciales de éste, como la concentración de determinados parámetros químicos, la calidad química de sus aguas o cualquier otra propiedad determinada previamente, facilitando la lectura intuitiva de los resultados, incluso de personas no familiarizadas con estos programas.

Otras herramientas utilizadas en la metodología y que también forma parte de un SIG, son las herramientas de interpolación espacial de datos puntuales, por ejemplo valores de concentración de parámetros químicos en puntos de observación. 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 grilla 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.

La Tabla 4.1 presenta una breve reseña de los principales métodos de interpolación que pueden utilizarse y sus características más importantes. Uno de los métodos más recomendados es el método de *Kriging*, aunque en caso de acuíferos con geometría más compleja (encajonamientos por barreras hidrogeológicas) podría ser necesario utilizar otros métodos como *Spline* con barreras. El uso de estos métodos de interpolación espacial,

incorporados como herramientas en programas SIG, entregan como resultado un mapa tipo *raster*, es decir un área discretizada en celdas en que cada una de ellas tiene un valor numérico de la propiedad interpolada a partir de los datos puntuales.

Además de la gran utilidad que representa el uso de herramientas SIG, incluyendo la interpolación espacial y la visualización espacial de propiedades del acuífero, es importante destacar que la mayoría de las metodologías internacionales evaluadas las utilizan en forma intensiva (Anexos, Sección 2.3).

Tabla 4.1: Principales métodos de interpolación y sus características.

Método	Determinístico / Estocástico	Vecindad Local / Global	Transición Abrupta / Global	Interpolador exacto	Limitantes del método	Recomendable para	Procesamiento computacional	Estructura de salida de datos	Supuestos planteados al modelo
<i>Kriging</i>	Estocástico	Local con variogramas globales. Local con variogramas locales cuando se estratifica. Local con tendencias globales	Gradual	Sí	El error en las estimaciones depende del variograma, de la distribución de los datos puntuales, y del tamaño de los bloques interpolados. Requiere cuidado el elegir qué modelo de correlación espacial se querrá obtener	Cuando los datos son suficientes para computar variogramas y <i>Kriging</i> como un método para tratar con datos dispersos. Datos binarios y nominales pueden ser interpolados con indicadores de <i>Kriging</i> . Información suave y gradual podría ser también incorporada como tendencias o estratificaciones. Datos multivariados también pueden ser interpolados mediante <i>co-kriging</i> .	Moderado	Grilla continua representada en una superficie	La superficie interpolada es lisa Existen hipótesis que operan bajo estadísticas estacionarias

Tabla 4.1: Principales métodos de interpolación y sus características.

Método	Determinístico / Estocástico	Vecindad Local / Global	Transición Abrupta / Global	Interpolador exacto	Limitantes del método	Recomendable para	Procesamiento computacional	Estructura de salida de datos	Supuestos planteados al modelo
Simulación Condicional	Estocástico	Local con variogramas globales. Local con variogramas locales cuando se estratifica. Local con tendencias globales.	Irregular	No		Se desea obtener excelentes estimaciones sobre el rango posible de valores para un atributo o localizaciones no muestrales. En este caso se hace necesario un análisis Monte Carlo u otro tipo de modelo numérico	Moderado a fuerte	Grilla continua representada en una superficie	Existen hipótesis que operan bajo estadísticas estacionarias
Método de Tobler	Determinístico	Local	Gradual	No	Los datos de entrada corresponden a cuentas (frecuencia) o densidades	Pasar de modelos con resultados de distribución espacial discreta a superficies continuas	Liviano a moderado	Grilla continua representada en una superficie, o contornos <i>raster</i>	Continuidad espacial y variación gradual de los datos dentro de la superficie
Interpolación lineal	Determinístico	Local	Gradual	Sí	No presenta limitantes	Para interpolar a partir de puntos cuando la densidad de datos es alta y para convertir una grilla de un sistema de proyección a otro	Liviano	Grilla continua, representada en una superficie	Soporta una gran densidad de datos de entrada y salida; muchos más que una aproximación lineal

Tabla 4.1: Principales métodos de interpolación y sus características.

Método	Determinístico / Estocástico	Vecindad Local / Global	Transición Abrupta / Global	Interpolador exacto	Limitantes del método	Recomendable para	Procesamiento computacional	Estructura de salida de datos	Supuestos planteados al modelo
Interpolación de Ponderación Inversa de la Distancia o IDW (<i>Inverse Distance Weighted</i>)	Determinístico	Local	Gradual	No con superficies lisas, pero puede ser forzado	Los resultados dependen del tamaño de la ventana de búsqueda y la elección de los pesos para los parámetros.	Una interpolación rápida de la dispersión de datos puntuales en una grilla regular o irregularmente espaciada	Liviano	Grilla continua representada en una superficie, o contornos <i>raster</i>	Datos equitativamente distribuidos para evitar el efecto <i>cluster</i>
Spline y Spline con Barreras	Determinístico con componentes locales estocásticos	Local	Gradual	Sí, con límites graduales	Es posible obtener muy buenos resultados	Una interpolación rápida (univariada o multivariada) de datos digitales de elevación y atributos relacionados con la creación de DEMs con un moderado nivel de detalle	Liviano	Grilla continua representada en una superficie, o contornos <i>raster</i>	Toda la superficie sobre la cual opera el modelo presenta suaves variaciones
Clasificación	Determinístico	Global	Abrupta si es que se usa sin otro método complementario	No	La delimitación de áreas y clases puede ser subjetiva, principalmente por efectos de la desviación estándar.	Para estimaciones rápidas cuando los datos son muy dispersos. Para remover diferencias sistemáticas antes de efectuar una interpolación a partir de datos puntuales	Liviano	Polígonos clasificados	Existe homogeneidad en los datos con los bordes

Tabla 4.1: Principales métodos de interpolación y sus características.

Método	Determinístico / Estocástico	Vecindad Local / Global	Transición Abrupta / Global	Interpolador exacto	Limitantes del método	Recomendable para	Procesamiento computacional	Estructura de salida de datos	Supuestos planteados al modelo
Superficies de Tendencia	Esencialmente determinístico (modelos empíricos)	Global	Gradual	No	El efecto físico de la tendencia no siempre es claro. Características de los bordes de polígonos pueden distorsionar el aspecto general de la superficie y puede ocasionar interpretaciones erróneas.	Para cálculos rápidos de tendencias generales o gruesas.	Liviano	Grilla continua representada en una superficie	Datos normalmente distribuidos
Modelos de Regresión	Esencialmente determinístico (modelos empíricos y estadísticos)	Global con ajustes locales	Gradual si los datos de entrada presentan variación gradual	No	Los resultados dependen fuertemente del modelo de regresión y de la calidad de los datos de entrada.	Como buena alternativa de modelación cuando otros modelos más apropiados no están disponibles o no hay presupuesto para utilizarlos	Liviano	Polígonos o grilla continua representada en una superficie	Modelo extrapolable a toda la superficie
Polígonos de Thyssen	Determinístico	Local	Abrupta	Sí	Sólo actúa un solo punto por polígono. El modelo de teselas depende de la distribución de los datos	Trabajar con datos de observaciones puntuales y nominales	Liviano	Polígonos o grilla	Excelente predicción mientras más cercanos sean los puntos

Fuente: Apunte "La interpolación espacial y los modelos digitales de terreno" del curso "Sistemas de Información Geográfica" de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. Accesible en < https://www.u-cursos.cl/forestal/2008/2/EF078/1/material_docente/> [Citado: 13 de abril de 2009]

4.2.2 Parámetros químicos que utiliza la metodología

La calidad química del agua subterránea queda definida por los valores de concentración de todos los parámetros físico-químicos que se puedan evaluar y contrastarse con una normativa vigente. Sin embargo, al momento de definir un índice de calidad es necesario escoger un número de parámetros químicos con los cuales trabajar, considerando por ejemplo: objetivos, consistencia, disponibilidad, relevancia, concentración, origen, recursos, redundancia de información, comparabilidad, etc.

A partir de la revisión de los parámetros que utilizan las distintas metodologías internacionales (Anexos, Sección 2.2) y aquellos normalmente analizados en los planes de monitoreo de nuestro país, especialmente de la Dirección General de Aguas (Anexos, Sección 1.1), además de considerar los objetivos del proyecto, se decidió trabajar en esta metodología con los parámetros que se describen a continuación.

La metodología contempla trabajar con dos grupos de parámetros (Tabla 4.2). El primer grupo está conformado por los parámetros químicos Sólidos Disueltos Totales (SDT), Cloruros (Cl), Sulfatos (SO_4), Calcio (Ca), Sodio (Na) y Magnesio (Mg), que corresponden a parámetros comúnmente realizados en cualquier muestra de agua y que además son utilizados en la mayoría de las metodologías internacionales. Estos parámetros se encuentran siempre disueltos en las aguas en forma natural, y el aumento de sus concentraciones puede deberse a efectos antrópicos. El segundo grupo está conformado por parámetros químicos que dan cuenta de la singularidad de cada acuífero y está conformado por un máximo de tres parámetros: la concentración de Nitratos (NO_3), más la concentración de dos elementos minoritarios que pueden escogerse en forma libre para cada acuífero, siempre y cuando reflejen las particularidades del mismo, ya sea por causas naturales o artificiales.

Tabla 4.2: Parámetros químicos utilizados en la metodología.

Grupo 1	Grupo 2
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Nitratos (NO ₃)
Cloruros (Cl)	Parámetro Local 1 (PL1)
Calcio (Ca)	Parámetro Local 2 (PL2)
Sulfatos (SO ₄)	
Sodio (Na)	
Magnesio (Mg)	

Los siete parámetros fijos, seis del grupo 1 y uno del grupo 2, normalmente son determinados en los análisis de agua y permiten definir la calidad de las aguas sin redundancia de información. Este concepto se refiere a parámetros altamente correlacionados, como son por ejemplo los SDT y la Conductividad Eléctrica, de modo que debe considerarse sólo uno de ellos dentro de la determinación del índice de calidad. Con esto, la aplicación de la metodología se realiza sobre la base de los mismos parámetros, facilitando la aplicación a nivel país y permitiendo la comparación de resultados de distintas zonas.

Los dos parámetros libres del grupo 2 responden al interés de incorporar parámetros locales que den cuenta de las particularidades específicas de cada acuífero, por ejemplo la presencia en altas concentraciones de Arsénico o Boro en el agua subterránea de la zona norte de Chile, y la contaminación por hidrocarburos o por aguas servidas, y que no necesariamente se ven reflejados en los parámetros fijos. Por otra parte estos parámetros locales no siempre son medidos en todos los sectores acuífero, pues depende de sus características y problemáticas.

Es importante señalar que a pesar del uso de siete parámetros químicos fijos por parte de la metodología, se requiere un análisis químico completo de las muestras de agua subterránea. En efecto, estos siete parámetros fijos deben formar parte de un conjunto mayor de parámetros analizados en cada muestra de agua subterránea, donde la cantidad total dependerá de cada zona de estudio y del uso que pueda darse a los resultados obtenidos. La Tabla 4.3 menciona los parámetros más comúnmente medidos en el agua subterránea y que son coincidentes con los monitoreados por la DGA (Anexos, Sección 1.1). La primera columna indica parámetros mínimos necesarios para una caracterización química básica del agua subterránea de un sector,

y entre los cuales se encuentran los siete parámetros fijos de la metodología. La segunda columna indica parámetros adicionales que pueden ser de interés local, ya que la normativa vigente de agua potable (INN, 2006) los califica como perjudiciales para la salud humana.

Tabla 4.3: Parámetros a medir en caracterización química.

Parámetros mínimos	Parámetros que pueden afectar la salud humana
pH	Cobre (Cu)
Conductividad eléctrica	Cromo total (Cr)
Bicarbonato (HCO ₃)	Fluoruro (F)
Carbonato (CO ₃)	Hierro (Fe)
Potasio (K)	Manganeso (Mn)
Cloruro (Cl)	Selenio (Se)
Sulfato (SO ₄)	Zinc (Zn)
Calcio (Ca)	Arsénico (As)
Sodio (Na)	Cadmio (Cd)
Magnesio (Mg)	Cianuro (CN)
Sólidos disueltos totales (SDT)	Mercurio (Hg)
Nitratos (NO ₃)	Nitrito (NO ₂)
	Plomo (Pb)

4.2.3 Depuración de la información química

Cabe mencionar que al momento de disponer de la concentración de los parámetros, es necesario analizar la validez de ellos, revisando los antecedentes disponibles y verificando, al menos, que el error en el balance iónico del análisis químico sea aceptable. El error de balance iónico no debe ser mayor a 5% (en términos absolutos) según la expresión que se presenta a continuación (Ec. 1):

$$error (\%) = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} \cdot 100 \leq 5\% \quad \text{Ec. 1}$$

La Tabla 4.4 presenta los cationes y aniones (disueltos) con que se realiza el balance iónico en aguas subterráneas. Para realizar este balance todos los compuestos deben estar expresados en miliequivalentes por litro (meq/L).

Tabla 4.4: Aniones y cationes mínimo necesarios para determinar el balance iónico.

Cationes	Aniones
Ca	HCO ₃
Mg	CO ₃
Na	SO ₄
K	Cl
	NO ₃

La metodología puede ser aplicada con la frecuencia temporal que se desee (anual, semestral, etc.) en vista de los objetivos del estudio específico. Por lo tanto, la idoneidad o conveniencia de utilizar análisis químicos de distintos puntos monitoreados en distintas fechas dependerá, por un lado, de la información disponible, y por el otro, de la variabilidad temporal de la calidad de las aguas o tendencias de los parámetros químicos que exista en el área. También, en el caso de disponer de distintos puntos de muestreo con distinta frecuencia en sus mediciones, puede optarse por alguno de ellos o bien promediar la concentración de sus parámetros medidos en un número determinado de fechas (mediciones mensuales para determinar el valor anual).

Los datos deben corresponder a la misma unidad hidrogeológica, es decir reflejar la calidad química del mismo acuífero, por lo que se debe poner especial cuidado en sectores que presentan más de un acuífero en forma vertical (superior e inferior) o bien que puedan estar conectados lateralmente.

En la depuración de la información química corresponde identificar valores anormales, y por tanto que requieran su verificación, eliminación o reemplazo, de acuerdo a las condiciones de muestreo, de transporte, medición, etc.

Por último, para aquellos valores que no alcancen el límite de detección de los instrumentos es necesario asumir un criterio para dar un valor numérico a la medición, por ejemplo 25% ó 50% de dicho límite.

La información química depurada del acuífero puede ser ordenada como indica la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Planilla ejemplo con valores químicos para aplicar metodología.

Pozo	Coordenadas		Fecha dd/mm/aa	Grupo 1						Grupo 2		
	E	N		SDT	Cl	SO ₄	Ca	Na	Mg	NO ₃	PL1	PL2
1
2
...

PL1 y PL2, corresponden a los parámetros locales.

4.3 Caracterización hidrogeológica y química del sector de aplicación

Como primer paso la metodología considera que se debe recopilar antecedentes (físicos, geológicos, hidrogeológicos, de usos del suelo, etc.) del sector acuífero en estudio, de tal forma de conocer su funcionamiento hidrogeológico (acuífero libre, confinado, direcciones de flujo, profundidad de las aguas, etc.) y establecer su estado de explotación para un momento determinado.

Además, se debe identificar las distintas actividades que se desarrollan sobre el acuífero y la ubicación de los asentamientos humanos que existan sobre éste de modo de poder establecer, en forma preliminar, posibles fuentes de productos químicos que puedan generar variaciones en la concentración química natural del agua subterránea. Con este análisis previo se puede proponer algunos elementos químicos para ser considerados como parámetros locales que den cuenta de problemáticas propias del sector acuífero donde se desee aplicar la metodología.

Se debe recopilar también la información existente de análisis de calidad físico-química de las aguas con la cual se aplicará la metodología. Las posibles fuentes de información son las que se listan a continuación:

- Banco Nacional de Aguas (BNA) administrada por la Dirección General de Aguas (DGA). Esta base de datos contiene estaciones de calidad pertenecientes a la Red de Monitoreo Nacional y, si bien posee pocos puntos de medición en lo que se refiere a calidad de aguas subterráneas, resulta valiosa ya que contiene datos con extensión temporal.

- Estudios previos realizados en la zona. Deben revisarse también si existen estudios públicos o privados, de impacto ambiental (Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental), o de caracterización hidrogeoquímica que permitan obtener valores para distintos parámetros para el período en que se realiza el estudio.

Es importante destacar que la cantidad y calidad de la información disponible, en cuanto a su densidad y distribución en el espacio, y en cuanto a número de parámetros analizados, es lo que determinará si ésta es suficiente para ser utilizada en la aplicación de la metodología o si es necesario generar (y por lo tanto muestrear) nueva información. La densidad necesaria de puntos con información no será siempre la misma, sino que dependerá, entre otros aspectos, del grado de explotación del acuífero y de sus características geológicas e hidrogeológicas.

La clasificación sobre su estado de explotación, o de una parte de él, debe evaluarse a partir del análisis de los derechos de aprovechamiento otorgados por la DGA en el área, y mediante el análisis de las variaciones temporales de los niveles piezométricos. La metodología plantea clasificar cada sector acuífero según si se encuentra en una situación de sobreexplotación o sustentabilidad a partir de las siguientes definiciones:

Sobreexplotado: Acuífero que presente alguna de las limitaciones a la explotación de aguas subterráneas por parte de la DGA (“reducción temporal”, “área de restricción” o “zona de prohibición” según Capítulo II de Resolución DGA N°425 publicada en Diario Oficial el 16 de Abril de 2008), o bien que el análisis de la evolución histórica de los niveles piezométricos indique una clara y sostenida tendencia a la disminución.

Sustentable: Acuíferos sin ninguna limitación por parte de la DGA en cuanto a la explotación de aguas subterráneas, y que sus niveles piezométricos no muestran disminuciones sostenidas en el tiempo, sino un equilibrio dinámico o aumento de los mismos. En esta clasificación calzan aquellos acuíferos que se encuentran en un estado natural o que, aunque se desarrolla algún tipo de actividad sobre ellos, ésta no ha afectado sus niveles.

Por otra parte para reflejar adecuadamente las condiciones del acuífero, organismos internacionales (Eurowaternet, 1998), indican que densidades de un pozo de observación por cada 25 km² y 100 km² son deseables en sitios impactados y no impactados, respectivamente. En el caso que los acuíferos presenten intrusión salina, la experiencia internacional indica que

la densidad debe ser mayor, siendo ésta entre 5 y 10 km² por pozo de observación (DGA, 2005).

La Tabla 4.6 propone una clasificación de la representatividad de la información de calidad química del acuífero según el nivel de explotación y la condición del acuífero. La representatividad puede ser *óptima*, *regular* o *deficiente* a partir de los km² que representa o caracteriza cada uno de los puntos con información.

Tabla 4.6: Clasificación de representatividad (km²/punto) de información química, según nivel de explotación y condición del acuífero.

Condición del Acuífero		Óptima	Regular	Deficiente
Sin Intrusión	Sobreexplotada	Menor a 25*	Entre 25 y 150	Mayor a 150
Salina	Sustentable	Menor a 100*	Entre 100 y 200	Mayor a 200
Con Intrusión	Sobreexplotada	Menor a 5**	Entre 5 y 15	Mayor a 15
Salina	Sustentable	Menor a 10**	Entre 10 y 20	Mayor a 20

* *Eurowaternet (1998)*; ** *U. de Chile-DGA (2005)*.

Además, es importante mencionar que la cantidad de pozos con información debe estar distribuida en el área de estudio lo más homogéneamente posible, ya que muestras concentradas o localizadas en una zona disminuyen enormemente la validez de los métodos de interpolación que se utilizarán para obtener los mapas de isoconcentraciones del acuífero.

En el caso de existir muestras obtenidas en puntos muy cercanos, producto de la resolución de la escala de trabajo (tamaño de celdas *raster*), puede que sea necesario considerarlos como un sólo pozo. Para este tipo de casos, se recomienda promediar los valores registrados de cada parámetro y representarlos en un único punto ficticio en el lugar. Esto resultará válido solamente cuando dichas muestras corresponden a la misma campaña de muestreo.

4.4 Elección de parámetros químicos locales

Los parámetros locales que integran el Grupo 2 de la metodología deben dar cuenta de la calidad química del acuífero, en cuanto a características hidrogeoquímicas de ocurrencia natural o de actividades locales que se desarrollen en el sector acuífero. La elección de los parámetros químicos locales se debe hacer en base a los siguientes pasos:

1. Recopilar antecedentes de posibles efectos que eleven el valor de la concentración de parámetros químicos en el sector acuífero en el que se desea aplicar la metodología:
 - Efectos de origen natural: geología, salares, volcanes, termas, mar.
 - Efectos de origen antrópico: derrames industriales, depósitos de residuos industriales líquidos (RILes), tranques de relave, vertederos, actividades agrícolas, ganaderas, etc.
2. Analizar las fuentes contaminantes, en cuanto a parámetros químicos asociados y valores propuestos por normas nacionales e internacionales de agua potable y riego, y su porcentaje de remoción mediante un tratamiento tradicional para agua potable.
3. Escoger dos parámetros siguiendo algún criterio establecido, por ejemplo:
 - parámetros más abundantes con respecto a una de las normas consideradas,
 - parámetros más riesgosos para la salud,
 - elementos minoritarios de mayor concentración,
 - parámetros no correlacionados y representativos de actividades antrópicas distintas.

A continuación se hace un desglose entre aquellos parámetros asociados a efectos de ocurrencia natural y de origen antrópico, para aportar ciertas ideas en el momento de escoger los parámetros locales. Este análisis se realizó mediante una recopilación de antecedentes bibliográficos nacionales e internacionales, elaborados por instituciones públicas y/o por investigaciones del ámbito académico.

4.4.1 Elección de posibles elementos de ocurrencia natural

La composición química del agua subterránea es el reflejo de todas las componentes del sistema que integran el sector acuífero: geología, geografía, procesos biológicos, estacionalidad, escorrentía, precipitación, etc. Los principales factores físico-químicos corresponden a pH, turbiedad, temperatura, Oxígeno disuelto, sales y nutrientes orgánicos.

La calidad fisicoquímica depende principalmente de la composición del agua de recarga, las interacciones 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.

Según los antecedentes geológicos e hidrogeológicos, los flujos de agua, a nivel nacional, atraviesan unidades geológicas en distancias relativamente cortas y con gradientes topográficos relativamente altos. Por esta razón no se asigna un rol de importancia a la litología como elemento influyente a nivel nacional, salvo excepciones en el norte de Chile, como la cuenca del río Loa, y en el sur de Chile, en la Región de Magallanes, donde existen sistemas de drenaje sobre grandes cuencas sedimentarias (SISS, 2001). Luego, los elementos contaminantes de origen natural estarán relacionados con la concentración naturalmente anómala de elementos presentes en zonas donde se ubican yacimientos minerales. El mayor riesgo de contaminación por causas de origen natural se presenta entre las regiones XV de Arica y Parinacota a la IV de Coquimbo, donde existe bajas tasas de precipitación. La Tabla 4.7 presenta una recopilación de los principales posibles parámetros contaminantes de origen natural (DESPOUY, 2005).

Tabla 4.7: Contaminantes naturales típicos de aguas superficiales y subterráneas de Chile.

Región	Considerados en NCh409/1	No considerados en NCh409/1
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, V, 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, V, Asbesto
VIII	Fe, Mn	Al, Ni, Asbesto
IX	Fe, Mn	Al, Mo, Ni, Asbesto
XIV y X	-	Al, Ni, Asbesto, Sb
XI	Fe	Mo, Ag, U
XII	-	Sb

Fuente: DESPOUY (2005)

Para una búsqueda de la ubicación más exacta de cada mineral se recomienda revisar el estudio de la SISS (2001), mientras que para la ubicación de las fuentes de agua potable que presentan problemas de contaminantes incluidos en la norma de NCh409/1, se sugiere revisar el estudio de DESPOUY (2005). El primero revisa los antecedentes de la presencia de contaminantes no controlados en agua potable, mientras que el segundo caracteriza la calidad de las fuentes de agua potable, entre ellas las aguas subterráneas.

4.4.2 Elección de posibles elementos de origen antrópico

Las principales fuentes contaminantes corresponden a residuos industriales líquidos y aguas servidas domésticas, cuya cantidad 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.

Existen importantes casos de salinización de diversas cuencas del Norte Grande y Norte Chico, como son San José, Camarones, Copiapó, Huasco, Elqui, etc. El Valle de Azapa es un caso crítico que ilustra esta situación, ya que se ha incrementado progresivamente la salinidad del agua subterránea a medida que se han incorporado nuevos suelos a labores agrícolas. En este valle, además se ha producido un incremento de los Nitratos en las aguas subterráneas debido al riego con aguas servidas (SISS, 2001), y la aplicación de fertilizantes sintéticos.

Por otro lado, el aporte de metales pesados por parte de actividades antrópicas genera importantes problemas de contaminación y toxicidades a nivel general. Sin embargo, en nuestro país, la presencia de metales pesados predominantemente es de ocurrencia natural superando muchas veces las normas de agua potable. La Tabla 4.8 muestra un resumen con los metales pesados asociados a las distintas actividades desarrolladas en la cuenca de Santiago (ANTINAO, 1998). En términos científicos se puede hablar de contaminación por metales pesados sólo cuando se detectan concentraciones anómalas en comparación con la línea de base de cada elemento (ALLOWAY y AYRES, 1993). Sin embargo, en términos legales hablamos de contaminación cuando las concentraciones (naturales o antrópicas) superan la normativa ambiental aplicable. En nuestro país, las aguas naturales están contaminadas si

superan la normativa secundaria, mientras que aquellas aguas que superan la norma de agua potable (NCh409) sólo pueden ser clasificadas como no aptas para el consumo humano.

Tabla 4.8: Metales asociados a distintos tipos de actividad en la cuenca de Santiago.

Actividad	Tipo de Actividad	Metales 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	Impurezas en fertilizantes	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn
	Pesticidas	Cu, As, Hg, Pb, Mn, Zn
	Abonos	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn
	Líquidos percolados	Cd, Ni, Cu, Pb, Zn
Otros	Preservantes de la madera y corrosión de objetos metálicos	As, Cu, Zn, Cd
Residuos Urbanos	Aguas Servidas	Pb, Cu, Zn, Cr
	Rellenos Sanitarios	Cd, Cu, Pb, Sn, Cr, Hg, Co

Fuente: ANTINAO (1998).

Otra experiencia internacional revisada indica los parámetros asociados a distintos tipos de actividades antrópicas. En la cuenca del Llobregat, al noreste de España (SOLER, y otros, 2002), mediante el análisis de las composiciones isotópicas de Estroncio (Sr) y Azufre (S), se identificó parámetros químicos contaminantes asociados a actividades antrópicas (Tabla 4.9).

Tabla 4.9: Contaminantes asociados a distintas actividades.

Fuente	Parámetros Químicos Asociados
Mina de Potasio	Na, K, Cl, Mg, Ca y SO ₄
Fertilizantes	K, NO ₃ , PO ₄ y SO ₄
Ganadería	NH ₄ , NO ₃ y TOC ¹
Residuos Urbanos e Industriales	Cl, NH ₄ , PO ₄ y TOC

Fuente: ANTICH, y otros (2000), OTERO, y otros (2005) y SOLER, y otros (2002).

En definitiva, se debe definir qué parámetros locales incluir en la metodología, considerando los efectos de ocurrencia natural o antrópicos según sea el grado de implicancia para la salud humana y las distintas actividades que se desarrollen.

4.5 Cálculo de índice de calidad

4.5.1 Mapas de isoconcentración

La Figura 4.2 muestra el esquema mediante el cual se obtiene los mapas de isoconcentración de los parámetros utilizados.

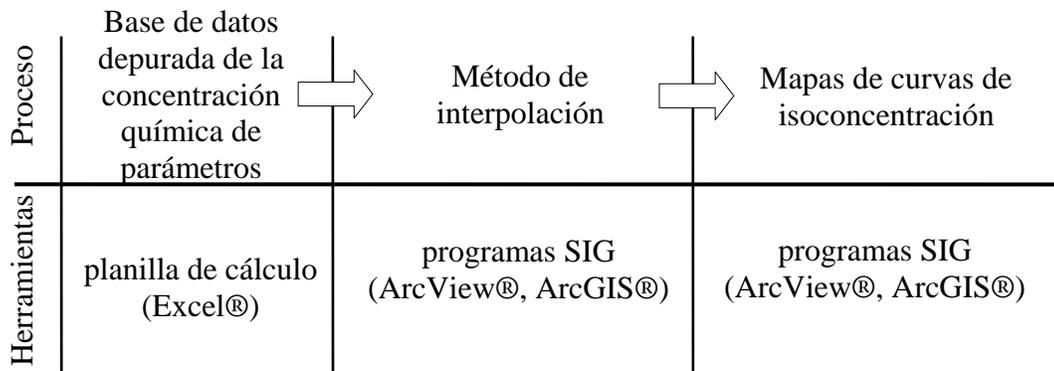


Figura 4.2: Esquema de interpolación de parámetros químicos.

¹ Carbono Orgánico Total

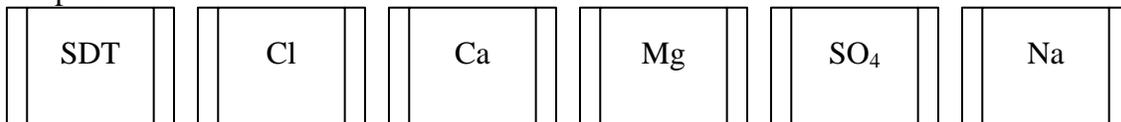
Para aplicar la metodología es necesario generar mapas de isoconcentración de cada uno de los parámetros en estudio, a partir de una base de datos químicos convenientemente depurada de acuerdo a lo indicado anteriormente, es decir revisar los datos considerando el balance iónico, la temporalidad, unidad hidrogeológica de interés, límites de detección, y chequeo de valores anormales.

Los mapas de isoconcentración se generan con herramientas SIG, por ejemplo usando el *software* ArcGIS®, en base a un método de interpolación espacial, aceptando la hipótesis que las concentraciones de los parámetros físico-químicos son continuas y que están correlacionadas en el espacio.

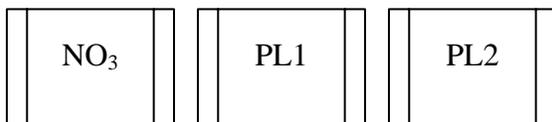
Cabe recalcar que, como se explicó anteriormente, existen varios métodos de interpolación espacial (Tabla 4.1), y la elección del método más adecuado debe responder a un criterio experto y profesional que considere las características del acuífero. De hecho el método más recomendado es el *Kriging* ordinario, sin embargo en acuíferos cuya geometría sea compleja debido a la longitud y encajonamientos por múltiples barreras físicas, sería necesario considerar otros métodos como *Spline* con barreras.

A partir de los datos registrados en cada uno de los puntos de muestreo se obtienen seis mapas de isoconcentración para el Grupo 1 (parámetros fijos) y 3 mapas para el Grupo 2 (Nitratos y dos parámetros locales a elegir), es decir:

Grupo 1:



Grupo 2:



Posteriormente, cada uno de los mapas es subdividido en un conjunto de celdas regulares, conocidas como *raster*, las cuales podrán tener distinto tamaño según la extensión del acuífero que se esté estudiando, su morfología y su densidad de puntos con información química.

En la Tabla 4.10 se propone criterios para escoger el tamaño de la grilla según el tipo de acuífero en que se aplique la metodología, sin embargo cabe recordar que la decisión final debe ser tomada con criterio experto que tome en cuenta las características del problema en cuestión.

Tabla 4.10: Propuesta de resolución de grilla para aplicar la metodología.

Tipo y Estado del Acuífero	Tamaño celda (m)	Resolución propuesta (celdas/km²)
Acuífero de gran extensión, no encajonado y que puede ser fácilmente representado dado que no existen barreras físicas que lo atraviesen. Se encuentra en estado sustentable.	200	25
Acuífero de gran extensión, que no presenta cortes marcados por barreras físicas naturales. Se desea tener una mejor resolución porque existe mayor actividad en la zona superior, se encuentra en estado sobreexplotado.	150	44
Acuífero formado por depósitos encajonados que necesita mayor resolución para representar de manera óptima la forma del sector acuífero. Se desea tener una resolución óptima porque se encuentra en estado sobreexplotado.	50	400

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que el tamaño mínimo de las celdas muchas veces queda limitado por la capacidad del procesador en el que se aplica la metodología puesto que se podría generar una enorme cantidad de celdas. Por ejemplo, para el sector acuífero El Loa, con una área de 7.950 km², al elegir un tamaño de celda de 200×200 m se generan 198.750 celdas por mapa, mientras que definiendo un tamaño de celda de 50×50 m se generan 3.180.000 celdas. Esta enorme cantidad de celdas en la misma área puede aumentar considerablemente el tiempo y los requerimientos de memoria del procesador, dificultando la implementación de la metodología.

Un último aspecto que debe considerarse en relación con el tamaño de la celda es la separación a la que se encuentran los puntos de muestreo de calidad. En el caso de nuestro país, la revisión de información disponible indica que la mayoría de los acuíferos no posee una resolución de la información de calidad química menor a 200 m, por lo que no sería necesario trabajar con celdas de menor tamaño. Sin embargo, si se desea aplicar la metodología a un sector acuífero pequeño con alta densidad de muestras, por ejemplo separadas cada 40 m, se debe escoger un tamaño de celda menor a esta distancia de manera que represente adecuadamente la variación de los parámetros de calidad.

4.5.2 Índice de calidad individual por parámetro

Después de generar los archivos en formato *raster* con la concentración por celda de cada parámetro químico, se procede a la clasificación de cada celda a partir de la escala de valores del índice de calidad. Este trabajo se debe realizar con programas que permitan manipular y operar con gran número de celdas, por ejemplo ArcGIS® o Excel® (versión 2007 o superior).

El índice de calidad (IC) de una celda, para cada uno de los parámetros, se obtiene mediante la interpolación lineal entre las concentraciones límites de cinco clases de calidad (C1, C2, C3, C4 y C5) y los valores de corte (VC1, VC2, VC3 y VC4), tal como se muestra en la Figura 4.3.

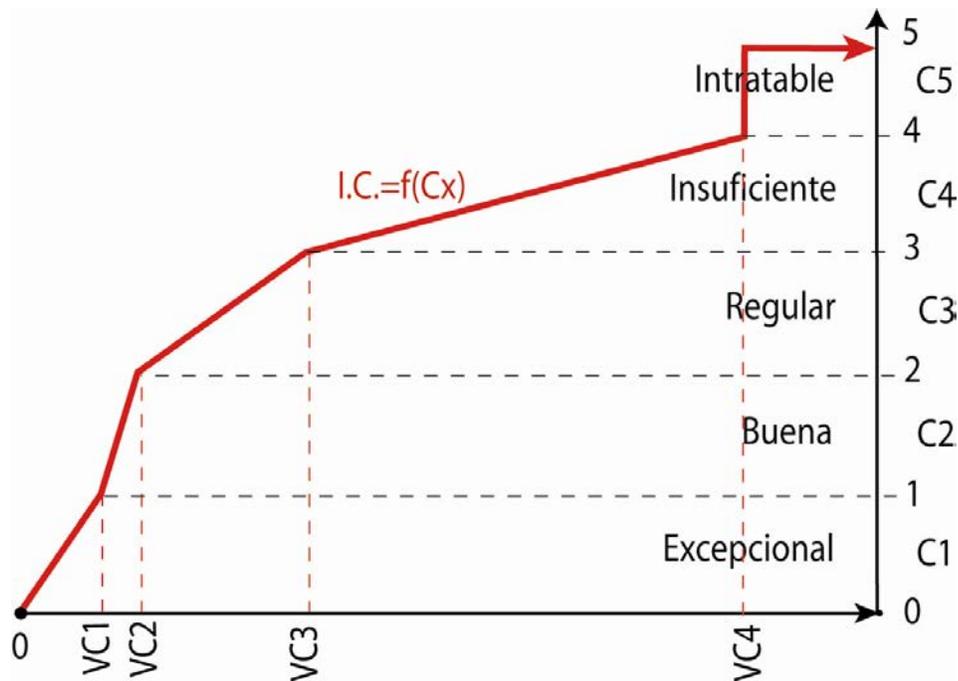


Figura 4.3: Cálculo de índice de calidad mediante interpolación lineal entre clases.

Las cinco clases de calidad corresponden a diferentes condiciones cualitativas de la calidad del agua subterránea, en base a valores límites 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. La referencia principal de este valor son las indicaciones de la Organización Mundial de la Salud respecto a la calidad del agua para consumo humano².
- 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

² Guidelines for Drinking-water Quality de OMS (2006).

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. En el caso que esta norma no establezca límite para un parámetro de interés se toma como referencia otras fuentes como OMS², USEPA³, o normas del Consejo de la Unión Europea⁴ (CE).

- 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 elementos 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), sin embargo se considera también la norma chilena de riego, NCh1333/78 (INN, 1996).
- 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. Se han considerado dos referencias principales, primero el criterio propuesto por SISS (INN, 2008) para definir el tipo de tratamiento necesario cuando se supera determinado nivel de concentración, y segundo, la clasificación de rangos de efectividad encontrados en la literatura técnica (HAMANN, y otros, 1990; LANKFORD y ECKENFELDER, 1990; PONTIUS, 1996; MENA, 2007).

Al considerar que en esta clase el agua presenta valores superiores a los definidos en la normativa de agua potable, y que por ende la SISS la clasifica en aguas de tipo III, es necesario tratamientos especiales como por ejemplo procesos de membrana. De acuerdo a la literatura técnica estos procesos tienen rangos de efectividad según tipo de

³ NPDWR y NSDWR, de la USEPA (USEPA, 2009).

⁴ Directiva 98/83/CE 3 Nov. 1998, del Consejo de la Unión Europea.

proceso y parámetro (Tabla 4.12), por lo que se adopta un valor intermedio representativo de procesos de membrana para cada parámetro, como se presenta en la Tabla 4.11.

En definitiva, la estimación del valor de corte 4 queda establecida por la ecuación Ec. 2, en donde el valor límite (VL) es el valor definido para aguas tipo III de acuerdo a la SISS (INN, 2008) o en su defecto el valor para la clase C2, y el porcentaje de eficiencia de remoción indicado en la Tabla 4.11, para cada parámetro.

$$C4 = \frac{VL}{1 - \%EficienciaRemoción} \quad \text{Ec. 2}$$

Tabla 4.11: Porcentajes representativos de eficiencia remoción de procesos de membrana.

Parámetro	%
SDT	75
Cloruros	75
Sulfatos	95
Calcio	95
Sodio	75
Magnesio	95
Nitratos	75

Tabla 4.12: Rangos de remoción de distintos procesos de tratamiento de aguas.

Parámetro	Coagulación y filtración	Intercambiador de iones		Procesos de membrana			Oxidación química, desinfección	Adsorción Carbón activado regular
		Aniónica	Catiónica	Ósmosis inversa	Ultra filtración	Electro- diálisis		
SDT	P	P	P	MB-E	P-B	MB-E	P	P
Cloruros	-	-	-	E	-	-	-	-
Sulfatos	P	MB-E	P	E	P	E	P	P
Calcio	-	-	-	E	-	-	-	-
Sodio	-	-	-	E	-	-	-	-
Magnesio	-	-	-	E	-	-	-	-
Nitratos	P	MB-E	P	MB	-	MB	P	P
Hierro	B-E	P	MB-E	MB-E	MB	MB-E	MB-E	P
Manganeso	B-E	P	MB-E	MB-E	MB	MB-E	B-E	P
Aluminio	B	P	MB-E	E	-	E	P	-

P: Pobre (0-20% de remoción); B: Bueno (20 a 60% de remoción); MB: Muy Bueno (60 a 90% de remoción); E: Excelente (90 a 100% de remoción); "-": datos insuficientes.

Fuente: HAMANN y otros (1990), complementado con MENA (2007).

- Los parámetros con concentraciones por sobre el valor de corte 4 son clasificados como *Intratables (C5)*. Hay que considerar que al haber adoptado un valor intermedio de remoción para la definición del valor de C4, las aguas de esta clase no se refiere, en términos estrictos, a aguas que no se pueden tratar, sino más bien que el tratamiento requerido para cumplir normativa de agua potable, de ser posible, sería con procesos que aseguren una mayor eficiencia, por lo que probablemente serían más complejos y costosos.

La Tabla 4.13 presenta los valores de corte que definen las cinco clases de calidad (Excepcional, Buena, Regular, Insuficiente e Intratable) para cada uno de los siete parámetros obligatorios que considera la metodología.

Tabla 4.13: Valores corte de los parámetros fijos de la metodología.

Parámetro	Unidad	VC1	VC2	VC3	VC4
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

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.
- 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.

A continuación la Figura 4.4 y la Figura 4.5 muestran todos los elementos considerados como base en esta metodología y su respectiva interpolación lineal de los rangos de calidad que permiten calcular el IC de cada elemento por separado. Todos los valores del IC se obtienen mediante interpolación lineal si la concentración es menor al límite de tratamiento, mientras que aquellas que lo superan toman el valor de 5 que representa la calidad de agua intratable.

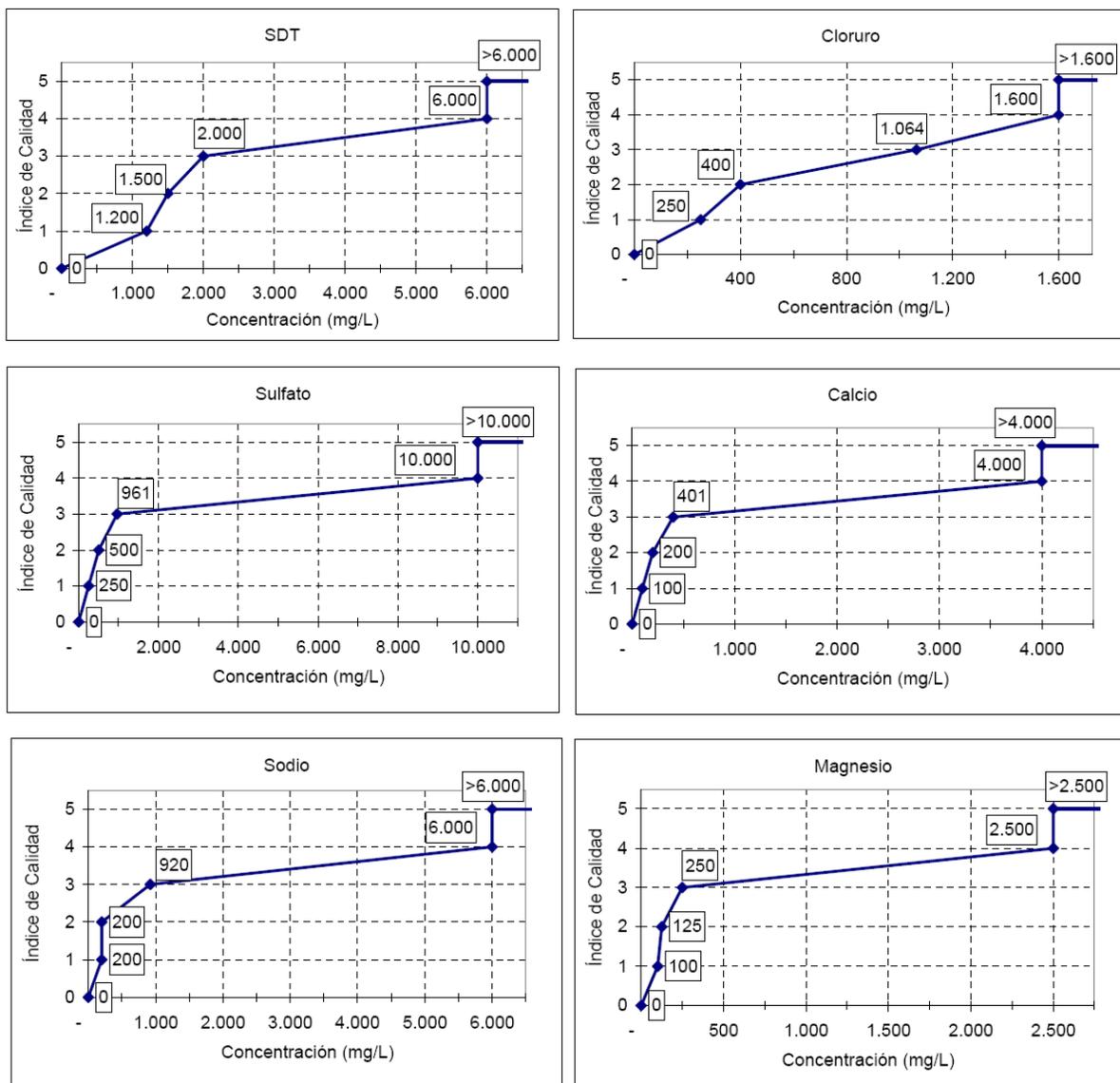


Figura 4.4: Gráfico para obtener IC asociado a elementos del Grupo 1.

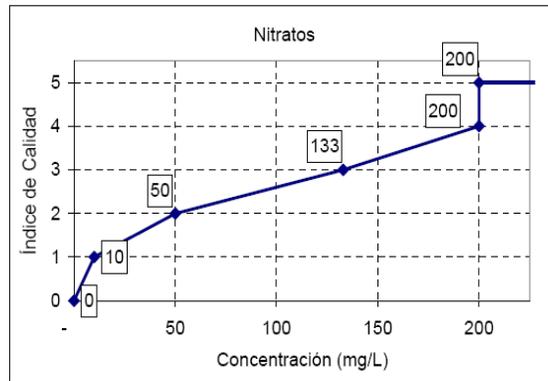


Figura 4.5: Gráfico para obtener IC asociado a Nitratos del Grupo 2.

La Tabla 4.14 presenta los valores de corte propuestos para cada parámetro químico que podría formar parte del Grupo 2, en base a las referencias disponibles mencionadas anteriormente. Cabe mencionar que para algunos parámetros no se cuenta con recomendaciones o normativas que permitan definir adecuadamente cada una de las clases. En caso de ausencia de un valor de corte, se adopta de preferencia el valor de corte inferior, o bien el valor superior, por lo tanto se reduce el número de clases definidas y con ello la clasificación del agua se polariza. Los valores de corte presentados en la Tabla 4.14 deben ser revisados en la medida que surjan nuevas recomendaciones, normativas y/o técnicas de tratamiento.

Tabla 4.14: Valores de corte de parámetros no fijos de la metodología.

Parámetro	Unidad	VC1	VC2	VC3	VC4	VL ^m	% remoción ⁿ
Fe	mg/L	0,3 ^b	0,3 ^d	5 ^e	200 ^k	50	75%
Mn	mg/L	0,05 ^c	0,10 ^d	0,20 ^e	40,00 ^k	10	75%
Ag	mg/L	0,1 ^b	0,1 ^c	0,2 ^f	0,4 ^k	0,1	75%
Al	mg/L	0,2 ^b	0,2 ^c	5 ^e	6,7 ^k	0,2	97%
Asbesto	MFL	7 ^c	7 ^h	7 ^h	7 ^h	-	-
B	mg/L	0,5 ^a	2 ^c	5 ^e	5 ^h	-	-
Ba	mg/L	0,7 ^a	0,7 ^h	0,7 ^h	2,8 ^k	0,7	75%
Be	mg/L	0,1 ^g	0,1 ^g	0,1 ^e	0,1 ^h	-	-
Cd	mg/L	0,003 ^a	0,010 ^d	0,050 ^e	0,200 ^k	0,01	95%
Co	mg/L	1 ^g	1 ^g	1 ^e	1 ^h	-	-
Cr	mg/L	0,05 ^a	0,1 ^c	1 ^e	1 ^h	-	-
Cu	mg/L	2 ^a	2 ^d	2 ^h	40 ^k	2	95%
F	mg/L	1,5 ^g	1,5 ^d	2 ^e	30 ^k	1,5	95%
Hg	mg/L	0,001 ^a	0,0010 ^d	0,010 ^e	0,050 ^k	0,001	98%
K	mg/L	2 ^g	2 ^g	2 ^e	2 ^h	-	-
Li	mg/L	2,5 ^g	2,5 ^g	2,5 ^e	2,5 ^h	-	-
Mo	mg/L	0,07 ^a	0,07 ^h	0,07 ^h	0,07 ^h	-	-
NH ₄	mg/L	1,5 ^b	1,5 ^d	1,5 ^h	1,5 ^h	-	-
Ni	mg/L	0,02 ^a	0,02 ⁱ	0,20 ^e	0,40 ^k	0,02	95%
Pb	mg/L	0,01 ^a	0,05 ^d	5,00 ^e	5,00 ^h	-	95%
PO ₄	mg/L	6,13 ^g	6,13 ^g	6,13 ^e	6,13 ^h	-	-
Se	mg/L	0,01 ^g	0,01 ^d	0,05 ^e	0,05 ^h	-	-
U	mg/L	0,015 ^a	0,03 ^c	0,03 ^h	0,60 ^k	0,03	95%
V	mg/L	0,1 ^g	0,1 ^g	0,1 ^e	0,1 ^h	-	-
Zn	mg/L	3 ^b	3 ^d	24 ^e	60 ^k	3	95%
As	mg/L	0,01 ^a	0,01 ^d	2,00 ^e	4,00 ^k	1,00	75%

Notas:

a: Fuente OMS. Valor límite en base a posible efectos en la salud humana.

b: Fuente OMS. Valor límite propuesto en base a aceptabilidad del agua potable, y no por niveles que puedan afectar a la salud humana.

c: Fuente USEPA. Valor límite para agua potable.

d: Fuente NCh409/1. Valor límite para el agua potable.

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

f: Fuente NCh1333. Valor límite para agua de riego.

g: En ausencia de valor recomendado o normado, se adopta igual valor que clase superior.

h: En ausencia de valor recomendado o normado, se adopta igual valor que clase inferior.

- i: Fuente CE. Valor límite para el agua potable.
- k: Ec. 2. Estimación en base a VL y % de remoción.
- m: Valor basado que coincide con dado por NCh409/1, excepto para Sodio, Hierro, Manganeso y Arsénico. En caso del Sodio se adopta valor límite del SDT, y en caso del Hierro, manganeso y Arsénico se adopta valor de 50mg/L, 10mg/L y 1mg/L de acuerdo a concentración que define la SISS (NCh777/1) como tipo III.
- n: Fuente HAMANN, y otros, (1990), complementado con MENA (2007). Valores propuestos.

4.5.3 Cálculo e interpretación del resultado del IC general

Una vez que se dispone del 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 del IC de los elementos químicos que, de acuerdo a la norma chilena de agua potable vigente (INN, 2006), afecten la salud humana (Tabla 4.15), y buscan reflejar que la calidad del acuífero esté definida por el parámetro de peor calidad. Lo anterior resulta consistente con los objetivos de la DGA. Los criterios se presentan en la Tabla 4.16 y se aplican para cada celda del sector acuífero de acuerdo a la interpolación generada (archivo *raster*).

Tabla 4.15: Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud (Tipo II) según NCh409/1Of.2005.

Elementos esenciales	Elementos no esenciales	Sustancias orgánicas	Plaguicidas	Productos secundarios de la desinfección
Cobre	Arsénico	Tetracloroetano	DDT	Monocloroamina
Cromo	Cadmio	Benceno	DDD	Dibromoclorometano
Fluoruro	Cianuro	Tolueno	DDE	Bromodichlorometano
Hierro	Mercurio	Xilenos	2.4-D	Tribromometano
Manganeso	Nitrato		Lindano	Triclorometano
Magnesio	Nitrito		Metoxicloro	Trihalometanos
Selenio	Plomo		Pentaclorofenol	
Zinc				

Tabla 4.16: 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 $1 < IC_{individual} \leq 4$ $IC_{general} = \underset{i=parametro}{Max} (IC_i)$
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Excepcional	→	IC general es el promedio aritmético del IC individual de todos los parámetros	Si $IC_{individual} \leq 1$ $IC_{general} = \frac{\sum_{i=parametro} IC_i}{n^{\circ} parametos}$

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 a la salud humana y/o que presenten la peor calidad química. A continuación se describe la interpretación de los valores que puede tomar el IC general, sin embargo se recalca que debido a los criterios definidos, ésta debe ser complementada con los IC individuales.

Calidad Excepcional ($0 \leq IC_{general} \leq 1$): Implica que todos los parámetros definidos por la norma NCh 409 como de importancia para la salud (elementos esenciales y no esenciales, sustancias orgánicas, plaguicidas y productos secundarios de la desinfección), presentan IC Excepcional y que el IC final está dado por el promedio aritmético de todos los parámetros seleccionados. Por lo tanto, la calidad excepcional permite asegurar que entre los parámetros seleccionados ninguno afecta a la salud humana, aunque el resto de parámetros presentes puede tener calidad Regular o Insuficiente. Sin embargo la situación esperada es que el resto de parámetros seleccionados presenten calidad Buena o Excepcional, en cuyo caso estas aguas con IC Excepcional no afectan la salud humana y cumplirían con criterios de aceptabilidad del agua potable. Para una interpretación más completa será necesario analizar el IC individual del resto de parámetros que no afecten la salud humana, por ejemplo para definir la existencia de

afectación antrópica, el nivel de dureza, la clasificación como fuente de agua potable según la SISS o las limitaciones de uso.

Calidad Buena ($1 < IC_{general} \leq 2$): Esta situación puede darse tanto porque existe algún parámetro que afecta a la salud humana (según normativa NCh409) que presenta IC individual Bueno y el resto presenta IC Bueno o Excepcional, o bien los parámetros de importancia para la salud humana, según normativa NCh409, presentan IC Excepcional y el resto de parámetros presenta IC Buena, Regular y/o Insuficiente. De este modo las aguas clasificadas con IC Bueno no afectan a la salud humana, sin embargo podrían presentar concentración elevada en algunos parámetros que reflejen afectación antrópica o limiten su uso. Una interpretación más detallada requiere del análisis del IC individual.

Calidad Regular ($2 < IC_{general} \leq 3$): Esta calidad puede ser reflejo que al menos uno de los parámetros que afectan la salud humana (según normativa NCh409) tiene IC Regular mientras el resto presenta IC Regular, Bueno y/o Excepcional. Sin embargo, también puede ocurrir cuando la concentración de parámetros relevantes a la salud humana no son altos (IC Bueno o Excepcional) y existe uno o más del resto de parámetros con IC Regular. Por lo tanto, el IC Regular corresponderá principalmente a aguas que afectan a la salud humana, aunque no se descarta que las aguas no sean nocivas para la salud humana y sea el resto de los parámetros seleccionados los que definen la calidad general. Dado esto, se debe analizar el IC individual para definir con mejor detalle limitaciones de uso o afectación antrópica.

Calidad Insuficiente ($3 < IC_{general} \leq 4$): Esta situación puede reflejar que existe al menos un parámetro nocivo para la salud humana (según normativa NCh409) que presenta IC Insuficiente, es decir que limita su uso en agricultura. Sin embargo, también puede producirse cuando los parámetros que afectan la salud humana tienen IC Bueno o Excepcional, pero existe al menos uno del resto de parámetros con IC Insuficiente. Por lo tanto, el IC Insuficiente corresponde a aguas que no pueden ser usadas en la agricultura ni menos para el consumo humano, debido a que al menos uno de los parámetros seleccionados, tanto nocivos o no nocivos para la salud humana supera las recomendaciones.

Calidad Intratable ($IC_{general} = 5$): Esta situación define cuando existe al menos un parámetro de los seleccionados que presenta una calidad intratable, ya sea que afecte o no a la salud humana. Estos niveles son tales que dificultan enormemente su tratamiento, pues exigen procesos de tratamiento de alta eficiencia, y probablemente asociado a mayor complejidad y costos. En definitiva esta agua presentaría limitaciones para la mayoría de los usos.

4.6 Análisis temporal del índice de calidad

Mediante un análisis temporal se busca complementar la caracterización de la calidad química de aguas en un sector acuífero. El análisis temporal de la metodología permite conocer la evolución o tendencia de la calidad del agua en el tiempo o en dos momentos dados, pudiendo ésta empeorar, mejorar o mantenerse. En términos generales la evaluación de este cambio temporal consiste en comparar el IC proveniente de mapas de calidad del mismo sector acuífero, pero en distintos momentos o entre un tiempo reciente y la situación de la línea base.

En la práctica, la comparación entre los mapas se facilita con el uso de herramientas SIG, ya que es necesario comparar el valor de IC en los tiempos disponibles, pero en la misma zona o celda. Por lo tanto, es necesario procesar la información disponible para obtener los mapas de tiempos distintos con la misma discretización (tamaño de celda, número de celdas, método, etc.) para la misma superficie.

Los mapas de calidad pueden corresponder tanto a índices individuales como a generales, ya sea con rango de valores continuo entre 0 y 5, o bien clasificado en 5 clases discretas, como sería el caso normal.

En el caso que el análisis temporal se realice entre dos momentos dados, la evaluación consiste en determinar el cambio porcentual entre el IC inicial y final, con respecto a la situación inicial (Tabla 4.17). 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). El valor T1% debe ser definido con un criterio experto y de acuerdo al alcance del análisis y considerando el horizonte temporal del análisis. Todos estos cambios están referidos al período comprendido entre ambos mapas de calidad.

Por otra parte, si interesa evaluar los cambios en la calidad de aguas en más de dos instantes de tiempo, y por tanto se dispone de varios mapas con índices de calidad, por ejemplo cada año en el transcurso de 5 años, el esquema de evaluación se modifica para considerar la evolución temporal de forma más detallada. Con esta información, es posible obtener para cada celda de cada mapa, la tendencia temporal del índice de calidad, es decir una serie temporal de éste. La evaluación de la tendencia temporal se realiza a partir de la regresión lineal de la serie temporal de datos, para luego establecer que si existe tendencia al incremento (pendiente positiva) la calidad empeora, o si la tendencia es decreciente (pendiente negativa) la calidad mejora, o bien si la tendencia es constante (pendiente nula) la calidad se mantiene inalterada (Tabla 4.17). El valor numérico de la pendiente a partir de la cual se considera positiva o negativa, por ejemplo T2, dependerá del horizonte temporal considerado, el cual está definido por los mapas de calidad utilizados. Por lo tanto resulta complejo establecer un valor de T2 a priori, y por tanto debe ser definido con criterio experto y de acuerdo al alcance del análisis y los datos disponibles (PASSARELLA y CAPUTO, 2006).

La Tabla 4.17 presenta un resumen de los criterios planteados para definir la clase temporal a partir de la variación del índice de calidad en el tiempo.

Tabla 4.17: Criterios para establecer la clase temporal.

Criterio para dos mapas	Criterio para más de dos mapas	Clase temporal
Aumento mayor a T1%	Pendiente negativa menor a T2	Mejorando
Cambio menor a T1% absoluto	Pendiente nula	Inalterado
Disminución mayor a T1%	Pendiente positiva mayor a T2	Empeorando

Considerando la variable temporal en la metodología es posible obtener un nuevo mapa del sector acuífero que refleje la calidad del agua subterránea considerando la variación temporal del IC. Para esto se plantea una nueva clasificación en base al cruce entre las clases de calidad y la clase temporal según la Tabla 4.18. El espectro de colores de rojo a verde refleja la situación calidad-temporal, donde el color rojo refleja una situación no deseable (calidad insuficiente o intratable que se mantiene o empeora) y el color verde una situación deseada (calidad excepcional o buena que se mantiene o mejora). Entre ambos extremos se encuentra

el color naranja (regular empeorando o intratable mejorando), amarillo (bueno empeorando, regular constante o insuficiente mejorando) y verde claro (excepcional empeorando y regular mejorando).

Tabla 4.18: Reclasificación temporal de la calidad química de aguas.

		Clase de Calidad				
		Excepcional	Bueno	Regular	Insuficiente	Intratable
Clase temporal	Empeorando					
	Constante					
	Mejorando					

Fuente: Adaptado de PASSARELLA y CAPUTO (2006).

El objetivo principal de incorporar la evolución temporal de la calidad química en la clasificación de sectores acuíferos es caracterizar temporalmente su condición de calidad. Eventualmente podría ocurrir que la calidad de un agua subterránea se clasifique como Buena y por tanto no tenga mayores restricciones de uso, sin embargo esta calidad puede estar empeorando desde tiempos anteriores, a partir de una calidad Excepcional. Esto indicaría por ejemplo que la actividad que se desarrolla en el sector acuífero, o bien las condiciones de éste podrían llevar en un futuro a que el agua siga empeorando su calidad al punto de tener una calidad Regular o Insuficiente. Por otra parte, en el caso que en una zona del sector acuífero se haya evaluado con calidad Regular, debido a la contaminación por algún elemento proveniente de la industria, y por ende los organismos pertinentes hayan tomado medidas para revertir la fuente contaminante, el IC y su tendencia temporal permitirían evaluar la calidad del sector acuífero y observar como ésta mejora en el tiempo.

En definitiva, la caracterización temporal de la calidad de las aguas en un sector acuífero es una herramienta importante que puede ser usada en la planificación y en las medidas de protección del acuífero.

En el desarrollo de este proyecto no se contó con bases de datos de calidad de química temporales de sectores acuíferos, provenientes de períodos de tiempo distintos y comparables, es decir, que permitiesen el adecuado estudio y aplicación de la metodología.

El estudio y la aplicación de la metodología para la evaluación temporal de su calidad requieren contar con programas de muestreo establecidos y sistemáticos, donde la red de puntos, la frecuencia, y los parámetros analizados estén definidos, como se plantea más adelante en el Capítulo 7 de este informe. En vista de esta falta de base de datos adecuadas, el análisis temporal de la metodología no pudo ser evaluado en detalle en los sectores acuíferos seleccionados, y no se pudo definir valores recomendados de T1% y T2, por lo que constituye uno de los aspectos que debieran ser desarrollados en futuros estudios.

4.7 Análisis estadístico para determinar el origen de los compuestos disueltos

El origen de los compuestos disueltos que definen la calidad de las aguas subterráneas puede identificarse en base a los antecedentes disponibles de la zona de estudio como el uso de suelo, catastro de actividades antrópicas, etc. Cuando no se dispone de esta información o ésta no es lo suficientemente precisa como para determinar el origen de la calidad química del acuífero, pueden utilizarse herramientas estadísticas aplicadas a la concentración de los elementos o compuestos químicos presentes en el agua subterránea. Las herramientas estadísticas utilizadas en estos casos corresponden a los análisis multivariados, dado que se cuenta con gran cantidad de información producto de: i) cantidad de parámetros químicos analizados, ii) número de pozos de la red de monitoreo, y iii) existencia de series de tiempo en muchos casos extensas. En particular para el estudio de la hidrogeoquímica es utilizado el Análisis de Componentes Principales (ACP), ya que tiende a develar factores latentes que existen entre los parámetros físico-químicos de un acuífero (TOLOSANA-DELGADO, y otros, 2005) y con ello permite agrupar parámetros que se encuentren correlacionados, y por ende reconocer grupos de características similares (LOVE, y otros, 2004).

Bajo esta perspectiva, la metodología considera en primer lugar desarrollar un ACP a la base de datos (en el período de tiempo considerado) de valores de concentración de los parámetros en los puntos de muestreo, obteniendo al final de éste grupos de parámetros químicos que probablemente provienen desde una misma fuente. En segundo lugar, para identificar las fuentes comunes se cruza la información obtenida con referencias disponibles, por ejemplo actividad industrial en el sector acuífero o correlaciones realizadas por la OMS (2007) entre distintos compuestos en las aguas subterráneas, y así identificar el origen común de los

compuestos disueltos, por ejemplo agricultura, industria, aguas servidas, etc. El esquema de la Figura 4.6 muestra el proceso de análisis para el conjunto de parámetros registrados.

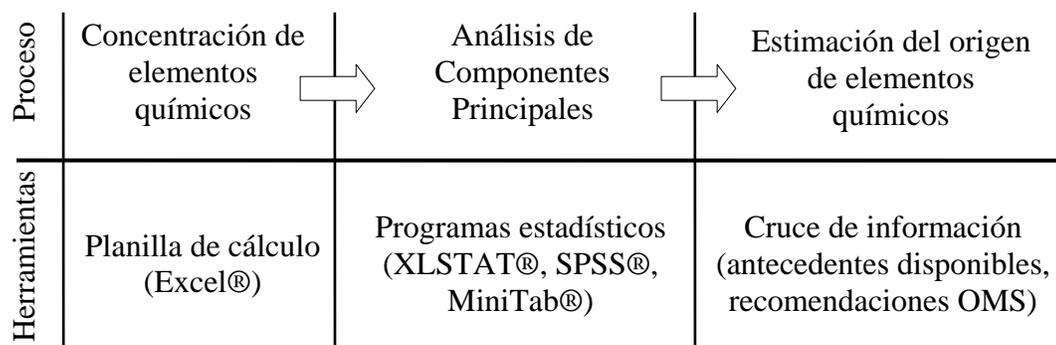


Figura 4.6: Esquema de análisis estadístico.

4.7.1 Aplicación del ACP en la metodología

Conceptualmente el ACP supone que si se dispone de una serie de datos que presentan interrelaciones importantes, resulta posible obtener componentes principales o factores, no observables en forma directa, capaces de resumir la información original usando menos variables, clarificando las relaciones entre ellas y sin una pérdida excesiva de detalle.

Si bien en los Anexos (Capítulo 5) se encuentra una descripción detallada de la formulación matemática del ACP, se puede indicar que el procedimiento implica realizar una transformación lineal de los valores originales (observados) en un sistema de coordenadas que facilita la comparación entre ellos. La transformación lineal queda definida por vectores y valores propios, en cantidad igual al número de variables estudiadas. Los vectores propios, o en este caso también denominados factores o componentes principales, son aquellos cuya dirección no cambia con la transformación, mientras que el valor propio asociado es un factor de escalamiento de la magnitud del vector propio.

Además, estos factores y valores propios asociados tienen la característica de explicar la varianza total de los datos en forma decreciente, es decir, el primer factor explica la mayor parte de ésta, la segunda explica la mayor parte de la varianza total que no es explicada por el

primer factor, y así sucesivamente. De este modo los primeros factores contienen gran parte de la información original, mientras que los últimos no. Por lo tanto, omitir los últimos factores no se traduce en pérdida relevante de información, a la vez que se reduce el número de variables consideradas.

El ACP consiste en una serie de pasos secuenciales, que deben ser realizados con criterio profesional para obtener conclusiones relevantes al problema en cuestión. Los pasos son los siguientes: a) requisitos de la base de datos, b) selección de factores, c) matriz de factores, d) interpretación de factores, e) puntuaciones factoriales y f) representaciones gráficas. Existen varias herramientas computacionales que facilitan el ACP, sobre todo cuando la base de datos es extensa, entre ellos se menciona los *software* XLSTAT®, SPSS® y MiniTab®. A continuación se presenta un resumen de los pasos de un ACP basado en diversas fuentes (MAKOVEC, 2008; DEPTO SOCIOLOGIA IV, 2008; IN3, 2002).

a. Requisitos de la base de datos

- Número de observaciones en la base de datos: al menos 5 veces mayor a la cantidad de variables observadas.
- Cumplimiento de test de correlación estadística entre variables. Si bien basta con confirmar uno de los test que se presentan más adelante para demostrar la correlación entre variables, se recomienda aplicar al menos los tres primeros. En caso que no se verifiquen dichos test de correlación, el análisis con ACP no resultaría válido.
 - Visualizar matriz de correlación: los coeficientes de esta matriz toman valores entre -1 y 1. Estos deben ser variados y no nulos con algún nivel de significancia, de modo que reflejen correlación entre variables. La Tabla 4.19 presenta un ejemplo de esta matriz con 5 parámetros o variables. Se observa que la matriz es simétrica, con valores de 1 en la diagonal y con valores entre 1 y -1 fuera de ella, en donde aquellos destacados en negrita se consideran no nulos.

Tabla 4.19: Ejemplo de matriz de correlación de parámetros.

Variables	V1	V2	V3	V4	V5
V1	1,00	0,35	0,79	0,60	-0,30
V2	0,35	1,00	0,72	0,46	0,14
V3	0,79	0,72	1,00	0,55	0,01
V4	0,60	0,46	0,55	1,00	-0,03
V5	-0,30	0,14	0,01	-0,03	1,00

- Determinante de matriz de correlaciones: este valor debe ser bajo, aunque no nulo, de modo que indique que las variables están linealmente correlacionadas.
- Test de Esfericidad de Bartlett: consiste en un test estadístico donde se contrasta la matriz de correlaciones con la matriz identidad (valores 1 en la diagonal y 0 fuera de ella), siendo la hipótesis nula (H0) que ambas sean iguales. Por lo tanto si se rechaza H0, indica que las variables están relacionadas. A partir de la matriz de correlación se puede calcular un estadístico que distribuye χ^2 con $(k^2 - k)/2$ grados de libertad, donde K es el número de variables, y por tanto si el nivel de significancia es menor al definido, por ejemplo 5% (95% de confianza), se debe rechazar la hipótesis nula.
- Test de Kaiser-Mayer-Olkin: consiste en evaluar el valor del coeficiente KMO, el cual contrasta la magnitud de los coeficientes de correlación observados con la magnitud de los coeficientes de correlación parcial. Un valor del coeficiente KMO entre 0,5 y 1,0, implica que existen correlaciones entre las variables.
- Correlación múltiple (CM): este índice estadístico toma valores entre 0 y 1, y cuantifica la correlación entre una variable y el resto. Por lo tanto deben ser altos de modo que indique correlación entre variables.

- Matriz de correlación anti-imagen: los coeficientes de esta matriz (coeficientes de correlación parcial cambiados de signo) tienen que ser cercanos a cero fuera de la diagonal y próximos a uno en ella.
- Medida de Adecuación Muestral (MSA): consiste en la diagonal de la matriz de correlación anti-imagen. Valores no bajos reflejan que existe correlación entre variables.

b. Selección de factores

Dado que el procedimiento para obtener los factores explica en forma decreciente la varianza total, es posible obtener un gráfico, llamado curva o gráfico de sedimentación, en donde se presenta el valor propio asociado a cada factor en forma decreciente (Figura 4.7). Este gráfico puede ser complementado con la varianza explicada acumulada.

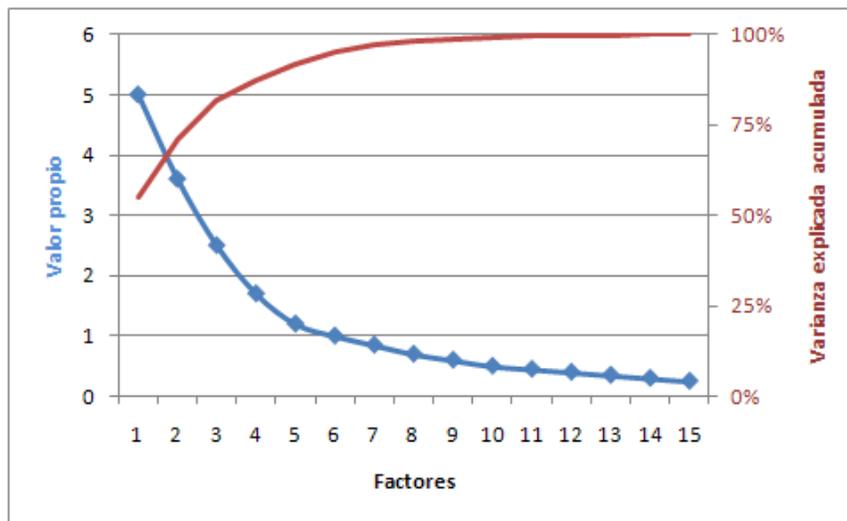


Figura 4.7: Ejemplo de gráfico de sedimentación.

La selección del número de factores puede ser realizada en base a varios criterios que se presentan a continuación, sin embargo todos ellos consideran una cantidad tal que la pérdida de información no sea significativa, es decir aceptar un nivel de explicación de la varianza total. En cualquier caso, los criterios son guías y su aplicación depende de cada caso.

- Porcentaje explicado fijo: adoptar un valor de varianza total explicada, por ejemplo 90%. En el caso de la Figura 4.7 bastaría considerar hasta el factor 4.
- Criterio de Kaiser: sólo considerar factores con valor propio mayor a 1,0. En el caso de la Figura 4.7 bastaría considerar hasta el factor 6.
- Criterio de Kaiser-Jolliffe: sólo considerar factores con valores propios mayores a 0,7. En el caso de la Figura 4.7 bastaría considerar hasta el factor 9.
- Scree-Test de Catell: considerar sólo primeros factores hasta un cambio de pendiente importante en la curva de sedimentación. En el caso de la Figura 4.7 bastaría considerar hasta el factor 5.

c. Matriz de factores

Matriz que indica la correlación entre las variables originales y los factores seleccionados, cada elemento (a_{ij}) es el coeficiente factorial entre un factor (y_j) y una variable original (x_i). Esta matriz contiene información relevante para la interpretación de los factores, pues representa el grado de explicación de una variable en un determinado factor.

	y_1	y_2	\cdots	y_p
x_1	a_{11}	a_{21}	\cdots	a_{1p}
x_2	a_{21}	a_{22}	\cdots	a_{2p}
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
x_n	a_{n1}	a_{n2}	\cdots	a_{np}

Figura 4.8: Matriz de factores o factorial.

d. Interpretación de factores

La interpretación de los factores consiste en entregar un significado semántico o conceptual a cada uno de los factores seleccionados, en base a los antecedentes adicionales o el conocimiento de las relaciones entre variables.

La asignación de una interpretación de cada factor seleccionado puede ser compleja si no se cumplen las siguientes características:

- Los coeficientes factoriales son próximos a 1.
- Una variable tiene coeficientes elevados sólo en un factor.
- No existir factores con coeficientes similares.

En el caso que lo anterior no ocurra, es posible realizar rotación de los ejes para alcanzar dichas características. A continuación se menciona las rotaciones posibles, sin embargo las ortogonales son las más usadas pues no cambian la correlación entre los factores.

- Ortogonales: mantienen la independencia de factores, aunque cambia la varianza explicada de cada factor, la varianza acumulada se mantiene: Varimax (optimiza por factores), Quartimax (optimiza por variables) y Equimax (optimiza por variables y por factores a la vez).
- Oblicuas: no mantienen independencia de factores y por tanto modifica la relación entre variables, por ejemplo Oblimin y Promax.

e. Puntuaciones factoriales

Consiste en una matriz con los valores que toma cada observación en los factores seleccionados. De esta manera se transforman los valores observados en nuevos valores según los factores seleccionados, matemáticamente consiste en una transformación lineal de coordenadas.

f. Representaciones gráficas

- Gráfico Biplot-variables: diagrama de dispersión en donde los ejes son dos factores seleccionados y la ubicación son las cargas factoriales de cada variable en dichos factores. Cada variable queda representada por un vector desde el origen, y con una dirección determinada de acuerdo a su relación con los factores representados. En este gráfico se puede apreciar varias relaciones entre las variables según la longitud de cada vector y el ángulo entre ellos o con los ejes, así como la varianza explicada por ambos factores.

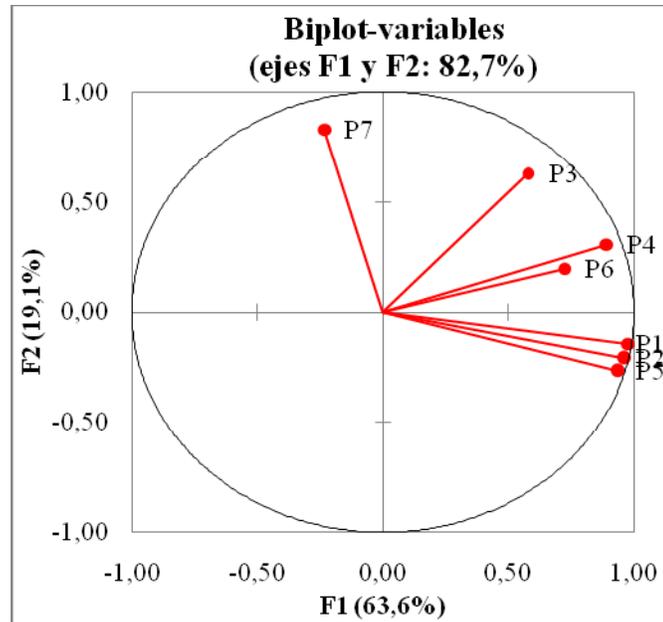


Figura 4.9: Ejemplo de gráfico Biplot-variables.

En las abscisas y ordenadas se presenta el porcentaje de la variable explicada por cada factor, de modo que la suma de ambas indica la varianza total explicada con ambos factores. En este caso el factor 1 y factor 2 explican el 82,7% de la varianza total, 63,6% y 19,1%, respectivamente.

El coseno del ángulo entre cada vector y los ejes de los factores (donde factor 1 es la abscisa y factor 2 es la ordenada) indica el grado de relación con el factor respectivo, por ejemplo: un ángulo cercano a 90° refleja nula relación, un ángulo cercano a cero refleja alta correlación positiva. Del mismo modo el grado de relación entre las variables está marcado por el coseno del ángulo entre ambos vectores, por ejemplo ángulos cercanos a 270° reflejan alta correlación negativa, es decir una variable aumenta en la medida que la otra disminuye. En este caso variables P1, P2 y P5 están muy relacionadas debido al pequeño ángulo entre vectores. Sin embargo la variable P7 no está relacionada con P4 y P6 (muy relacionadas entre ellas), debido al ángulo casi perpendicular entre ellos.

La longitud del vector de cada variable indica el peso relativo de cada una de ellas respecto a las otras, por lo que es deseable encontrar longitudes similares y cercanas a 1. En caso que la longitud sea baja, indica que dicho parámetro tiene menor representación con las componentes principales del gráfico, o bien posee buena representación en factores no graficados. En el caso de la Figura 4.9 sólo la variable P6 está levemente menos representada en los dos factores, pero no marcadamente.

- Gráfico Biplot-valores: diagrama de dispersión (Figura 4.10) en donde los ejes son dos factores seleccionados y la ubicación son las puntuaciones factoriales de cada observación (puntos azules), o bien observaciones adicionales (puntos naranjos) que no fueron utilizadas en los cálculos. Esta representación, en conjunto con características de los puntos de observación (coordenadas, posición en acuífero, cercanía a ciudades o industrias, momento del muestreo, etc.) permite apreciar tendencias espaciales y/o temporales, o similitudes entre ellos, o incluso entre datos de bases de datos distintas. En el ejemplo de la Figura 4.10 se parecía que varios pozos se agrupan tanto en zonas aguas arriba y aguas abajo, como en zonas agrícolas. Por otra parte, se ha agregado observaciones adicionales (puntos naranjos), pudiendo ser agrupadas en la zona de vertientes.

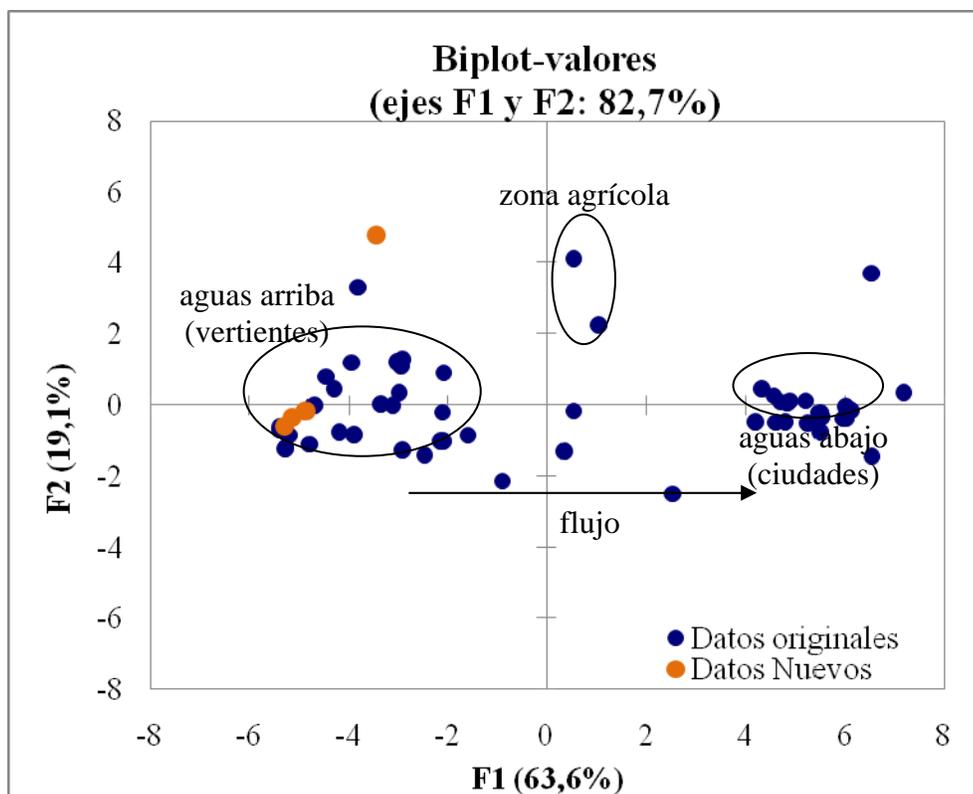


Figura 4.10: Ejemplo de gráfico Biplot-valores.

4.7.2 Interpretación de resultados del ACP

A continuación, para un acuífero cualquiera, se ilustrará como interpretar los resultados al aplicar ACP a la concentración observada de los parámetros químicos Na, Cl, SDT, Ca, Mg, SO₄ y NO₃. La Figura 4.11 presenta el gráfico Biplot-variables con los dos primeros factores o componentes principales.

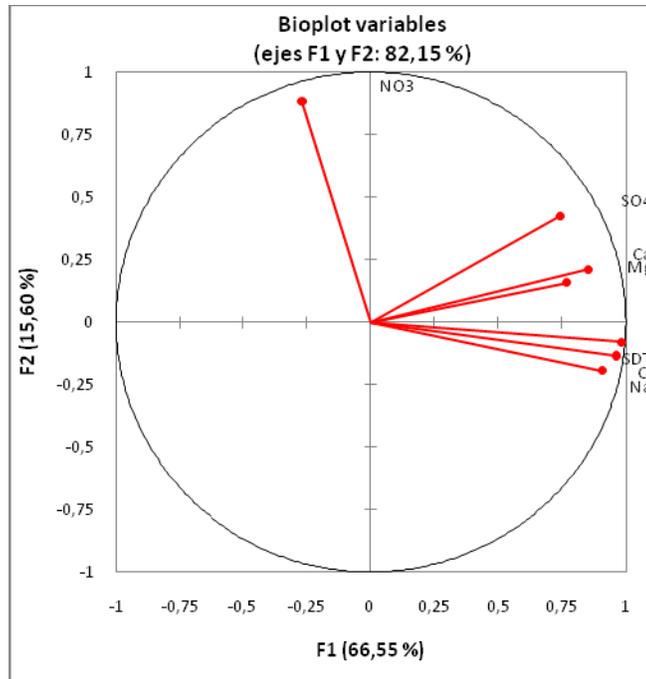


Figura 4.11: Gráfico Biplot-variables de acuífero ejemplo.

En primer lugar se destaca que la varianza total explicada por ambos factores alcanza 82,15% (factor 1: 66,55% y factor 2: 15,60%), por lo que contienen gran parte de la información de los datos originales.

En segundo lugar, la longitud del vector indica el grado de representación de los elementos en el espacio reducido de dos factores o componentes principales representados. Se debe prestar especial atención a este valor cuando un parámetro sea extremadamente pequeño con respecto al resto, puesto que corresponderá a un parámetro que tiene menor representación en las componentes principales del gráfico, o bien posee buena representación en factores no graficados, y por lo tanto no es bien explicado por dichos factores. En el caso de la Figura 4.11 se verifica que todos los parámetros tienen buena representación en los primeros dos factores o componentes principales.

En tercer lugar, a partir del ángulo de los vectores con los ejes, el gráfico muestra (al igual que la matriz de factores) que los parámetros SDT, Na, Cl, Ca y Mg están altamente explicados por el factor 1, el parámetro NO₃ por el factor 2, mientras que el SO₄ es explicado por una

combinación de ambos. Cabe señalar que si se incluyera en el análisis la concentración de metales provenientes de la actividad industrial (por ejemplo Cd, Cu, Cr, Pb y Zn), y por tanto con un alto nivel de correlación entre ellos, probablemente se agruparían entorno a un tercer componente principal asociado a la actividad industrial y no se agruparían entorno a los dos primeros factores (YU, y otros, 1998).

Por otra parte, del ángulo entre los vectores de los parámetros químicos se reconocen varios grupos con muy buena correlación (Na-Cl-SDT y Ca-Mg), y otros que tienen menor o ninguna correlación (SO₄ y NO₃).

A partir de lo anterior, la relación entre parámetros y entre estos y los factores, ya es posible afirmar que los grupos Na-Cl-SDT y Ca-Mg tendrían origen similar, mientras que el NO₃ tiene un origen completamente distinto. Por último el SO₄ tendría un origen combinado.

Cabe mencionar que una interpretación más detallada de los factores requiere mayores antecedentes de la zona de estudio como concentraciones, actividades económicas, industria presentes, geología, etc. En este caso, suponiendo que la concentración de Na-Cl-SDT y Ca-Mg son bajas y se encuentran en rangos atribuibles a condiciones naturales, el factor 1 asociado a dichos grupos se interpretaría como de origen natural. El factor 2 se interpretaría como de origen antrópico, pues el NO₃ generalmente es incorporado por actividades humanas.

La Figura 4.12 presenta el gráfico Biplot-valores con la puntuación factorial de cada observación según los dos factores seleccionados (factor 1 en la abscisa y factor 2 en la ordenada) y con algunos datos adicionales (agua de mar y agua dulce).

Los antecedentes adicionales de las observaciones (ubicación en el acuífero, cercanía a fuentes contaminantes, etc.) permiten agrupar puntos de observaciones con similares características, por ejemplo en la figura se destaca zonas agrícolas, zonas costeras, y zonas áridas.

Además se puede destacar que los puntos con peor calidad química se ubican en la porción alta de los factores, es decir hacia las zonas agrícolas con altos valores de NO₃ (factor 2) y hacia zonas costeras con altos valores de sales disueltas (factor 1). Y por lo tanto, la gran cantidad de observaciones se ubican próximas al origen reflejando una mejor calidad de estas aguas.

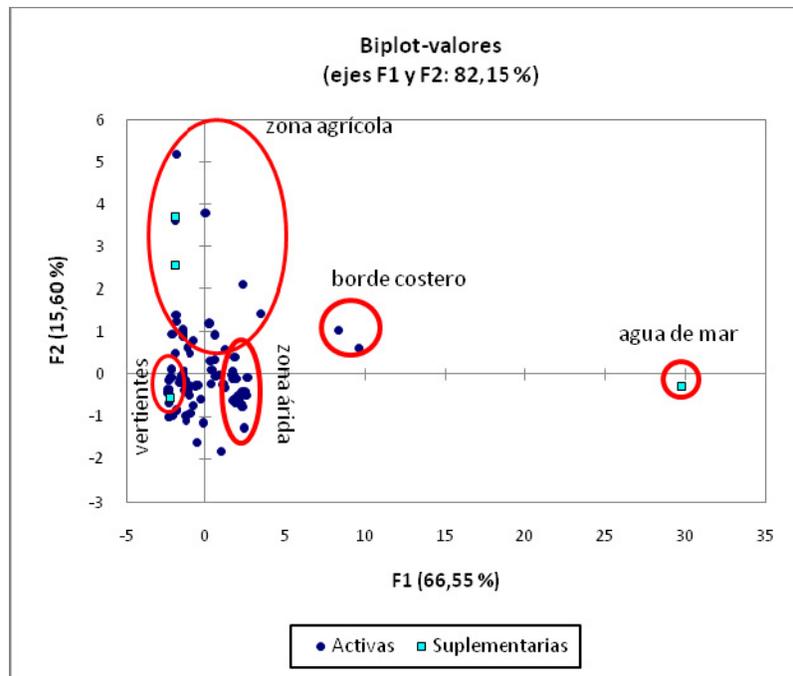


Figura 4.12: Gráfico Biplot-valores de acuífero ejemplo.

En definitiva, como resultado de este análisis estadístico con ACP se obtiene un grupo de parámetros con origen común. En este ejemplo las variables Na, Cl, SDT, Mg y Ca provienen de la misma fuente (y asociado a factor 1), el NO_3 proviene de una fuente distinta (asociado a factor 2), y el SO_4 tienen dos fuentes distintas (y asociado a factor 1 y factor 2).

4.7.3 Cruce de información

Con la finalidad complementar el resultado del ACP, la metodología plantea establecer una interpretación más precisa de los factores seleccionados indicando el posible origen para cada uno de ellos, por ejemplo natural o antrópico, y por consiguiente a los compuestos disueltos seleccionados como parámetros. Para lo anterior resulta necesario conocer otros antecedentes de la zona de estudio como concentraciones observadas, actividad económica, industrias presentes, etc., así como antecedentes complementarios de correlación entre parámetros u origen de estos en las aguas.

Los antecedentes de la zona están disponibles en la metodología a partir de la base de datos química y la caracterización de la zona de estudio. Por otra parte, la metodología propone

utilizar como antecedentes complementarios la Tabla 4.20, que constituye un extracto de la Tabla A1.1 y la Tabla A1.2 propuesta por la OMS respecto a seguridad química en agua potable (OMS, 2007). Esta tabla relaciona un elemento químico con su posible origen, pudiendo ser ocurrencia natural, actividad agrícola, asentamientos humanos, industrial, y producción y distribución de agua potable según la Tabla 4.21.

Tabla 4.20: Posible origen de elementos químicos en el agua.

Elemento	Ocurrencia natural	Actividad agrícola	Asentamientos humanos	Industrial	Producción y distribución de A.P.	Mayores usos
Cl	x		x	x		Producción de químicos industriales (soda cáustica, cloro, sodio, clorito de sodio, hipoclorito de sodio), control de hielo y nieve; producción de fertilizantes.
*Ca	x	x		x		Depósitos naturales, intrusión de agua salina o agua de mar. Industria de prefabricados de la construcción, alimentarias y papeleras. Fertilizantes.
*SO ₄	x	x		x		Fertilizantes; productos químicos; colorantes; vidrio; papel; jabones; textiles; fungicidas; insecticidas astringentes; eméticos; minería, pulpa de madera, industria de metales y galvanizados; tratamiento de aguas servidas; procesamiento de cuero; agente de sedimentación; control de algas
Na	x			x		Fabricación de tetraetilo de plomo y de hidruro de sodio; producción de titanio; catalizador para caucho sintético; reactivos de laboratorio; refrigerante de reactores nucleares; cables de energía eléctrica; alumbrado público; generadores de energía solar; tratamiento de aguas.
*Mg	x	x		x		Abundante en la naturaleza, y se halla en minerales rocosos, además se encuentra en el agua de mar, salmueras subterráneas y lechos salinos. Fertilizantes. Industria metalúrgica y papelería.
NO ₃		x	x	x		Fertilizantes inorgánicos; agente oxidante; producción de explosivos; confección de vidrio.

Tabla 4.20: Posible origen de elementos químicos en el agua.

Elemento	Ocurrencia natural	Actividad agrícola	Asentamientos humanos	Industrial	Producción y distribución de A.P.	Mayores usos
Al			x	x	x	Antiácidos; vacunas; antitranspirantes; aditivo de comidas; floculantes;
Fe	x			x	x	Tuberías de agua potable; pigmentos en pinturas y plásticos, colorantes de comida; tratamiento de deficiencia en humanos; coagulante
Mn	x			x		Aleaciones (acero, hierro); baterías; vidrio; extinción de incendio; oxidante con propósito de limpieza, blanqueamiento y desinfección.
As	x			x		Agentes de aleación en la fabricación de transistores, láser, y semiconductores; transformación de vidrio, pigmentos textiles, papel, adhesivos de metal, madera y, municiones; plaguicidas, productos farmacéuticos

Fuente: OMS (2007). *Fuentes complementarias: GONZÁLEZ y ORTIZ (2004), LENNTECH (2008).

Tabla 4.21: Categorización del origen de elementos químicos en el agua.

Fuente	Ejemplos
Ocurrencia natural (incluye ocurrencia natural de toxinas de algas)	Rocas y suelos, cianobacterias en aguas superficiales.
Actividad agrícola (incluye pesticidas)	Aplicación de purines, fertilizantes y pesticidas; prácticas intensivas de producción animal.
Asentamientos humanos (incluye aquellos usados con propósitos de salud pública, por ejemplo control de vectores)	Disposición de basura y aguas servidas, escurrimiento urbano, pérdidas de combustible.
Industrial	Manufactura, procesamiento y minería.
Producción y distribución de agua potable	Químicos de tratamiento de aguas; corrosión y/o depositación proveniente de estanques de almacenamiento y tuberías.

Fuente: OMS (2007).

4.7.4 Resultado del origen de compuestos disueltos

En definitiva, mediante el cruce de información del análisis de ACP, la información de la OMS (2007) y los antecedentes disponibles es posible identificar el origen de parámetros químicos de modo de caracterizar más precisamente el origen de la calidad obtenida en el sector acuífero. El resultado final del análisis estadístico para determinar el origen de compuestos disueltos es una tabla que relaciona cada parámetro con una posible fuente, como la Tabla 4.22 que resume el análisis de origen para el ejemplo presentado en la sección 4.7.2.

Tabla 4.22: Ejemplo de resultado final análisis de origen de compuestos disueltos.

Parámetros	Posible origen
Na, Cl, SDT	Natural (condiciones hidrogeoquímicas)
Ca, Mg	Natural (condiciones hidrogeoquímicas)
NO ₃	Antrópico (agrícola)
SO ₄	Natural y Antrópico (agrícola)

En el caso del ejemplo presentado en la sección 4.7.2 (Figura 4.11 y Figura 4.12) se obtiene que el grupo Na-Cl-SDT, de acuerdo a Tabla 4.20, tiene fuente común la ocurrencia natural o industrial, sin embargo si las concentraciones son tales que no permiten relacionarlas a alguna industria, probablemente el origen sea natural. Dado que estos elementos se asocian al factor 1, se asigna un origen natural a este factor.

Por otra parte el NO_3 , y por consiguiente el factor 2, tendrían origen antrópico ya que, de acuerdo a Tabla 4.20, las fuentes pueden ser actividad agrícola, asentamientos humanos y/o industrial. Suponiendo que los antecedentes disponibles indican que existen varios pozos en zonas agrícolas, así como ausencia de industrias contaminantes de Nitratos, el origen puede establecerse como antrópico-agrícola.

En el caso del SO_4 , dado que está asociado tanto al factor 1 como a la factor 2, probablemente tiene un origen natural y antrópico, lo que resulta consistente con lo planteado por la Tabla 4.20. En último caso el grupo Ca-Mg está asociado principalmente al factor 1, por lo que su origen probable es natural.

5 APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS

En este capítulo se describe la aplicación de la metodología desarrollada para la clasificación de acuíferos en cuanto a su calidad química para los tres sectores acuíferos elegidos, es decir: El Loa, Los Choros y Aconcagua.

La descripción se presenta ordenada de la misma manera en que se presenta la metodología en el Capítulo 4, es decir, se detalla el procesamiento de la información y luego los resultados (mapas temáticos) para cada uno de los pasos de metodológicos definidos. Primero en base a los antecedentes disponibles de análisis químicos de aguas subterráneas se realiza la elección de los parámetros que se considerarán en el Grupo 2 y el análisis de los datos. En segundo lugar se determina el IC, individual y general del acuífero según los criterios antes descritos y los mapas de isoconcentración de cada uno de los parámetros, obtenidos por interpolación espacial. En tercer lugar, se realiza el análisis estadístico para identificar origen de la calidad en base a las concentraciones observadas de cada parámetro. En cuarto lugar, corresponde realizar el análisis temporal de la calidad del acuífero para indicar su tendencia en el tiempo, aunque no existen datos del IC del acuífero de períodos distintos. Finalmente se presenta un mapa del acuífero con la correspondiente calidad y la caracterización de origen y temporal.

Todos los cálculos se realizaron bajo la plataforma ArcGIS®, con el apoyo de Excel®, donde se realizó la interpolación y las posteriores clasificaciones del IC individual y el IC general. Se eligió esta plataforma debido a que contiene una gran cantidad de opciones de interpolación y contiene opciones de cálculo. Cada uno de estos cálculos arroja como resultado mapas de los acuíferos donde se representa espacialmente los distintos índices de calidad.

5.1 Elección de sectores-acuífero para la aplicación de la metodología

Las bases del proyecto propusieron 12 sectores acuíferos para determinar en cuál o cuáles permitirían la aplicación de la metodología diseñada, en función de la calidad y cantidad de la información disponible. En las primeras etapas del estudio se recopiló y analizó toda la información respecto de los acuíferos propuestos (red de medición de niveles y calidad química de aguas subterráneas de la DGA y otros estudios). En base a esta información se realizó un exhaustivo análisis para definir los tres sectores acuíferos posibles para la

aplicación de la metodología propuesta, a saber: El Loa (como sector piloto), Aconcagua y Los Choros (como sectores para validar la metodología). A continuación se presenta las tablas resumen de estos sectores acuífero respecto a la información disponible de ellos, mientras que en los Anexos (Sección 1.1) se encuentra las fichas del resto de los sectores acuíferos estudiados.

Tabla 5.1: Ficha resumen de información disponible sector acuífero El Loa.

SECTOR ACUÍFERO RÍO LOA			
<i>II Región de Antofagasta</i>			
Cantidad y tipo de acuíferos:	2 (libre-confinado)	Nº de pozos con datos de química:	1
Localización de acuífero:	Altiplánico	Superficie por punto (km ²):	7.950,38
Superficie acuífero (km ²):	7.950,38	Nº de pozos con datos de niveles:	14
Profundidad acuífero:	-	Superficie por punto(km ²):	567,88
Prof. nivel piezométrico:	-	Nº de pozos con datos de derechos:	206
Caudal total otorgado (L/s):	2.805	Superficie por punto (km ²):	38,59

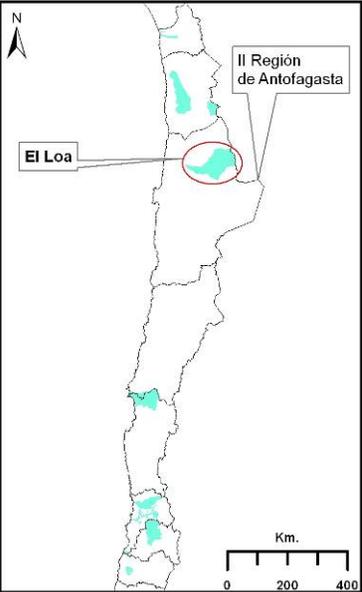
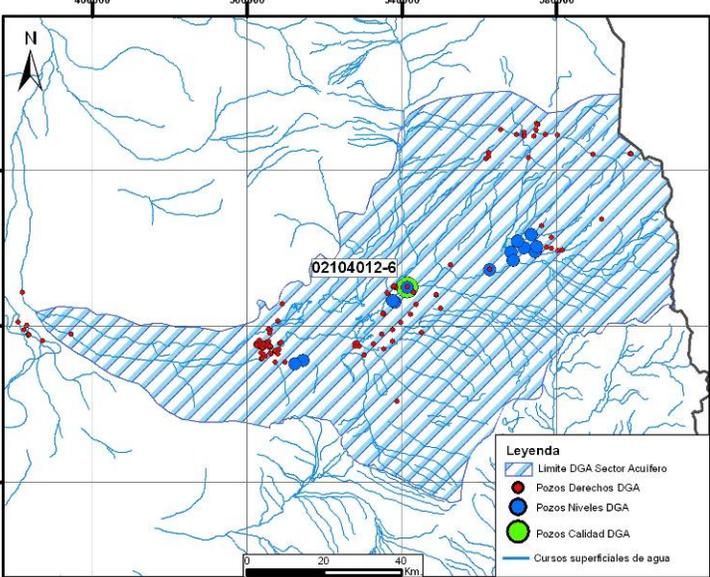
<i>Localización sector acuífero</i>	<i>Detalle sector acuífero y pozos DGA con información</i>
 <p>This map shows the outline of Chile with several regions highlighted in light green. A callout box labeled 'II Región de Antofagasta' points to a specific area in the north. Within this region, another callout box labeled 'El Loa' points to a red-shaded area, indicating the location of the aquifer sector.</p>	 <p>This detailed map shows the Loa sector with a blue hatched area representing the 'Limite DGA Sector Acuífero'. It includes numerous red dots for 'Pozos Derechos DGA', blue dots for 'Pozos Niveles DGA', and green dots for 'Pozos Calidad DGA'. A specific well is labeled '02104012-6'. Blue lines represent 'Cursos superficiales de agua'. The map includes a coordinate grid, a north arrow, and a scale bar from 0 to 40 km.</p>

Tabla 5.1: Ficha resumen de información disponible sector acuífero El Loa. (cont.).

INFORMACIÓN DATOS DGA				
Calidad química:				
	Nº de pozos:	1	<i>Extensión de los registros (años)</i>	
	Nº de pozos vigentes:	1	5-9:	0
	Nº promedio análisis por pozo:	28	9-12:	1
	% de análisis con B. Iónico correcto:	87%	12-15:	0
<i>Valores temporales (extensión de registro) de parámetros físico-químicos</i>				
<i>Promedios</i>				
	Cond. eléctrica (µmhos/cm):	5.714,4	Na (mg/L):	785,2
	pH (u. pH):	7,9	Ca (mg/L):	101,6
			Mg (mg/L):	67,8
			K (mg/L):	80,2
			Cl (mg/L):	1.772,3
			HCO ₃ (mg/L):	215,0
			SO ₄ (mg/L):	65,0
			CO ₃ (mg/L):	4,3
<i>Máximos</i>				
	Cond. eléctrica (µmhos/cm):	16.209,0	Na (mg/L):	2.980,0
	pH (u. pH):	8,5	Ca (mg/L):	184,2
			Mg (mg/L):	264,0
			K (mg/L):	234,0
			Cl (mg/L):	5.533,8
			HCO ₃ (mg/L):	381,4
			SO ₄ (mg/L):	750,0
			CO ₃ (mg/L):	38,4
<i>Mínimos</i>				
	Cond. eléctrica (µmhos/cm):	2.282,0	Na (mg/L):	87,5
	pH (u. pH):	6,6	Ca (mg/L):	38,0
			Mg (mg/L):	25,0
			K (mg/L):	3,9
			Cl (mg/L):	634,6
			HCO ₃ (mg/L):	135,8
			SO ₄ (mg/L):	0,0
			CO ₃ (mg/L):	0,0
<i>Desviación estándar</i>				
	Cond. eléctrica (µmhos/cm):	3.664,4	Na (mg/L):	642,6
	pH (u. pH):	0,5	Ca (mg/L):	43,7
			Mg (mg/L):	53,1
			K (mg/L):	61,0
			Cl (mg/L):	1.380,0
			HCO ₃ (mg/L):	68,5
			SO ₄ (mg/L):	161,2
			CO ₃ (mg/L):	9,2
<i>Otros parámetros analizados:</i>				
Ag, Al, As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Zn, P(PO ₄)				
Datos Niveles:				
	Nº de Pozos:	14	<i>Extensión de los registros (años)</i>	
	Nº de Pozos con cota:	8	0 - 10:	5
	Nº de Pozos vigentes:	8	10 - 20:	9
	Nº de Pozos suspendidos:	6	+ de 20:	0
	Calidad de la información:	R		
B (Buena): Más de 20 pozos con buena calidad de coordenadas y cotas				
R (Regular): Menos de 20 pozos con buena calidad de coordenadas y cotas				
D (Deficiente): Menos de 20 pozos con coordenadas a corregir				
Datos Derechos :				
	Nº Solicitudes:	206	<i>Usos</i>	
	Aprobados, Ley 20017:	117	Agua Potable:	0
	Provisorios:	0	Riego:	20
	Pendientes:	10	Minería:	108
	Denegados:	79	Industria:	8
	Caudal total aprobado (L/s):	2.805	Otros usos:	58
			Sin información:	14

Tabla 5.1: Ficha resumen de información disponible sector acuífero El Loa. (cont.).

INFORMACIÓN ESTUDIOS Y DOCUMENTOS RECOPIRADOS		
N° Estudios considerados: 4		
N° Estudios útiles: 3		
Calidad Química:		
N° Análisis químicos:	249	N° Estudios con muestras en agua superficial: 1
N° Puntos de muestreo:	128	N° Estudios con muestras en agua subterránea: 2
N° Puntos con medición temporal:	67	N° de Estudios con datos nuevos: 2
N° Estudios con parámetros principales:		
Cond. eléctrica:	2	Mg: 1
pH:	1	Cl: 1
Na:	1	HCO ₃ : 1
Ca:	1	SO ₄ : 1
N° Estudios con parámetros isotópicos:		
d ¹⁸ O:	2	d ² H: 2
		Tritio: 2
N° Estudios con otros parámetros:		
CO ₃ :	1	Br: 0
As:	1	Cianuro: 0
B:	2	CO ₂ : 0
Cu:	0	Col Fec: 0
Fe:	0	Col Totales: 0
Pb:	0	Color aparente: 0
PO ₄ :	0	Cr: 0
NO ₃ :	2	DBO ₅ : 0
Nitrito:	1	Densidad: 0
SS:	0	Dureza: 0
ST:	1	F: 0
Alc:	1	I: 0
Al:	0	K: 1
		Li: 1
		M ₂ CO ₃ : 0
		Mn: 0
		Mo: 0
		OD: 0
		RAS: 0
		RASO: 0
		S: 0
		Si O ₂ : 1
		Sn: 0
		Zn: 0
		T°: 1
N° Estudios con caracterización de:		
Niveles de agua:	1	Activ. prod. pot. contaminantes: 1
Uso de suelo:	0	Zona de riesgo tradicional: 0
Demanda ambiental suelos:	0	Zona disposición de riles: 0
Carga contaminante existente:	0	Descarga de riles: 0

Tabla 5.2: Ficha resumen de información disponible sector acuífero Los Choros.

SECTOR ACUÍFERO LOS CHOROS			
<i>IV Región de Coquimbo</i>			
Cantidad y tipo de acuífero:	2 (libre-conf.)	Nº de pozos con datos de química:	2
Localización de acuífero:	Costero	Superficie por punto (km ²):	7.139,86
Superficie acuífero (km ²):	14.279,71	Nº de pozos con datos de niveles:	13
Profundidad acuífero:	-	Superficie por punto(km ²):	1.098,94
Prof. nivel piezométrico:	-	Nº de pozos con datos de derechos:	316
Caudal total otorgado (L/s):	3.476	Superficie por punto (km ²):	45,19

Localización sector acuífero

Detalle sector acuífero y pozos DGA con información

Tabla 5.2: Ficha resumen de información disponible sector acuífero Los Choros. (cont.)

INFORMACIÓN DATOS DGA						
Calidad química:						
	Nº de pozos:	2	<i>Extensión de los registros (años)</i>			
	Nº de pozos vigentes:	2	5-9:	0		
	Nº promedio análisis por pozo:	38	9-12:	0		
	% de análisis con B. Iónico correcto:	92 %	12-15:	2		
<i>Valores temporales (extensión de registro) de parámetros físico-químicos</i>						
<i>Promedios</i>						
	Cond. eléctrica (µmhos/cm):	977,7	Na (mg/L):	118,6	Cl (mg/L):	166,0
	pH (u. pH):	8,0	Ca (mg/L):	55,8	HCO ₃ (mg/L):	153,2
			Mg (mg/L):	21,1	SO ₄ (mg/L):	120
			K (mg/L):	6,0	CO ₃ (mg/L):	0,8
<i>Máximos</i>						
	Cond. eléctrica (µmhos/cm):	1.630,0	Na (mg/L):	170,5	Cl (mg/L):	239,8
	pH (u. pH):	9,4	Ca (mg/L):	123,6	HCO ₃ (mg/L):	219,7
			Mg (mg/L):	42,6	SO ₄ (mg/L):	260,0
			K (mg/L):	67,2	CO ₃ (mg/L):	17,0
<i>Mínimos</i>						
	Cond. eléctrica (µmhos/cm):	217,9	Na (mg/L):	90,2	Cl (mg/L):	104,6
	pH (u. pH):	6,7	Ca (mg/L):	4,8	HCO ₃ (mg/L):	97,3
			Mg (mg/L):	2,0	SO ₄ (mg/L):	0,0
			K (mg/L):	1,6	CO ₃ (mg/L):	0,0
<i>Desviación estándar</i>						
	Cond. eléctrica (µmhos/cm):	259,5	Na (mg/L):	14,1	Cl (mg/L):	32,4
	pH (u. pH):	0,5	Ca (mg/L):	29,0	HCO ₃ (mg/L):	29,7
			Mg (mg/L):	9,9	SO ₄ (mg/L):	69,8
			K (mg/L):	5,6	CO ₃ (mg/L):	2,8
<i>Otros parámetros analizados:</i>						
Ag, Al, As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Zn, N(NO ₂), P(PO ₄)						
Datos Niveles:						
	Nº de Pozos:	13	<i>Extensión de los Registros (años)</i>			
	Nº de Pozos con cota:	0	0 - 10:	0		
	Nº de Pozos vigentes:	13	10 - 20:	2		
	Nº de Pozos suspendidos:	0	+ de 20:	11		
	Calidad de la información:	D				
B (Buena): Más de 20 pozos con buena calidad de coordenadas y cotas						
R (Regular): Menos de 20 pozos con buena calidad de coordenadas y cotas						
D (Deficiente): Menos de 20 pozos con coordenadas a corregir						
Datos Derechos :						
	Nº Solicitudes:	316	<i>Usos</i>			
	Aprobados, Ley 20017:	257	Agua Potable:	28	Industria:	0
	Provisorios:	0	Riego:	263	Otros usos:	0
	Pendientes:	4	Minería:	108	Sin información:	2
	Denegados:	55				
	Caudal total aprobado (L/s):	3.476				

Tabla 5.2: Ficha resumen de información disponible sector acuífero Los Choros. (cont.)

INFORMACIÓN ESTUDIOS Y DOCUMENTOS RECOPIRADOS			
N° Estudios considerados:		7	
N° Estudios útiles:		7	
Calidad Química:			
N° Análisis químicos:	46	N° Estudios con muestras en agua superficial:	0
N° Puntos de muestreo:	34	N° Estudios con muestras en agua subterránea:	2
N° Puntos con medición temporal:	12	N° de Estudios con datos nuevos:	2
N° Estudios con parámetros principales:			
Cond. eléctrica:	2	Mg:	2
pH:	2	Cl:	2
Na:	2	HCO ₃ :	2
Ca:	2	SO ₄ :	2
N° Estudios con parámetros isotópicos:			
d ¹⁸ O:	0	d ² H:	0
		Tritio:	0
N° Estudios con otros parámetros:			
CO ₃ :	1	Br:	0
As:	0	Cianuro:	0
B:	0	CO ₂ :	0
Cu:	0	Col Fec:	0
Fe:	0	Col Totales:	0
Pb:	0	Color aparente:	0
PO ₄ :	0	Cr:	0
NO ₃ :	2	DBO ₅ :	0
Nitrito:	1	Densidad:	0
SS:	1	Dureza:	1
ST:	2	F:	0
Alc:	0	I:	0
Al:	0	K:	1
N° Estudios con caracterización de:			
Niveles de agua:	7	Activ. prod. pot. contaminantes:	0
Uso de suelo:	1	Zona de riesgo tradicional:	0
Demanda ambiental suelos:	0	Zona disposición de riles:	0
Carga contaminante existente:	0	Descarga de riles:	0

Tabla 5.3: Ficha resumen de información disponible sector acuífero Aconcagua.

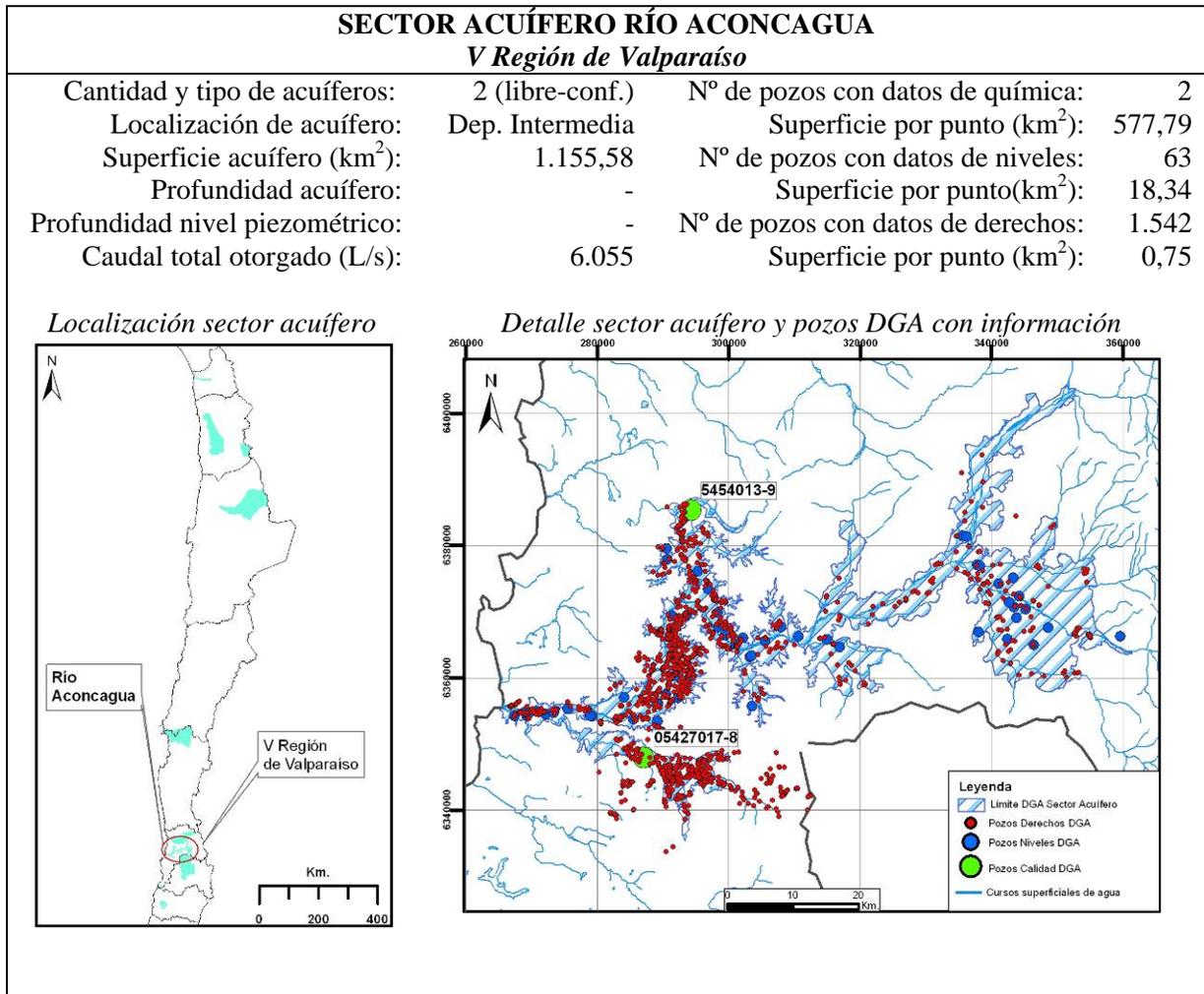


Tabla 5.3: Ficha resumen de información disponible sector acuífero Aconcagua. (cont.)

INFORMACIÓN DATOS DGA					
Calidad química:					
	Nº de pozos:	2	<i>Extensión de los registros (años)</i>		
	Nº de pozos vigentes:	2	5-9: 0		
	Nº promedio análisis por pozo:	29	9-12: 1		
	% de análisis con B. Iónico correcto:	91 %	12-15: 1		
<i>Valores temporales (extensión de registro) de parámetros físico-químicos</i>					
<i>Promedios</i>					
			Na (mg/L):	35,2	Cl (mg/L): 39
Cond. eléctrica (µmhos/cm):	759,1		Ca (mg/L):	96,7	HCO ₃ (mg/L): 175,2
pH (u. pH):	7,7		Mg (mg/L):	28,5	SO ₄ (mg/L): 208,4
			K (mg/L):	2,1	CO ₃ (mg/L): 2,5
<i>Máximos</i>					
			Na (mg/L):	57,3	Cl (mg/L): 218,8
Cond. eléctrica (µmhos/cm):	1.159,0		Ca (mg/L):	220,0	HCO ₃ (mg/L): 261,3
pH (u. pH):	8,7		Mg (mg/L):	95,9	SO ₄ (mg/L): 445,0
			K (mg/L):	32,0	CO ₃ (mg/L): 19,3
<i>Mínimos</i>					
			Na (mg/L):	2,8	Cl (mg/L): 15,3
Cond. eléctrica (µmhos/cm):	8,2		Ca (mg/L):	45,0	HCO ₃ (mg/L): 10,4
pH (u. pH):	6,2		Mg (mg/L):	10,4	SO ₄ (mg/L): 40,2
			K (mg/L):	0,6	CO ₃ (mg/L): 0,0
<i>Desviación estándar</i>					
			Na (mg/L):	8,4	Cl (mg/L): 22,5
Cond. eléctrica (µmhos/cm):	224,1		Ca (mg/L):	30,4	HCO ₃ (mg/L): 37,8
pH (u. pH):	0,6		Mg (mg/L):	10,1	SO ₄ (mg/L): 62,8
			K (mg/L):	3,0	CO ₃ (mg/L): 4,7
<i>Otros parámetros analizados:</i>					
Ag, Al, As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Zn, P(PO ₄)					
Datos Niveles:					
	Nº de Pozos:	63	<i>Extensión de los registros (años)</i>		
	Nº de Pozos con cota:	35	0 - 10: 2		
	Nº de Pozos vigentes:	59	10 - 20: 4		
	Nº de Pozos suspendidos:	4	+ de 20: 57		
	Calidad de la información:	B			
B (Buena): Más de 20 pozos con buena calidad de coordenadas y cotas					
R (Regular): Menos de 20 pozos con buena calidad de coordenadas y cotas					
D (Deficiente): Menos de 20 pozos con coordenadas a corregir					
Datos Derechos :					
	Nº Solicitudes:	1.542	<i>Usos</i>		
Aprobados, Ley 20017:	909	Agua Potable:	189	Industria:	0
Provisorios:	0	Riego:	1.335	Otros usos:	0
Pendientes:	25	Minería:	18	Sin información:	0
Denegados:	608				
Caudal total aprobado (L/s):	6.055				

Tabla 5.3: Ficha resumen de información disponible sector acuífero Aconcagua. (cont.)

INFORMACIÓN ESTUDIOS Y DOCUMENTOS RECOPIRADOS		
N° Estudios considerados: 6		
N° Estudios útiles: 4		
Calidad Química:		
N° Análisis químicos: 0	N° Estudios con muestras en agua superficial: 0	
N° Puntos de muestreo: 0	N° Estudios con muestras en agua subterránea: 0	
N° Puntos con medición temporal: 0	N° de Estudios con datos nuevos: 0	
N° Estudios con parámetros principales:		
Cond. eléctrica: 0	Mg: 0	
pH: 0	Cl: 0	
Na: 0	HCO ₃ : 0	
Ca: 0	SO ₄ : 0	
N° Estudios con parámetros isotópicos:		
d ¹⁸ O: 0	d ² H: 0	Tritio: 0
N° Estudios con otros parámetros:		
CO ₃ : 0	Br: 0	Li: 0
As: 0	Cianuro: 0	M ₂ CO ₃ : 0
B: 0	CO ₂ : 0	Mn: 0
Cu: 0	Col Fec: 0	Mo: 0
Fe: 0	Col Totales: 0	OD: 0
Pb: 0	Color aparente: 0	RAS: 0
PO ₄ : 0	Cr: 0	RASO: 0
NO ₃ : 0	DBO ₅ : 0	S: 0
Nitrito: 0	Densidad: 0	Si O ₂ : 0
SS: 0	Dureza: 0	Sn: 0
ST: 0	F: 0	Zn: 0
Alc: 0	I: 0	T°: 0
Al: 0	K: 0	
N° Estudios con caracterización de:		
Niveles de agua: 0	Activ. prod. pot. contaminantes: 0	
Uso de suelo: 0	Zona de riesgo tradicional: 0	
Demanda ambiental suelos: 0	Zona disposición de riles: 0	
Carga contaminante existente: 0	Descarga de riles: 0	

El estudio entrega una herramienta que permite caracterizar cualquier sector acuífero en el país, debido a esto a que los sectores acuíferos seleccionados interpretan distintas realidades geográficas de Chile, distintas características físicas del territorio, como también distintas características en lo que se refiere a actividades antrópicas desarrolladas. Por ejemplo el sector acuífero El Loa representa características hidrogeológicas propias de los acuíferos del norte del país, además se puede relacionar a la actividad minera del norte grande con una potencial contaminación específica. El sector acuífero Los Choros es interesante de estudiar debido a los

problemas de intrusión salina que tienen la mayoría de los acuíferos costeros, que en cierta medida se ven afectados con el aumento de la extracción de agua subterránea debido a las distintas actividades antrópicas que se pueden desarrollar en esas áreas. Por último el sector acuífero Aconcagua representa a los acuíferos típicos de la zona central del país, los cuales poseen una fuerte demanda por el recurso hídrico utilizado en la industria, agua potable y riego, entre otras. Además de esta fuerte demanda por el recurso, están muy susceptibles a ser contaminados por los distintos residuos que producen las actividades antrópicas que se desarrollan.

5.2 Sector acuífero El Loa

5.2.1 Antecedentes disponibles

Este acuífero está ubicado en la II Región de Antofagasta, al interior de la cuenca del Río Loa y posee un comportamiento exorreico. Los escurrimientos principales son el río San Pedro, El Loa, Salado y El Salvador y las quebradas Llalqui y León. El acuífero posee un área de 7.950 km² y se extiende desde el valle central hasta la Cordillera de los Andes. Entre las ciudades importantes se puede mencionar a Calama con 136.600 habitantes (Censo 2002).

La hidrogeología del sector acuífero la componen depósitos no consolidados, con rocas volcánicas fracturadas y rocas carbonatadas, en tres zonas características: Calama, Llalqui y León. Existen dos acuíferos, uno superior de condición libre y con espesor máximo de 100 m, y otro inferior del tipo confinado y cuyo espesor puede alcanzar los 200 m. Ambos acuíferos se encuentran separados por un estrato confinante con espesor entre 0 y 200 m (DICTUC, 2005).

La metodología describe la calidad de un acuífero, por lo que en este sector acuífero como se reconocen dos, uno superior libre y otro inferior confinado, sería necesario aplicarla a cada uno de ellos en forma independiente.

En este acuífero se cuenta con la información del estudio "Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, S.I.T. N°85" (DGA, 2003). Se debe tener en cuenta que los datos disponibles (Anexos, Sección 4.1.1) en este sector acuífero son

pocos, con una densidad muy baja, y con deficiente distribución. Además las mediciones corresponden a distintas fechas (años 1999 y año 2000) o éstas son desconocidas.

Del estudio antes mencionado se seleccionaron 38 puntos que pertenecen al acuífero superior, y en el cual se aplicó la metodología por contar con más datos y revestir mayor riesgo de afectación antrópica.

A partir de los puntos seleccionados y su ubicación se realizó la caracterización de tres zonas del acuífero, donde se consideró que la información disponible era aceptable para la interpolación de la información y la aplicación de la metodología (ver Figura 5.1). En otras palabras, en base a la información disponible no fue posible realizar un análisis del sector acuífero completo. Estas tres zonas abarcan 1.991 km² y fueron delimitados considerando un radio máximo de interpolación de 8 km por pozo, que representa un área de 200 km² para cada pozo.

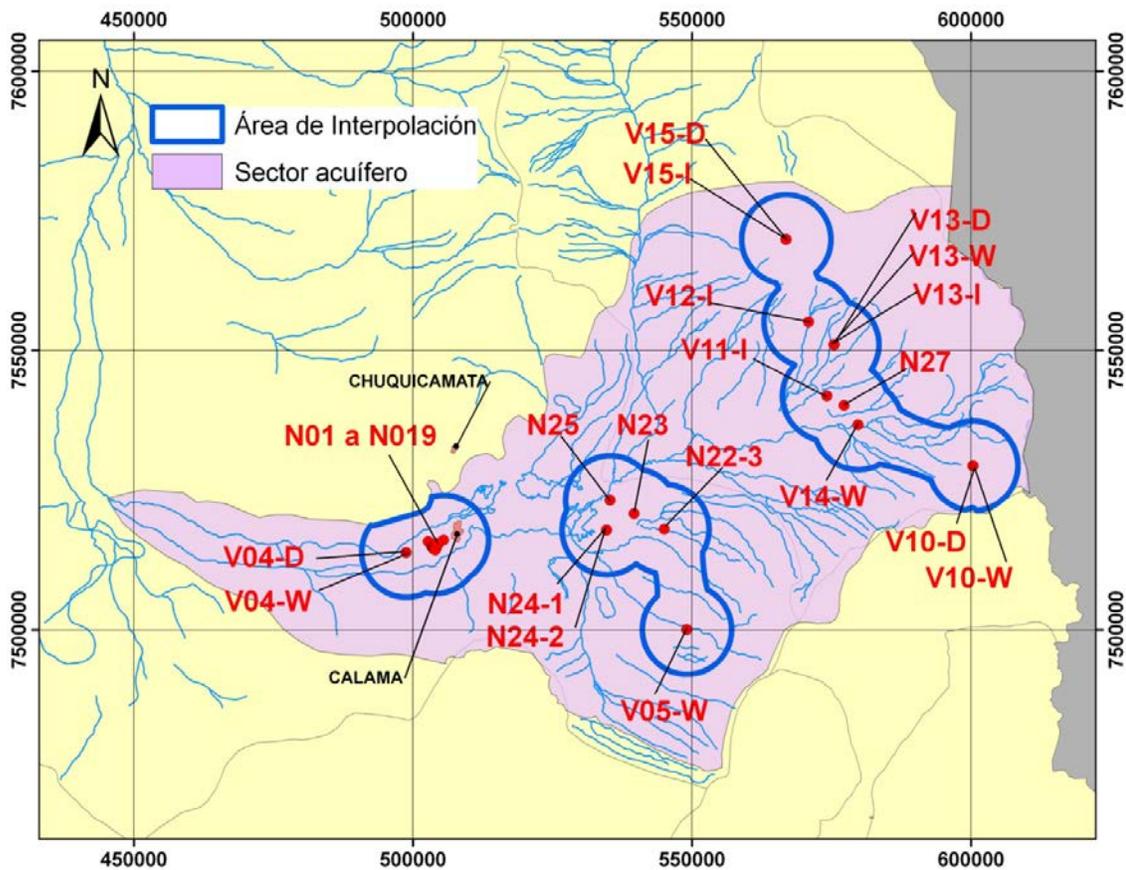


Figura 5.1: Distribución de los puntos de muestreo en sector acuífero El Loa.

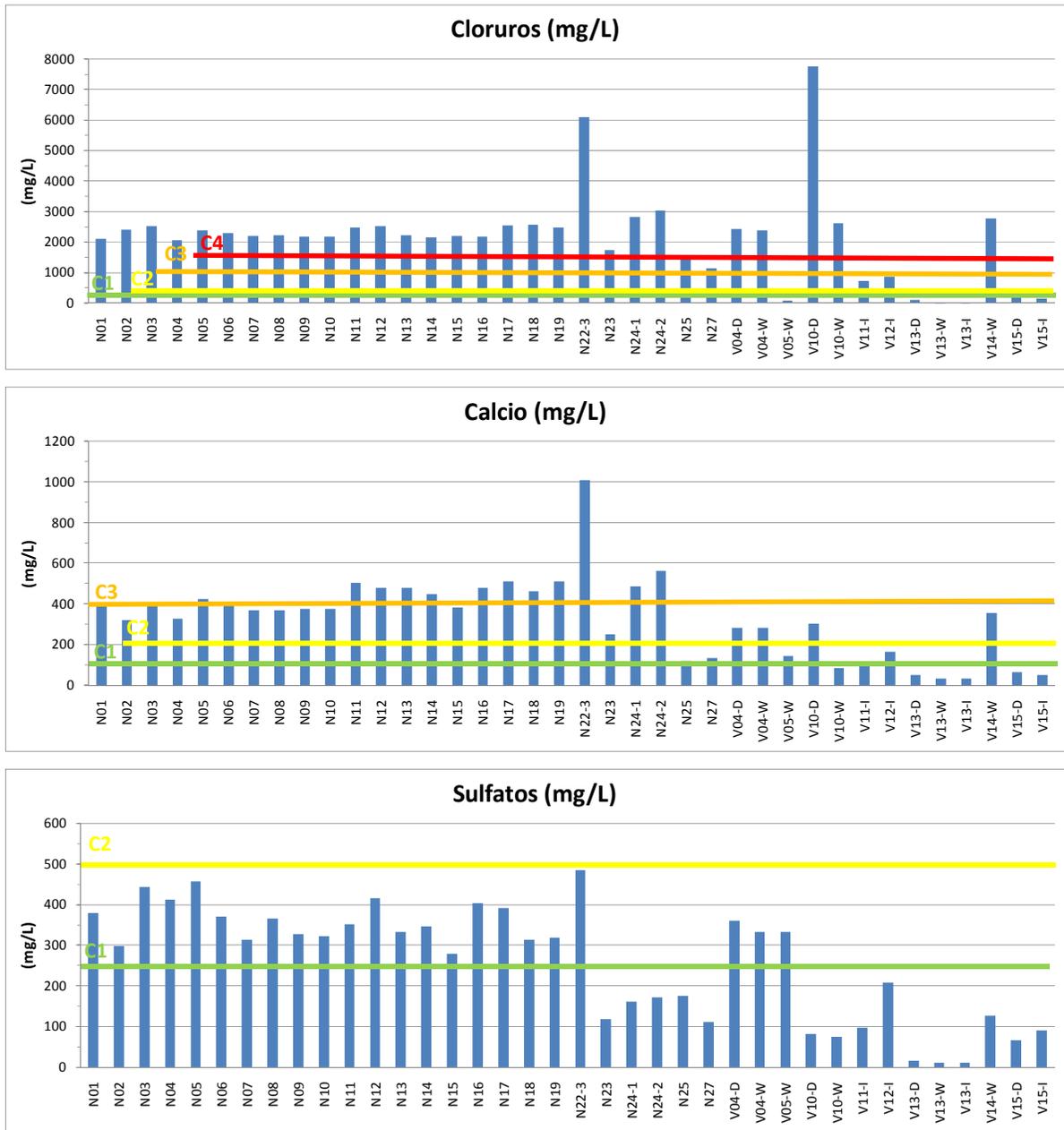
5.2.2 Elección de parámetros locales

Como se explicó anteriormente, para el grupo 2 se deben elegir dos parámetros locales además de Nitratos (NO_3) que es fijo. Sin embargo, para este sector solo se eligió el Arsénico (As), ya que es el único parámetro que cuenta con datos en todos los puntos seleccionados y que presenta valores elevados en la zona.

5.2.3 Análisis de datos medidos.

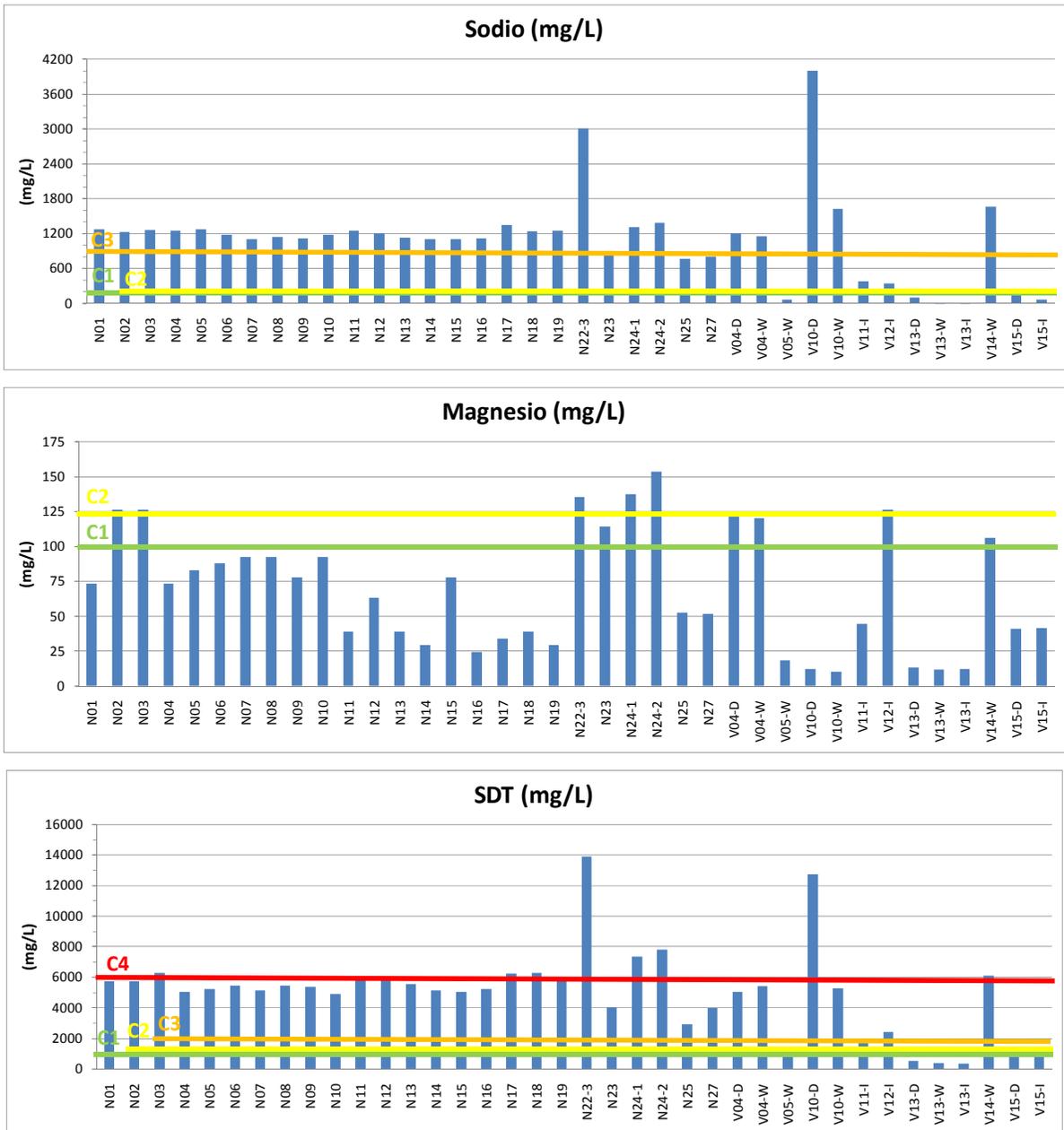
Previo a la interpolación se revisó la calidad de los datos de los análisis químicos para cada uno de los parámetros, con la finalidad de detectar datos dudosos y definir el método de interpolación a utilizar. La base de datos se encuentra en Anexos (Sección 4.1.1).

De acuerdo a la Tabla 4.13 y la Tabla 4.14, en este sector acuífero se presentan parámetros con calidad intratable tanto en el Grupo 1 como en el Grupo 2. En la Figura 5.2 se presenta los parámetros observados para el Grupo 1 junto con la línea de los límites de separación de las clases de calidad. En este sector se aprecia que los parámetros más altos corresponden a los Cloruros, Sólidos Disueltos Totales, Sodio y Calcio, que sobrepasan el límite de calidad Insuficiente ($\text{IC} \geq 3$) en muchos de los puntos, y en el caso de los Cloruros la mayoría de los puntos están dentro del rango de Intratable. Los puntos con mayores valores son el N22-3 y V10-D.



En las abscisas se presentan los puntos de observación

Figura 5.2: Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte, sector acuífero El Loa.

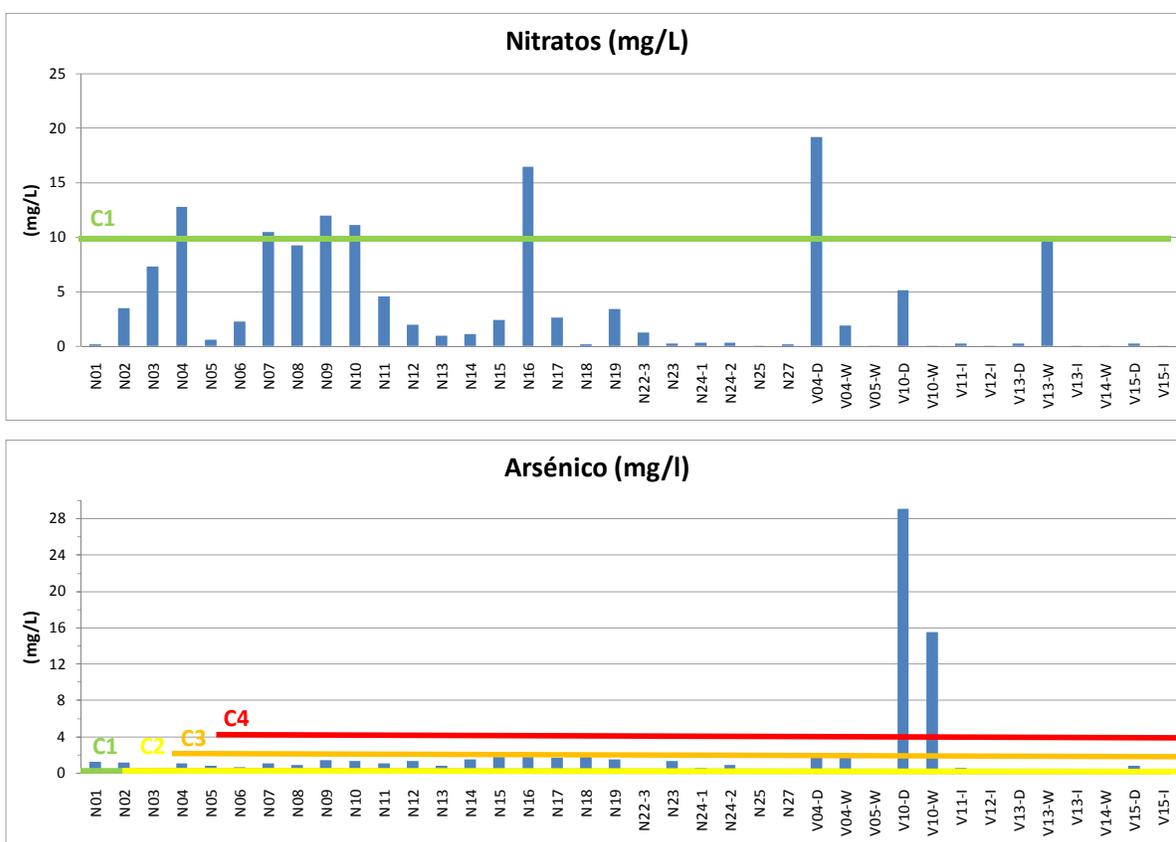


En las abscisas se presentan los puntos de observación

Figura 5.2: Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte, sector acuífero El Loa.

(cont.)

En el Grupo 2 (Figura 5.3) los valores más altos corresponden al Arsénico, parámetro en el que dos muestras (V10-D y V10-W) presentan afectaciones del rango intratable con valores muy altos. Estos dos puntos también presentan valores altos otros parámetros, lo que junto a su ubicación podría estar reflejando una condición natural de la zona debido a fuentes geotermales. Los Nitratos por otra parte, presentan valores bajos que sólo en algunos puntos superan el primer límite de afectación (calidad Buena).



En las abscisas se presentan los puntos de observación

Figura 5.3: Concentración de parámetros Grupo 2 y normativa, sector acuífero El Loa.

5.2.4 Determinación del índice de calidad

5.2.4.1 Interpolación

Para el sector acuífero El Loa se determinó un área de interpolación que corresponde a tres zonas, donde el máximo radio de interpolación para un dato fue 8 km, considerando que la máxima área representativa de un punto es 200 km² a su alrededor.

Para este caso y debido a las características geomorfológicas de la cuenca se decidió utilizar el método de interpolación *Spline* con barreras ya que permite interpolar los datos abarcando únicamente el área representativa de los puntos con información. De acuerdo al tamaño del área de interpolación y la distancia entre los puntos se decidió ocupar una grilla de 50x50 m.

En esta sección sólo se presentará los mapas de índice de calidad, mientras que los resultados de la interpolación de cada parámetro se presentan en mapas de isoconcentración en los Anexos (Sección 6.1.1).

5.2.4.2 Cálculo de los índices de calidad individual

Se realizó la evaluación del IC individual de acuerdo a los límites especificados en la Tabla 4.13, es decir evaluando en las rectas que se construyeron entre cada límite para cada uno de los parámetros estudiados y que corresponde a la interpolación lineal entre los valores de corte.

Los resultados del cálculo del índice de calidad de cada parámetro químico se presentan desde la Figura 5.4 a la Figura 5.11. En las primeras seis figuras se expone los parámetros del Grupo 1. Los parámetros que presentan mayores concentraciones y por lo tanto, que disminuyen la calidad química del acuífero corresponden a Cloruros y SDT. Ambos parámetros generan zonas definidas como de calidad Intratable en el centro y al este del sector acuífero, mientras que al oeste (próximo a Calama) los Cloruros generan una zona de calidad Intratable, peor a la calidad Insuficiente generada por los SDT.

Los parámetros del Grupo 2 se presentan desde la Figura 5.10 a la Figura 5.11. Se aprecia que el Arsénico presenta alta afectación en la zona suroriente, donde la afectación por Cloruros y SDT también es intratable.

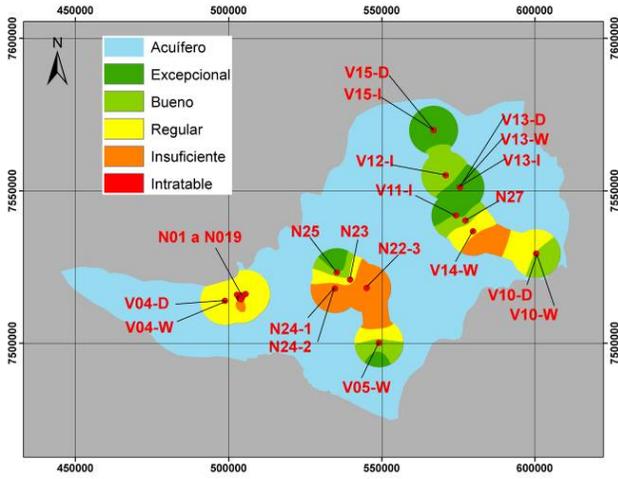


Figura 5.4: Índice de calidad individual de Ca en el sector acuífero El Loa.

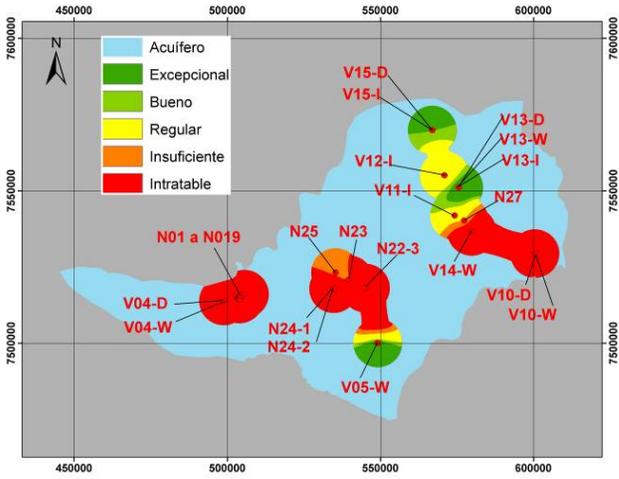


Figura 5.5: Índice de calidad individual de Cl en sector acuífero El Loa.

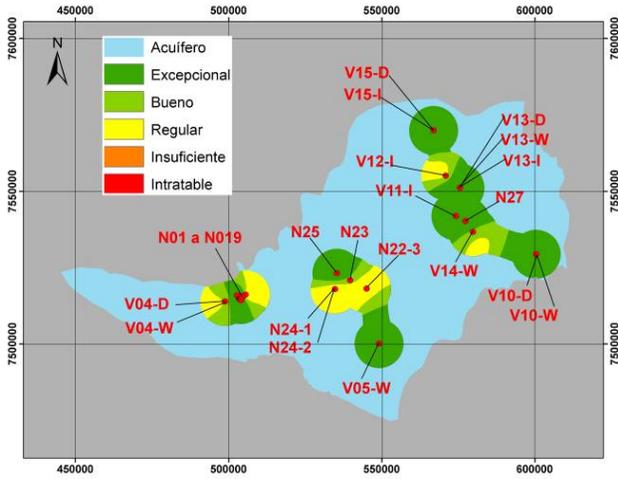


Figura 5.6: Índice de calidad individual de Mg en sector acuífero El Loa.

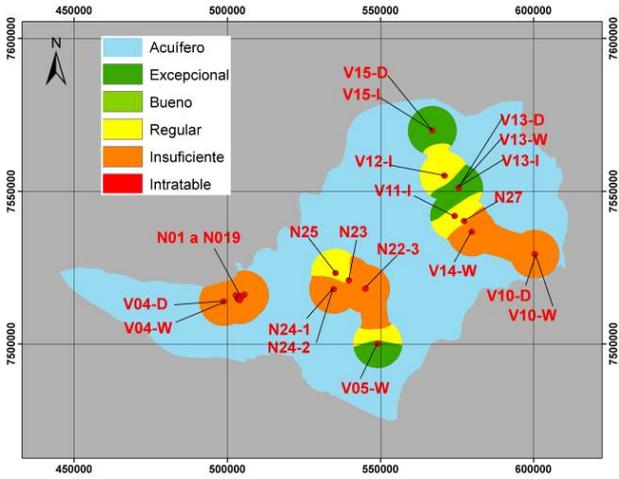


Figura 5.7: Índice de calidad individual de Na en sector acuífero El Loa.

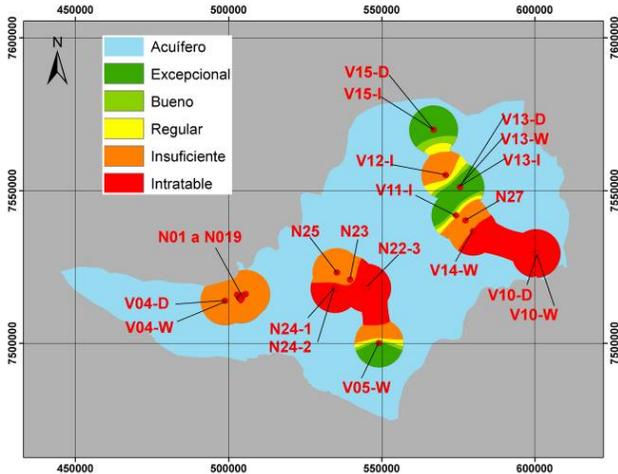


Figura 5.8: Índice de calidad individual de SDT en sector acuífero El Loa.

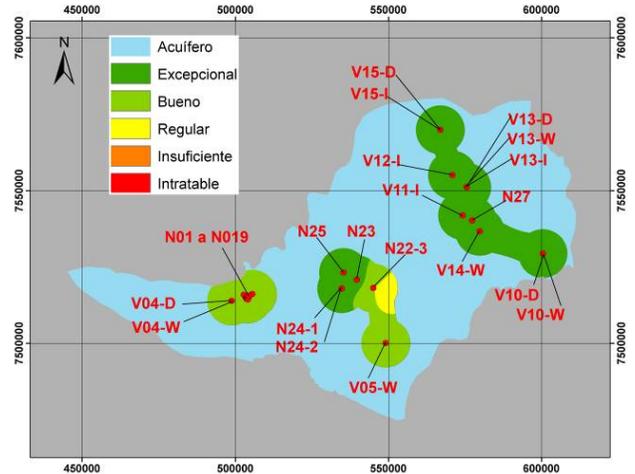


Figura 5.9: Índice de calidad individual de SO₄ en sector acuífero El Loa.

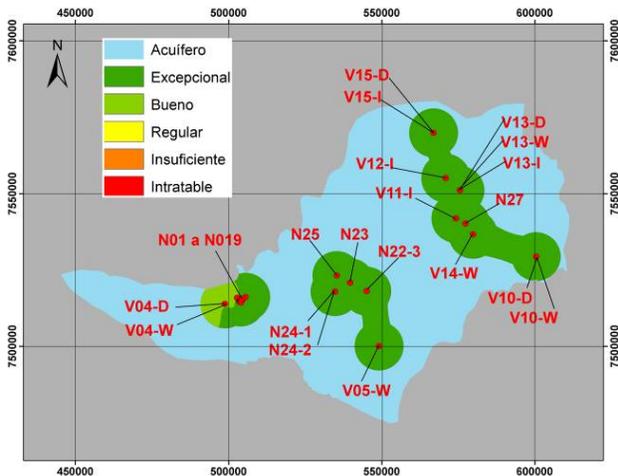


Figura 5.10: Índice de calidad individual de NO₃ en sector acuífero El Loa.

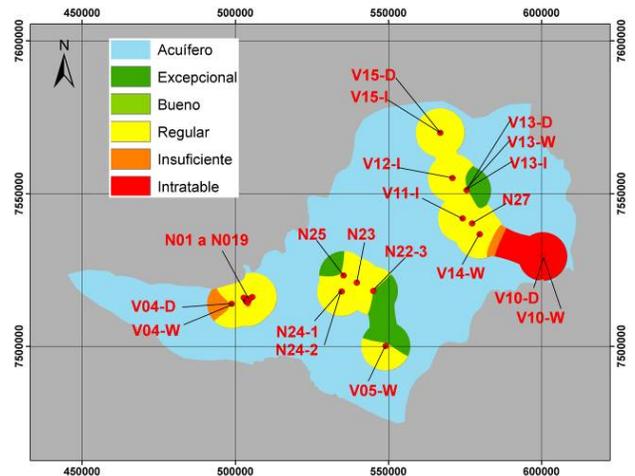


Figura 5.11: Índice de calidad individual de As en sector acuífero El Loa.

5.2.4.3 Cálculo del índice de calidad general

Según lo especificado en la metodología, el cálculo del IC general debe realizarse de acuerdo a los criterios especificados en la Tabla 4.16, revisando la aplicabilidad de éstos en el área estudiada. En la Tabla 5.4 se presenta los requisitos del cálculo del IC general en conjunto con comentarios acerca de la aplicabilidad de cada uno de ellos para los parámetros estudiados.

Tabla 5.4: Criterios y comentarios sobre la aplicación en sector acuífero El Loa.

Criterios	Comentarios
Si existe un parámetro con IC Intratable, el IC general es Intratable	Este criterio se aplicó en gran parte del área estudiada.
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, definidos en la NCh409, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente, el IC General se determina como el peor IC entre todos los parámetros.	Este criterio se aplicó en una parte importante del área estudiada, ya que la mayor parte de la zona que no cae en el criterio anterior se presenta afectación regular para el Arsénico.
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, definidos en la NCh409, presentan IC Excepcional, el IC General se determina como el promedio aritmético del IC de todos los parámetros.	Este criterio se utilizó en una zona muy acotada del área estudiada.

La Figura 5.12 presenta el mapa de IC general para el sector acuífero El Loa. Se aprecia una importante zona con IC Intratable, debido principalmente a los Cloruros y SDT, aunque el Arsénico también contribuye en el extremo sureste. El resto del área presenta mayoritariamente IC Regular, el que se debe principalmente al segundo criterio, ya que en esta zona el peor IC por parámetro corresponde a Regular.

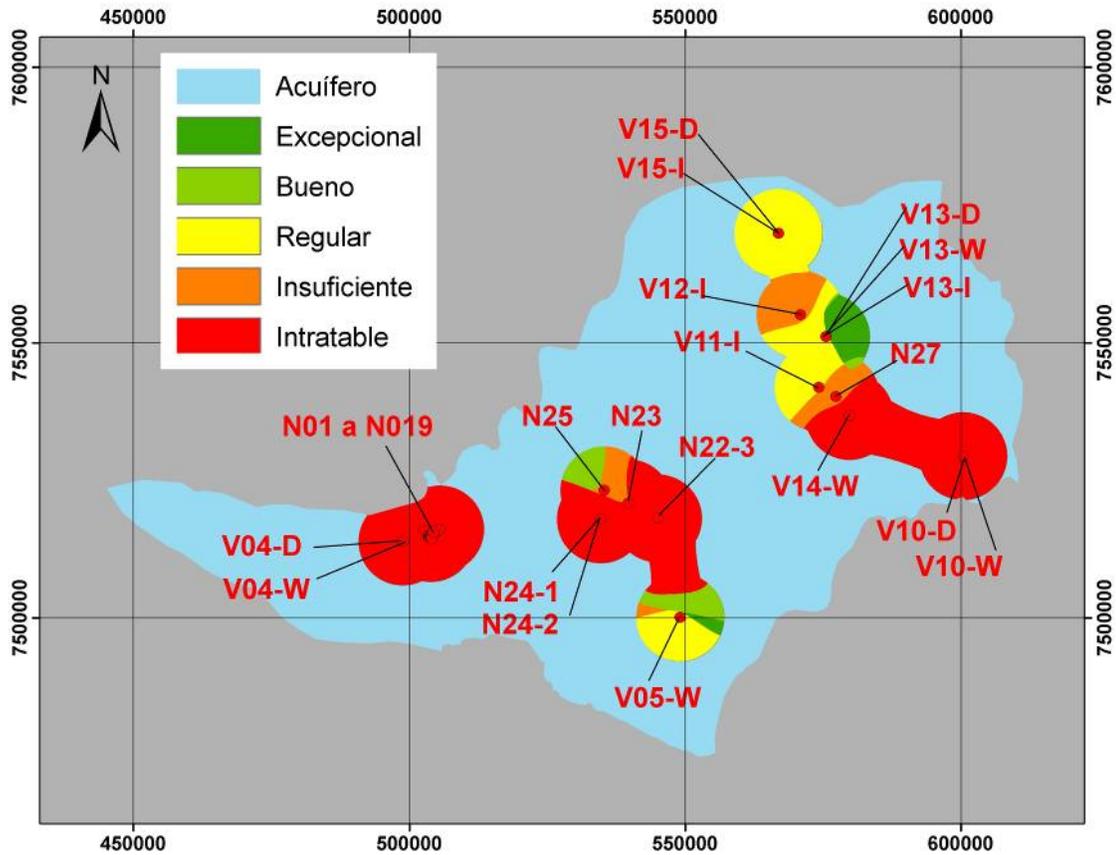


Figura 5.12: Índice de calidad general para el sector acuífero El Loa.

La distribución espacial del IC muestra claramente el efecto de aumento natural de la concentración, en el sector oriental del acuífero, donde se alcanzan altas concentraciones de As, Cl y SDT, producto de la actividad volcánica en el sector del Tatio. Por otra parte en el sector nororiente se observa una calidad mejor del agua debido a que se está cerca de las zonas de recarga del sistema acuífero. Finalmente el sector poniente presenta mala calidad, que puede ser el reflejo de la mezcla de efectos naturales y antrópicos, dada su ubicación cercana a un centro urbano.

5.2.5 Análisis estadístico ACP

Para obtener la caracterización de posible origen de la calidad química en el sector acuífero El Loa, se realiza el análisis de componentes principales con el apoyo de una rutina establecida en el programa computacional XLSTAT® acoplado al *software* Excel®, y siguiendo cada uno

de los pasos presentados en la metodología. La salida de la ejecución de este programa se presenta en Anexos (Sección 6.3.1).

5.2.5.1 *Requisitos de la base de datos*

La base de datos es la misma utilizada para determinar los índices de calidad, por lo que se reitera la insuficiencia de la información existente, ya que son valores con distribución heterogénea, no existe certeza de la fecha de medición en varios datos, existe incertidumbre en la representación de acuífero superior e inferior de algunos datos, y balance iónico superan 5% y alcanza hasta 12%. Esta base de datos cuenta con 38 observaciones del acuífero superior de 8 parámetros seleccionados: SDT, Cl, SO₄, Ca, Na, Mg, NO₃ y As. Por lo tanto no cumple con el tamaño mínimo recomendado (5 veces la cantidad de parámetros) y es probable que las correlaciones obtenidas tengan menor validez estadística y se encuentren más influenciadas por valores extremos en los datos. En el caso de realizar una mayor depuración de los datos, eliminando los datos con balance iónico superior a 5%, la cantidad de observaciones se reduciría a 26, situación claramente peor. Por último, se pudo comprobar que las observaciones en dos pozos (V10-D y V10-W) tomados en "Tatio salida" afectan enormemente las relaciones entre las variables, por lo que se decidió omitirlas para obtener factores principales más representativos del resto de pozos, pero igualmente mostrarlas en los gráficos.

Respecto a la correlación entre las variables y a partir de la inspección visual de la matriz de correlación, su determinante ($2,7 \times 10^{-6}$) y el test de esfericidad de Bartlett (rechazo de H₀ con error <0,01%), se puede establecer que existe una estructura interna en los datos que hacen útil el ACP para obtener variables independientes que resuman la relación entre las variables. La inspección visual de matriz de correlaciones indica que hay correlación entre variables SDT, Cl, SO₄ y Ca, y en menor medida con variables NO₃, As y Mg.

5.2.5.2 *Selección de factores*

Con el uso de XLSTAT®, se obtiene el gráfico de sedimentación que indica los valores propios de los 8 componentes principales y la explicación de la varianza total. Adoptando el criterio de Kaiser de usar sólo aquellos componentes principales con valores propios mayores

a 1, sólo sería necesario seleccionar los dos primeros que explican el 78,7% de la varianza total.

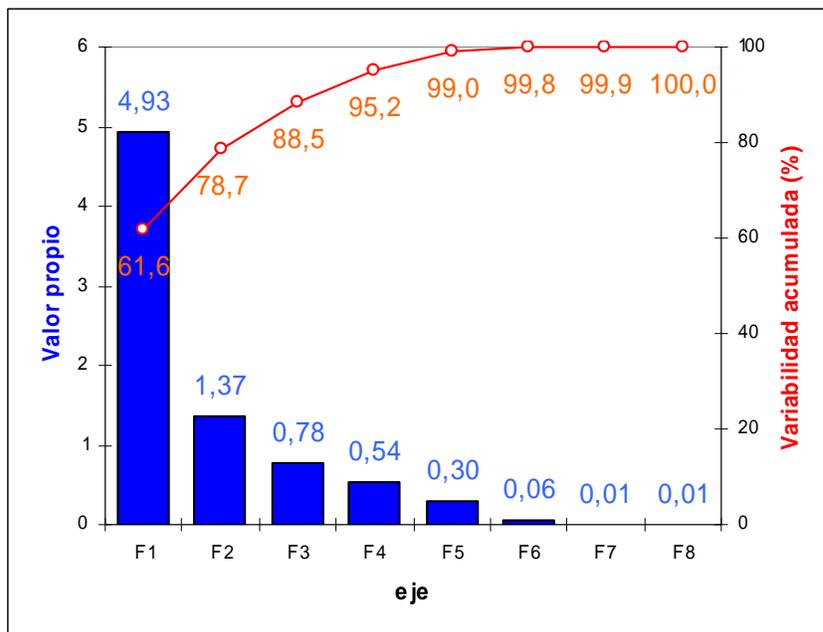


Figura 5.13: Gráfico de sedimentación ACP en sector acuífero El Loa.

5.2.5.3 Matriz de factores

La matriz factorial (Tabla 5.5), que contiene la correlación entre las variables originales (parámetros) y las variables nuevas (componentes principales o factores seleccionados) refleja que las variables SDT, Cl, SO₄, Ca y Na tienen valores altos en factor 1, las variables NO₃ y As toman valores medio-altos en factor 2, y la variable Mg tiene valores medios en factor 1 y factor 3. Sin embargo, es posible mejorar la saturación de las variables (valor más alto en un solo factor) considerando la rotación ortogonal de los ejes según el método Quartimax. La matriz factorial considerando los tres primeros factores y su rotación, se presenta a continuación.

Tabla 5.5: Matriz factorial de parámetros en sector acuífero El Loa.

Parámetro	Factor F1	Factor F2	Factor F3	Factor rotado D1	Factor rotado D2	Factor rotado D3
SDT	0,973	-0,187	-0,035	0,986	-0,026	0,097
Cl	0,979	-0,148	-0,017	0,986	0,017	0,098
SO ₄	0,784	0,334	-0,160	0,749	0,364	-0,240
Ca	0,943	-0,090	-0,218	0,966	-0,016	-0,110
Na	0,969	-0,137	-0,028	0,976	0,021	0,083
Mg	0,581	-0,332	0,661	0,538	0,056	0,769
NO ₃	0,228	0,777	0,478	0,073	0,929	0,128
As	0,439	0,677	-0,194	0,370	0,605	-0,430
Varianza explicada acumulada	61,6%	78,7%	88,5%	57,0%	75,6%	88,5%

5.2.5.4 Interpretación de factores

La interpretación semántica de los factores considera los valores observados de los parámetros relacionados a los factores y a los antecedentes disponibles. El factor 1 se asocia a un origen o fuente natural ya que los parámetros Na, Cl, SDT, Ca, SO₄ y Mg asociados, presentan valores esperados en un ambiente con alto contenido de minerales que pueden entrar en disolución. El factor 2 se asocia a un origen antrópico, ya que NO₃ presenta valores sobre 10 mg/L en algunos puntos. Sin embargo los valores son inferiores a 20 mg/L por lo que dada la ubicación y la actividad económica el origen antrópico se asocie principalmente a la industria o asentamientos urbanos, más que a actividades agrícolas. Por último, aunque no resulta fundamental para asignar el origen a todos los parámetros se puede indicar la interpretación del factor 3. Este factor sólo estaría asociado al Mg, con valores medios que no permiten dilucidar claramente su origen, sin embargo se espera que sea natural pero con un comportamiento químico algo distinto al resto de elementos mayores como Na y Cl.

Para considerar los tres primeros factores principales, correspondería representar las relaciones mediante tres gráficos Biplot-variables y tres gráficos Biplot-valores, sin embargo para efectos de la metodología y tomando en cuenta la representatividad alcanzada por los dos primeros factores, sólo es necesario gráficos Biplot (Figura 5.14) con factores 1 y 2 rotados. El resto de gráficos se presenta en Anexos (Sección 6.2.1).

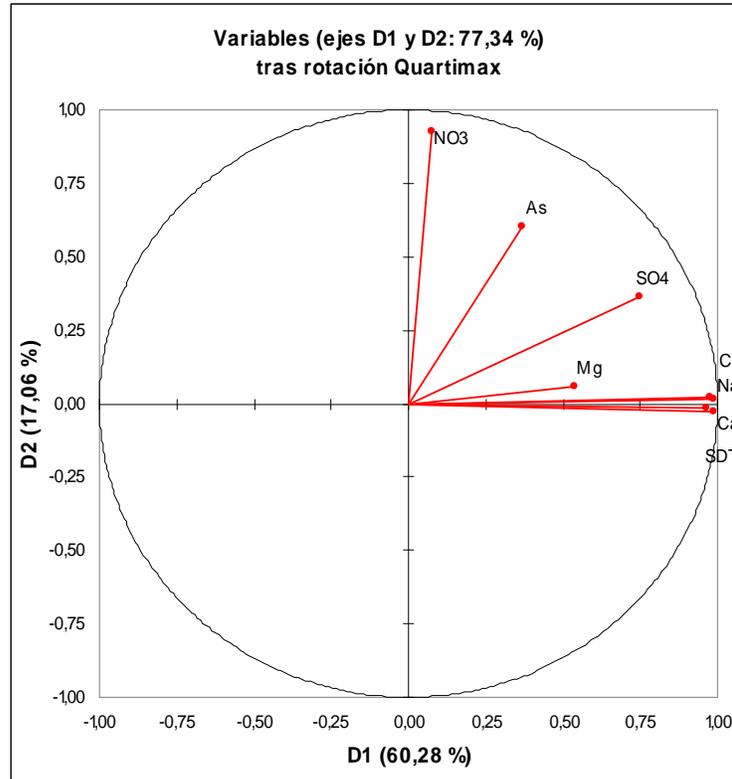


Figura 5.14: Gráfico Biplot-variables en sector acuífero El Loa.

Los factores 1 y 2 rotados representan el 77,3% de la varianza total. Los parámetros Na, SDT, Cl y Ca se encuentran bien representados (longitud de vectores), se relacionan entre ellos (ángulo pequeño) y se asocian fuertemente al factor 1 (ángulo pequeño), por lo que su origen debe ser principalmente natural y probablemente asociado a formaciones geológicas. El parámetro Mg, se encuentra menos representado que los mencionados anteriormente, pero de todas maneras se reconoce un origen natural tanto por el factor 1, como por factor 3. El parámetro NO₃ tendría origen antrópico, probablemente asociado a la industria y/o asentamientos urbanos. El parámetro SO₄ se aleja del factor 1, por lo que su origen es natural aunque tendría un componente antrópico, por ejemplo asociado a la industria metálica. El parámetro As tendría un efecto combinado entre antrópico y natural, tal cual se indica en la literatura técnica, ya que en la II región el As se debería a fuentes volcánicas o geotermales, pero también por la industria del cobre. Lo anteriormente expuesto, resulta consistente con lo planteado por la OMS como posibles fuentes de los parámetros en cuestión.

Tabla 5.6: Origen principal de parámetros en sector acuífero El Loa.

Parámetros	Origen principal
Na, Cl, SDT, Ca	Natural (condiciones hidrogeoquímicas)
Mg	Natural (condiciones hidrogeoquímicas)
NO ₃	Antrópico (industrial y/o asentamiento urbano)
SO ₄	Natural y Antrópico (industrial minería)
As	Natural y Antrópico (industrial minería)

5.2.5.5 Puntuaciones factoriales y representaciones gráficas

Para completar el ACP en sector acuífero El Loa se presenta el gráfico Biplot-variables, con las puntuaciones factoriales de las observaciones de acuerdo a los factores 1 y 2 rotados, y se han agregado las dos observaciones en V10-D y V10-W. Se aprecia que los puntos suplementarios se asociarían a origen antrópico, lo que podría ser incongruente dada la cercanía a una fuente geotermal como el Tatio. Por otra parte la gran densidad de puntos se ubica en torno al factor 1, reflejando que el origen natural de los parámetros es lo principal, y a partir de la ubicación se puede establecer que a medida que se aproximan a la ciudad de Calama, los puntos aumentan su componente antrópico.

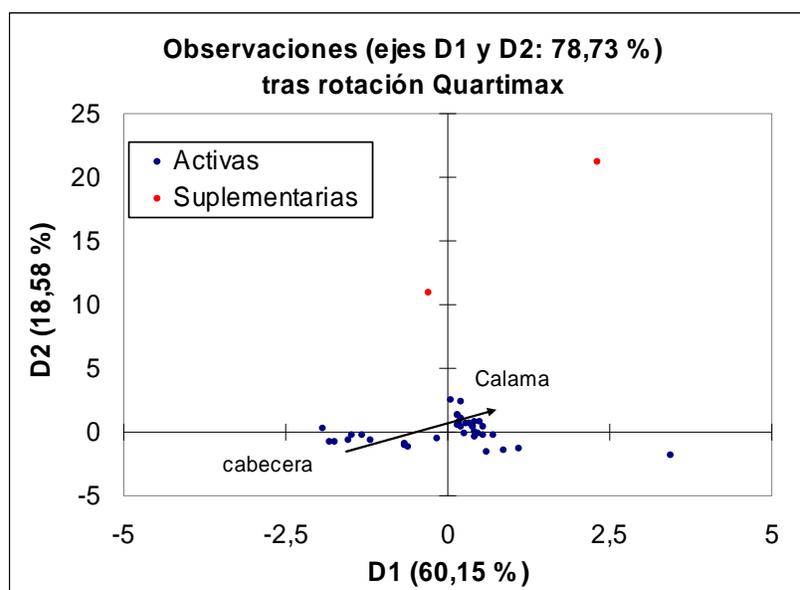


Figura 5.15: Gráfico Biplot-valores en sector acuífero El Loa.

5.2.6 Análisis temporal

El sector acuífero El Loa no cuenta con bases de datos de calidad química de las aguas provenientes de tiempos distintos, que permitan la aplicar adecuadamente la metodología y con ello determinar el IC en tales períodos. Por lo tanto, no es posible aplicar el análisis temporal que plantea la metodología.

5.2.7 Resultados finales

En general, el acuífero presenta aguas subterráneas de mala calidad, ya que predominan zonas con IC Regular a Intratable. Esta situación se explica por los altos niveles de SDT, Cl y As. Tanto el Cl como SDT tienen un origen natural producto de condiciones hidrogeoquímicas del acuífero. Mientras que el As tendría un origen mixto, es decir natural y antrópico.

El Mapa 01 que se adjunta a este informe presenta para el sector acuífero El Loa los resultados finales de la metodología, incluyendo el IC, general e individual, así como el análisis del origen de los compuestos disueltos.

5.3 Sector acuífero Los Choros

5.3.1 Antecedentes disponibles

Este acuífero se ubica en la IV Región de Coquimbo, al interior de la cuenca Los Choros tiene un comportamiento exorreico. Los principales cauces son Quebrada el Pelicano, quebrada los Pedernales y Quebrada Los Choros. Este acuífero posee un área total de 4.173 km² y se desarrolla en la depresión intermedia y zona costera. La hidrogeología del sector está compuesta por rocas sedimentarias y mixtas sedimento-volcánicas, además de encontrarse rocas plutónicas e hipabisales. En el área de estudio, comprendida en parte por subsector acuífero Los Choros Bajos y Playa Los Choros, en el sector costero, se reconoce un único acuífero con espesor de relleno entre 10 y 200 m, en donde se mezclan arcillas, limos, arena y gravas (DGA, 2005).

El uso de suelo es predominantemente agrícola, mediante cultivos tales como olivos, hortalizas, maíz y cítricos. Respecto a los derechos de aprovechamiento del recurso subterráneo destaca el riego (agrícola), posteriormente agua potable y finalmente minería.

Existen antecedentes respecto a problemas de intrusión salina en la zona de estudio (DGA 2005), el cual se acrecienta por efecto del bombeo que realiza el sector agrícola en la zona más cercana a la costa.

En este sector acuífero, no se contó con la información mínima necesaria para la aplicación de la metodología, por lo que fue necesario realizar una campaña de monitoreo adicional (Geohidrología Consultores-DGA, 2009). Dicha campaña abarcó un área de 635 km² y consideró el muestreo de 18 puntos de observación (norias y pozos). La Figura 5.16 presenta la distribución de los puntos muestreados en la campaña. Sin embargo a partir de los datos obtenidos, de la ubicación de los puntos de muestreo y de otras razones presentadas más adelante, sólo se realizó una caracterización de una porción del sector acuífero original. Esta porción queda definida como el área de interpolación e incluye 16 de los 18 puntos muestreados, representando una densidad de 7 km² por punto en un área de 108 km².

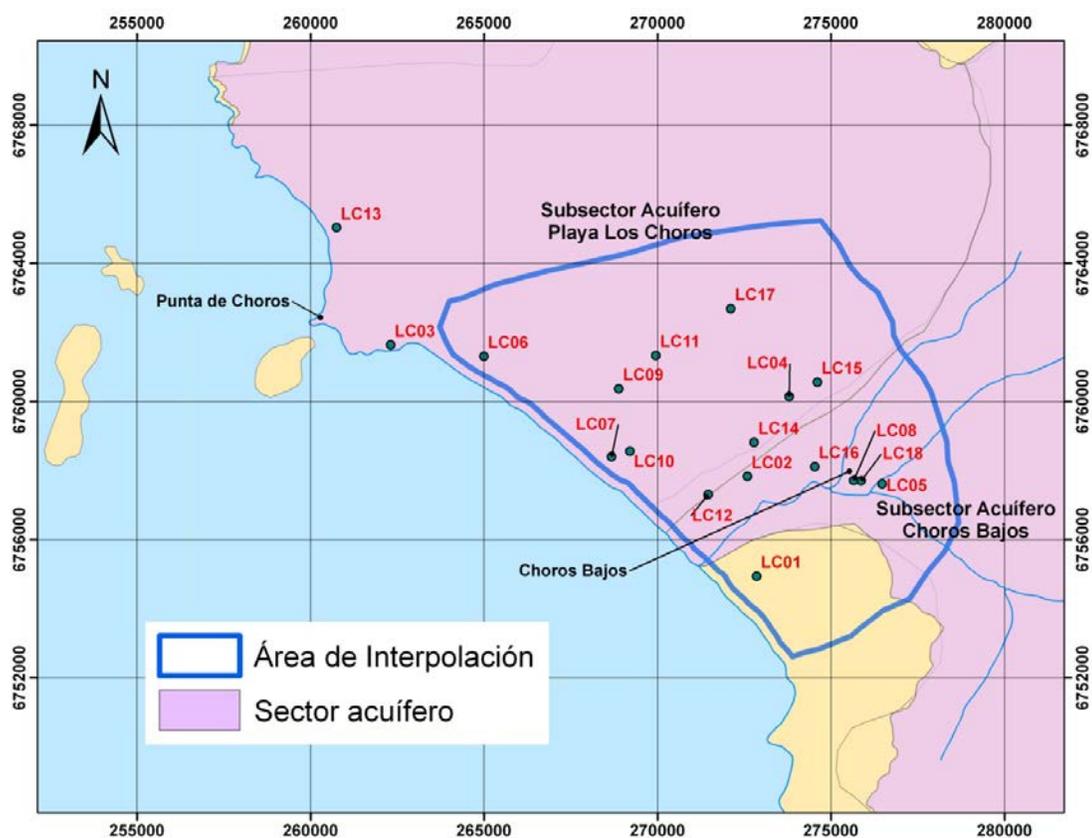


Figura 5.16: Distribución de los puntos de muestreo en sector acuífero Los Choros.

5.3.2 Elección de parámetros locales

Los parámetros medidos en cada uno de los puntos de muestreo fueron: Cl, NO₃, SO₄, Ca, Na, Mg, SDT, HCO₃, K, pH, Al, Fe, Mo, Hg, Ni y PO₄. Todos estos parámetros fueron escogidos considerando las actividades productivas y las características naturales del sector, de acuerdo a lo indicado en secciones 4.2.2 y 4.4 de este informe.

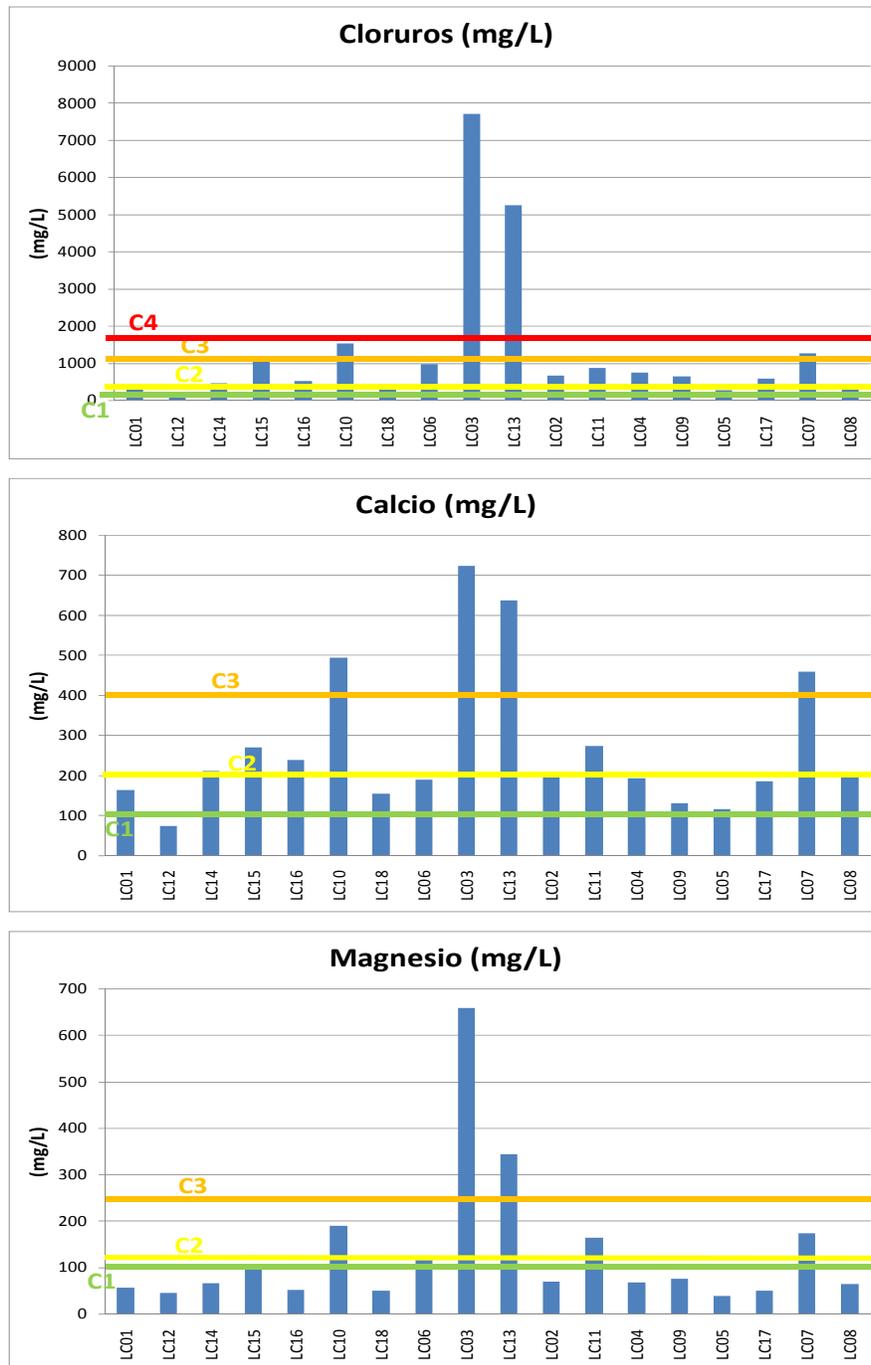
Como se explicó en la metodología, los parámetros del Grupo 1 para el cálculo del IC del acuífero son fijos y son: Cl, SO₄, Ca, Na, Mg y SDT. Sin embargo, para el Grupo 2 se deben elegir dos parámetros locales además del NO₃ que se encuentra fijo. Los parámetros elegidos fueron el Hierro (Fe) y el Aluminio (Al). Estos dos parámetros presentaron valores más elevados que el resto.

5.3.3 Análisis de datos medidos

Antes de realizar la interpolación se revisó los análisis químicos entregados por el laboratorio para cada uno de los puntos de observación, con la finalidad de reconocer valores anormales o dudosos y poder verificarlos, eliminarlos o reemplazarlos, tomando en consideración las condiciones de muestreo. Esta revisión sirvió también para elegir el método de interpolación que a utilizar. La base de datos se presenta en los Anexos (Sección 4.1.2).

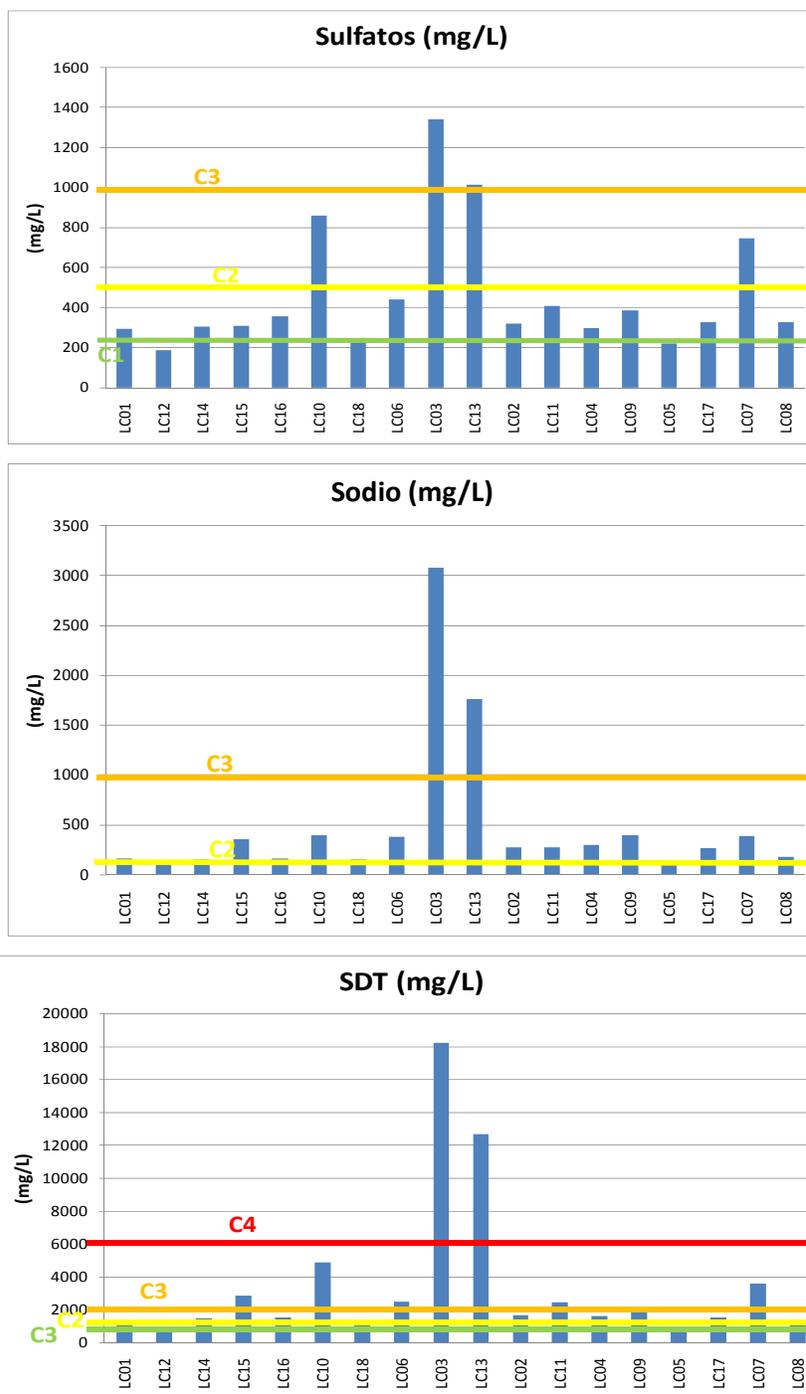
Los resultados se presentan en la Figura 5.17 y la Figura 5.18, junto con la línea de los límites de separación de las clases de calidad. Sin embargo, para algunos parámetros estos gráficos no muestran dichas líneas, ya sea porque los límites se encuentran fuera del rango de los resultados, o porque coinciden en el mismo valor (como es el caso de los límites C1 y C2 del Hierro y el Aluminio).

El sector acuífero Los Choros presenta mayor concentración de los elementos del Grupo 1 respecto del Grupo 2, en particular en los parámetros que están relacionados a la intrusión salina (Cl y SDT). La Figura 5.17 muestra que los valores medidos de Cloruros, Sodio, Calcio y Magnesio sobrepasan el límite C1 (calidad Buena), para la mayoría de los puntos muestreados. Destacan además los puntos LC03 y LC13 con valores particularmente altos, lo que puede ser explicado por su cercanía al mar.



En las abscisas se presentan los puntos de observación

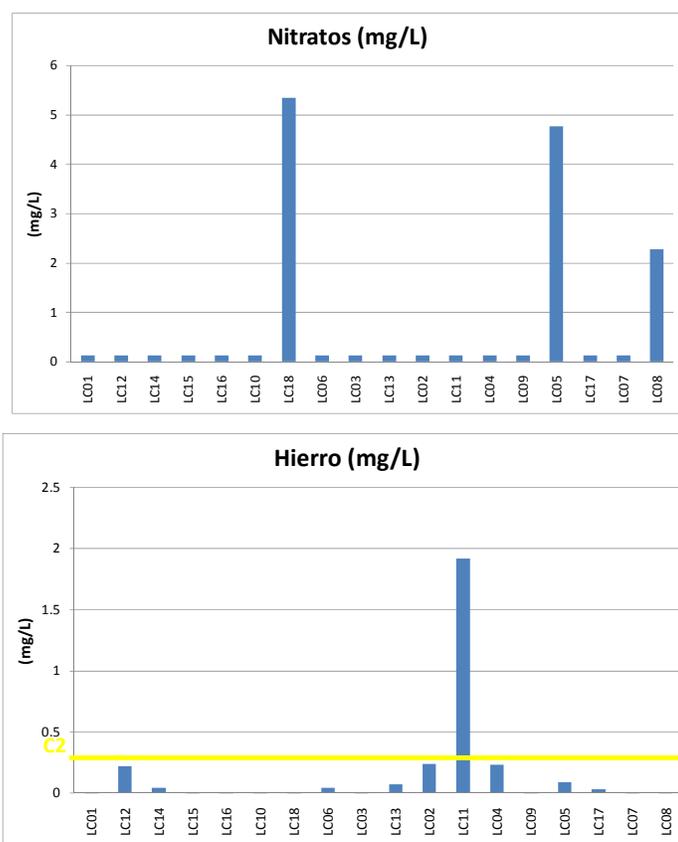
Figura 5.17: Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte, sector acuífero Los Choros.



En las abscisas se presentan los puntos de observación

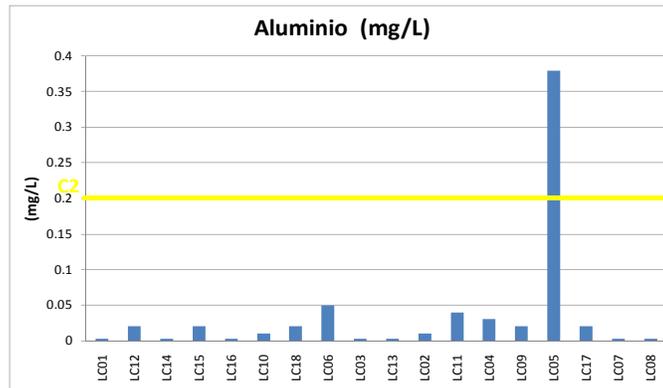
Figura 5.17: Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte, sector acuífero Los Choros. (cont.).

En el Grupo 2 (Figura 5.18) sólo se alcanza los primeros límites establecidos en dos de los tres parámetros, y en forma localizada en algunos puntos muestreados. El Aluminio sobrepasa el primer límite de calidad en el punto LC05 y constituye un dato puntual que no se aprecia en los demás puntos por lo que podría explicarse por su proximidad al pueblo Los Choros Bajos o bien que proviene desde otro sector. Para el caso del Hierro, se detectó sólo un punto (LC11) con un valor alto, lo que se atribuyó a las condiciones del pozo pues se encontraba en desuso y probablemente afectado por depositación de los materiales de habilitación. Los valores de Nitratos son relativamente bajos, sin embargo se detectan algunos valores más altos (sin alcanzar el primer valor de corte) y que se encuentran dentro del área agrícola del sector.



En las abscisas se presentan los puntos de observación

Figura 5.18: Concentración de parámetros Grupo 2 y valores de corte, Los Choros.



En las abscisas se presentan los puntos de observación

Figura 5.18: Concentración de parámetros Grupo 2 y valores de corte, Los Choros. (cont.).

5.3.4 Determinación del índice de calidad

5.3.4.1 Interpolación

Para el sector acuífero Los Choros se realizan las siguientes consideraciones especiales previas a la interpolación espacial y que determina el área mostrada en la Figura 5.16:

- No se incluyeron dentro de la interpolación los puntos LC03 y LC13. En primer lugar estos puntos se encuentran alejados del resto de puntos de observación, por lo que incluirlos produciría una interpolación errónea en sectores intermedios sin puntos medidos. En segundo lugar, su cercanía al mar y las concentraciones observadas de Cloruros indican que las aguas corresponden a una mezcla de agua dulce con agua de mar, a la vez que es muy distinto al resto de las observaciones realizadas.
- La zona de interpolación se restringió a una zona del acuífero con características conocidas aunque alejadas de la cuña salina. El primer antecedente es que existe una cuña salina (entrada de agua de mar por debajo del acuífero) cuya profundidad de la aumenta a medida que se aleja de la orilla del mar (DGA, 2005). Por otro lado sólo los puntos LC03 y LC13 se encuentran ubicados a una distancia tal de la orilla del mar que permitiese incorporar las características químicas de la cuña salina. En definitiva, interpolar una zona en que uno de los límites es el mar implicaría conocer de manera

exacta las concentraciones de los distintos parámetros en la orilla, en conjunto con incorporar el efecto de la cuña salina a medida que se aleja de la orilla del mar.

- La zona de interpolación tiene una extensión de 108 km², ya que está restringida a aquella en que existe una representatividad adecuada con los puntos muestreados.
- El valor de Hierro en el punto de muestreo LC11 fue reemplazado por el valor observado en pozo LC09 próximo. Esto se justifica en la presunción que dicho pozo se encuentra en desuso y por tanto el alto valor observado proviene de la habilitación y no es una condición del acuífero en el lugar.
- Para aquellos valores de concentración que no alcanza el límite de detección, se adoptó el criterio de reemplazarlos con el 25% de dicho límite analítico. Esto ocurrió para algunas mediciones de parámetros como Hierro, Aluminio y Nitratos.

A partir de la configuración de los puntos, los valores medidos y el área considerada, los métodos de interpolación no entregarían resultados muy distintos. Por esta razón y por la facilidad de aplicación, se utilizó el método de interpolación de *Spline* con barreras, imponiendo como barrera el área de interpolación antes descrita. De acuerdo al tamaño del acuífero y la distancia mínima entre los puntos medidos se decidió ocupar una grilla de interpolación de 10 m, valor mucho menor a los propuestos en Tabla 4.10. Los resultados de la interpolación se presentan en mapas de isoconcentración en los Anexos (Sección 6.1.2).

5.3.4.2 Cálculo de los IC Individuales por parámetro

La evaluación del IC se realizó de acuerdo a los límites especificados en la Tabla 4.13 evaluando en las rectas que se construyeron entre cada límite para cada uno de los parámetros estudiados y que corresponde a la interpolación lineal entre valores de corte.

Los resultados de las evaluaciones de la interpolación de los parámetros individuales se presentan desde la Figura 5.19 a la Figura 5.27. En las primeras seis figuras se expone cada uno de los parámetros del Grupo 1. Como se mencionó, este grupo es el que presenta los peores valores de IC debido probablemente a la intrusión salina. Esto se refleja claramente en las gráficas de Ca, Cl y SDT, con este último presentando amplias zonas con valores de IC Insuficientes.

Los parámetros del Grupo 2 se presentan desde la Figura 5.25 hasta la Figura 5.27. Se aprecia que los parámetros medidos presentan calidad sustancialmente mejores que en el Grupo 1. Sólo el Aluminio presenta un valor Regular en un extremo del sector interpolado, y que está dado por un sólo valor muestreado en la zona del pueblo Los Choros Bajos.

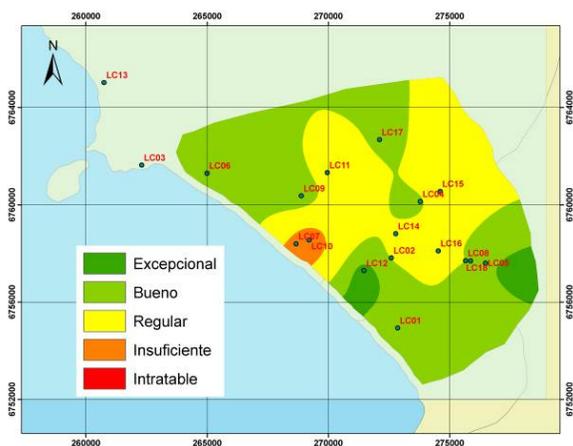


Figura 5.19: Índice de calidad individual de Ca en sector acuífero Los Choros.

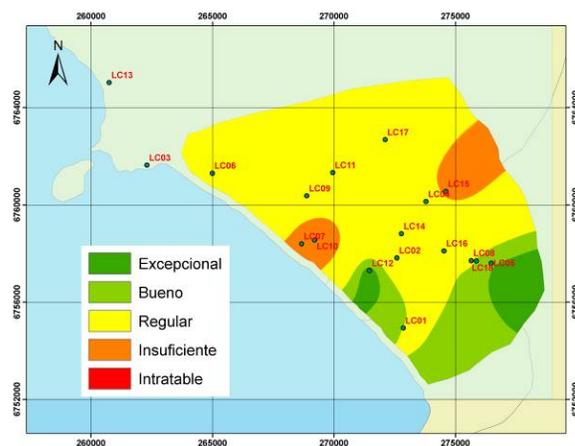


Figura 5.20: Índice de calidad individual de Cl en sector acuífero Los Choros.

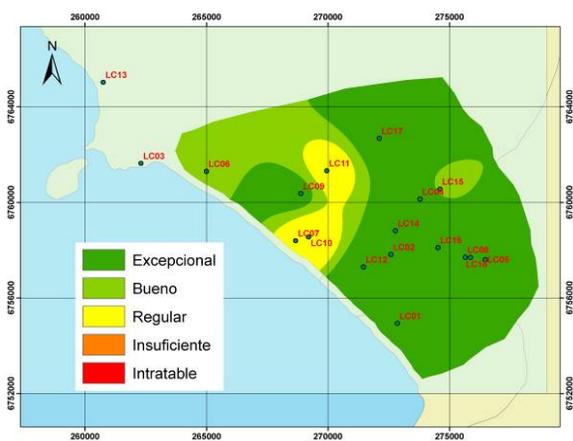


Figura 5.21: Índice de calidad individual de Mg en sector acuífero Los Choros.

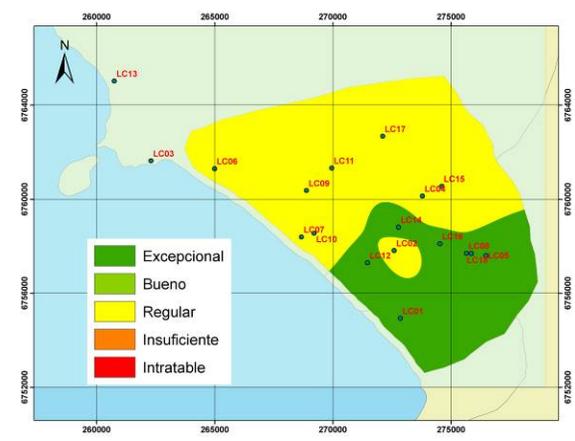


Figura 5.22: Índice de calidad individual de Na en sector acuífero Los Choros.

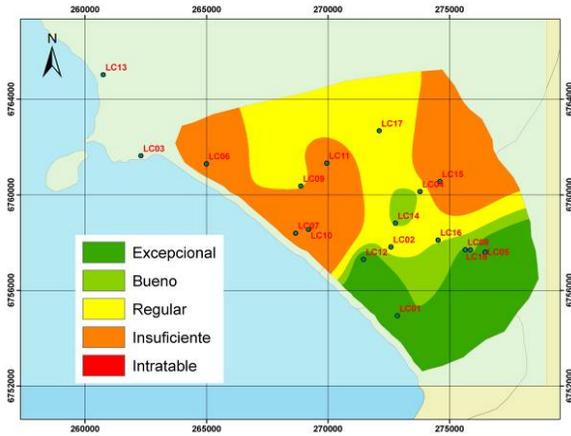


Figura 5.23: Índice de calidad individual de SDT en sector acuífero Los Choros.

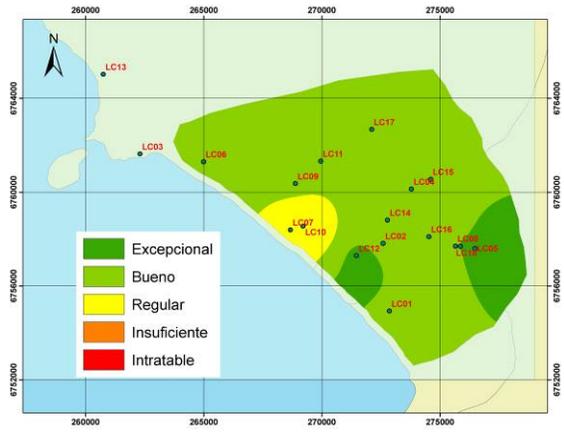


Figura 5.24: Índice de calidad individual de SO₄ en sector acuífero Los Choros.

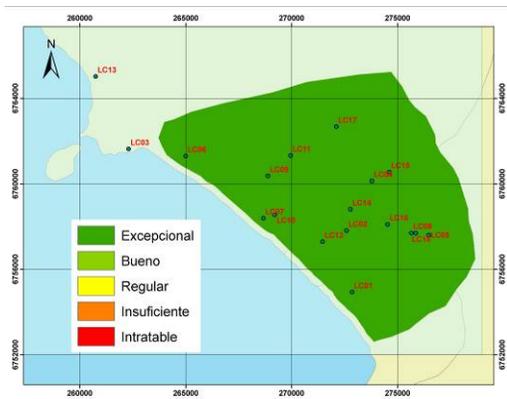


Figura 5.25: Índice de calidad individual de NO₃ en sector acuífero Los Choros.

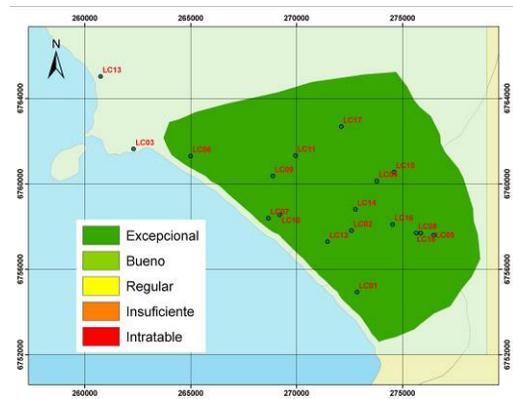


Figura 5.26: Índice de calidad individual de Fe en sector acuífero Los Choros.

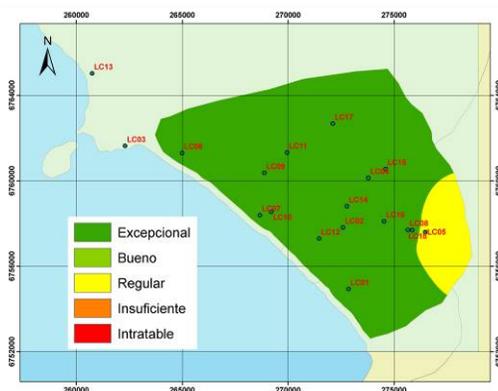


Figura 5.27: Índice de calidad individual de Al en sector acuífero Los Choros.

5.3.4.3 Cálculo del índice de calidad general

De acuerdo a lo especificado en la metodología el cálculo del IC general, debe realizarse de acuerdo a los tres criterios especificados en la Tabla 4.16, revisando la aplicabilidad de éstos en el área estudiada. En la Tabla 5.7 se presentan los requisitos del cálculo del IC general en conjunto con comentarios acerca de la aplicabilidad de cada uno de ellos para los parámetros estudiados.

Tabla 5.7: Criterios y comentarios sobre la aplicación en sector acuífero Los Choros.

Criterios	Comentarios
Si existe un parámetro con IC Intratable, el IC general es Intratable	Dentro de las evaluaciones de la interpolación no aparece ninguna zona como intratable, en ninguno de los parámetros, por lo que este criterio no se aplicó
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, definidos en la NCh409, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente, el IC General se determina como el peor IC entre todos los parámetros.	Este criterio se aplicó sólo en la zona que el Aluminio aparece con un valor regular ya que el resto de los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan valores IC Excepcional en la totalidad del área.
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, definidos en la NCh409, presentan IC Excepcional, el IC General se determina como el promedio aritmético del IC de todos los parámetros.	Este criterio es el que prevaleció en casi la totalidad del área estudiada, excepto en la zona del acuífero en que el Aluminio presenta IC Regular.

En la Figura 5.44 se aprecia el mapa de IC general para el sector acuífero Los Choros, donde se observa zonas con IC Insuficiente e IC Regular. En la parte este se aprecia una pequeña área con IC Insuficiente que responde a la conjunción de las concentraciones de SDT y Al. También al este, pero entorno a punto LC15 se tiene IC Insuficiente pero de carácter puntual, y que responde al SDT y al Mg (que afecta a la salud humana según normativa NCh409). La intrusión salina se muestra en la zona noroeste con IC Regular e IC Insuficiente, debido a la calidad del SDT en donde el Mg presenta IC Bueno o IC Regular. En la zona sureste se aprecia un área con IC Regular que se explica por el Al en un pozo ubicado en zona urbana. El resto del área que posee valores de IC Bueno y Excepcional, se debe al promedio de todos los parámetros.

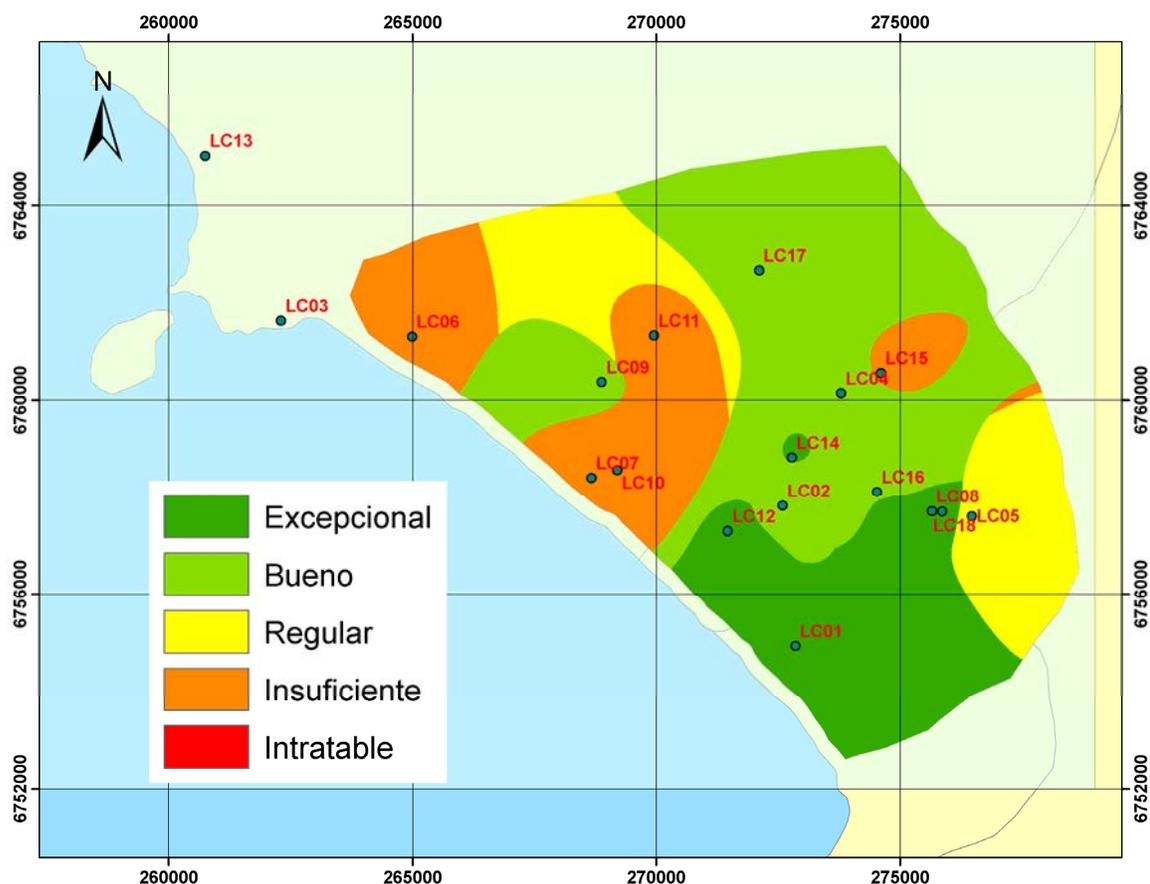


Figura 5.28: Índice de calidad general para el sector acuífero Los Choros.

5.3.5 Análisis estadístico ACP

Para obtener la caracterización de un posible fuente u origen de la calidad química en el sector acuífero Los Choros, se realiza el análisis de componentes principales con el apoyo de una rutina establecida en el programa computacional XLSTAT® que se acopla al software Excel®, y siguiendo cada uno de los pasos presentados en la metodología. La salida de la ejecución de este programa se presenta en Anexos (Sección 6.3.2).

5.3.5.1 Requisitos de base de datos

La base de datos es la misma que la utilizada para determinar los IC, por lo tanto ya se encuentra depurada adecuadamente. Esta base de datos cuenta con 18 observaciones de 9 parámetros seleccionados: SDT, Cl, SO₄, Ca, Na, Mg, NO₃, Fe y Al. Por lo tanto no cumple con el tamaño mínimo recomendado (5 veces la cantidad de parámetros) y posiblemente las correlaciones obtenidas tengan menor validez estadística.

Respecto a la correlación entre las variables y a partir de la inspección visual de la matriz de correlación, su determinante ($4,5 \times 10^{-7}$) y el test de esfericidad de Bartlett (rechazo de H₀ con error <0,01%), se puede establecer que existe una estructura interna en los datos que hacen útil el ACP para obtener variables independientes que resuman la relación entre las variables. La inspección visual de matriz de correlaciones indica que hay correlación entre variables SDT, Cl, SO₄, Ca, Mg y Na, entre las variables NO₃ y Al, y el Fe no tiene correlaciones importantes con otras variables.

5.3.5.2 Selección de factores

Con el uso de XLSTAT®, se obtiene el gráfico de sedimentación que indica los valores propios de los 9 componentes principales y la explicación de la varianza total. Adoptando el criterio de Kaiser (usar sólo aquellos componentes principales con valores propios mayores a 1) se debiera seleccionar los tres primeros que explican el 93,1% de la varianza total, sin embargo los dos primeros factores logran explicar sobre el 80% de la varianza total.

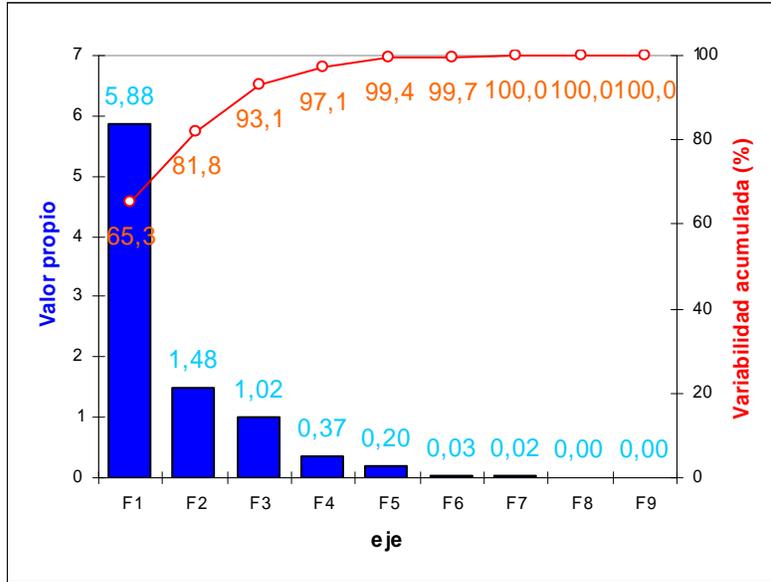


Figura 5.29: Gráfico de sedimentación ACP, acuífero Los Choros.

5.3.5.3 Matriz de factores

La matriz factorial, que contiene la correlación entre las variables originales (parámetros) y las variables nuevas (componentes principales o factores seleccionados) refleja que las variables Na, Cl, SDT, SO₄, Ca, Mg tienen valores altos en factor 1, las variables Al y NO₃ tienen valores más altos en factor 2 y la variable Fe sólo en el factor 3. Sin embargo, es posible mejorar levemente la saturación de las variables (valor más alto en un solo factor) considerando la rotación ortogonal de los ejes según método Quartimax. La matriz factorial considerando los factores seleccionados y su rotación, se presenta a continuación.

Tabla 5.8: Matriz factorial de parámetros en sector acuífero Los Choros.

Parámetro	Factor F1	Factor F2	Factor F3	Factor rotado D1	Factor rotado D2	Factor rotado D3
SDT	0,984	0,115	0,088	0,995	-0,011	0,004
Cl	0,977	0,118	0,113	0,990	-0,004	0,029
SO ₄	0,967	0,025	-0,053	0,955	-0,111	-0,125
Ca	0,947	-0,001	-0,077	0,929	-0,136	-0,144
Na	0,959	0,130	0,133	0,976	0,012	0,049
Mg	0,980	0,102	0,050	0,986	-0,026	-0,032
NO ₃	-0,323	0,842	-0,120	-0,223	0,862	-0,187
Fe	-0,234	-0,142	0,949	-0,168	-0,016	0,973
Al	-0,285	0,834	0,229	-0,157	0,884	0,158
Varianza explicada acumulada	65,3%	81,8%	92,3%	64,2%	81,4%	93,1%

5.3.5.4 Interpretación de factores

La interpretación semántica de los factores toma en consideración los valores observados de los parámetros relacionados a los factores y a los antecedentes disponibles. El factor 1 se asocia a un origen o una fuente natural ya que parámetros Na, Cl, SDT, Mg, Ca y SO₄ relacionados, presentan valores de concentración bajos o bien explicados por la cercanía al mar (intrusión salina). El factor 2 se asocia a un origen antrópico, ya que NO₃ y Al, los parámetros relacionados, si bien toman valores no muy altos, descartándose origen agrícola, las mayores concentraciones se encuentran en el pueblo Los Choros Bajos, y de acuerdo a la OMS podrían deberse a asentamientos urbanos (Tabla 4.20). Por último el factor 3, el cual se asocia el Fe únicamente, correspondería a un factor antrópico pero de bajo efecto, pues sus valores son bajos y no existen antecedentes de origen natural en esta zona. La fuente antrópica no se asocia a actividades industriales por lo que probablemente se asocie a la oxidación de materiales con que se construyeron los pozos.

Dado que se escogieron tres factores principales, correspondería representar las relaciones mediante tres gráficos Biplot-variables y tres gráficos Biplot-valores, sin embargo para efectos de la metodología, para discriminar el origen antrópico de algunas variables, gráficos Biplot

con factores 1 y 2 (rotados) en los ejes serían suficientes, el resto se presenta en Anexos (Sección 6.2.2).

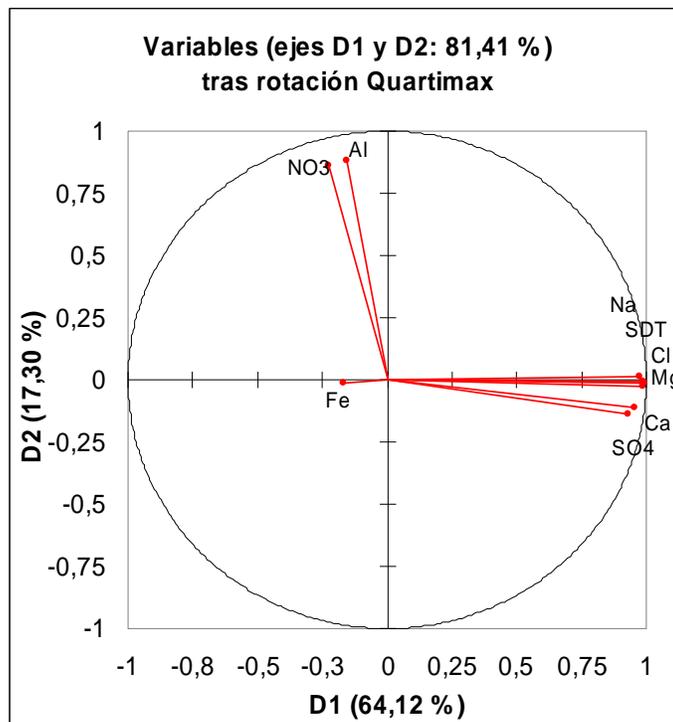


Figura 5.30: Gráfico Biplot-variables en sector acuífero Los Choros.

Los factores 1 y 2 rotados representan el 81,4% de la varianza total. Los parámetros Na, SDT, Cl y Mg se encuentran bien representados (longitud de vectores), se relacionan entre ellos (ángulo pequeño) y se asocian fuertemente al factor 1 (ángulo pequeño), por lo que su origen debe ser principalmente natural y probablemente asociado a intrusión salina. Los parámetros Ca y SO₄ se encuentran relacionados, bien representados y asociado al factor 1, por lo que su origen también sería natural, pero probablemente con un comportamiento químico distinto más asociado a la disolución de minerales que a la intrusión salina. Los parámetros NO₃ y Al se encuentran bien representados por factores 1 y 2, y están asociados principalmente al factor 2, por lo que su origen sería antrópico y marcado por la proximidad a asentamientos urbanos (desechos domiciliarios). Por último, el Fe no se encuentra bien representado por los factores 1

y 2, pero si por el factor 3, de modo que su origen sería antrópico, y más específicamente por el estado de los pozos. Lo anteriormente expuesto, resulta consistente con lo planteado por la OMS como posibles fuentes de los parámetros en cuestión.

Tabla 5.9: Origen principal de parámetros en acuífero Los Choros.

Parámetros	Origen principal
Na, Cl, SDT, Mg	Natural (intrusión salina)
SO ₄ , Ca	Natural
NO ₃ , Al	Antrópico (asentamiento urbano)
Fe	Antrópico (estado de pozos)

5.3.5.5 Puntuaciones factoriales y representaciones gráficas

Para completar el ACP en Los Choros se presenta el gráfico Biplot-variables, con las puntuaciones factoriales de las observaciones de acuerdo a los factores 1 y 2 rotados. Se aprecia que existen varios puntos ubicados cerca del origen reflejando la buena calidad. Además se aprecia que existen algunos puntos que se alejan del origen hacia la parte positiva del factor 2 lo que coincide con proximidad al pueblo de Los Choros Bajos y por ende al empeoramiento de la calidad. Por otra parte, se reconocen puntos que avanzan hacia la porción positiva del factor 1, lo que coincide con la proximidad al mar y por ende el efecto de la intrusión salina.

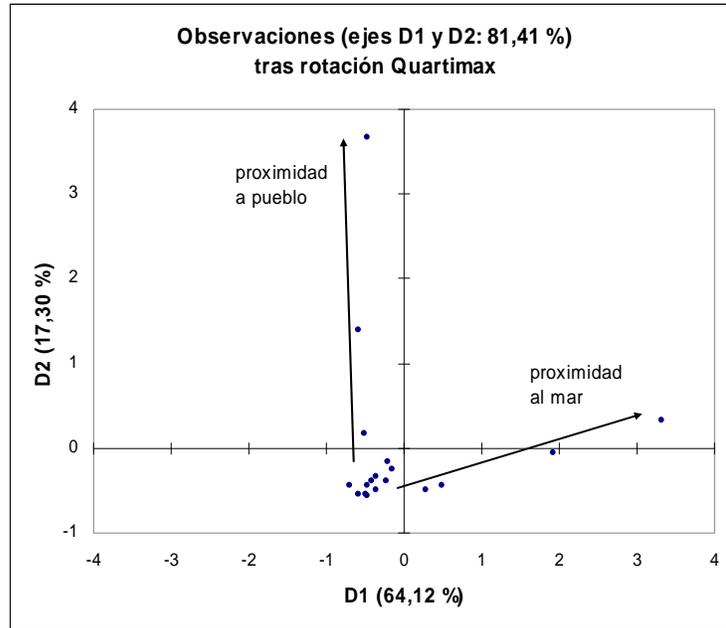


Figura 5.31: Gráfico Biplot-valores en acuífero Los Choros.

5.3.6 Análisis temporal

El sector acuífero Los Choros no cuenta con bases de datos de calidad química de las aguas provenientes de tiempos distintos, que permitan la adecuada aplicación de la metodología y con ello determinar el índice de calidad en tales períodos. Por lo tanto, no es posible aplicar el análisis temporal que plantea la metodología.

5.3.7 Resultados finales

En general, la calidad química de las aguas subterráneas de este acuífero se encuentra entre IC Excepcional a Regular en su parte central y con IC Regular e IC Insuficiente hacia el noroeste y hacia el este. La zona con IC Regular al sureste se ubica en las cercanías del pueblo, con valores más elevados de Aluminio y Nitratos. Su origen se asocia principalmente a contaminación característica de asentamientos urbanos. Se logra reconocer la intrusión salina, al noroeste de la zona de estudio, asociado a parámetros SDT, Cl, Na y Mg, y con IC Regular e IC Insuficiente. Las zonas con IC Bueno e IC Excepcional en la parte central son el resultado que todos los parámetros presentan valores bajos y que no afectan a la salud humana.

El Mapa 02 que se adjunta a este informe presenta, para el sector acuífero Los Choros, los resultados finales de la metodología, incluyendo el IC, general e individual, así como el análisis del origen de los compuestos disueltos.

5.4 Sector acuífero Aconcagua

5.4.1 Antecedentes disponibles

El sector acuífero del río Aconcagua se ubica en la V Región de Valparaíso, en la cuenca del río Aconcagua y es de tipo exorreica. La red de drenaje superficial está constituida por los siguientes ríos principalmente: Estero Pocuro, Estero San Francisco, Río Putaendo, Estero de Catemu, Estero El Melón y Río Aconcagua. El área superficial del acuífero corresponde a 1.186 km² y se extiende a través de la zona costera, Cordillera de la Costa y Valle Central.

Entre las zonas urbanas destacan: Concón, Quillota, La Calera, San Felipe y Los Andes.

La hidrogeología de la zona se desarrolla en depósitos no consolidados, que poseen como relleno rocas sedimentarias y mixtas sedimento-volcánicas. Sólo en sectores de Las Vegas, Llay-Llay, parte de Desembocadura y, posiblemente en Catemu, es posible reconocer más de un acuífero, donde el inferior tiene algún grado de confinamiento. El espesor del acuífero superficial es variable según los distintos sectores: San Felipe-Los Andes entre 50 a 100 m, Putaendo entre 70 y 150 m, Las Vegas entre 35 y 80 m, Llay-Llay entre 5 y 30 m, Rabuco entorno a 20 m, Quillota entre 35 y 90 m, Limache entre 60 y 115 m, Desembocadura entre 10 y 150 m, y en Nogales y Catemu se desconoce (DGA, 2001).

Se debe señalar que el análisis de la información disponible en la Red de Monitoreo de la calidad de aguas subterráneas de la DGA y la revisión de estudios anteriores indicó que la cantidad de información disponible de calidad química era insuficiente por lo que fue necesario realizar campañas de muestreo adicionales. En particular se realizaron dos campañas de muestreo, la primera corresponde a parte de las actividades realizadas para este proyecto y contempló el muestreo de 35 puntos distribuidos en toda el área estudiada. La segunda campaña se enmarca en el estudio (Geohidrología Consultores-DGA, 2009), el cual agregó 15 puntos nuevos con el objetivo de aumentar la densidad de puntos muestreados, junto con ellos se volvió a muestrear 3 puntos en que se verificaron los resultados obtenidos en la campaña

anterior. En la Figura 5.32 se presenta la distribución de los puntos medidos en donde los puntos muestreados en la primera campaña se presentan con una letra "P" inicial, y los de la segunda con una "A". La densidad de los 50 puntos distintos muestreados es 21 km²/punto, aproximadamente.

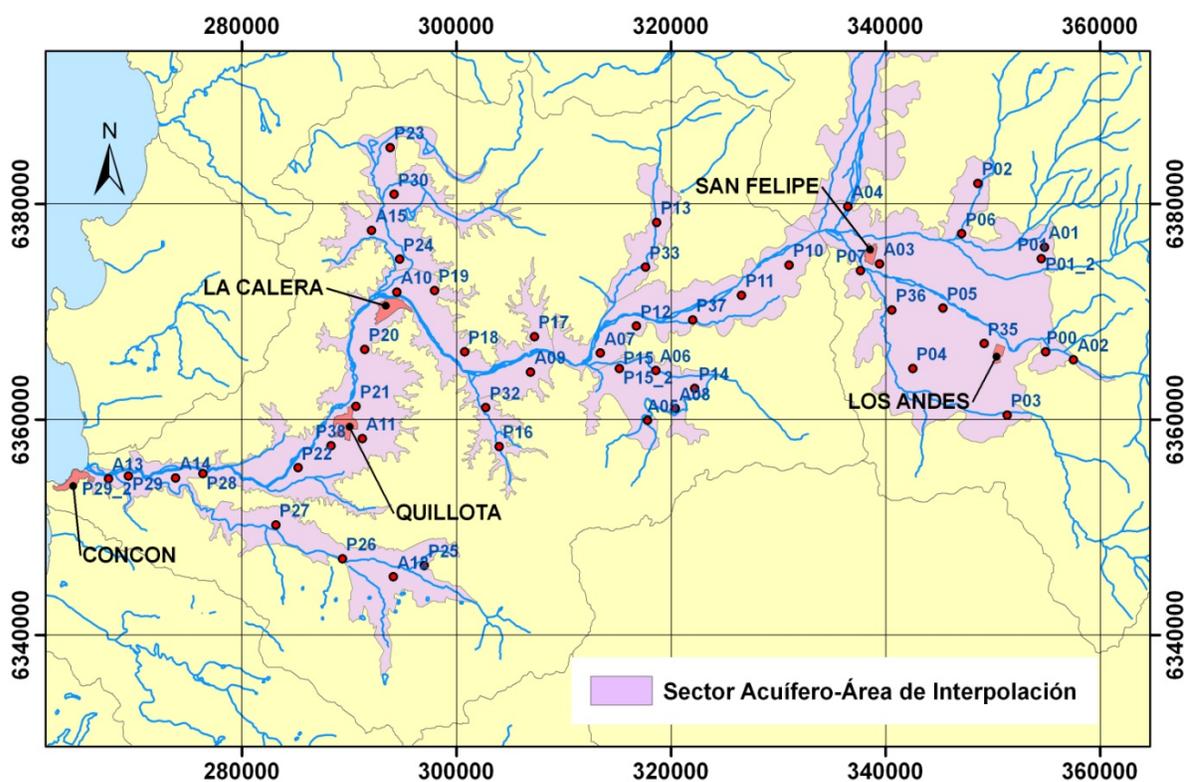


Figura 5.32: Distribución de los puntos de muestreo en sector acuífero Aconcagua.

5.4.2 Elección de parámetros locales

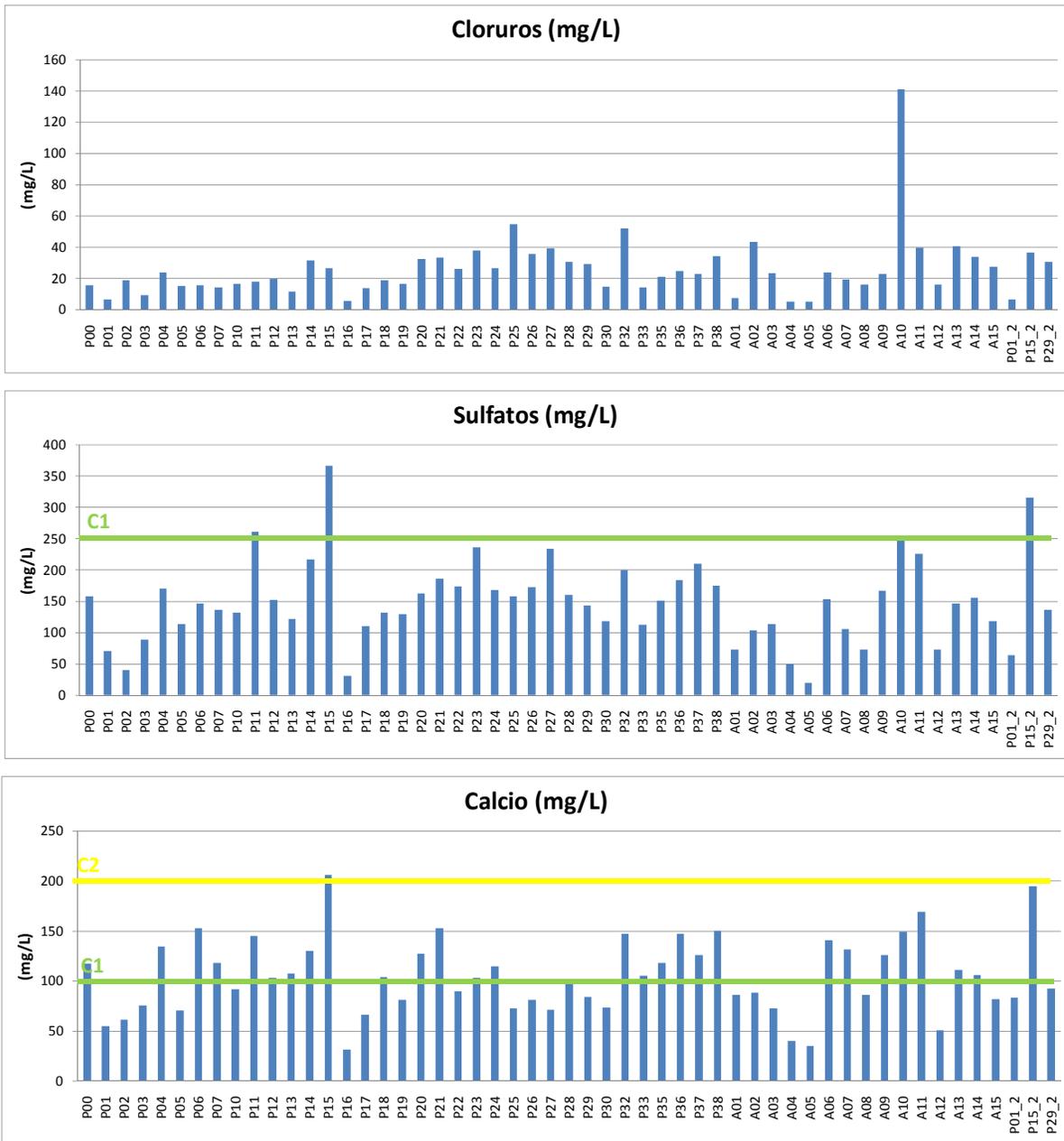
Los parámetros medidos en cada uno de los puntos de muestreo fueron: Cl, NO₃, SO₄, Ca, Na, Mg, SDT, HCO₃, K, pH, Al, Cu, Fe, Mn, Mo, Hg, Ni y Ba. Todos estos parámetros fueron escogidos considerando las actividades productivas y las características naturales del sector, según indicaciones de secciones 4.2.2 y 4.4.

Como se explicó en la metodología, los parámetros del Grupo 1 para el cálculo del IC del acuífero son fijos y son: Cl, SO₄, Ca, Na, Mg y SDT. Sin embargo, para el Grupo 2 se deben elegir dos parámetros locales además del NO₃ que se encuentra fijo. Los parámetros elegidos fueron el Hierro (Fe) y el Manganeseo (Mn), ya que presentan valores importantes en las mediciones efectuadas frente al resto de parámetros, tal como indica la literatura respecto a los contenidos elevados de estos metales con origen natural (Tabla 4.7) en esta zona.

5.4.3 Análisis de datos medidos

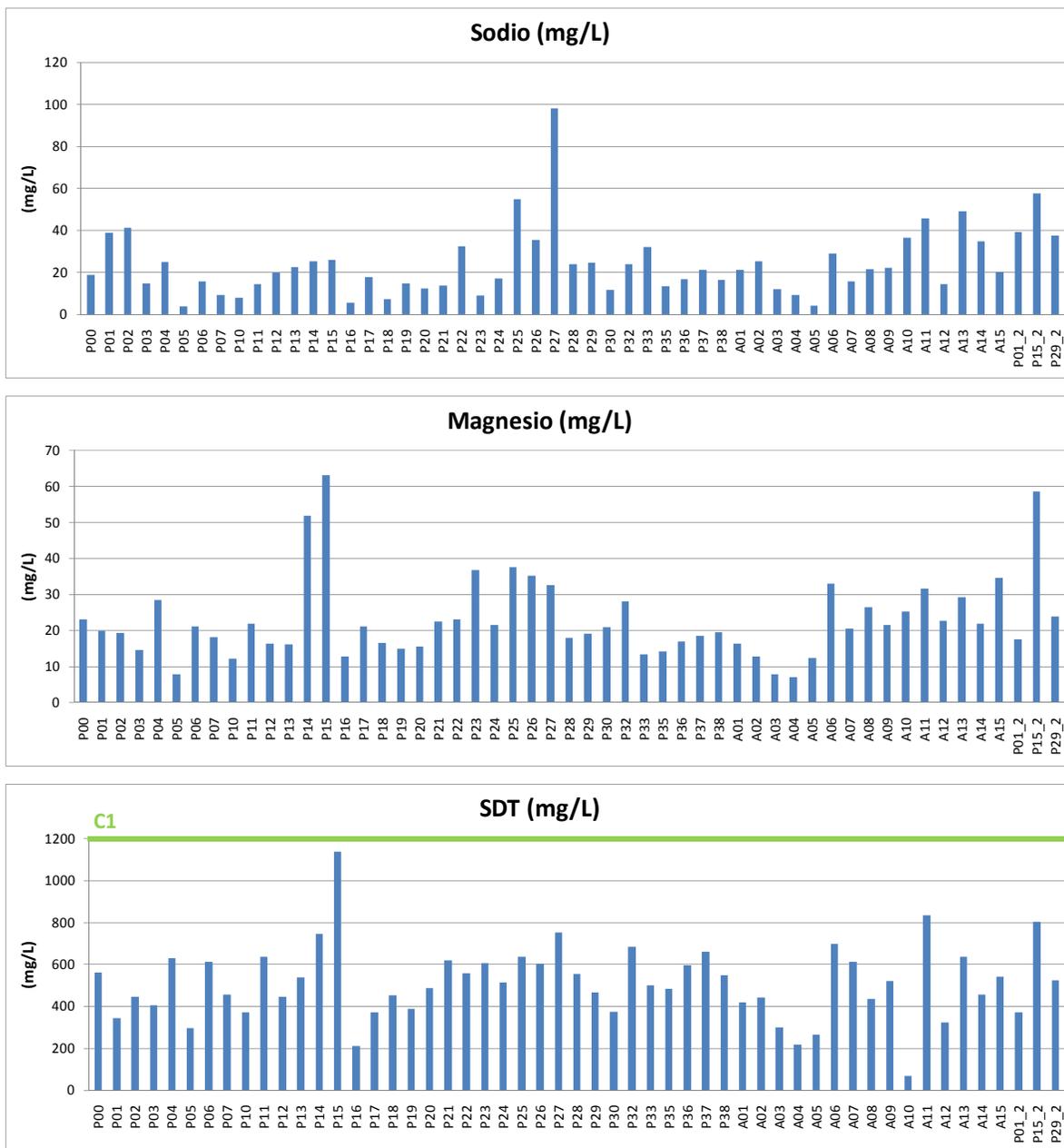
Antes de realizar la interpolación se revisaron los datos medidos para cada uno de los parámetros, con el fin de identificar valores anormales o dudosos y poder verificarlos, eliminarlos o remplazarlos, tomando en consideración condiciones en que fue tomada la muestra. Esta revisión sirve para elegir el método de interpolación que se utilizará. La base de datos se encuentra disponible en Anexos (Sección 4.1.3 y Sección 4.1.4).

En la Figura 5.33 se presenta los resultados de los parámetros medidos para el Grupo 1 junto con la línea de los límites de separación de las clases de calidad. En algunos de los gráficos no se incluyen estas líneas debido a que están fuera del rango de los resultados para el parámetro. Como se puede apreciar, todos los parámetros de este grupo presentan comportamientos similares en todos los puntos medidos y no se registran grandes diferencias. También se distingue que los resultados de los parámetros del Grupo 1, excepto el SO₄ y el Ca, se encuentran bajo el valor de corte de 1, es decir en Calidad Excepcional.



En las abscisas se presentan los puntos de observación

Figura 5.33: Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte, sector acuífero Aconcagua.

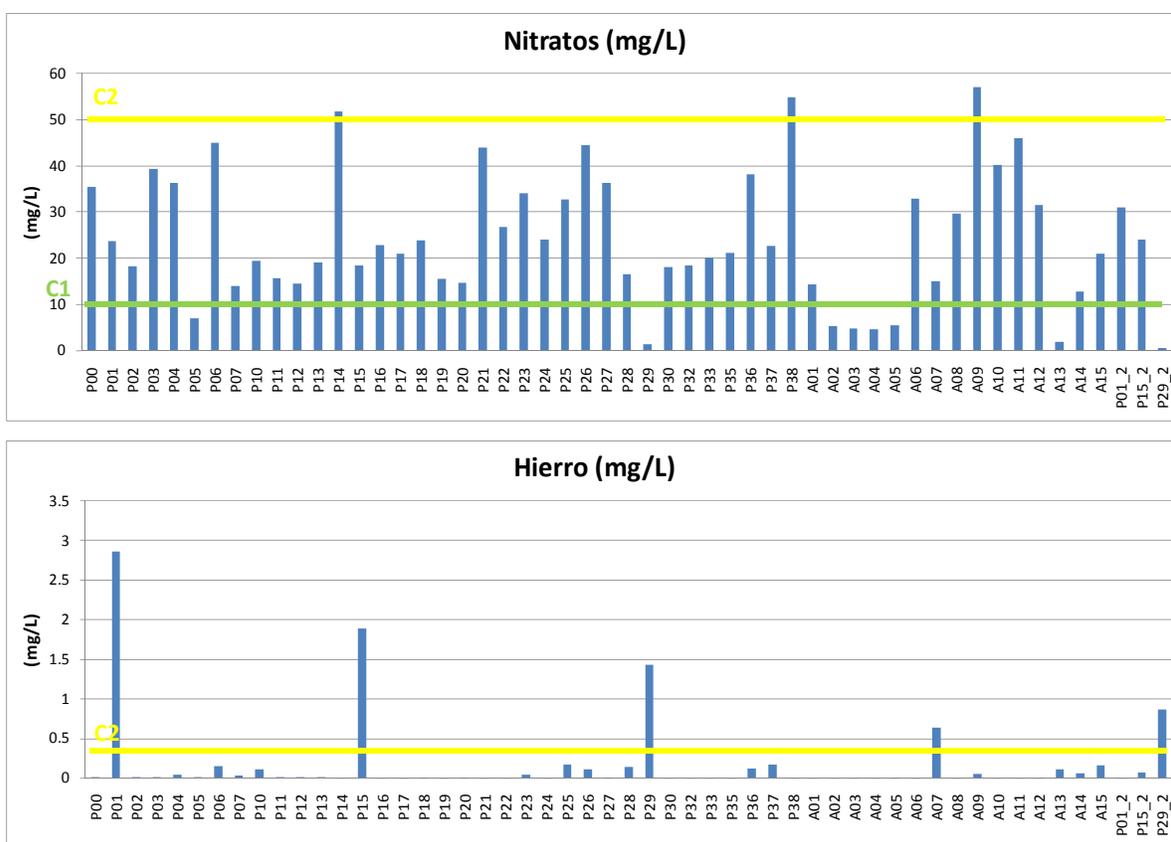


En las abscisas se presentan los puntos de observación

Figura 5.33: Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte, Aconcagua (cont.).

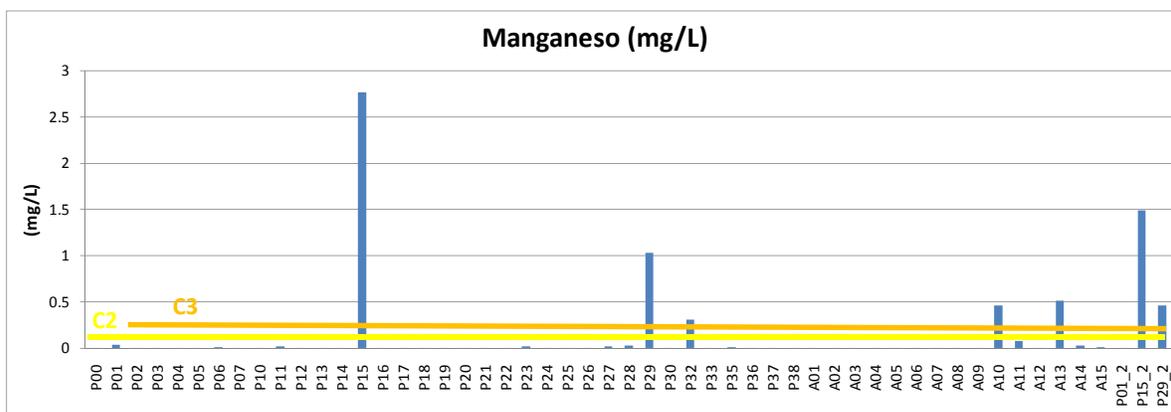
En todos los parámetros del Grupo 2 (Figura 5.34) se supera el valor de corte 1 (límite inferior de Calidad Buena), y en algunos el valor de corte 2 (límite inferior de Calidad Regular). Para el caso de Nitratos se sobrepasa el primer límite de 10 mg/L en la mayoría de los puntos, y el

segundo en tres de ellos. En el Fe se debe destacar que el primer límite establecido se pasa desde el IC Excepcional al Regular dado que no existe un valor intermedio designado (Tabla 4.14), por lo que nunca se clasificará un IC Bueno para este parámetro. Este primer límite de 0,3 mg/L es sobrepasado en 5 puntos del total medido en los que se presentan valores considerablemente mayores. Al igual que en el Fe, en el Mn no existe IC Bueno por lo que se pasa de IC Excepcional a Regular (Tabla 4.14). El Mn es el único parámetro en que se sobrepasa el valor de corte 3 por lo existirá zonas con IC Insuficiente. Al igual que en el Fe, los parámetros que sobrepasan los límites establecidos son sustancialmente mayores al resto.



En las abscisas se presentan los puntos de observación

Figura 5.34: Concentración de parámetros Grupo 2 y valores de corte, sector acuífero Aconcagua.



En las abscisas se presentan los puntos de observación

Figura 5.34: Concentración de parámetros Grupo 2 y valores de corte, sector acuífero Aconcagua. (cont.).

5.4.4 Determinación del índice de calidad

5.4.4.1 Interpolación

El sector acuífero Aconcagua tiene la particularidad que su geometría dificulta la interpolación de parámetros, ya que deben ser consideradas las aislaciones naturales que se producen en los distintos brazos del acuífero. Por esta razón y después de corroborar con interpolaciones manuales, se escogió el método de interpolación de *Spline* con Barreras el cual toma en cuenta las barreras hidrogeológicas (Tabla 4.1). Además, en el caso de los parámetros Hierro y Manganeso, algunas observaciones no superaron el límite de detección del equipo del laboratorio, por lo que se procedió a adoptar un valor igual al 25% de éste. De acuerdo al tamaño del acuífero y la distancia mínima entre los puntos medidos se decidió ocupar una grilla de interpolación de 50 m (Tabla 4.10). Los resultados de la interpolación se presentan en mapas de isoconcentración en los Anexos (Sección 6.1.3).

5.4.4.2 Cálculo de los IC individuales

La evaluación del IC se realizó de acuerdo a los límites especificados en la Tabla 4.13 y la Tabla 4.14 evaluando mediante interpolación lineal entre cada valor de corte de los parámetros del Grupo 1 y Grupo 2.

Los resultados de las evaluaciones de la interpolación de los parámetros individuales se presentan desde la Figura 5.35 a la Figura 5.43. En las primeras 6 figuras se exponen cada uno de los parámetros del Grupo 1. En estas figuras se aprecia que el Calcio (Ca) desarrolla un IC Bueno en gran parte del sector acuífero, constituyendo el parámetro que presenta el peor IC distribuido en un área mayor. El sulfato (SO_4) también presenta algunos sectores con IC Bueno, pero en la mayoría se muestra un IC Excepcional. El resto de los parámetros de este grupo presenta Índices de Calidad Excepcional en la totalidad del área del sector acuífero.

Los parámetros del Grupo 2 se presentan desde la Figura 5.41 a la Figura 5.43. Se aprecia que estos parámetros presentan índices de calidad peores que en el Grupo 1. Los Nitratos presentan un IC Bueno en casi la totalidad del acuífero, sin embargo existen pequeños focos de calidad Regular. La diferencia entre los índices de calidad para este parámetro no es abrupta por lo que no se debe a focos puntuales. Para el caso del Hierro (Fe), se presentan 3 focos aislados de IC Regular y el resto del área presenta IC Excepcional. No existen zonas con IC Bueno debido a que no se estableció un límite intermedio entre IC Excepcional y Regular (Tabla 4.14). Lo anterior es un indicador que el Hierro se presenta puntualmente en algunas zonas y no constituye una característica general del acuífero. El último parámetro del Grupo 2 es el Manganeso, y también presenta IC peores llegando incluso a calidad Insuficiente. Este parámetro tampoco tiene un valor límite intermedio que establezca el IC Bueno (Tabla 4.14).

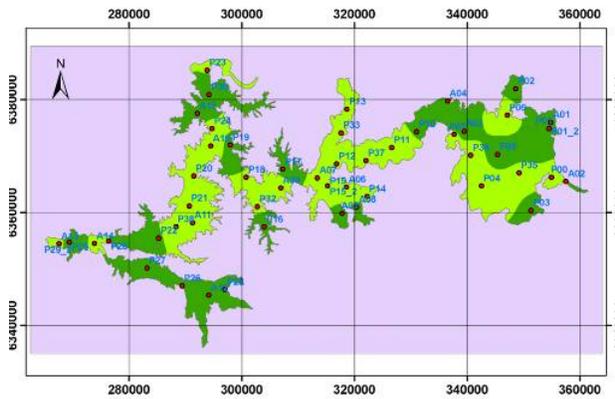


Figura 5.35: Índice de calidad individual de Ca en sector acuífero Aconcagua.

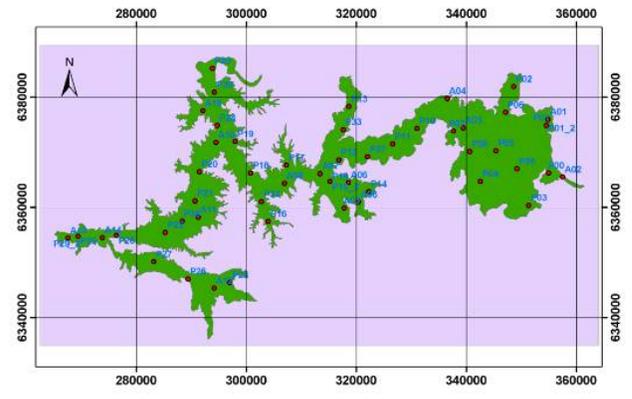


Figura 5.36: Índice de calidad individual de Cl en sector acuífero Aconcagua.

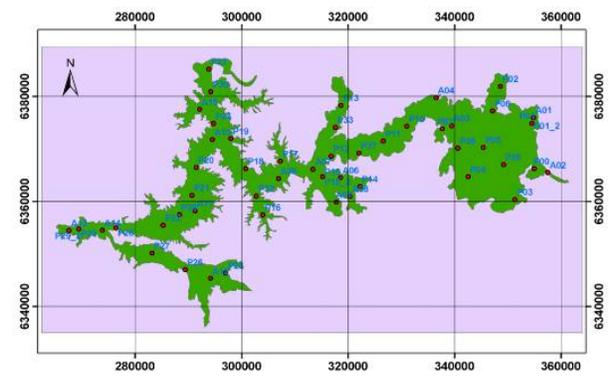


Figura 5.37: Índice de calidad individual de Mg en sector acuífero Aconcagua.

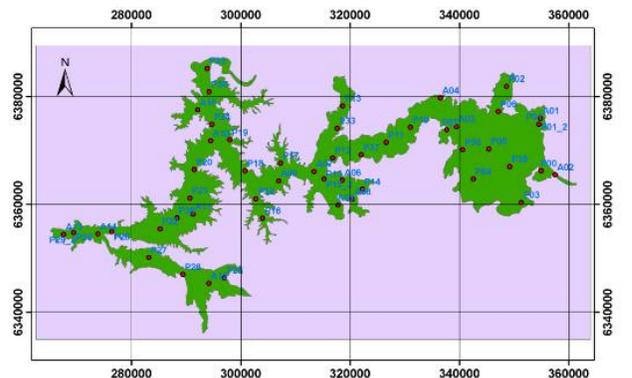


Figura 5.38: Índice de calidad individual de Na en sector acuífero Aconcagua.

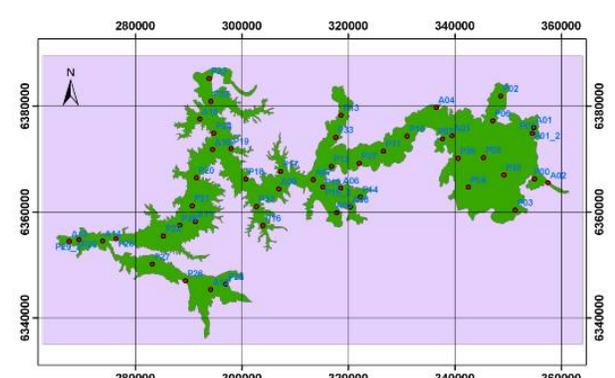


Figura 5.39: Índice de calidad individual de SDT en sector acuífero Aconcagua.

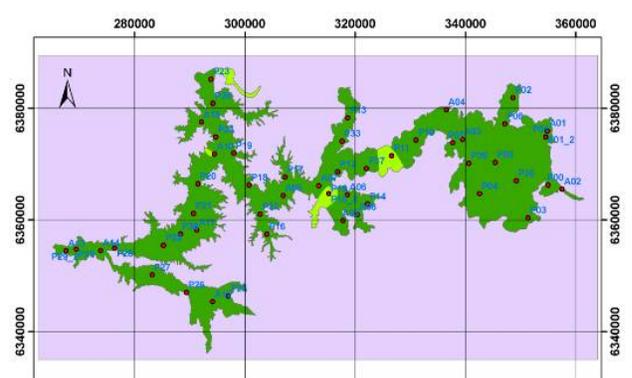


Figura 5.40: Índice de calidad individual de SO₄ en sector acuífero Aconcagua.

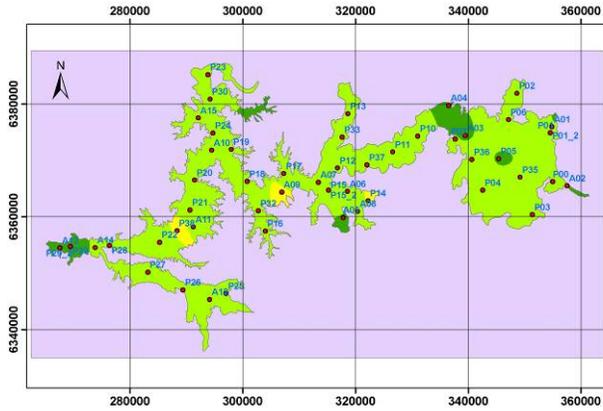


Figura 5.41: Índice de calidad individual de NO_3 en sector acuífero Aconcagua.

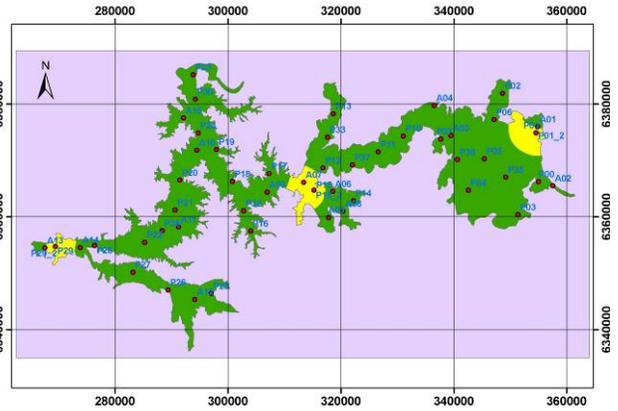


Figura 5.42: Índice de calidad individual de Fe en sector acuífero Aconcagua.

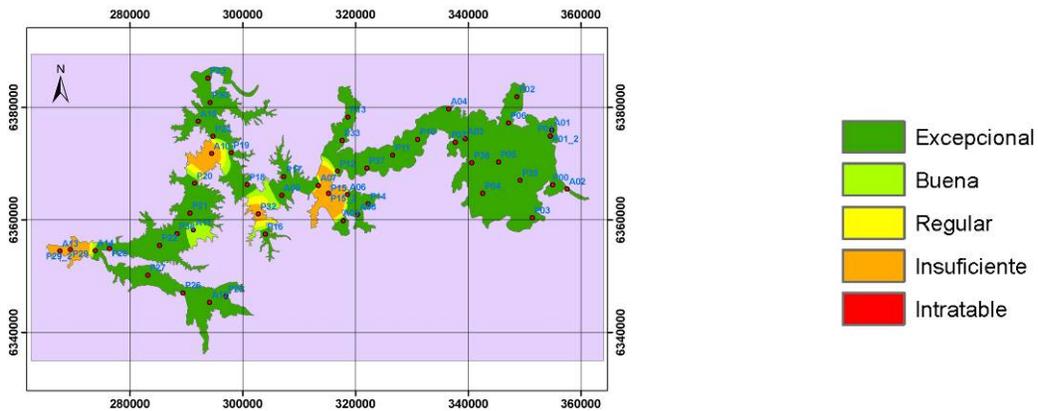


Figura 5.43: Índice de calidad individual de Mn en sector acuífero Aconcagua.

5.4.4.3 Cálculo del índice de calidad general

De acuerdo a lo especificado en la metodología el cálculo del IC general, debe realizarse de acuerdo a los criterios especificados en la Tabla 4.16, revisando la aplicabilidad de éstos en el área estudiada. En la Tabla 5.10 se presenta los requisitos del cálculo del IC general en conjunto con comentarios acerca de la aplicabilidad de cada uno de ellos para los parámetros estudiados.

Tabla 5.10: Criterios y Comentarios sobre la aplicación en sector acuífero Aconcagua.

Criterios	Comentarios
Si existe un parámetro con IC Intratable, el IC general es Intratable	Dentro de las evaluaciones de la interpolación no aparece ninguna zona como intratable para ninguno de los parámetros. Por lo tanto este criterio no se aplica.
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, definidos en la NCh409, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente, el IC general se determina como el peor IC de todos los parámetros medidos.	Todos los parámetros del Grupo 2 (NO ₃ , Mn y Fe) se encuentran incluidos pueden afectar a la salud humana, de acuerdo a NCh409. La unión de las áreas en que alguno de estos tres parámetros supera el IC Excepcional representa casi la totalidad del área del acuífero. Por esta razón, el cálculo del IC final para el acuífero está regido por este criterio en casi toda su superficie.
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, definidos en la NCh409, presentan IC Excepcional, el IC general se determina como el promedio aritmético del IC de todos los parámetros	Existen muy pocas zonas en que los parámetros que afectan la salud humana se encuentran en IC Excepcional, por lo tanto este criterio se aplica en una superficie muy reducida del acuífero.

En la Figura 5.44 se aprecia el mapa de IC general para el sector acuífero Aconcagua, y donde se aprecia cuatro zonas con IC Insuficiente, debidas principalmente al Manganeso. El resto del área posee en general un IC entre Bueno y Regular debido principalmente a Nitratos al centro y al oeste, y al Hierro en el extremo este.

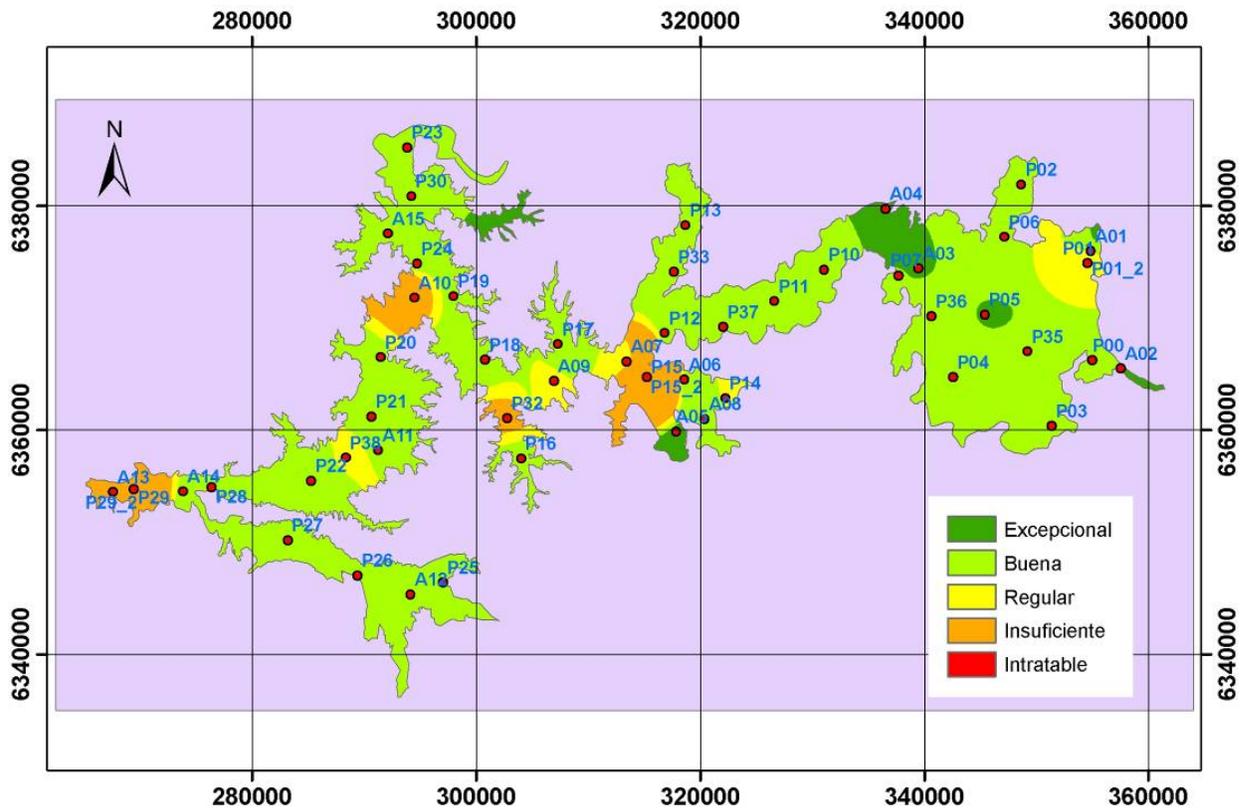


Figura 5.44: Índice de calidad general para el sector acuífero Aconcagua.

5.4.5 Análisis estadístico ACP

Para obtener la caracterización de posible fuente de la calidad química en el acuífero de Aconcagua, se realiza el análisis de componentes principales con el apoyo de una rutina establecida en el programa computacional XLSTAT® que se acopla al software Excel®, y siguiendo cada uno de los pasos presentados en la metodología. La salida de la ejecución de este programa se presenta en Anexos (Sección 6.3.3).

5.4.5.1 Requisitos de la base de datos

La base de datos es la misma que la utilizada para determinar los IC, por lo tanto ya se encuentra depurada adecuadamente. Esta base de datos cuenta con 53 observaciones de 9 parámetros seleccionados: SDT, Cl, SO₄, Ca, Na, Mg, NO₃, Fe y Mn. Por lo tanto cumple con

el tamaño mínimo recomendado (5 veces la cantidad de parámetros) y sería posible obtener correlaciones estadísticamente adecuadas.

Respecto a la correlación entre las variables y a partir de la inspección visual de la matriz de correlación, su determinante ($2,6 \times 10^{-3}$) y el test de esfericidad de Bartlett (rechazo de H_0 con error $< 0,01\%$), se puede establecer que existe una estructura interna en los datos que hacen útil el ACP para obtener variables independientes que resuman la relación entre las variables. La inspección visual de matriz de correlaciones indica que hay correlación entre variables, aunque ésta es baja para Fe, Mn y NO_3 .

5.4.5.2 Selección de factores

Con el uso de XLSTAT®, se obtiene el gráfico de sedimentación que indica los valores propios de los 9 componentes principales y la explicación de la varianza total. Adoptando el criterio de Kaiser de usar sólo aquellos componentes principales con valores propios mayores a 1, se seleccionan los tres primeros que explican el 74,5% de la varianza total.

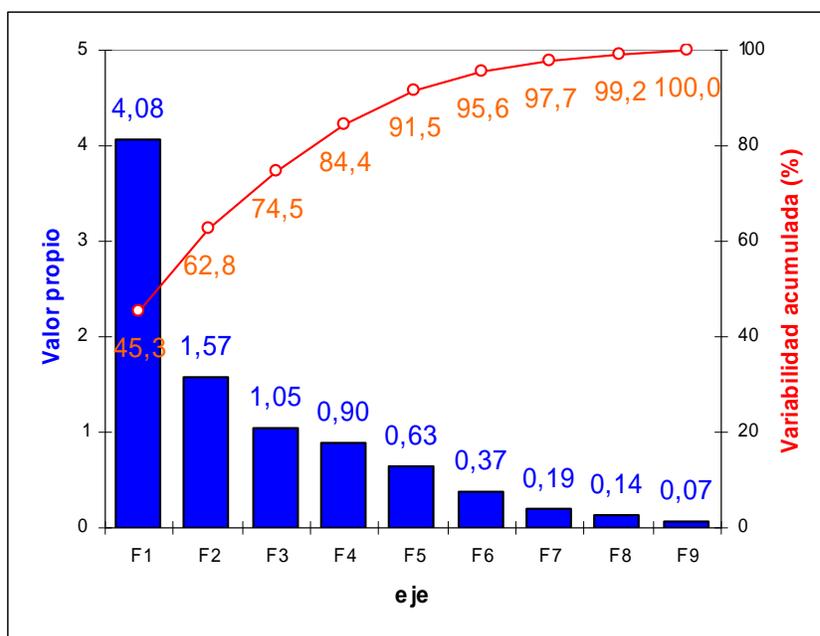


Figura 5.45: Gráfico de sedimentación ACP, en sector acuífero Aconcagua.

5.4.5.3 Matriz de factores

La matriz factorial, que contiene la correlación entre las variables originales (parámetros) y las variables nuevas (componentes principales o factores seleccionados) refleja que las variables SDT, SO₄, Ca, Mg tienen valores altos en factor 1, las variables Fe y NO₃ tienen valores más altos en factor 2 y las variables Na y Cl mayormente en el factor 3. Sin embargo, es posible mejorar la saturación de las variables (valor más alto en un solo factor) considerando la rotación ortogonal de los ejes según método Quartimax. La matriz factorial considerando los factores seleccionados y su rotación, se presenta a continuación.

Tabla 5.11: Matriz factorial de análisis ACP en sector acuífero Aconcagua.

Parámetro	Factor F1	Factor F2	Factor F3	Factor rotado D1	Factor rotado D2	Factor rotado D3
SDT	0,835	0,057	-0,293	0,880	0,100	-0,044
Cl	0,472	-0,368	0,576	0,293	-0,207	0,749
SO ₄	0,909	-0,111	-0,085	0,896	-0,021	0,206
Ca	0,803	-0,180	-0,359	0,883	-0,148	-0,068
Na	0,499	-0,042	0,679	0,269	0,133	0,788
Mg	0,874	0,054	0,037	0,816	0,158	0,277
NO ₃	0,367	-0,674	-0,151	0,433	-0,644	0,099
Fe	0,249	0,772	0,107	0,161	0,802	0,019
Mn	0,691	0,581	-0,007	0,626	0,645	0,078
Varianza explicada acumulada	45,3%	62,8%	74,5%	42,1%	59,7%	74,5%

5.4.5.4 Interpretación de factores

La interpretación semántica de los factores toma en consideración los valores observados de los parámetros relacionados a los factores. El factor 1 y el factor 3 se asocian a un origen o fuente natural ya que presentan valores de concentración bajos, sin embargo se diferenciarían en los mecanismos hidrogeoquímicos. El factor 1, asociado a Mg, SDT, SO₄ y Ca, refleja un comportamiento químico distinto al factor 3, asociado a los parámetros Na y Cl. Estos últimos

son, más bien, conservativos, y se mantienen en solución, mientras que el resto son más activos. El factor 2 se asocia a un origen antrópico, ya que el NO_3 supera los 10mg/L en algunas zonas, y el Fe y Mn se asocian a industrias ubicadas en el sector acuífero (petróleo, cobre, alimentos).

Dado que se escogieron tres factores principales, correspondería representar las relaciones mediante tres gráficos Biplot-variables y tres gráficos Biplot-valores, sin embargo para efectos de la metodología, para discriminar el origen antrópico de algunas variables, gráficos Biplot con factores 1 y 2 (rotados) en los ejes serían suficientes, el resto se presenta en Anexos (Sección 6.2.3).

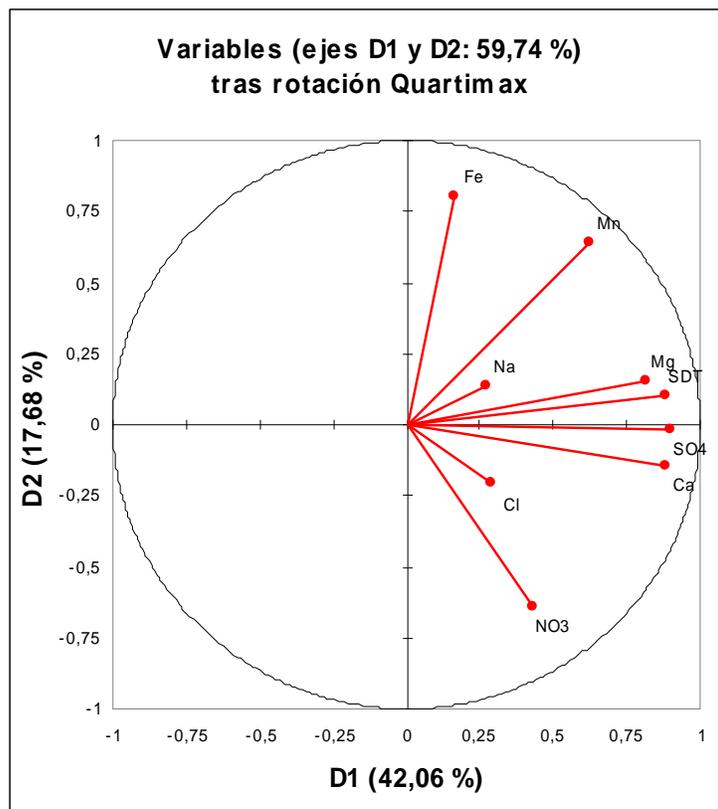


Figura 5.46: Gráfico Biplot-variables en sector acuífero Aconcagua.

Los factores 1 y 2 rotados representan el 59,7% de la varianza total. Los parámetros Mg, SDT, SO₄ y Ca se encuentran bien representados (longitud de vectores), se relacionan entre ellos (ángulo pequeño) y se asocian fuertemente al factor 1 (ángulo pequeño), por lo que su origen debe ser principalmente natural. Los parámetros Na y Cl se encuentran relacionados, no se encuentran bien representados por factores 1 y 2, pero sí por factor 3 por lo que tienen un origen natural, pero con una química distinta al primer grupo mencionado. Los parámetros Fe, Mn y NO₃ se asocian un poco más con el factor 2, pero mantienen relación con el factor 1, por lo tanto su origen es tanto natural como antrópico. Esto es consistente con la literatura que menciona al Fe y al Mn como fuentes naturales de contaminación en la V región (Tabla 4.7). Otro aspecto destacable es la relación casi inversa entre Fe y NO₃, indicando posiblemente que el origen, si bien es antrópico en ambos casos, serían actividades casi excluyentes, por ejemplo agrícola para el NO₃ e industria en caso del Fe y del Mn. De hecho, al apreciar en los mapas de isoconcentración respectivos que zonas con mayores valores no son las mismas. Por último, esto resulta consistente con lo planteado por la OMS como posibles fuentes de los parámetros en cuestión.

Tabla 5.12: Origen principal de parámetros en sector acuífero Aconcagua.

Parámetros	Origen principal
Na, Cl	Natural
SDT, Mg, SO ₄ , Ca	Natural
Fe, Mn	Antrópico (industrial) y Natural
NO ₃	Antrópico (agricultura)

5.4.5.5 Puntuaciones factoriales y representaciones gráficas.

Para completar el ACP en sector acuífero Aconcagua se presenta el gráfico Biplot-variables, con las puntuaciones factoriales de las observaciones de acuerdo a los factores 1 y 2 rotados. Se aprecia que la mayoría de los puntos se ubican en torno al origen, mientras que sólo algunos se alejan de éste y que en general coinciden con las zonas de peor calidad, lo que reflejaría que existen fuentes de contaminación localizadas de carácter industrial. Los que se ubican hacia la parte positiva del factor rotado D2 corresponden a las zonas de desembocadura

y la parte central (puntos P15 y A07) con valores elevados de Manganeso y Hierro, reflejo de la actividad industrial. Por otra parte, los puntos más alejados hacia la parte negativa de factor rotado D2 corresponden a zonas con valores elevados de Nitratos, como P38, A09, P14 y A10, prevaleciendo la actividad agrícola sobre la industrial.

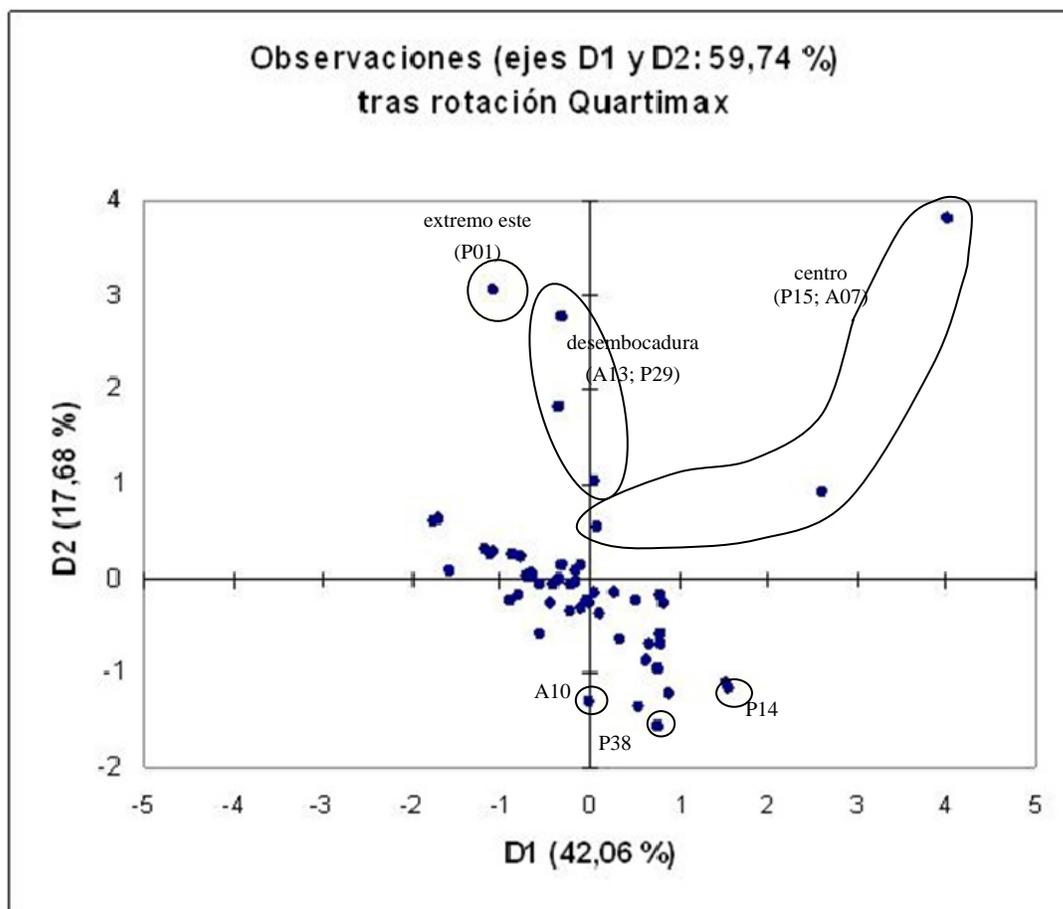


Figura 5.47: Gráfico Biplot-valores en sector acuífero Aconcagua.

5.4.6 Análisis temporal

En el sector acuífero Aconcagua no se cuenta con bases de datos de calidad química de las aguas provenientes de tiempos distintos, que permitan la adecuada aplicación de la

metodología y con ello determinar el índice de calidad en tales períodos. Por lo tanto, no es posible aplicar el análisis temporal que plantea la metodología.

5.4.7 Resultados finales

En general se aprecia la calidad de las aguas de este acuífero es Buena, sin embargo existen zonas donde la calidad empeora hasta ser Insuficiente. El IC Bueno generalizado está marcado por los niveles de NO_3 , los que reflejan una afectación antrópica cuyo origen principal sería la actividad agrícola. Las zonas con peor calidad (IC Regular e IC Insuficiente) se deben a valores aún más elevados de NO_3 , así como de Mn y Fe. La ubicación de estas zonas, así como la correlación entre parámetros hace suponer que su origen sea la actividad industrial en dichos lugares.

El Mapa 03 que se adjunta a este informe presenta para el sector acuífero Aconcagua los resultados finales de la metodología, incluyendo el IC, general e individual, así como el análisis del origen de los compuestos disueltos.

6 INSTRUMENTOS PARA LA PROTECCIÓN DE LA CALIDAD

Los instrumentos de protección de acuíferos tienen como objetivo preservar la calidad y continuidad del recurso hídrico subterráneo de una determinada zona. Estas medidas constituyen todas las acciones gubernamentales y privadas destinadas para este fin que abarcan desde una gestión directa sobre situaciones de emergencia, hasta labores de educación orientadas a la prevención.

Las medidas de protección parten como base por el conocimiento de las características del sector acuífero (contexto hidrogeológico, línea base de calidad, uso de suelo, etc.), de las principales fuentes de contaminación involucradas y del entorno socio-económico asociado al recurso. Así, bajo este conocimiento es posible identificar las áreas que necesitan de atención prioritaria, y facilita el diseño de mayores (o más precisas) medidas de protección enfocadas a cada sector acuífero en particular.

Para ello, es importante que se realice también una evaluación de los distintos roles que deben tener el estado, los organismos locales, los usuarios y el mercado, de modo que éstos queden bien definidos, tengan autoridad suficiente y exista una buena coordinación institucional y pública que sin duda es la base para la buena gestión y protección de los recursos hídricos. En este sentido, se hacen necesarias las políticas globales e integrales para todo un país, pero también la creación de organismos con una mayor competitividad en terreno, y a nivel regional, capaz de diseñar planes de manejo particulares para cada acuífero, y ejecutar políticas locales para problemas locales.

Los diversos instrumentos y medidas de protección de acuíferos, pueden dividirse en cuatro grupos principales, que son:

- Medidas de conocimiento e investigación.
- Medidas educacionales.
- Medidas políticas y económicas.
- Medidas de acción directa.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de ellos basada en la revisión de antecedentes que se presentan en Anexos (Capítulo 3).

6.1 Descripción de instrumentos de protección

6.1.1 Conocimiento e investigación

Las medidas que competen al conocimiento e investigación son todas aquellas que buscan conocer la cuenca y el acuífero a proteger. En este sentido, estas medidas son básicas para la aplicación de cualquiera de las otras y por lo tanto, deben considerarse como prioritarias a nivel de política gubernamental. Muchas de ellas pueden desarrollarse a partir de una herramienta SIG, lo que genera grandes ventajas para su análisis y desarrollo de otras medidas de manejo de los acuíferos. Deben para ello realizarse tipos de estudios que se mencionan a continuación.

6.1.1.1 Contexto hidrogeológico

De manera introductoria para el desarrollo de este punto se puede citar la definición de Hidrogeología dada por CUSTODIO y LLAMAS (2001): "Hidrogeología es aquella parte de la hidrología que corresponde al almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre". Los campos que deben ser estudiados para una correcta caracterización hidrogeológica son los siguientes:

- **Geología**: ésta constituye el área fundamental del conocimiento hidrogeológico debido a que se estudia el medio físico donde ocurren todos los fenómenos en los ámbitos de la naturaleza y forma de los materiales presentes. Junto con lo anterior se analizan los elementos que condicionan el funcionamiento de los acuíferos, como la distribución de los materiales permeables y/o impermeables, fallas, fracturas, afloramientos del basamento, etc.
- **Química del agua**: análisis y clasificación de las aguas de acuerdo a los sólidos y gases disueltos presentes, incluyendo los equilibrios de estas disoluciones, conceptos de alcalinidad y agresividad.

- Hidrología: dentro de esta área se incluyen los ámbitos climáticos y su interacción con los cauces superficiales y subterráneos.
- Hidráulica subterránea: dentro de este tema se analizan teórica y empíricamente todos los procesos que condicionan el movimiento del agua subterránea. Dentro del análisis se incluyen los principios generales de movimiento en medios porosos, grados de confinamiento de los acuíferos asociados y el efecto asociado a captaciones subterráneas.

6.1.1.2 Vulnerabilidad, riesgo y carga de contaminantes

La literatura técnica (DGA, 2004) indica que la vulnerabilidad se puede definir como el nivel de penetración con que un contaminante alcanza una posición específica en un sistema acuífero, considerando el espesor y características de la zona no saturada. Por otro lado, el riesgo de contaminación está determinado básicamente por las características del acuífero, las que son relativamente estáticas (es decir, permanentes a escalas razonables de tiempo) y por la existencia de actividades potencialmente contaminantes, las que son esencialmente dinámicas.

Existen diversas metodologías para la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos. Dichos métodos difieren en los parámetros utilizados, como por ejemplo características de la zona no saturada, profundidad del agua subterránea, recarga neta, permeabilidad del subsuelo, etc. Existen métodos que utilizan un número importante de parámetros, mientras que otros están basados en un número muy reducido. En la práctica, la utilización de un método u otro queda determinada, fundamentalmente, por la disponibilidad de información.

Uno de los métodos utilizados en Chile (SERNAGEOMIN y DGA) es el denominado BGR (otro es el GOD) que fue desarrollado en Alemania, sin embargo se ha generado un versión modificada para su aplicación sólo en el marco del DS46 Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Los resultados de los estudios que utilizaron el método BGR original se presentan en mapas a escalas 1:100.000, 1:250.000 y 1:500.000, en la Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental.

Estudios de esta naturaleza son de gran utilidad para la Planificación Territorial, dado que permiten hacer recomendaciones a las distintas autoridades con respecto a la distribución de

las actividades socio-económicas a realizar en el territorio (uso de suelo), de manera de minimizar la contaminación de los recursos hídricos subterráneos.

La vulnerabilidad de un acuífero depende en gran parte del tipo de obra de infiltración que se utilice, por lo que es importante destacar que los mapas de vulnerabilidad que desarrolla SERNAGEOMIN no consideran la existencia de estas obras. Junto con lo anterior, se debe tomar en cuenta que la escala de estos mapas no permite un grado de detalle a nivel local y específico para determinar vulnerabilidades de contaminación de acuíferos ante una obra que infiltre. Por estas razones, muchas veces será necesario realizar el cálculo de la vulnerabilidad con los datos estratigráficos y características locales, considerando los mapas del SERNAGEOMIN como antecedentes a considerar.

6.1.1.3 Línea Base de calidad de aguas

La línea base es un concepto ampliamente utilizado en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y se refiere a las condiciones antes de realizar un determinado proyecto o antes que se manifiesten efectos antrópicos. Se aplica a las llamadas "variables ambientales" que son susceptibles a ser modificadas por estas actividades como flora y fauna, calidad del aire y el agua, ruido, paisaje, etc.

Para el caso de la calidad de las aguas, la línea base se refiere a la composición de éstas antes de recibir los impactos de las actividades antrópicas presentes en una zona determinada. En general se obtiene mediante análisis realizados a las aguas en las zonas de recarga (subterráneas o superficiales) de los acuíferos a los que se puede incorporar efectos de las características naturales de los acuíferos estudiados.

La línea base constituye un punto de comparación a la situación actual y por lo tanto permite cuantificar el grado de afectación por actividades antrópicas en las zonas estudiadas.

En el caso de los acuíferos esta información es particularmente importante, ya que, permitiría definir las distintas características naturales de los acuíferos, representando la variabilidad existente a lo largo del país. Desde acuíferos con altas concentraciones de iones en la zona norte hasta acuíferos con aguas prácticamente puras en la zona sur del país. Lo anterior también resulta de gran utilidad si se considera que en el futuro se requerirá contar con normas de calidad secundarias.

6.1.1.4 Fuentes de contaminación

Las actividades humanas producen gran cantidad de desechos y provocan perturbaciones en el ciclo hidrológico y en la circulación de las aguas. Con frecuencia el resultado es una contaminación de las mismas, unas veces recuperable, pero otras prácticamente irreversibles.

Los acuíferos subterráneos, por la lenta circulación de las aguas y la capacidad de adsorción de los terrenos, pueden tardar mucho en evidenciar una eventual contaminación. A su vez presentan un notable poder depurador frente a muchos agentes contaminantes, aunque con un límite que varía mucho dependiendo del agente que se considere y del suelo en que se encuentre.

Del mismo modo que un acuífero resiste a la contaminación, una vez que ésta se ha producido y establecido, la regeneración suele ser extraordinariamente lenta, a veces de muchos años, si es que puede lograrse por medios técnicos y económicamente viables.

Los posibles orígenes de la contaminación de los acuíferos son muy variados y es difícil recogerlos todos en forma sintética. Se puede realizar la siguiente clasificación (CUSTODIO y LLAMAS, 2001):

a) Contaminación por actividades domésticas

Es una contaminación esencialmente orgánica y biológica nacida en fosas sépticas, pozos negros, fugas de sistemas de alcantarillado, vertido indiscriminado de aguas de letrinas, etc., a la que debe sumarse una contaminación nacida de la utilización cada vez más intensa de productos químicos de uso doméstico, tales como los detergentes (o sustancias tensoactivas) en sus diversas versiones.

b) Contaminación por labores agrícolas

La contaminación por labores agrícolas tiene un primer aspecto: los abonos. Estos aditivos suelen ser artificiales o a base de desechos de animales y entonces la contaminación producida es principalmente debida al aporte de Nitratos, compuesto sumamente móvil. También se destaca que la materia orgánica se consume, en general, liberando CO₂. El dióxido de Carbono puede contribuir apreciablemente al

endurecimiento y aumento de la alcalinidad del agua de infiltración profunda, dependiendo del clima, tipo de suelo y cultivo.

El segundo aspecto importante se encuentra en los regadíos cuando se produce infiltración del agua excedente con calidades deficientes. Si se realiza esta infiltración en zonas mal drenadas y con escasa recarga natural podría producirse, después de un tiempo, un agua no apta para los cultivos establecidos.

Por último se distingue un tercer aspecto asociado a las labores agrícolas derivado de la utilización de pesticidas (insecticidas, herbicidas, plaguicidas, etc.). Estos pueden constituir un problema grave y permanente en las aguas, en especial debido a ciertos tipos como el DDT.

c) Contaminación por ganadería

Es una contaminación esencialmente orgánica y biológica, con matices muy similares a la contaminación por actividades domésticas, pero con frecuencia más concentrada y aguda, en especial en granjas intensivas. Bajo este aspecto los purines de los planteles porcinos son un grave problema, en cambio la contaminación por granjas avícolas es proporcionalmente menos intensa.

Efectos de este tipo de actividades antrópicas es posible observar en algunos sectores de la VI Región del L. G. B. O'Higgins, donde se concentra la mayor cantidad de planteles porcinos del país.

d) Contaminación por aguas superficiales

Se produce cuando aguas superficiales contaminadas recargan el acuífero. En general (salvo el caso de acuíferos fracturados) la parte en suspensión no contribuye a la contaminación, aunque produce un frenado de la recarga por colmatación del lecho. Efectos de este tipo se han podido observar en el sector sur del acuífero de Santiago, por la relación de éste con el río Mapocho. En este sector existe un flujo desde el río con una alta carga orgánica hacia el acuífero, produciendo un aumento en la concentración de nitratos.

e) Contaminación por aguas salinas

La forma más importante en las regiones costeras es la intrusión salina. Tanto en regiones costeras como en regiones interiores existe además la posible contaminación por movimientos laterales o verticales de aguas salobres o saladas naturales, o a través del medio poroso o favorecido por perforaciones mal construidas o abandonadas. Otras veces las aguas salinas son producto de actividades industriales e incluso municipales, tales como la regeneración de resinas de intercambio iónico o desalinización de aguas salobres.

En el caso de Chile, además de los acuíferos costeros donde ya se han producido aumentos en la concentración de sólidos disueltos (Los Choros), existe el riesgo de impacto por mal manejo en los salares del norte, donde existe relación entre acuíferos de salmueras o aguas muy concentradas con acuíferos de agua dulce que los recargan.

f) Contaminación por actividades mineras

Es una contaminación esencialmente mineral y frecuentemente se puede relacionar con evacuaciones de aguas de mina, con el lavado de mineral y por la depositación de material sin valor comercial, como relaves y botaderos. La disolución y posterior arrastre es producto de la interacción de estos materiales con el agua de lluvia o por aguas de superficie. Este problema es especialmente importante en relaves y botaderos que contienen materiales oxidables, tales como sulfuros y carbonatos. En la minería del petróleo se obtienen cantidades importantes de aguas de salinidad elevada que son también una importante fuente de contaminación mineral de aguas subterráneas. Algunas veces puede existir una contaminación orgánica derivada del vertido de aceites de flotación degradados o de productos relacionados con el petróleo.

g) Contaminación por actividades industriales

Estas contaminaciones son tan variadas como las industrias que las originan. Son especialmente insalubres y nocivas las contaminaciones con metales pesados procedentes de la industria metalúrgica. La industria química y petroquímica puede introducir en el terreno sustancias orgánicas e inorgánicas en grandes cantidades. La industria de la alimentación puede introducir grandes cantidades de materia orgánica al

igual que las de bebidas, las cuales pueden además aportar detergentes. Otra fuente importante de contaminación son las industrias papeleras.

h) Contaminación por actividades nucleares

Las actividades nucleares pueden aportar, además de productos orgánicos e inorgánicos comunes con otras industrias químicas, radioisótopos. Esto ocurre especialmente en las plantas de tratamientos de combustibles nucleares irradiados y de minerales radioactivos. Las actividades médicas también pueden ser un origen de contaminación con radioisótopos.

i) Contaminación a través de pozos mal contruidos o abandonados

Es un tipo de contaminación a la que muchas veces se le presta poca importancia, pero que puede tener graves consecuencias. Los pozos que ponen en comunicación varios acuíferos, los pozos con entubaciones rotas o corroídas en niveles con aguas de mala calidad o aquellos que permitan la fácil entrada de aguas superficiales son especialmente peligrosos.

j) Contaminación por pozos de inyección

La introducción en el terreno de aguas residuales mediante pozos es una práctica cada día más difundida, y en general es una forma de utilizar el subsuelo como receptor de residuos. La infiltración puede realizarse con precauciones y siendo muy consciente de las limitaciones del método. Muchas contaminaciones de aguas subterráneas nacen de pozos de inyección mal proyectados, mal contruidos o mal utilizados. Pueden originar una contaminación no sólo inorgánica, orgánica o biológica, sino también una contaminación térmica a la que por desgracia muchas veces se le concede poca importancia.

k) Contaminación por vertido de basuras

Es una contaminación muy ligada a las actividades humanas. Su máximo desarrollo se tiene cuando las basuras se entierran de forma inadecuada en excavaciones no impermeables o que entran en contacto con el nivel freático. Puede ser una contaminación orgánica, biológica e inorgánica a la vez, en ocasiones muy seria.

l) Contaminación natural

Esta contaminación se produce por las condiciones y composiciones propias de los acuíferos. Un ejemplo son los acuíferos en el norte de Chile por su gran concentración de Arsénico y Cloruros debida a los minerales propios presentes en la zona. Se debe tener especial cuidado en la explotación de estos recursos, ya que en algunos casos podría provocar el aumento de estas concentraciones de acuerdo al tipo de explotación.

6.1.1.5 Puntos de extracción

Es importante conocer los puntos de extracción del sector en estudio y la magnitud de cada una de ellas debido a que es importante para realizar los balances hídricos de una cuenca y determinar la disponibilidad del recurso. Idealmente se debería tener la información de la habilitación de estos puntos de extracción con el objetivo de identificar el acuífero explotado.

6.1.1.6 Monitoreo

El monitoreo continuo es esencial para llevar el control integral de la disponibilidad del recurso y su calidad. Los puntos de muestreo deben estar acordes al programa de monitoreo definido según objetivos de control de la calidad del agua. El programa de monitoreo queda definido por:

- Parámetros a controlar: parámetros comunes y locales.
- Ubicación de los puntos de control: que aseguren representatividad.
- Frecuencia del monitoreo: que permitan seguimiento de variaciones.
- Protocolo de toma, transporte y análisis de las muestras: de acuerdo a normativas vigentes.

6.1.2 Educación

El interés por la educación ambiental nace de la necesidad de encontrar respuestas formativas al problema ambiental. Lo que no puede resolver la política y las leyes vigentes fortalece la idea de educar a los ciudadanos para que cada uno participe activamente en la protección y cuidado del medio ambiente. Las medidas de protección educacionales deben estar orientadas

a instruir a la población sobre la importancia del recurso hídrico y su protección. Estas medidas se basan sobretodo en:

- Promover el uso racional del agua, su reciclaje y eficiencia. Y para ello estas ideas y conocimientos deben transmitirse tanto en las escuelas, como en los hogares a través de las empresas de servicios sanitarios, y a las demás industrias que hacen uso del recurso. Para estas últimas deberían realizarse talleres de capacitación, considerando los diversos niveles socio-económicos de las actividades industriales y productivas del lugar.
- Promover programas de prevención de la contaminación. Ello debe realizarse también a partir de talleres de capacitación de empresas en cuanto al manejo y depósito de sustancias potencialmente contaminantes, incluyendo el uso de sustancias alternativas menos nocivas para el medio ambiente.

A modo de ejemplo, en España existe el Centro Nacional de Educación Ambiental (CENEAM) que depende del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, cuyas líneas de trabajo se centran en la recopilación y difusión de información especializada en educación ambiental; en el diseño y desarrollo de programas y materiales de sensibilización y participación ciudadana; en la organización y apoyo a reuniones, seminarios y otros foros de reflexión y debate; en el desarrollo y ejecución de acciones de formación ambiental; y en la cooperación con otras entidades públicas y privadas, tanto en el ámbito nacional como internacional, para la promoción y el desarrollo de la educación ambiental. Dentro de los programas educacionales que desarrolla este centro, y que podrían ser implementar en Chile a través del nuevo Ministerio del Medio Ambiente, se distinguen los siguientes:

- Programas de **enseñanza escolar** en los que se incluyen actividades didácticas (itinerarios ecológicos en los alrededores, actividades y/o talleres educativos) y sugerencias que cada docente puede incluir en su programación. En estos programas, entre otros, se da importancia a reconocer la diversidad de intereses y condicionantes que se plantean a la hora de aprovechar los recursos naturales.

- Programas en los **hogares** dirigidos a familias preocupadas por el impacto ambiental y social de sus decisiones y hábitos. Con esta iniciativa se desea acompañarlas en el proceso de cambio hacia una gestión más responsable de su hogar:
 - Promoviendo el autocontrol del consumo doméstico de agua y energía.
 - Introduciendo medidas y comportamientos ahorradores.
 - Ayudando a hacer una compra más ética y más ecológica.

Los hogares participantes afrontan el reto de ahorrar en sus hogares una cantidad significativa de agua y energía.

- Para las **empresas**, el CENEAM reconoce la posibilidad de realizar capacitaciones en las siguientes opciones de formación:
 - Formación reglada: información sobre estudios impartidos en Universidades, así como Ciclos Formativos de Grado Superior y Grado Medio de Formación Profesional Específica.
 - Cursos y postgrados: información sobre cursos y másteres de temática ambiental impartidos por diferentes entidades, tanto presenciales, a distancia como por internet.
 - Formación CENEAM: información sobre los cursos desarrollados por el CENEAM y otros que se realizan por medio de convenios interinstitucionales.

6.1.3 Medidas políticas y económicas

Las Medidas Políticas y Económicas son aquellas que tienen relación directa con la elaboración de leyes, normas y directrices para la protección de los recursos hídricos, así como con el diseño de planes y programas estratégicos de manejo de los mismos. Algunos de estos puntos serán globales a nivel de país, mientras que otras medidas se diseñarán para cada cuenca en particular, considerando todos aquellos puntos evaluados dentro de las Medidas de Conocimiento e Investigación.

6.1.3.1 Incentivos económicos

El incentivo económico es una herramienta bastante útil para impulsar a las empresas a lograr objetivos ambientales. Esta forma de realizar gestión ambiental es de vital importancia cuando

normalizar un determinado umbral de algún parámetro específico tiene un costo económico muy alto para un determinado sector productivo. Sin embargo, existirán muchas empresas que están en condiciones de cumplir con el objetivo ambiental propuesto si es que se les otorga algún beneficio económico, ya que no están obligadas a realizarlo por alguna normativa.

Evidentemente esto no se puede aplicar a todos los parámetros relevantes en materia ambiental, ya que algunos de ellos deberán ser obligatoriamente normados por el grado de afectación que producen a su entorno. Sin embargo, existen muchos de ellos que sí se puede aplicar como por ejemplo crear un incentivo en la disminución del consumo de agua.

Existen muchos instrumentos posibles para realizar estos incentivos económicos, entre ellos podemos nombrar beneficios tributarios en sus distintas modalidades, cofinanciamientos a obras de mejora, etc. El incentivo siempre deberá estar orientado a la rentabilidad económica de realizar las mejoras que permitirán acceder al beneficio.

6.1.3.2 Políticas de autorregulación

Las políticas de autorregulación son las que se refieren a multas y sanciones que se cursan a las entidades que infringen normas estipuladas por el gobierno. Todas estas normas deben tener como objetivo proteger los recursos hídricos en todas sus formas. Un ejemplo de estas normas son el DS N°46 que regula las descargas a aguas subterráneas, o el DS N°90 que regula las descargas a cursos superficiales. Todas estas normas regulan los parámetros físico-químicos de las descargas de efluentes sobre cuerpos de aguas que pueden constituir fuentes de agua potable o riego, por lo tanto son de vital importancia.

Si bien en Chile existen normas relacionadas con la emisión de líquidos potencialmente contaminantes sobre cuerpos de agua superficiales y subterráneos, existen pocas normas que regulen o busquen un objetivo de calidad ambiental desde el punto de vista de la calidad físico-química del agua. Estas normas son denominadas como normas secundarias y en efecto, sólo existen para algunos ríos del país, pero son totalmente inexistentes para aguas subterráneas.

Contar con normas de calidad resulta prioritario como estrategia de protección de acuíferos, ya que desde el punto de vista de la institucionalidad ambiental en Chile sin esta herramienta

resulta muy complicado establecer o utilizar los instrumentos de gestión ambiental como planes de descontaminación y prevención.

Los planes de descontaminación tienen por objetivo recuperar los niveles, en este caso la calidad físico-química del acuífero, a los señalados en las normas. Los planes de prevención tienen por objetivo el evitar la superación de las normas de calidad ambiental. Basados en normas de calidad ambiental es posible entonces generar zonas saturadas o de latencia, tal como se ha hecho en varias ciudades de Chile, en el caso de la calidad del aire.

En el caso de Chile la elaboración de normas de calidad requerirá un esfuerzo importante, ya que, se deben generar normas a nivel de acuífero. Dada la geografía de Chile existen una gran cantidad de ambientes diferentes que hace que existan acuíferos con calidad físico-químicas totalmente distintas. Lamentablemente sin normas de calidad ambiental para el agua subterránea estas herramientas de gestión ambiental que dispone el estado son instrumentos inaplicables.

Un problema adicional es que para poder contar con una adecuada caracterización de la calidad físico-química de los acuíferos con el objetivo de definir objetivos de calidad, requiere poder levantar líneas bases que permitan observar la calidad natural del acuífero, ojalá sin actividad antrópica o con un efecto menor. Una visión general de los sistemas acuíferos del país indica que actualmente existe una cantidad importante de ellos con calidades similares a la natural. Sin embargo, cada día aumenta la presión por la extracción de estos recursos y aumentan los riesgos de que actividades potencialmente contaminantes produzcan cambios en la calidad natural que haga aún más complicada la tarea de elaborar normas de calidad.

En resumen, el problema de la falta de normas podría ser abordado en una primera etapa al menos realizando muestreos de calidad en los principales acuíferos de cada región, con el objetivo de contar con información de calidad físico-química de los acuíferos con baja o nula afectación. Posteriormente cuando se decida elaborar normas secundarias se contará con la información técnica necesaria. De otro modo se contará con información alterada y que no reflejará de manera adecuada los objetivos ambientales reales para cada acuífero.

Otro ejemplo de aspectos no regulados es el suelo para el cual no existe una normativa específica que reglamente su calidad o las disposiciones que se realizan sobre él. La

confección de una normativa específica resulta compleja, dado los estudios que requiere, sin embargo se deberían realizar esfuerzos por incorporar los aspectos no regulados realizando investigaciones propias y utilizando la experiencia extranjera.

Junto con lo anterior, se debería realizar un aumento de las multas por infracción a normas de emisión, actualmente en Chile las multas para muchas de las empresas son bajas y por lo tanto, resulta más rentable pagar las multas que incorporar sistemas de tratamiento de agua a sus operaciones. Las multas tienen como objetivo desincentivar el infringir las normas estipuladas.

6.1.3.3 Programas de ordenamiento territorial

La ordenación territorial puede abordarse desde distintas escalas, donde destacan a nivel de país y a nivel de cuenca o acuífero.

Uno de los principales problemas de Chile es la excesiva concentración de las actividades productivas en la zona central del país. Industrias, universidades, comercio y las principales aduanas se encuentran en torno a Santiago y sus alrededores. Esta agrupación de actividades provoca que los impactos en el medio ambiente, y en especial en las aguas, también se encuentren concentrados en la zona central del territorio nacional.

En este sentido hace falta un programa detallado de ordenación territorial en que se promueva la descentralización del país, es decir un traslado de la actividad económica desde la zona centro a regiones más apartadas. Esto permitirá aliviar la carga ambiental en la zona central de Chile y levantar económicamente las regiones.

El trabajo de descentralización debe abarcar todas las áreas de la actividad humana, desde las económicas hasta las culturales, de manera que sea un proceso con resultados permanentes y efectivos. No basta con trasladar algunas industrias grandes a regiones sin considerar que el traslado generará movimientos de recursos humanos, los cuales demandarán las condiciones sociales y culturales a las que están acostumbrados en las regiones céntricas.

Los instrumentos para lograr estos traslados deberán ser incentivos económicos que hagan rentable la inversión e instalación de los nuevos proyectos. Estas acciones pueden ser complementadas con un aumento en los costos tributarios de las actividades desarrolladas en la zona central, especialmente en los proyectos nuevos.

A nivel de cuenca o de acuífero el ordenamiento territorial debe considerar como primera fuente de información las medidas de conocimiento e investigación, ya que basados en el conocimiento del modelo de funcionamiento conceptual de un acuífero, es posible ordenar los usos de suelo de modo de minimizar el riesgo de afectación en sectores claves del acuífero. De este modo por ejemplo, se podría restringir la instalación de empresas potencialmente contaminantes en aquellos sectores del acuífero donde ingresa la recarga o bien cercanos a pozos de abastecimiento de agua potable o cercano a cursos de agua superficiales, o en aquellos sectores donde la vulnerabilidad del acuífero es alta.

6.1.3.4 Elaboración de planes de manejo integrales

Los planes de manejo son los que integran todas las áreas antes descritas y constituyen un esquema de acción unificado, liderado por una autoridad competente y difundidos a todas las entidades involucradas, ya sean públicas o privadas. El objetivo de estos planes de manejo será preservar la calidad y suministro del recurso hídrico.

Los planes deberán contemplar los campos de acción y las escalas de trabajo objetivo, ya sea a nivel regional y/o de sectores específicos cuando sea necesario. Las distintas escalas requerirán de una magnitud de recursos muy distinta en términos de fiscalización, estudios y administración del trabajo a realizar.

- Las escalas a nivel de sector estarán condicionadas por las actividades productivas que se encuentren de dicho sector y la afectación que estas tienen sobre el recurso. En esta escala será factible de realizar estudios de riesgo de afectación y contaminación y las posteriores medidas de remediación en caso de ser necesarias.
- Las escalas regionales se ocuparán de dar directrices generales en cuanto a ordenaciones territoriales, derechos de aprovechamiento del recurso y educación.

Otro punto importante que se deberá incorporar es el sustento económico que tengan las medidas adoptadas de acuerdo a la situación propia de cada una de las regiones. Cada región tiene capacidades distintas de respuesta a un plan de manejo ambiental de acuíferos y estará condicionada por el nivel de utilidades que genere el rubro productivo. Por esta razón, cada región debería incorporar distintos planes de manejo con objetivos acordes con la región a la que se aplica.

6.1.4 Medidas de acción directa

Las Medidas de Acción Directa son aquellas que se diseñan para un sector acuífero en particular y que buscan la protección, prevención o remediación de la calidad o cantidad del recurso. Se diseñan a partir del conocimiento de los puntos evaluados en las Medidas de Conocimiento e Investigación y para la aplicación de las Medidas Políticas y Económicas, sobretodo, de aquellos puntos que tienen que ver con el plan de manejo integral de la cuenca.

6.1.4.1 Zonificación del acuífero

Elaboración de la Zonificación del acuífero, técnica ampliamente difundida para proteger la calidad del agua subterránea que consiste en delimitar áreas de protección específicas según el funcionamiento del acuífero. La zonificación se considera necesaria para alcanzar un equilibrio entre el desarrollo económico y la protección de los acuíferos, que permite planificar, tomar decisiones, diseñar monitoreos, etc. Para ello se elabora un mapa donde se distingue principalmente la zona de recarga del acuífero y las zonas de protección. En las zonas de recarga se aplica la máxima restricción de actividades, ya que es donde se genera y define la calidad del recurso, mientras que en las zonas de protección se establecen perímetros de protección entorno los pozos de extracción, y donde quedarán definidas las diversas actividades que estarán prohibidas o que pueden desarrollarse sobre ellas.

En general se diseñan entre dos y tres áreas de protección alrededor de los pozos, cuyos perímetros se pueden definir a partir de múltiples parámetros, siendo el tiempo promedio de viaje del agua al pozo a través de la zona saturada (ZS) y los tiempos de degradación promedio de los contaminantes, los criterios normalmente utilizados. La Tabla 6.1 presenta un resumen con los perímetros de las zonas de protección propuestas en los distintos trabajos revisados.

Tabla 6.1. Perímetros de zonas de protección alrededor de pozos.

	FOSTER y GARDUÑO (2002)	ROBINSON y CHILTON (2007)	DEROUNE y DESSARGUES (1998)
Zonas de Protección	I) 10 años por la ZS	I) 50 metros ZS	I) 10 metros ZS
	II) 50 años (ZS)	II) 50 días ZS	IIa) +24 h o +25 m desde la zona I
			IIb) 50 días o 100 m o radio influencia del pozo
			III) Área de recarga

Además, en los mapas de zonificación puede indicarse las zonas de uso de tierras, de descarga de efluentes, de eliminación de basuras, etc.

En caso de acuíferos contaminados, también se ha logrado buenos resultados identificando los horizontes contaminados y utilizando una zonificación vertical, que permite establecer la profundidad suficiente de extracción de agua para que la calidad del agua subterránea sea adecuada.

6.1.4.2 Recargas artificiales

La recarga artificial de los acuíferos es una técnica que se está implementado cada vez más en distintos países, y que generalmente busca resolver problemas de volumen de agua subterránea, pero también mejorar la calidad del agua o impedir o frenar la intrusión salina de acuíferos costeros. En ocasiones ha sido utilizada para resolver problemas de subsidencias del terreno.

Consiste en la inyección directa de agua al acuífero a partir de pozos de inyección, o a partir de la infiltración inducida mediante zanjas, cuencas de detención, lagunas, etc. Las aguas que se utilizan pueden ser aguas subterráneas de otra área, aguas superficiales en períodos de mayores caudales e incluso aguas servidas con tratamientos primarios cuando el método de recarga es la infiltración a través del terreno.

En algunas ocasiones la recarga artificial se realiza considerando solamente los acuíferos como cuerpos almacenadores de agua, de modo que en períodos de abundancia de aguas

superficiales estas son “guardadas” en los acuíferos para ser bombeadas en los períodos de estiaje.

6.1.4.3 Tratamiento y descontaminación

De acuerdo al nivel de contaminación que se presente en un determinado lugar será necesario aplicar alguna tecnología de tratamiento para su remediación o descontaminación. El término tecnología de tratamiento implica cualquier operación unitaria o una serie de éstas que altere la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de reacciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado. Las tecnologías de remediación pueden clasificarse sobre la base de los siguientes principios:

- Estrategia de remediación: existen tres tipos principalmente, i) destruir o modificar los contaminantes, ii) extraer los contaminantes del suelo, o bien iii) aislarlos o inmovilizarlos por métodos físicos o químicos.
- Lugar en que se realiza el proceso de remediación: tratar el suelo sin tener que ser removido (denominadas *In Situ*) o bien excavar y remover el suelo (llamadas *Ex Situ*). La Tabla 6.2 presenta una comparación entre ambos tipos de tecnologías.
- Tipo de tratamiento: se basa en el principio que se utiliza y básicamente son tres, i) el de tipo biológico (utiliza las actividades metabólicas de los microorganismos para degradar o transformar los contaminantes); los fisicoquímicos (utilizan las propiedades físicas o químicas de los contaminantes) y los térmicos (que utilizan calor para incrementar la volatilización los contaminantes). La Tabla 6.3 presenta las ventajas y desventajas de las tecnologías mencionadas.

Tabla 6.2: Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, según lugar.

	<i>In Situ</i>	<i>Ex Situ</i>
Ventajas	Permiten tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar.	Menor tiempo de tratamiento.
	Potencial disminución de costos.	Más seguros en cuanto a uniformidad: homogenizar y muestrear periódicamente.
Desventajas	Mayores tiempos de tratamiento.	Necesidad de excavar el suelo.
	Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo. Dificultad para verificar la eficacia del proceso.	Aumento de costos e ingeniería para equipos. Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante.

Tabla 6.3: Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, según tipo.

	Ventajas	Desventajas
Biológicos	Bajos costos.	Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos.
	Son tecnologías más benéficas para el ambiente.	No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.
	Los contaminantes generalmente son destruidos.	Sólo para la aplicación en contaminantes que sean biodegradables.
	Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior.	
	Generan pocos residuos.	
Fisicoquímicos	Son efectivos en cuanto a costos.	Los residuos generados por técnicas de separación deben tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos.
	Pueden realizarse en períodos cortos.	
Térmicos	El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería.	Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación.
	Permite tiempos rápidos de limpieza.	Es el grupo de tratamientos más costoso, ya que los costos aumentan en función del empleo de energía y de equipos intensivos en mano de obra.

6.2 Análisis de aplicabilidad de instrumentos de protección en sectores de estudio

Anteriormente se presentó un conjunto de instrumentos de gestión que abarcan diversos campos de manera de abordar integralmente la protección de acuíferos. Los diversos instrumentos antes individualizados están divididos en cuatro:

- Medidas de conocimiento e investigación.
- Medidas educacionales.
- Medidas políticas y económicas.
- Medidas de acción directa.

A continuación se muestra el ejercicio de aplicar la primera parte de estas medidas, es decir de **conocimiento e investigación**. Aquí corresponde recopilar toda la información disponible y relevante respecto del acuífero en estudio. Posteriormente se realizará una discusión sobre la aplicabilidad de estas medidas y la repercusión que tendrán en la restantes que se aplican después de realizar el levantamiento de la información existente.

Se debe tener en cuenta que este constituye sólo un ejercicio elaborado con la información disponible. En el desarrollo de cada una de las aplicaciones se realizarán recomendaciones cuando exista información faltante sobre las posibles fuentes o el levantamiento que se deba realizar.

6.2.1 Aproximación a medidas de conocimiento e investigación en sectores acuífero estudiados

Los sectores acuíferos utilizados fueron El Loa, Los Choros y Aconcagua, pues fue donde se aplicó la Metodología de Diagnóstico y Clasificación de Acuíferos. Los antecedentes generales presentados corresponden a información recopilada en el transcurso del proyecto, en tanto que los antecedentes para la aplicación se obtuvieron de bases de datos en información proporcionada por la DGA. La información se presenta en forma de láminas en las que se integró la mayor cantidad de información posible en la menor cantidad de figuras de manera de poder visualizar de mejor manera la situación general del sector acuífero.

6.2.1.1 Sector acuífero El Loa

Antecedentes generales

El sector acuífero El Loa está ubicado en la II Región de Antofagasta, al interior de la cuenca del Río Loa y posee un comportamiento exorreico. Los escurrimientos principales son el río Loa, Quebrada Llalqui y Quebrada León. El acuífero posee un área de 7.950 km² y se extiende desde el valle central hasta la Cordillera de los Andes. No existen resoluciones de la DGA que declaren este sector acuífero como Área de Protección.

La hidrogeología del sector acuífero la componen depósitos no consolidados, con rocas volcánicas fracturadas y rocas carbonatadas. Tipo acuífero: libre y confinado en Calama y Llalqui. La productividad al centro del sector acuífero es clasificada como muy elevada con valores mayores a 10 m³/h/m, sin mayor información en las zonas aledañas.

El uso de suelo predominante esta dado por el sector minero y el sector agrícola. El mayor número de solicitudes de aprovechamiento del recurso hídrico las realiza el sector Minero y en segundo lugar para Riego.

Antecedentes de aplicación

Se realizó una recopilación breve de antecedentes con los que se puede tener una idea general de la información que se encuentra disponible y la que se debería levantar para poder realizar una gestión apropiada de protección de acuíferos. La principal fuente fue el estudio “Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivo de Calidad. Cuenca del Río Loa”, elaborado por la DGA (2004) en el que aparece una recopilación de información con respecto a los siguientes:

- Hidrología, geología e hidrogeología.
- Uso de suelo: agrícola, industrial y urbano.
- Datos de descargas a cursos de agua: industriales y domiciliarios.
- Datos de calidad de las aguas.

Junto con lo anterior, se utilizaron bases de datos proporcionadas por la DGA en las que se incluyen los derechos otorgados en el sector, que contienen la ubicación, caudal y tipo de derecho.

Finalmente se utilizó el mapa de índice de calidad General elaborado mediante la aplicación de la metodología, presentado en Capítulo 3 del presente informe. Este mapa clasifica espacialmente la aptitud química del acuífero considerando los parámetros relevantes generales y locales, de acuerdo a las características propias del sector. Se debe recordar que para el sector acuífero el Loa no existían datos suficientes como para desarrollar la metodología en la totalidad del sector y sólo se realizó en áreas en que fue posible realizar la interpolación necesaria para determinar los índices.

La Figura 6.1 reúne toda la información recopilada en los estudios y bases de datos proporcionadas. En ella se puede ver la directa relación que tiene cada uno de los ítems presentados. Al observar la figura se puede señalar lo siguiente:

- En primer lugar se debe revisar la definición del área sector acuífero, que de acuerdo a la información entregada por la DGA, se realiza tomando en cuenta variados factores. Sin embargo, no existe un criterio único de definición del área denominada “sector acuífero”, por lo que se debiese implementar un criterio único para su determinación que considere todas las variables posibles y tome en cuenta las grandes diferencias que puedan existir entre un acuífero y otro. Un criterio para definir estas áreas podría considerar los límites hidrogeológicos, ya que se tomaría en cuenta las barreras geológicas naturales que limitan hidráulicamente un determinado sistema, considerando como única entrada las precipitaciones del sector en cualquiera de sus formas. En el caso del Loa existen cuencas en la parte superior que realizan aportes al sector acuífero, sin embargo estas cuencas no se incluyen en el área individualizada.
- Existe una cantidad importante de derechos de aprovechamiento sin información acerca de su uso. Se deben determinar con exactitud los derechos que corresponden a extracciones de aguas subterráneas destinadas a agua potable, ya que éstas son las que requerirán una calidad mayor.

- Existen derechos de aprovechamiento para uso minero que no están asociados a actividad minera o alguna generación de residuos de este rubro. Por lo que se debería realizar un levantamiento acucioso de las mineras presentes en el sector ya que es la principal actividad productiva.
- El resultado de la metodología no comprende toda el área del sector acuífero, sin embargo abarca casi la totalidad de la zona de extracciones en las tres áreas que se presentan. Los valores encontrados en las 3 áreas son en su mayoría desde Regular a Intratable debido a las altas concentraciones de cloruros y arsénico.
- Junto con lo anterior, se distingue la necesidad de realizar una ampliación de la red de monitoreo de manera de generar información para aplicar la evaluación de índice de calidad al sector acuífero completo, o por lo menos a las áreas de interés.
- Para este sector aún no existe un estudio completo de vulnerabilidad de acuíferos por lo que no es posible incorporarlo. Sin embargo, cuando se disponga de esta información se podrá contar con un mayor conocimiento de la fragilidad de las distintas zonas a ser afectadas por contaminaciones de origen antrópico.
- El uso de suelo indica que existe un incipiente actividad agrícola en los alrededores de Calama y el resto son zonas sin vegetación o praderas naturales en la parte alta de la cuenca.

6.2.1.2 Sector acuífero Los Choros

Antecedentes generales

El sector acuífero Los Choros se ubica en la IV Región de Coquimbo, al interior de la cuenca Los Choros, de comportamiento exorreico. Los principales cauces son Quebrada El Pelicano, Quebrada Los Pedernales y Quebrada Los Choros. Este acuífero posee un área de 4.173 km² y se desarrolla en la depresión intermedia y zona costera. No existe ninguna resolución emanada de la DGA que declare el sector acuífero Los Choros con limitación a la explotación de aguas subterráneas.

La hidrogeología del sector está compuesta por rocas sedimentarias y mixtas sedimento-volcánicas, además de encontrarse rocas plutónicas e hipabisales. El tipo de acuífero que se desarrolla es del tipo libre. La productividad en el sector centro del acuífero es del tipo elevada a media, con rangos entre 1 y 4 m³/h/m, mientras que al oeste se considera como elevada, con rangos entre 4 y 10 m³/h/m.

El uso de suelo predominante lo realiza el sector agrícola, mediante cultivos tales como olivos, duraznos, hortalizas, maíz y cítricos. La mayor cantidad de solicitudes para el aprovechamiento del recurso subterráneo corresponde al sector agrícola, para riego. Luego en segundo lugar aparece el uso de agua potable y finalmente minería.

Antecedentes de aplicación

Para este sector se dispone de escasa información acerca de las fuentes potenciales de contaminación como del uso de suelo. Sólo se tienen los derechos de aprovechamiento de tipo subterráneo para el sector proporcionados por la DGA y los mapas de vulnerabilidad realizados por el SERNAGEOMIN (método BGR).

El mapa de índice de calidad General se realizó sólo para el sector Playa Los Choros y Los Choros bajos de acuerdo a lo solicitado por la DGA en su interés de cuantificar los efectos de la intrusión salina para el sector específico. La Figura 6.2 reúne la información del mapa de índice de calidad y los derechos otorgados, en tanto que la Figura 6.3 se presenta la vulnerabilidad. De acuerdo a estas figuras se puede señalar lo siguiente:

- Se debe realizar un levantamiento de las actividades mineras e industriales dentro del sector, en conjunto con cualquier otra actividad que constituya una fuente potencial de contaminación. Posteriormente se podrá realizar una mejor gestión territorial considerando esta información.
- En la mayoría del área considerada para el cálculo del índice de calidad se obtienen valores de Índice Excepcional y Bueno, y sólo existe un área reducida en que se obtienen valores regulares producidos por presencia de Aluminio. La porción más reducida del área que presenta un valor de Índice Insuficiente se debe a la combinación de valores altos de cloruros y sólidos disueltos totales. El resultado de la metodología comprende un área reducida de la totalidad del sector, sin embargo constituye una primera aproximación a una zonificación del acuífero ya que al cruzar esta información con la de vulnerabilidad se podrían definir sectores de protección.
- Al igual que en el sector El Loa, se distingue la necesidad de realizar una ampliación de la red de monitoreo de manera de generar información para aplicar la evaluación de índice de calidad al sector acuífero completo, o por lo menos a las áreas de interés.
- En la Figura 6.3 se presenta la vulnerabilidad para el sector acuífero Los Choros. En ella se aprecia que las mayores vulnerabilidades se encuentran cercanas a la Quebrada los Choros y donde se concentran los derechos otorgados (Figura 6.2). También se aprecia que en el sector donde se aplicó la metodología de índice de calidad existen valores de vulnerabilidad altos.

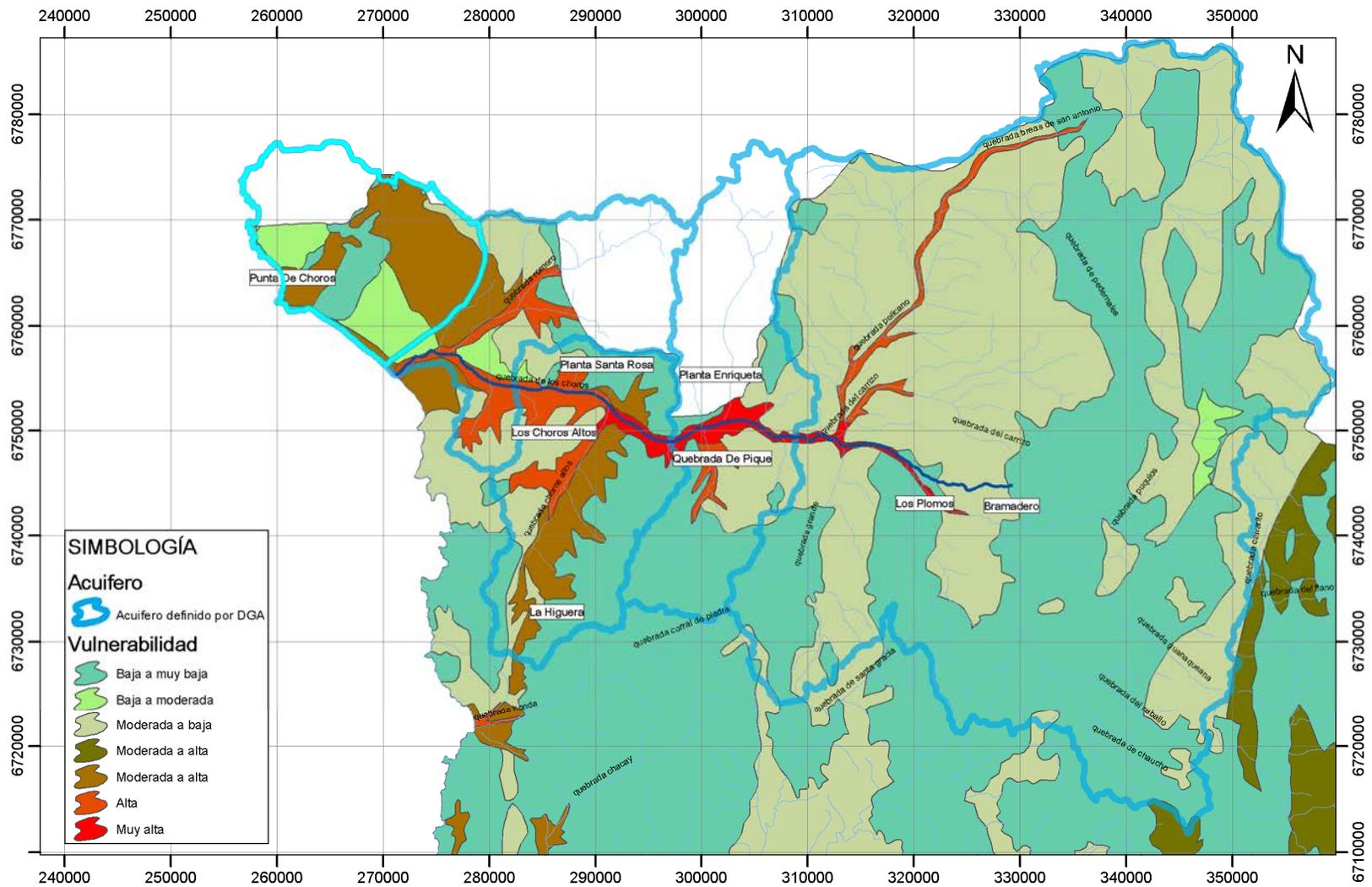


Figura 6.3: Vulnerabilidad sector acuífero Los Choros.

6.2.1.3 Sector acuífero Aconcagua

Antecedentes Generales

El sector acuífero del Río Aconcagua se ubica en la V Región de Valparaíso, en la cuenca del río Aconcagua de tipo exorreica. La red de drenaje superficial está constituida por los siguientes ríos principalmente: Estero Pocuro, Estero San Francisco, Río Putaendo, Estero de Catemu, Estero El Melón, y Río Aconcagua.

El área superficial del acuífero corresponde a 1.156 km² y se extiende a través de la zona costera, Cordillera de la Costa y valle central. No existe una resolución de la DGA que limite la explotación del recurso.

La hidrogeología de la zona se desarrolla en depósitos no consolidados, que poseen como relleno roca sedimentaria y mixta sedimento-volcánicas. En el sector de desembocadura, se pueden distinguir dos tipos de acuíferos: a nivel superficial y de profundidad variable se ubica el acuífero libre de buena capacidad de almacenamiento, el cual se recarga mediante el río Aconcagua, el segundo tipo se ubica a una mayor profundidad, el que se encuentra separado del anterior por una capa predominantemente arcillosa. Dada la baja permeabilidad del estrato arcilloso, se genera un confinamiento del acuífero inferior, el que presenta niveles piezométricos generalmente distintos al acuífero superficial. El acuífero confinado a pesar de tener un bajo almacenamiento, como es característico en acuíferos en presión, presenta buenos rendimientos, presentando transmisividad sobre 700 m²/día en algunos pozos. A mayor profundidad, existirían rellenos más antiguos, que se encuentran más consolidados y cuyo porcentaje de finos puede resultar mayor. Ambos acuíferos presentan un ancho promedio de unos 1.500 m.

Las principales actividades económicas en esta cuenca son agricultura, minería e industria. Respecto a la actividad industrial, la minería metálica más importante de la cuenca corresponde a la explotación de cobre fino en sectores de Los Andes y Catemu. Por último la actividad industrial posee una amplia gama de campos, tales como alimentos, conservas, cemento, y también, por la fabricación de productos químicos industriales y frigoríficos.

Antecedentes de Aplicación

Para el caso del sector acuífero Aconcagua, la principal fuente de información fue el estudio “Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivo de Calidad. Cuenca del Río Aconcagua”, elaborado por la DGA (2004) en el que aparece la misma recopilación de información que se tiene para El Loa. Junto con lo anterior, se utilizaron bases de datos proporcionadas por la DGA en los que se incluyen los derechos otorgados en el sector, que contienen la ubicación, caudal y tipo de derecho.

La Figura 6.4 presenta la información recopilada en los estudios y bases de datos proporcionadas con respecto a las captaciones subterráneas, fuentes potenciales de contaminación y los resultados de la metodología aplicada

En la Figura 6.5 se presenta el mapa de uso de suelos del sector acuífero y en la Figura 6.6 se presenta la vulnerabilidad. Con respecto a todas estas figuras se señala lo siguiente:

- En la Figura 6.4 se observa que existen 4 zonas en que el índice de calidad es Insuficiente lo que se produce por valores altos de manganeso en esas zonas. Los Índices Regular y Bueno son debidos al Hierro y a Nitratos, este último de origen antrópico. En tres de las cuatro áreas en que se presentan valores Insuficientes de índice de calidad se encuentran derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas destinados a agua potable. Junto con la anterior, existe una numerosa generación de residuos industriales líquidos (RILes) en estas mismas áreas. Existen varios puntos de actividad minera que en general se encuentra fuera de la definición del sector, no obstante se encuentran en cuencas aportantes al sector acuífero.
- De acuerdo al mapa de uso de suelos (Figura 6.5) se aprecia que la totalidad del sector acuífero corresponde a terrenos agrícolas. Existen superficies reducidas correspondientes a las áreas urbanas sin embargo corresponden a un porcentaje menor de la superficie total.
- En cuanto a la vulnerabilidad (Figura 6.6), se puede decir que la mayor parte de la superficie del sector presenta vulnerabilidades altas debidas a la baja profundidad del agua subterránea. Sólo en la parte alta de la cuenca, cercano a Los Andes, se presentan vulnerabilidades menores.

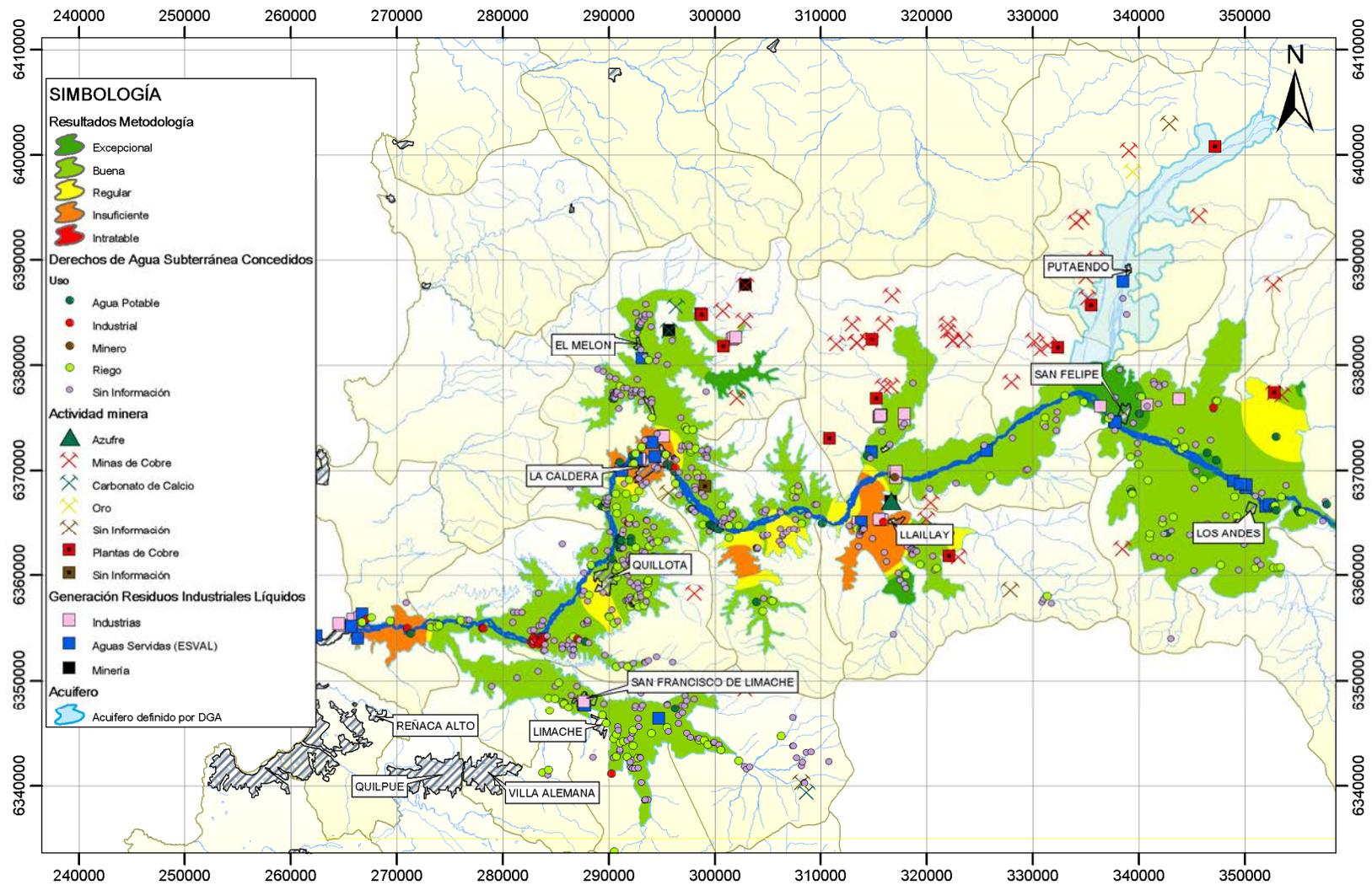


Figura 6.4: Captaciones subterráneas, fuentes potenciales de contaminación y resultados de la metodología en sector acuífero Aconcagua.

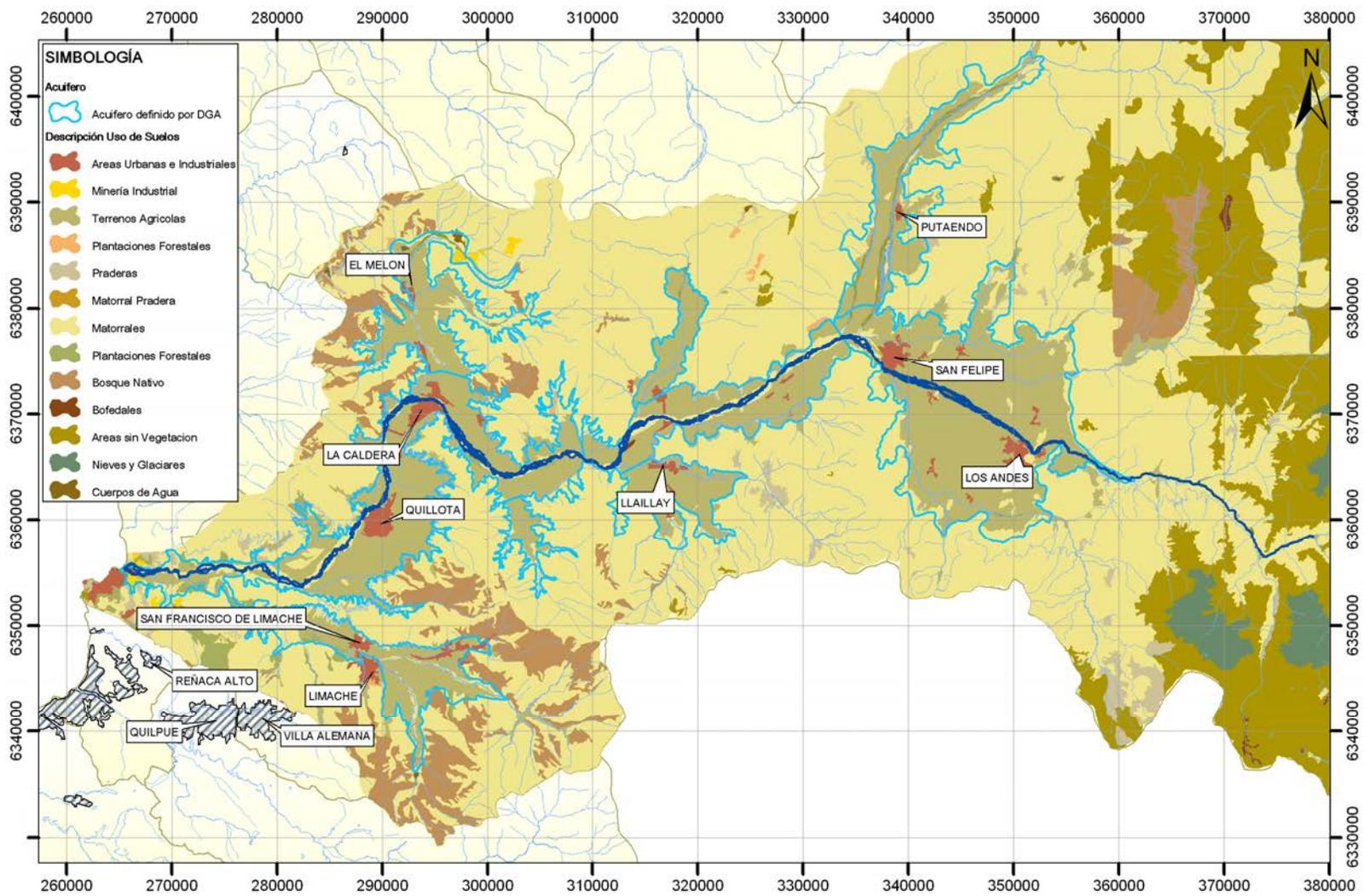


Figura 6.5: Uso de suelos sector acuífero Aconcagua.

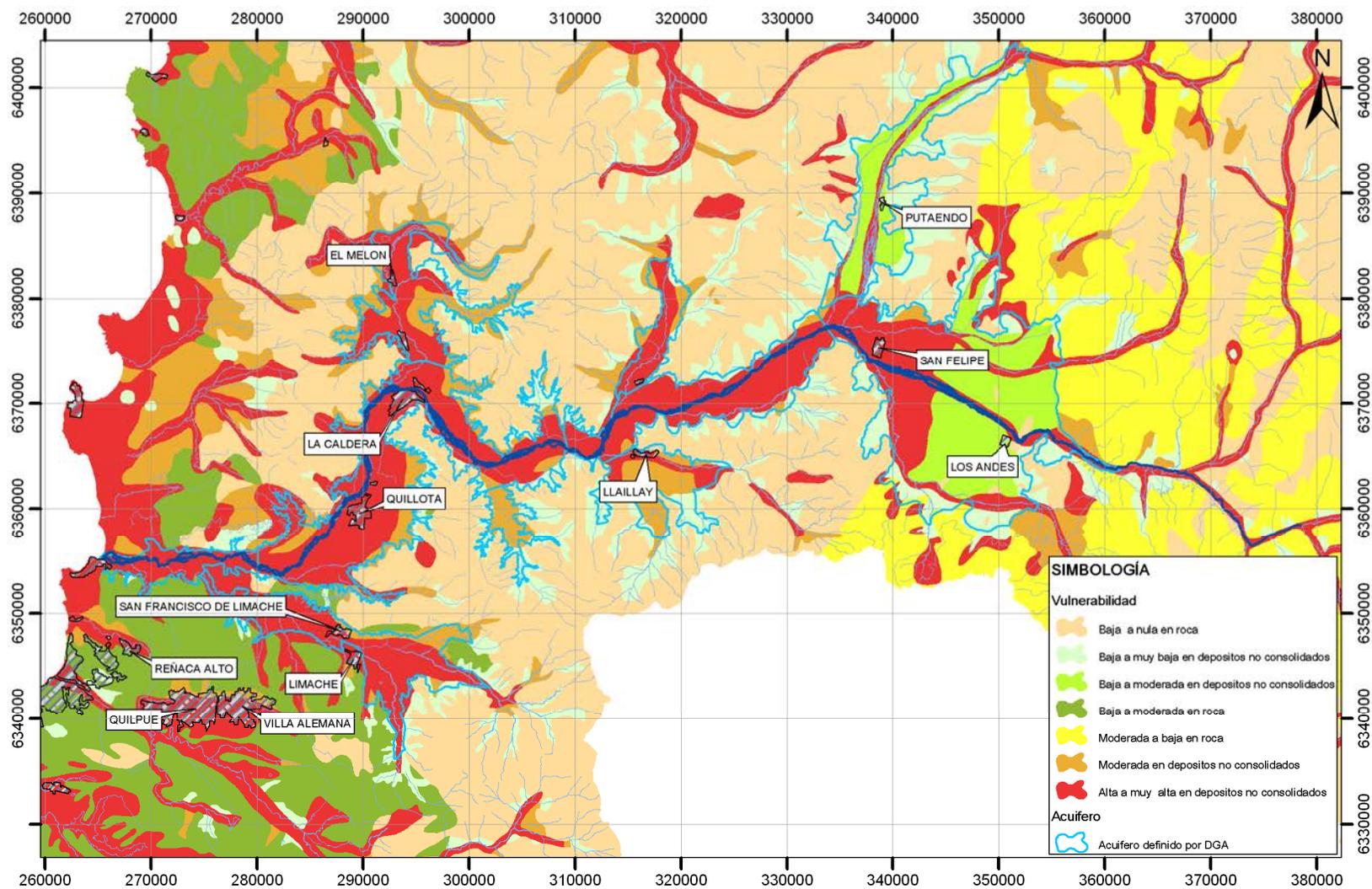


Figura 6.6: Vulnerabilidad sector acuífero Aconcagua.

6.2.2 Discusión sobre aplicabilidad de medidas de protección

De acuerdo al levantamiento de la información que se dispone en cada uno de los sectores acuíferos estudiados, en conjunto con la aplicación de los índices de calidad de cada uno de ellos, se pueden realizar diversas observaciones con respecto a la aplicabilidad de medidas de protección en los sectores acuíferos en general. Sin olvidar el esquema general de las medidas de protección, en que se incluyen medidas de conocimiento e investigación, educacionales, políticas y económicas, y de acción directa; se discutirán las que atañen al marco temático del proyecto por lo que se dejará fuera del análisis las medidas de protección educacionales en conjunto con las políticas y económicas.

6.2.2.1 Conocimiento e investigación

El contexto hidrogeológico en general se encuentra bastante definido en todos los acuíferos estudiados. En cada uno de ellos existen numerosos estudios referidos al tema que en conjunto pueden describir de buena manera y a una escala útil de análisis la geología general de los sectores, la hidrología y la hidráulica subterránea de los sistemas, aunque este último con mayor dificultad.

En cuanto a la vulnerabilidad, el sector acuífero el Loa carece de estudios de vulnerabilidad por lo que sería necesario disponer de ellos para completar la información necesaria para realizar una caracterización del sector óptima. Para los otros acuíferos no hubo mayor problema debido a que se disponía de la vulnerabilidad de los sectores completos. Se debe conocer en qué sectores acuíferos se dispone de mapas de vulnerabilidad y orientar los trabajos futuros a los sectores en que se tiene mayor interés.

La línea base está directamente relacionada al monitoreo que se efectúa dentro de las cuencas y tiene que ver con la densidad de puntos de monitoreo y su ubicación, frecuencia de medición y los parámetros que se miden. No se podrá realizar una buena línea base de calidad y disponibilidad de recursos si no se dispone de una red de monitoreo óptima. De todos estos puntos se hablará en profundidad en los capítulos posteriores.

Existe amplia información en cuanto a los derechos otorgados dentro de las cuencas, sin embargo esta información no se encuentra corroborada en cuanto a su utilización, es decir, no se sabe si es que el derecho concedido efectivamente se esté utilizando y cuál es el porcentaje

de utilización con respecto al caudal otorgado. Junto con lo anterior, en muchos casos no se encuentran bien definidos los derechos destinados a agua potable, los cuales deberían constituir una prioridad en cuanto a las medidas que se aplique dentro de un sector.

Finalmente se observó que no existe una base de datos centralizada que reúna las actividades industriales dentro de una zona en conjunto con las mineras. Los rubros productivos poseen una caracterización bien definida en cuanto a sus emisiones de contaminantes por lo que sería sencillo determinar espacialmente las potenciales afectaciones que podrían ocurrir disponiendo de esta base de datos.

6.2.2.2 Acción directa

Después de realizar las medidas de conocimiento e investigación se propone efectuar medidas de acción directa en el sector acuífero. Estas medidas buscan la protección, prevención o remediación de la calidad y disponibilidad del recurso. En los acuíferos estudiados se observan claras relaciones que pueden ser utilizadas para realizar una **zonificación** de subsectores. Esta zonificación serviría para individualizar y proteger zonas en que el sector acuífero se encuentra en un estado crítico de acuerdo a parámetros establecidos. De acuerdo a lo observado se pueden definir zonas de protección en distintos grados cuando se presente alguna de estas:

- Valores del índice de calidad Insuficientes o Intratables.
- Vulnerabilidad alta.
- Presencia de pozos de agua potable.
- Fuentes potenciales de afectación con contaminantes peligrosos.

La combinación de estas características determinaría el grado de protección que requiere la zona en cuanto a permisos de instalación de nuevas industrias, otorgación de derechos de aprovechamiento, descargas, etc.

Las medidas de acción directa correspondientes a remediación y a recargas artificiales corresponde a medidas de carácter más local que el análisis realizado. Para la realización de estas medidas se deberán realizar estudios locales de factibilidad y riesgo para determinar la aplicabilidad de cada una de ellas según corresponda.

7 PROPUESTA DE MONITOREO

Este capítulo presenta, para cada uno de los sectores acuíferos seleccionados, una propuesta de monitoreo, con la cual se pueda realizar un seguimiento efectivo de su calidad en el tiempo. Por lo tanto, el monitoreo debe permitir, en términos prácticos, una aplicación adecuada de la metodología de calidad de acuíferos planteada en este proyecto.

La propuesta de monitoreo se refiere principalmente a la ubicación de puntos de control, sin embargo también se mencionan recomendaciones para los otros tres aspectos esenciales: parámetros a controlar, frecuencia de monitoreo y protocolo de toma, transporte y análisis de las muestras.

En primer lugar se indica los criterios que debe cumplir el monitoreo, basados en bibliografía especializada, así como en la experiencia de este consultor. Luego, en base a los criterios planteados, se evalúa la actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas con que cuenta la DGA, lo que permite apreciar sus deficiencias y la necesidad de definir una nueva red de monitoreo. A continuación se presenta brevemente los antecedentes disponibles de los sectores acuíferos seleccionados. Por último, y como consecuencia de lo anterior, se presenta una nueva red de monitoreo, así como detalles respecto a los parámetros que controlar, frecuencia de monitoreo y protocolos de muestreo, transporte y análisis.

7.1 Objetivos y criterios de diseño

El muestreo tiene por objetivo identificar la calidad química de un acuífero y, como se mencionó anteriormente, se requiere establecer ciertos criterios respecto a la ubicación de los puntos de control, así como de los parámetros que controlar, la frecuencia de muestreo y los protocolos de muestreo, transporte y análisis de muestras. A partir de la bibliografía consultada a lo largo de este proyecto, y la experiencia de este consultor, a continuación se presentan criterios para cada uno de los aspectos mencionados.

7.1.1 Ubicación y distribución

Es posible establecer recomendaciones respecto a la densidad de puntos de muestreo, considerando tanto la representatividad espacial como los impactos antrópicos reflejados en el grado de explotación del acuífero.

De acuerdo a DGA (2005), la densidad de puntos utilizada en estudios internacionales en acuíferos con intrusión salina (IGME, 2003) se ubica entre 5 y 10 km² por punto. Por otra parte, estudios pilotos en acuíferos (EUROWATERNET, 1998) indican que densidades de 25 km² y 100 km², resultan adecuadas en sitios impactados y no impactados, respectivamente.

Por otra parte, es posible clasificar la condición del acuífero en dos categorías según el grado de explotación de éste, sobreexplotada y sustentable, como se describe en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Clasificación de condición del acuífero según grado de explotación.

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.

A partir de lo anterior se plantea una clasificación de la densidad de puntos de muestreo, en óptima, regular y deficiente, según lo indicado en la Tabla 7.2. Por lo tanto, es deseable que una red de monitoreo cumpla con la condición óptima de densidad, según la condición del acuífero.

Tabla 7.2: Recomendación de densidad de monitoreo (km²/punto) en acuíferos.

Condición del Acuífero		Óptima	Regular	Deficiente
Sin Intrusión	Sobreexplotada	Menor a 25*	Entre 25 y 150	Mayor a 150
Salina	Sustentable	Menor a 100*	Entre 100 y 200	Mayor a 200
Con Intrusión	Sobreexplotada	Menor a 5**	Entre 5 y 15	Mayor a 15
Salina	Sustentable	Menor a 10**	Entre 10 y 20	Mayor a 20

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

Por otra parte, los puntos de control deben ser distribuidos convenientemente en el área de estudio de modo de permitir análisis espaciales de los datos, por ejemplo una interpolación adecuada, tal como lo plantea la metodología de clasificación de calidad de acuíferos planteada. Se clasificó la distribución espacial en: localizada, heterogénea y homogénea, según indica la Tabla 7.3. Por lo tanto es deseable que una red de monitoreo sea homogénea.

Tabla 7.3: Clasificación de distribución espacial de red de monitoreo en acuíferos.

Distribución espacial	Descripción de red de monitoreo
Localizado	Puntos de control concentrados en un área muy pequeña con respecto al total del área del acuífero
Heterogénea	Distribución no localizada y distribuida en diferentes densidades espacialmente.
Homogénea	Distribución con densidades más o menos constante en todo el espacio del acuífero

Considerando lo anteriormente expuesto, resulta deseable que una red de monitoreo posea una densidad óptima de puntos de control, de acuerdo al tipo de acuífero estudiado, y distribuido espacialmente en forma homogénea. Sin embargo, las recomendaciones no deben aplicarse ciegamente, sino que deben considerar el modelo conceptual del funcionamiento del agua subterránea en el acuífero (RENTIER, y otros, 2006), es decir tomar en consideración las complejidades del acuífero y sus características geológicas e hidrogeológicas

(EUROWATERNET, 1998). A continuación se menciona otros aspectos a considerar según RENTIER, y otros (2006):

- Flujo subterráneo y gradientes hidráulicos.
- Objetivos del muestreo.
- Variabilidad, natural o inducida, de los datos a medir.
- Existencia de fuentes contaminantes.
- Condiciones de accesibilidad y propiedad.
- Conocimiento y confiabilidad de equipamiento de pozos (habilitación, bomba).

Cabe destacar que el conocimiento de las características constructivas (profundidad, habilitación, bomba) de los pozos resulta muy importante, ya que permite conocer el origen de la muestra y el estrato que esta representa, además de definir las condiciones de muestreo. Más adelante en este informe (sección 7.4) se detallan aspectos constructivos que debe tener un punto de control de la calidad química de aguas subterráneas.

7.1.2 Parámetros de control

En el contexto de este estudio, el objetivo de la red de monitoreo, además de permitir caracterizar y monitorear la calidad físico-química del agua subterránea, debe ser capaz de entregar información relevante para la aplicación de la metodología presentada en este proyecto, por lo tanto los parámetros a controlar deben ser consistentes con ésta. Sin embargo, dichos parámetros tienen un enfoque químico, por lo que pueden ser complementados con otros parámetros de enfoque hidrogeológicos.

La Tabla 7.4 presenta los parámetros mínimos que se deben controlar, en donde se reconocen cuatro grupos. Los parámetros químicos del Grupo General y los Nitratos del Grupo Local, permiten definir la calidad de las aguas sin redundancia de información y constituyen una base de comparación entre distintos acuíferos del país. El resto de parámetros químicos del grupo Local son libres y responden a la necesidad de incorporar características locales de los acuíferos. La elección de estos parámetros libres puede hacerse a partir de las recomendaciones mencionadas en la metodología al respecto. Los parámetros del grupo Adicional, son incluidos para poder describir de forma químicamente adecuada cada muestra

de agua, ya que es posible establecer por ejemplo su balance iónico o su naturaleza corrosiva. Por último, y como medida de la cantidad de recursos hídricos, se incorpora, como parámetro mínimo de tipo hidrogeológico, el nivel freático.

Tabla 7.4: Parámetros mínimos a medir.

Tipo	Grupo	Descripción de red de monitoreo
Químico	General	Cloruro, Sulfatos, Calcio (disuelto), Sodio (disuelto), Magnesio (disuelto), Sólidos Disueltos Totales
	Local	Nitratos y otros parámetros locales según indicaciones capítulo 4.4
	Adicional	Carbonatos, Bicarbonatos, Potasio (disuelto), pH, Conductividad eléctrica, Temperatura, Oxígeno disuelto
Hidrogeológicos		Nivel freático

7.1.3 Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo dependerá, entre otras cosas, del objetivo del muestreo, de los recursos económicos disponibles y de las características del acuífero. Si las condiciones político-administrativas-económicas lo permiten, es recomendable establecer un programa de monitoreo que asegure recursos económicos para el muestreo, análisis y recopilación de la información.

La norma chilena NCh411/1 Of.96 (INN, 1998) establece directrices para programas de monitoreo respecto a objetivos, requisitos y frecuencias de muestreo, sin embargo no establecen períodos definidos para aguas subterráneas. Organismos europeos especializados (EUROWATERNET, 1998) proponen establecer programas de monitoreo cíclicos de 5 años. En el primer año se realiza un muestreo más frecuente (por ejemplo cada 3 meses), para establecer una caracterización y/o reconocer comportamientos estacionales. En los años siguientes, la frecuencia puede disminuir (por ejemplo a 2 veces al año), en vista de los resultados y para reconocer valores máximos y mínimos. Luego del quinto año, es necesario replantear el programa de monitoreo en vista de los antecedentes obtenidos en años anteriores. La frecuencia debe ser mayor en sistemas más variables.

En ausencia de un programa de monitoreo formal y estructurado, la Tabla 7.5 presenta recomendaciones de la frecuencia de muestreo para acuíferos en distintas condiciones.

Tabla 7.5: Frecuencia mínima de monitoreo según condiciones de acuífero.

Condiciones de acuífero	Frecuencia mínima recomendada
Libres y/o Muy vulnerables y/o Alta actividad antrópica	Cada 6 meses
Confinados y/o Poco vulnerables y/o Baja actividad antrópica	Cada 12 meses

7.1.4 Protocolo de muestreo, transporte y análisis de muestras

A partir de los puntos de muestreo se deben obtener datos representativos de la calidad química del agua subterránea. Por lo tanto, resulta esencial seguir protocolos adecuados de muestreo, transporte y análisis de muestras que reduzcan al mínimo su contaminación, eviten alteraciones significativas a su calidad química y permitan obtener valores confiables de sus propiedades.

La norma chilena NCh411.Of98 (INN, 1998), en sus partes 2 y 3, establece directrices para realizar adecuadamente cada una de las tareas mencionadas. A continuación, la Tabla 7.6 presenta un resumen de las principales recomendaciones prácticas.

Tabla 7.6: Recomendaciones para toma, transporte y análisis de muestras.

Muestreo	Transporte	Análisis
Evitar introducir algún tipo de contaminante adicional al evaluado.	Usar envases adecuados, idealmente entregados por laboratorio.	Escoger un laboratorio con respaldo institucional y acreditación, e idealmente cercano al punto de muestreo
Extraer toda el agua existente en pozo antes de muestrear. Dejar corriendo agua por lo menos 5 min. Extraer muestra lentamente.	Usar preservantes adecuados, según indicación de laboratorio.	Exigir cumplimiento de estándares de calidad
Equipo de toma de muestra (mangueras, bombas y recipientes) debe estar limpio y libre de elementos extraños adheridos.	Refrigerar muestras, pero evitando congelamiento.	
Enjuagar todos los recipientes con agua a muestrear (al menos tres veces).	Trasladar dentro de 24 horas desde muestreo.	
Homogenizar contenido colectado antes de extraer muestra.	Rotular adecuadamente los envases, evitando el deterioro de etiquetas.	
Medir parámetros sensibles en terreno (temperatura, oxígeno disuelto, pH, turbidez).		
Registrar características de punto de control y condiciones de muestreo (método, equipos, profundidad, etc.)		

Por otra parte, durante el muestreo adicional realizado en sectores acuíferos de Aconcagua y Los Choros se estableció un protocolo, el cual se detalla a continuación:

- Descripción punto de muestreo.
- Registrar nivel estático.
- Renovación de agua del pozo o noria (idealmente 3 veces).
- Revisión y rotulación de envases.
- Enjuague (3 veces) y relleno de envases sin preservantes.
- Medición de parámetros *In Situ*.
- Almacenamiento refrigerado de envases para traslado.
- Registro fotográfico del pozo y su entorno.
- Traslado refrigerado de las muestras al laboratorio (menos de 24 horas).
- Confección de Ficha de terreno con datos relevantes.

7.2 Revisión de la actual red de monitoreo de aguas subterráneas de la DGA

A partir de los criterios de diseño de una red de monitoreo, especialmente respecto a la densidad de pozos y su distribución espacial, es posible evaluar la actual Red de Calidad con que cuenta la DGA en cada uno de los sectores acuíferos seleccionados.

7.2.1 Sector acuífero El Loa

Tal como muestra la Figura 7.1, el sector acuífero de El Loa tiene una extensión de 7.950 km², y sólo existe un punto de control, por lo que su densidad es 7.950 km²/punto. Este acuífero no está sometido a intrusión salina, y su nivel de calidad tiene origen principalmente natural, y se clasifica como sustentable debido a la tendencia en sus niveles freáticos y, a que a la fecha, no presenta limitaciones a la explotación. Por lo tanto, la densidad de puntos de monitoreo es deficiente y con distribución heterogénea, de modo que es requisito aumentar los puntos de muestreo y asegurar su representatividad espacial.

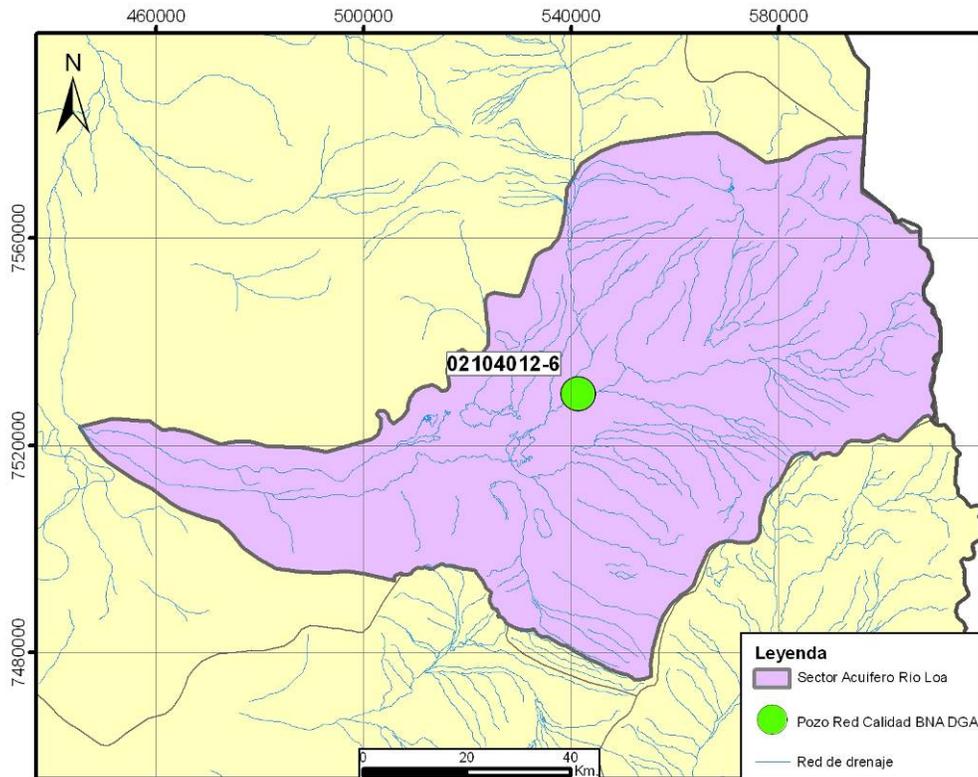


Figura 7.1: Red de monitoreo de calidad de agua subterránea DGA en sector acuífero El Loa.

7.2.2 Sector acuífero Los Choros

La Figura 7.2 muestra la situación del sector acuífero de Los Choros que fue estudiado. Su extensión es 275 km^2 , y sólo existe un punto de control, por lo que su densidad es $275 \text{ km}^2/\text{punto}$. Este acuífero presentó claros efectos de intrusión salina. Además se clasifica como sustentable, debido al comportamiento histórico del nivel freático, y a que a la fecha y por parte de la DGA, no posee medidas que limiten la explotación. En definitiva, la densidad de puntos de monitoreo es deficiente y con distribución heterogénea, por lo que resulta imperioso mejorar la distribución espacial y ampliar el número de puntos de control.

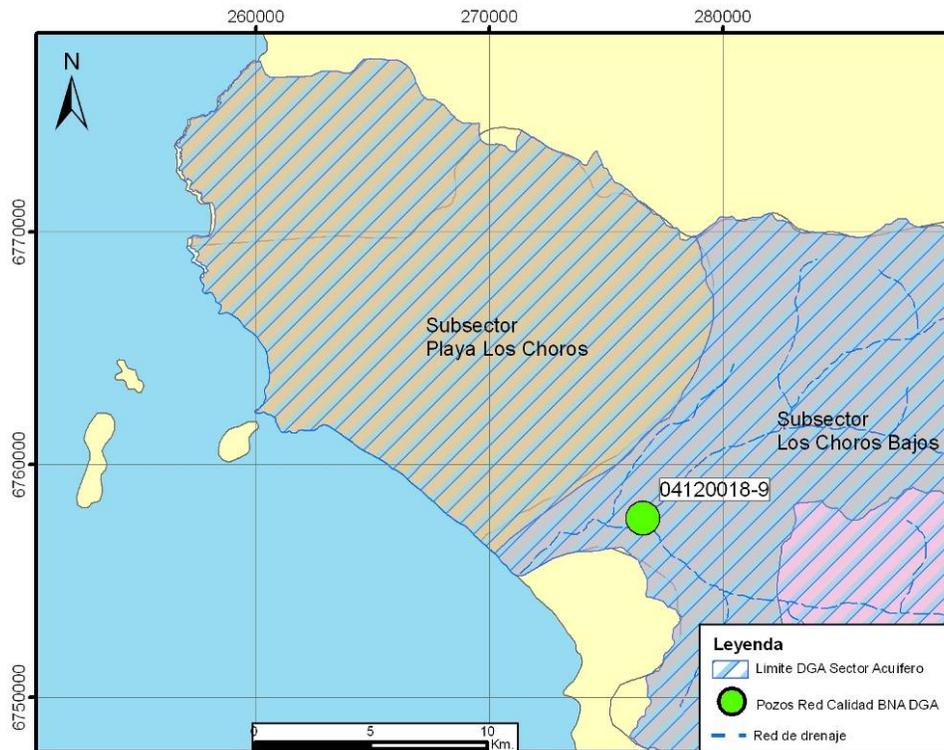


Figura 7.2: Red de monitoreo de calidad de agua subterránea DGA en sector acuífero Los Choros (sector costero).

7.2.3 Sector acuífero Aconcagua

Tal como se aprecia en la Figura 7.3, en este sector acuífero, con extensión de 1.186 km², sólo existen dos puntos de control, de modo que su densidad es 593 km²/punto. Por otra parte, de la aplicación de la metodología se obtiene que el acuífero no presenta indicios de intrusión salina y tiene clara afectación antrópica. Además, se clasifica como sustentable, debido al comportamiento histórico del nivel freático y por no poseer limitaciones a la explotación, según la DGA. En definitiva, la densidad de puntos de monitoreo es deficiente y con distribución heterogénea, por lo que es necesario ampliar el número de puntos de control.

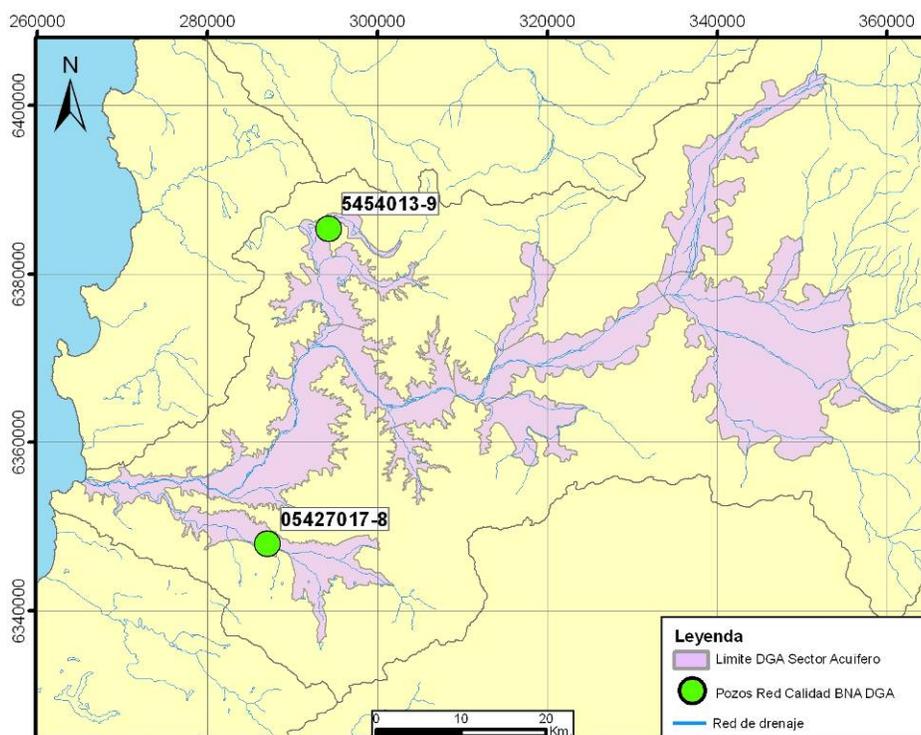


Figura 7.3: Red de monitoreo de calidad de agua subterránea DGA en sector acuífero Aconcagua.

7.3 Propuesta de distribución, frecuencia y parámetros

A continuación se presenta para cada sector acuífero, mediante fichas (Figura 7.4, Figura 7.5 y Figura 7.6), una propuesta de red de muestreo que cumple con los objetivos indicados, a partir de la aplicación de los criterios de diseño, junto a los antecedentes disponibles y a la experiencia obtenida durante las campañas de muestreo adicional realizadas durante el proyecto. Adjunto a este informe se presentan mapas (Nº4, Nº5 y Nº6) con las fichas mencionadas.

La ubicación propuesta se basa en la ubicación de pozos existentes (muestreados, red de calidad de la DGA y red de pozos con derechos de aguas DGA) de modo de reducir la necesidad de construir nuevos. En el caso que la ubicación propuesta no era un pozo de la red de calidad o ya muestreado en este proyecto, se consideró adecuado establecer un área en la cual resulta necesario definir un pozo existente o bien la construcción de uno.

Por otra parte, al tomar en cuenta los criterios de densidad y distribución espacial planteados, fue necesario establecer áreas principales y secundarias, específicamente en Los Choros y en El Loa, con la finalidad de enfocarse en zonas de mayor interés privilegiando mayor densidad de puntos de control en ellas. De esta forma fue posible reducir el número de puntos de control total, pero obteniendo una distribución homogénea y una densidad óptima o regular en todos los acuíferos. Las coordenadas geográficas de cada punto se presentan en los Anexos (Capítulo 7) en base al número de cada punto de monitoreo.

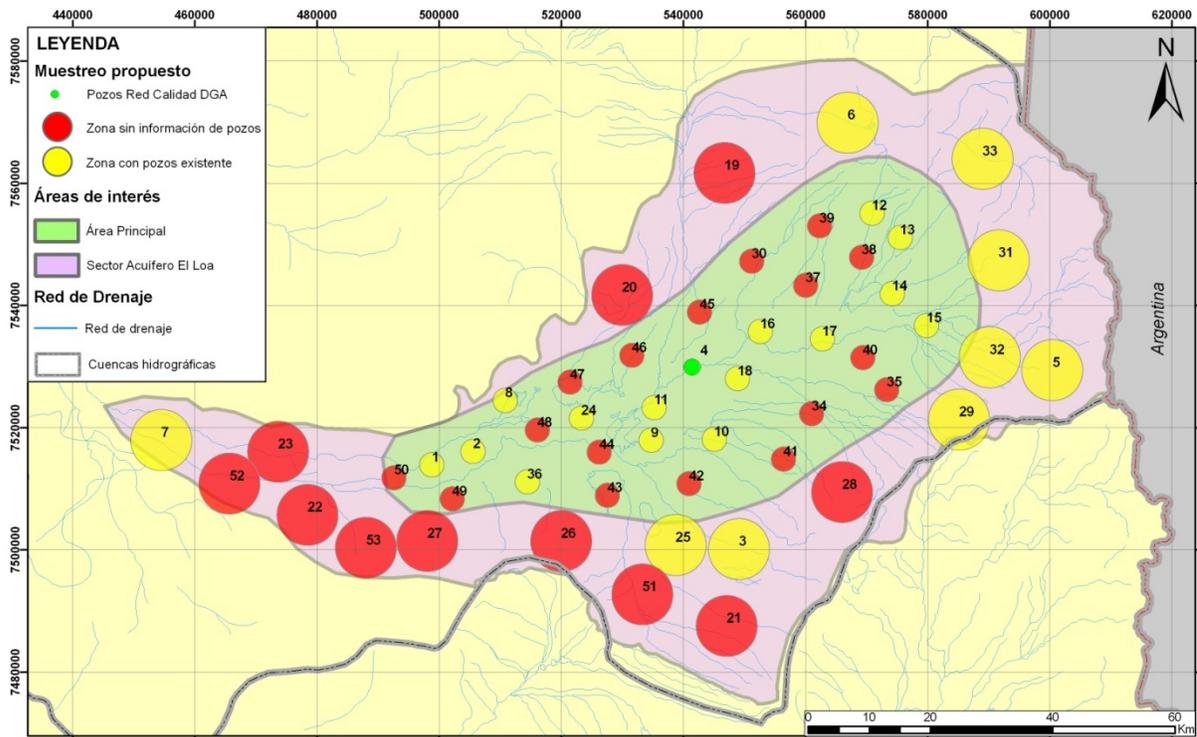
Además de la localización se indica los parámetros químicos mínimos que interesaría muestrear desde el punto de vista de la aplicación de la metodología para definir la calidad del acuífero. Todos los parámetros deben medirse como disueltos, excepto aquellos con sufijo (t), ya que deben medir como totales.

Por otro lado se recomienda la frecuencia de muestreo mínimo e ideal, en base a la Tabla 7.5 y las condiciones del acuífero. Y por último, se indica detalles respecto al método de muestreo que complementa con lo descrito en capítulos anteriores.

A modo de ejemplo se explica la Figura 7.4, donde se presenta la red de monitoreo de calidad físico-química propuesta para el sector acuífero El Loa. En dicha figura se puede observar la siguiente información:

- Límites del acuífero.
- Puntos verdes pequeños: representan los pozos que actualmente forman parte de la red de monitoreo de la DGA.
- Puntos amarillos pequeños: representan puntos existentes, de los cuales se conocen sus características constructivas y que además fueron muestreados en la campaña de terreno.
- Círculos amarillos grandes: representan sectores donde es deseable contar con información adicionales, se sabe que existen pozos por que existen derechos otorgados, pero se desconoce ubicación exacta y la información de sus características constructivas.

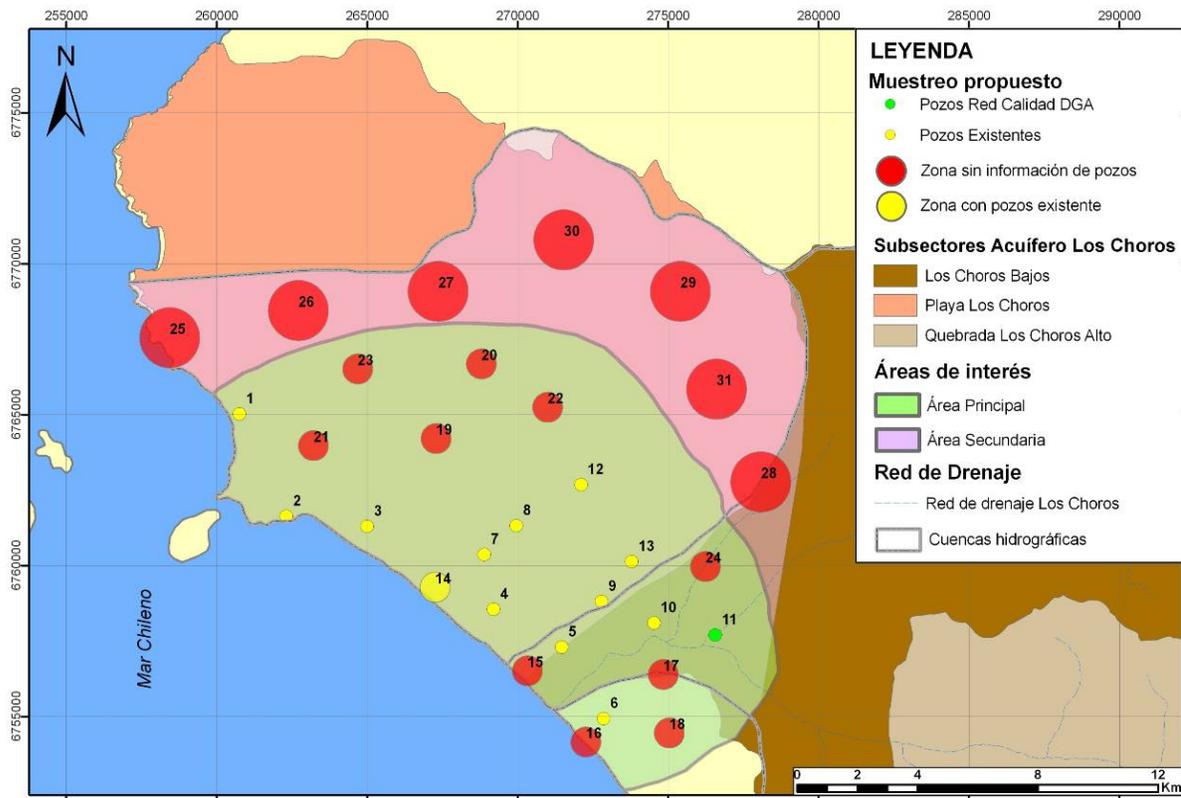
- Círculos rojos grandes: representa un sector recomendado para monitorear donde no existe información de existencia de pozos. En este caso lo más probable es que se requeriría perforar un pozo especialmente con el propósito de monitoreo.
- Áreas de interés principal y secundario: representan áreas con distinto interés de representación, con distinta densidad de puntos pero con distribución homogénea. En el área principal se privilegia mayor densidad de puntos de control en ellas.



Características

Ubicación	Parámetros a controlar
Distribución homogénea en cada área. Área principal: Puntos: 33; Densidad: 93 km ² /punto. Área secundaria: Puntos: 20; Densidad: 243 km ² /punto.	Grupo 1: Cl, SO ₄ , Ca, Na, Mg, SDT. Grupo 2: NO ₃ , As (t), Li (t), Cu (t), Mo (t), Al (t), B (t), Ag (t), Be (t), Ba (t), Sb (t). Adicional: CO ₃ , HCO ₃ , K, C.E., pH, T° y OD. Hidrogeológicos: nivel freático.
Frecuencia de muestreo	Toma de muestras
Mínimo cada 12 meses, ideal cada 3 meses.	Uso de bombas instaladas o de muestreadores discretos (<i>bailer</i>).

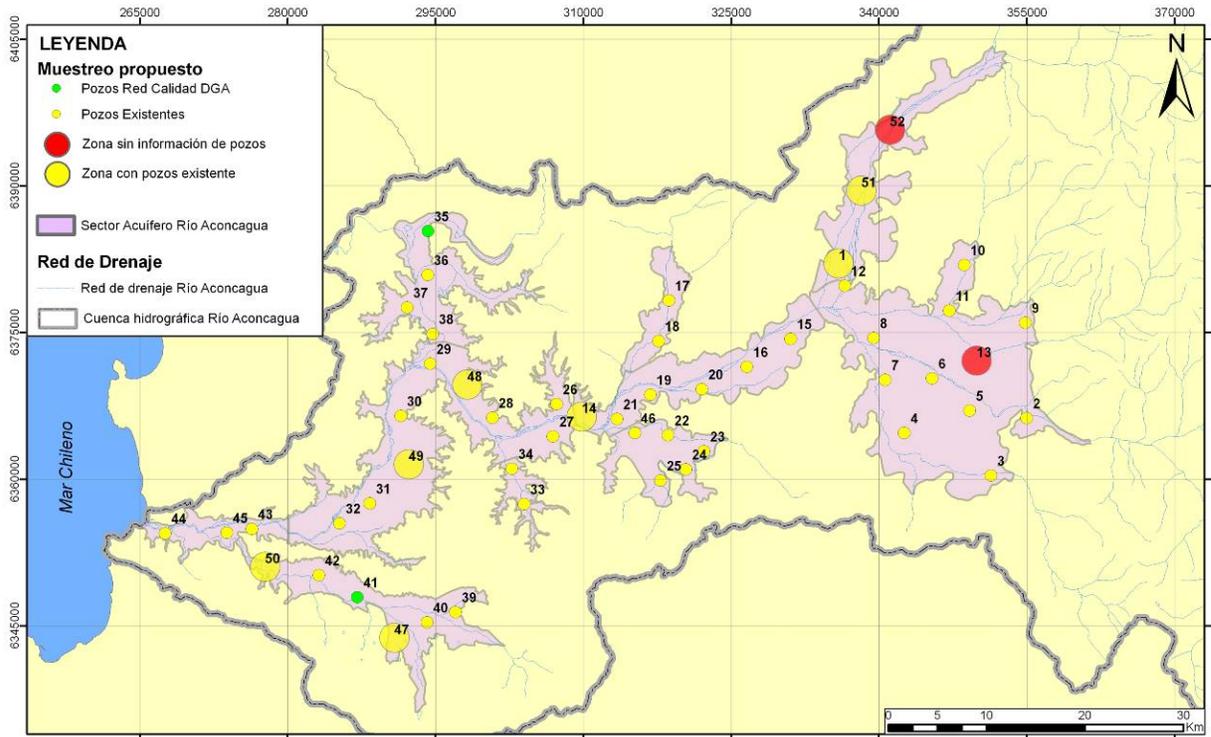
Figura 7.4: Propuesta de muestreo sector acuífero El Loa.



Características

Ubicación	Parámetros a controlar
Distribución homogénea en cada área. Área principal: Puntos: 24; Densidad: 7 km ² /punto. Área secundaria: Puntos: 7; Densidad: 15 km ² /punto.	Grupo 1: Cl, SO ₄ , Ca, Na, Mg, SDT. Grupo 2: NO ₃ , Al (t), Fe (t), Mn (t), Mo (t), Ni (t), Hg (t), PO ₄ . Adicional: CO ₃ , HCO ₃ , K, C.E., pH, T° y OD. Hidrogeológicos: nivel freático.
Frecuencia de muestreo	Toma de muestras
Mínimo cada 12 meses, ideal cada 3 meses.	Uso de bombas instaladas o de muestreadores discretos (<i>bailer</i>).

Figura 7.5: Propuesta de muestreo sector acuífero Los Choros (sector costero).



Características

Ubicación	Parámetros de control
<p>Distribución homogénea. Puntos: 52. Densidad: 23 km²/punto.</p>	<p>Grupo 1: Cl, SO₄, Ca, Na, Mg, SDT. Grupo 2: NO₃, Al (t), Fe (t), Mn (t), Mo (t), Hg (t), Ni (t), B (t). Adicional: CO₃, HCO₃, K, C.E., pH, T° y OD. Hidrogeológicos: nivel freático.</p>
Frecuencia de muestreo	Toma de muestras
<p>Mínimo cada 6 meses, ideal cada 3 meses.</p>	<p>Uso de bombas instaladas.</p>

Figura 7.6: Propuesta de muestreo sector acuífero Aconcagua.

7.4 Características constructivas

Este subcapítulo presenta una descripción de las características constructivas de la actual red de monitoreo de la calidad de aguas subterráneas de la DGA, y detalla los requisitos constructivos que una red de monitoreo debiera cumplir. De este modo es posible evaluar la situación actual de la red de control de la DGA e indicar modificaciones y/o requerimientos para la red de monitorio propuesta en el capítulo anterior.

7.4.1 Descripción características constructivas actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas

A partir de las áreas estudiadas en cada uno de los sectores acuíferos seleccionados, y de la base de datos entregada por la DGA respecto a la red de monitoreo de la calidad de aguas subterráneas, se individualizaron cuatro puntos de muestreo a los cuales correspondió revisar sus características constructivas.

La Tabla 7.7 presenta una descripción de las características de cada punto y se centra en cinco aspectos considerados relevantes: identificación, ubicación, construcción, rendimiento y estado. Esta información fue solicitada a la DGA Central, sin embargo la recopilación resultó difícil debido a la dispersividad y falta de información, más aún considerando que se requiere del apoyo de las Direcciones Regionales. En definitiva, sólo se dispuso de la información correspondiente a Los Choros, y parcialmente respecto a El Loa.

Tabla 7.7: Descripción de pozos de actual red de monitoreo de calidad.

Características	Sector acuífero				
	Aconcagua	Aconcagua	Los Choros	El Loa	
Identificación	Nombre	Pozo CCU	Dren Los Caleos	Pozo Los Choros N°1 C-3	Pozo Chiu-Chiu
	Código BNA	05427017-8	5454013-9	04120018-9; ^c	02104012-6
	Propiedad	CCU	S/I	Com. N. Sequia	S/I
Ubicación	Coordenadas UTM (PSAD56)	6.347.952 N 287.074 E	6.385.363 N 294.245 E	6.757.704 N 276.566 E	7.529.912 N 541.418 E
	Cota (msnm)	S/I	S/I	Registrada pero no informada	S/I
Construcción	Fecha	S/I	S/I	Feb72	S/I
	Diámetro (cm)	S/I	S/I	25	20
	Habilitación (m)	S/I	S/I	62 (prof.) 14,4 (total)	S/I
	Profundidad (m)	S/I	S/I	93	S/I
	Material	S/I	S/I	S/I	S/I
	Estratigrafía	S/I	S/I	Existe, no entregada	S/I
Rendimiento	Caudal máx. (L/s) – Nivel freático (m) – Fecha	S/I	S/I	12 - 29,8 - Feb72	S/I
	Nivel estático (m) – Fecha	S/I	S/I	0,8 - Feb1972	S/I
Estado	Acceso	S/I	S/I	S/I	S/I
	Situación	S/I	S/I	Sin uso	S/I
	Equipamiento	S/I	S/I	Sin bomba	S/I
	Registros de Calidad ^d	30 (Abr98-Mar07)	27 (Abr98-Mar07)	31 (Ene98-Jun07)	28 (May96-May07)
	Frecuencia de muestreo (muestreo/año) ^c	3,0	2,7	3,4	2,3

S/I: Sin Información; c: código BNA debiera corregirse a 04120006-5 según información entregada;

d: Base de datos entregada por DGA en Agosto 2008.

7.4.2 Requisitos constructivos de puntos de muestreo

Adicional a los requisitos de ubicación de la red de monitoreo, es esencial definir los requisitos básicos respecto a las características constructivas de los puntos de muestreo. Estas características mínimas tienen como objetivo facilitar la toma adecuada de las muestras, y asegurar dichas condiciones en el tiempo.

Con dicho objetivo, y con referencia a la normativa chilena y la experiencia de este consultor, se plantean los siguientes requisitos que un punto de control de agua subterránea debe cumplir.

7.4.2.1 Acceso e identificación

El acceso al punto de control debe estar asegurado en toda época del año, esto aplica tanto a los caminos como a los permisos legales del propietario para extraer muestras. Además, el punto de control debe estar claramente identificado en terreno por señales que indiquen su presencia, nombre e, idealmente, antecedentes generales del pozo (año de construcción, profundidad, diámetro, teléfono de responsable, etc.). El punto de control debe tener definidas, de la manera más confiable posible, sus coordenadas geográficas y cota topográfica.

7.4.2.2 Construcción

Idealmente los puntos de control debieran estar destinados exclusivamente al monitoreo, es decir que no se encuentren destinados al bombeo. Sin embargo, dado que este requisito puede resultar muy limitante, sobre todo en acuíferos con escasez de pozos, el profesional a cargo puede evaluar el muestrear un pozo de bombeo, ya sea indicando esta situación en las observaciones de la muestra, o bien en circunstancias en que el bombeo sea pequeño o se haya detenido permitiendo la recuperación del nivel freático. Por otra parte, se recomienda evitar el muestreo desde norias debido a que su calidad química podría no ser reflejo del acuífero que la recarga.

La Figura 7.7 muestra un esquema de un punto de control con características adecuadas para facilitar el muestreo, y donde destaca el diámetro, la habilitación, la profundidad, las terminaciones y el material usado.

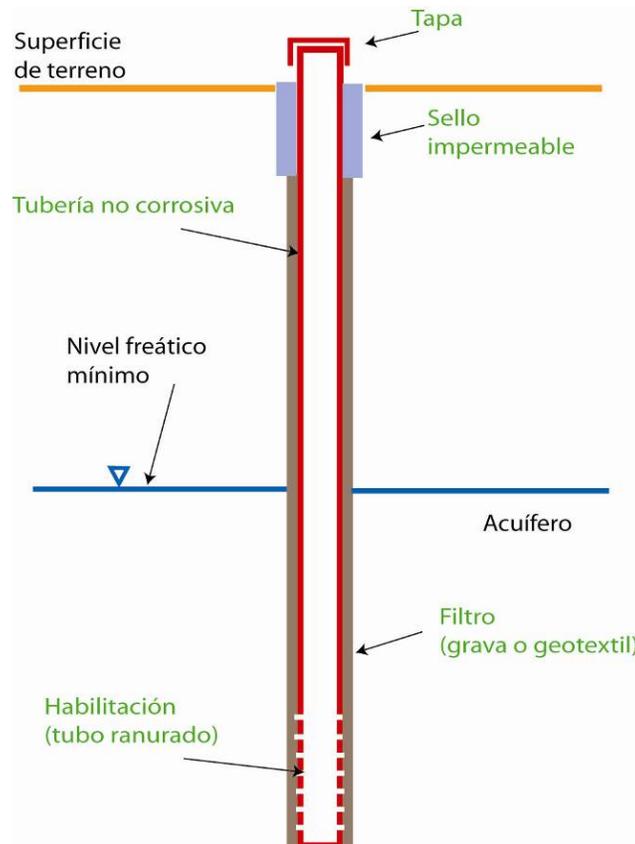


Figura 7.7: Esquema constructivo de un punto de control de agua subterránea.

El diámetro debe permitir la introducción de equipos de muestreo (sondas, piezómetros, tuberías, mangueras, muestradores discretos, bombas pequeñas, etc.). El diámetro mínimo factible es 5 cm (2 pulgadas), sin embargo un diámetro mayor a 10 cm (4 pulgadas) permite el uso de la mayoría de los equipos de muestreo.

La habilitación debe consistir en tramos de tubería ranurada que enfrenten el acuífero, y en ningún caso se debe muestrear pozos sin revestimiento. Por otra parte, la profundidad del inicio y término de la habilitación deben ser conocidos, y donde la primera de ellas debiera ser inferior al menor nivel observado en el pozo, y la segunda no debe superar el extremo inferior del acuífero. La habilitación debe ser protegida con algún medio filtrante que evite el ingreso de partículas al interior de la tubería (filtro de grava, geotextil, etc.) provenientes del acuífero.

Respecto a los materiales usados, estos no deben afectar la calidad de las aguas, por lo que se recomienda utilizar elementos no corrosivos (PVC, acero inoxidable, etc.).

Las terminaciones del pozo incluyen la construcción de un sello impermeable (bentonita, cemento o similar) en el primer tramo (0,3 a 1,0 m) de la tubería desde la superficie, además de tapa con control de acceso (candado).

7.4.2.3 Representatividad

El punto de control debe asegurar la representatividad vertical de la medida, por lo que la habilitación debe enfrentar sólo el acuífero que se desea analizar. En caso de existir más de un acuífero, se debe evitar cualquier interacción entre ellos, mediante sellos impermeables y múltiples habilitaciones independientes (piezómetros en un mismo pozo, o bien pozos distintos).

7.4.3 Evaluación de características de actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas

A partir de los requisitos constructivos mencionados anteriormente, y con los datos entregados de cada punto de monitoreo, corresponde la evaluación de la actual red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas. Sin embargo, la información disponible al cierre de este informe no permite una correcta evaluación, ya que se carece de mucha información relevante como diagramas de perforación y habilitación, condiciones en terreno o material usado.

En el caso del Aconcagua sólo es posible decir que resulta esperable que el acceso a los dos pozos es adecuado, así como su identificación en terreno y ubicación geográfica, pues se han realizado mediciones desde 1998. Por lo tanto, se requiere de mejor información de estos puntos, para establecer una evaluación acertada.

En el sector acuífero Los Choros, también es esperable buenas condiciones de acceso e identificación debido a la existencia de registros desde 1998. Por otra parte, se cumpliría con requisito de diámetro, el uso exclusivo para monitoreo, habilitación en acuífero de interés y cota topográfica. Sin embargo, no es posible concluir respecto a su estado, existencia de filtro o material de habilitación.

Por último, el punto de control en sector acuífero El Loa, también cumpliría con buenas condiciones de acceso e identificación. Además satisface el requisito del diámetro de la tubería. Sin embargo, no es posible establecer cumplimiento de otros aspectos como profundidad de habilitación, material usado y cota topográfica.

Por otra parte, el desarrollo de esta evaluación reveló la falta de una base de datos unificada respecto a los antecedentes relevantes de los pozos que forman parte de la red de calidad. La DGA debiera realizar un levantamiento general de todos los pozos en donde realice muestreos periódicos de agua subterránea, de modo que se complete la información solicitada en Tabla 7.7, además de rectificar coordenadas y cotas geográficas.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones del proyecto

8.1.1 Desarrollo de la metodología

En base a la revisión de la literatura científica nacional e internacional y a partir de la experiencia alcanzada durante la ejecución de este proyecto se puede realizar las siguientes conclusiones respecto del desarrollo de la metodología de clasificación de acuíferos:

- La revisión de la literatura científica especializada permite concluir que existen pocas metodologías de clasificación de calidad química de acuíferos desarrolladas a nivel mundial, y que las existentes no son aplicables en Chile, ya que no satisfacen los criterios, las realidades y las necesidades de nuestro país.
- Lo anterior implicó el desarrollo de una metodología propia que permitiera clasificar la calidad química del agua subterránea considerando la gran variabilidad natural de los acuíferos a nivel nacional, incorporando criterios de la Dirección General de Aguas, en cuanto el uso del agua y la protección de la salud de las personas.
- La metodología de clasificación de la calidad química de acuíferos desarrollada demostró ser una herramienta útil y confiable, que puede ser aplicada a diferentes acuíferos del país, que entrega una valiosa información respecto de los potenciales usos del agua subterránea.
- Dada la gran variabilidad de la calidad química de los acuíferos en Chile, la utilización de una metodología flexible que permita incorporar parámetros químicos característicos de una zona o acuífero, resulta fundamental. En este sentido la metodología desarrollada cuenta con un conjunto de parámetros químicos fijos (Grupo 1) y otro conjunto con parámetros variables (Grupo 2). Los primeros permiten calcular un índice de calidad (IC) intermedio que permite comparar la calidad química de los diferentes acuíferos en idénticas condiciones. Por otra parte, los parámetros variables incorporan parámetros propios del acuífero en estudio, permitiendo dar cuenta de las características propias de cada sector acuífero del país.

- El desarrollo de una metodología de clasificación requiere necesariamente la adopción de criterios que permita catalogar los diferentes tipos de agua. La metodología desarrollada adoptó como primeros criterios la utilización de normas de calidad de agua. Esto le confiere, por una parte, un sólido respaldo técnico y legal, y por otra, una gran flexibilidad, ya que si se promulgan nuevas normas o nuevos valores máximos de parámetros químicos, es posible volver a aplicar la metodología sin cambios metodológicos importantes.
- Uno de los aspectos importantes a considerar en el diseño de una metodología de clasificación de la calidad química de acuíferos, es el comportamiento temporal de la calidad química. Se requiere para ello una visión dinámica de la calidad química, ya que el recuso hídrico subterráneo tiene un comportamiento dinámico, al igual que las actividades que potencialmente pueden alterar o cambiar su composición química. A modo de ejemplo se puede indicar que es muy distinto tener un acuífero que presenta un IC Bueno, que se ha mantenido constante en el tiempo, a que este mismo índice anteriormente haya sido excepcional. En este último caso la calidad del acuífero va empeorando.
- La utilización de técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales (ACP) permite analizar situaciones en la cual existe una gran cantidad de información. Este es el caso del monitoreo de la calidad química de aguas subterráneas, donde se tiene un alto número de parámetros químicos medidos, en un número importante de pozos y en muchos casos con series históricas largas. La técnica ACP demostró ser una herramienta que permite analizar la fuente de cada uno de los parámetros químicos observados en el agua subterránea.
- La aplicación de cualquier metodología de clasificación de calidad química de acuíferos requiere una buena red de medición, en cuanto a calidad de los análisis de laboratorio, número de parámetros analizados, número y distribución espacial de los pozos de monitoreo, y ojala con una frecuencia adecuada.
- Utilizar información de análisis químicos de distintas fuentes como: Banco Nacional de Aguas de la DGA, estudios hidrogeológicos varios, estudios de impacto ambiental (SEIA), informes de fiscalización de la Superintendencia de Servicios Sanitarios

(SISS), etc., no es viable o genera información poco confiable. Lo anterior se funda en el hecho que la información muchas veces no es comparable, ya que corresponde a periodos de tiempo diferentes, análisis químicos incompletos, análisis en distintos laboratorios, etc.

- Por lo tanto, se refuerza el hecho de que la DGA es el organismo que debe continuar con la labor de mantención y operación de la red de monitoreo de agua subterránea. Sin embargo, se debe poner énfasis en la ampliación de la red de monitoreo actual, especialmente en el número de puntos de control en aquellos acuíferos en los que actualmente existe monitoreo.

8.1.2 Instrumentos de protección

Respecto de los instrumentos de protección de acuíferos se puede realizar las siguientes conclusiones:

- Las medidas de conocimiento e investigación son fácilmente aplicables en Chile, e incluso muchas de ellas están siendo ya abordadas actualmente por distintos organismos. Por ejemplo, los mapas de vulnerabilidad de acuífero para todo el país se están realizando en el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), mientras la Dirección General de Aguas (DGA) se ocupa de los monitoreos de calidad de las Aguas.
- La zonificación de acuíferos es también una herramienta de fácil implementación, eficiente y sencilla, que permite diseñar planes de manejo y gestión de los recursos hídricos considerando las zonas que requieren una mejor protección.
- Las medidas de acción directa, tienen un costo económico más alto y pueden plantearse en determinados sectores donde exista un riesgo elevado de deterioro del recurso en cuanto a su calidad y/o cantidad.
- Las medidas educacionales son altamente recomendables, puesto que la consciencia de la sociedad frente los problemas medioambientales es una de las mejores medidas auto-regulatorias.

- Las medidas políticas y económicas son absolutamente necesarias para que el Estado tenga el control en la protección de sus recursos. Muchas de las medidas descritas ya existen en nuestro país aunque parece necesario que el Estado tenga más capacidad para implementar tales medidas o que éstas sean más duras (multas) de modo que las actividades privadas se autorregulen mejor. Hay que considerar que estas medidas, son quizás las que serían más lentas de implementar en el país ya que requieren de la elaboración (o modificación) de nuevas normativas y leyes.
- El punto crucial para poder contar con instrumentos de protección de acuíferos es la elaboración de normas de calidad ambiental (secundarias), de modo de poder utilizar las herramientas de gestión que la actual institucionalidad ambiental permite.
- Dado que la elaboración de normas secundarias, es complejo y muchas veces toma un tiempo considerable, se recomienda realizar a la brevedad una caracterización de acuíferos desde el punto de vista físico-químico, que permitan contar con información de la calidad natural del acuífero o similar a su calidad natural. De modo que en el momento que se decida confeccionar las normas de calidad ambiental se cuente con una información técnicamente óptima.
- Desde el punto de vista de la aplicabilidad de las medidas de protección, se observa que pueden ser perfectamente aplicables en Chile siempre que se destinen los recursos necesarios en cada uno de los aspectos. De acuerdo al levantamiento de información realizado en los acuíferos de estudio, se aprecia que existen varios ítems que requieren un mayor conocimiento como son los tipos de extracción de aguas subterráneas, potenciales fuentes de contaminación, vulnerabilidad, etc. Todos ellos fundamentales para obtener un conocimiento acabado del estado del recurso para un determinado sector acuífero. Resulta especialmente importante contar con información espacialmente distribuida de la calidad química de los acuíferos, ya que es la base para cualquiera de las medidas de protección propuestas. En definitiva, resultará más difícil proteger un sistema mientras menos información y/o conocimiento se tenga de él.
- Junto con lo anterior, se destaca que la metodología desarrollada resulta muy útil para el análisis del estado de un sector acuífero. Esta herramienta sumada a los otros

aspectos que se analizan dentro del sector constituyen los elementos con que se podría implementar un sistema de zonificación de acuíferos. En esta zonificación se podrían proteger acuíferos que presenten un estado crítico en cuanto a vulnerabilidad, calidad o continuidad del recurso, o alguna combinación de estos.

- La elaboración de normas de secundarias debe tomar en cuenta no sólo la calidad química del agua subterránea, sino que también el nivel de explotación de los acuíferos que pudieran inducir contaminación. En este sentido, el desarrollo de normas de calidad debe ir acompañado de un análisis legal que considere las leyes que rigen el aprovechamiento. Por ejemplo, si se indica que un acuífero está en estado de latencia se debería restringir las extracciones por razones de calidad, y no por razón de disponibilidad.

8.1.3 Red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas

En base al análisis de la información de la red de calidad química de aguas subterráneas de la DGA se puede realizar las siguientes conclusiones:

- La actual red de monitoreo de aguas subterráneas de la Dirección General de Aguas es deficiente, especialmente en términos espacial y temporal. Sin embargo, el conjunto de parámetros analizados y la calidad de los análisis de laboratorio cumplen con los requisitos necesarios para la caracterización y seguimiento de la calidad química del acuífero. En definitiva la red resulta poco representativa de las condiciones químicas de los acuíferos seleccionados, y por tanto no permite un adecuado seguimiento de ésta.
- Para cada sector acuífero seleccionado se propuso una nueva red de monitoreo, en la que se aumentó el número de puntos, los pozos existentes y/o nuevos, y que se cumplan con criterios claros respecto a representatividad y características constructivas.
- La red de monitoreo se complementa con definiciones respecto a los parámetros que se deben muestrear en cada punto de control, la frecuencia de muestreo mínimo y los protocolos de toma, transporte y análisis de las muestras.

8.2 Recomendaciones de trabajos futuros

Basado en la revisión de la literatura especializada, la experiencia obtenida durante la elaboración del estudio y las características de la red de medición de la calidad química de aguas subterráneas de la DGA se realiza las siguientes recomendaciones de trabajos futuros:

- Realizar muestreos de calidad química en 2 ó 3 acuíferos representativos de cada región, en al menos dos estaciones del año, considerando las recomendaciones indicadas en el capítulo 7 del presente informe. Esto permitirá contar con información de línea base con la calidad técnica necesaria para su posterior utilización en el diseño de medidas de protección de acuíferos más concretas.
- En este sentido es muy importante y recomendable que los muestreos se realicen a corto plazo, ya que en la medida que pasa el tiempo la calidad química del acuífero se aleja de la natural, y por tanto puede llevar a tomar decisiones erróneas respecto de, por ejemplo, la elaboración de normas secundarias.
- Consolidar la información de la calidad química de modo que sea asequible para cualquier usuario.
- Realizar monitoreo de la calidad química en los sectores acuíferos estudiados en este proyecto, es decir El Loa, Los Choros y Aconcagua, para aplicar, estudiar y analizar la temporalidad del índice de calidad. Esto resulta muy importante debido a que la escasez de información de calidad química no permitió aplicar las etapas de temporalidad de la metodología desarrollada.
- Una vez que se cuente con la información base de la calidad química de un acuífero, es necesario trabajar en el desarrollo de normas de calidad ambiental para los acuíferos, de modo que se utilice la institucionalidad ambiental que actualmente posee el país.

9 BIBLIOGRAFÍA

ALLOWAY, B. y AYRES, D. (1993). Chemical Principles of Environmental Pollution [Libro]. - London : Blackie Academy and Professional.

ANTICH, N., CANALS, A., SOLER, A., DARBYSHIRE, D.P.F. y SPIRO, B.F. (2000). The isotope composition of dissolved strontium as tracer of pollution in the Llobregat River, northeast Spain, International Association of Hydrological Science. [Publicación periódica].

ANTINAO, J. (1998). Caracterización Química de la Contaminación Ambiental de la Cuenca de Santiago Mediante el Análisis de Metales Pesados en la Fracción fina de Sedimentos Fluviales: Memoria para Optar al Título de Magíster de Geología: Universidad de Chile, Depto. de Geología [Libro].

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. (2001). Hidrología Subterránea [Libro]. - Barcelona : Omega.

DEPTO SOCIOLOGÍA IV (2008). Asignatura: Técnicas de investigación social - Departamento IV de Sociología (UCM) [En línea] = Capítulo 20: Análisis factorial: el procedimiento Análisis factorial // Introducción al análisis de datos. Análisis multivariante / ed. U. Complutense de Madrid. - 15 de marzo de 2009. - http://www.ucm.es/info/socivmyt/paginas/D_departamento/materiales/datos_multivariante.htm.

DEROUNE J. y DESSARGUES A. (1998). Delineation of groundwater protection zones based n tracer test and transport modelling in alluvial sediments [Publicación periódica] // Environmental Geology. 36 : Vols. 1-2. - págs. 27-36.

DESPOUY, I. (2005). Caracterización de fuentes y Análisis Crítico de los Tratamientos de Agua Potable en Chile. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile [Libro]. - Santiago : [s.n.].

DGA (2005). Estudio de intrusión salina en acuíferos costeros: Sector Costa Quebrada Los Choros, IV Región. S.I.T. N°109. [Informe]. - Santiago : [s.n.].

DGA (2003). Informe Técnico. Evaluación de los recursos hídricos sectores Calama y Llalqui, cuenca Río Loa. SIT N° 85. [Informe].

DGA (2004). Manual para la aplicación del concepto de vulnerabilidad de acuíferos, establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, Decreto Supremo N°46.Depto.de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. [Informe] / MOP, Depto.de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. - Santiago : [s.n.], 2004.

DGA (2001). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. Cuenca del río Aconcagua. [Informe].

EUROWATERNET (1998). The European Environment Agency's Monitoring and Information Network for Inland Water Resources. Technical Guidelines for Implementation. [Informe].

FAO (1994). Water quality for agriculture, Irrigation and Drainage Paper (Ayers, R.S. y Westcot, D.W.) [Libro]. Vol. 29 Rev 1.

FOSTER S. y GARDUÑO, H. (2002). Groundwater quality protection a guide for water service companies municipal authorities and enviroment agencies // The World Bank, GWMATE. - Washington : [s.n.].

GEOHIDROLOGÍA CONSULTORES-DGA (2009). Realización de campaña de monitoreo de aguas subterráneas sectores acuífero Los Choros y Aconcagua. SIT N°185 [Informe] : Informe técnico. - Santiago : [s.n.].

GONZÁLEZ, M.J. y ORTIZ, L. (2004). Iones en agua [En línea] / ed. Jiménez Gregorio. Diciembre de 2008. - <http://www.ionesenagua.com/>.

HAMANN, C.L., McEWEN, J.B. y MYERS, A.G. (1996). Guide to selection of water treatment process – 1990. En: AWWA. Water Treatment Membrane Processes, Cap. 10 Pág 10.9[Libro].

IGME (2003). Congreso TIAC (Tecnología de la Intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Paises Mediterráneos) [Sección del libro].

IN3 (2002). Proyecto e-Math de la UOC [En línea] = EST-M03: Análisis de componentes principales // Uso de las TIC en asignaturas cuantitativas aplicadas. Materiales / ed. Catalunya Internet Interdisciplinary Institute de la Universitat Oberta de. - 11 de noviembre de 2002. - 15 de marzo de 2008. - <http://www.uoc.edu/in3/e-math/>.

INN (1996). NCh 1333/78. Requisitos de calidad del Agua para diferentes usos [Libro]. - Santiago : [s.n.], 1996.

INN (1998). NCh411/3.Of98. Calidad de Agua, Muestreo, Parte 3. Guía sobre la preservación y manejo de las muestras [Libro]. - 1998.

INN (2005). NCh 409/1. Agua Potable 1 Requisitos [Libro]. - Santiago : [s.n.], 2005.

INN (2008). NCh 777/1 c. R2008. Agua Potable, Fuentes de abastecimiento y obras de captación, Parte 1 Captación de aguas superficiales [Libro]. - Santiago : [s.n.], 2008.

LANKFORD P. y ECKENFELDER W. (1990). Toxicity reduction in industrial effluents [Libro]. - NY : [s.n.], 1990.

LENNTech (2008). Water treatment & Air Purification systems [En línea]. - Lenntech Agua residual & purificación del aire Holding B.V., 2008. - Diciembre de 2008. - <http://www.lenntech.com/>.

LOVE D., HALLBAUER, D, AMOS, A. y HRANOVA, R. (2004). Factor analysis as a tool in groundwater quality management two southern African case studies [Publicación periódica] // Physics and Chemistry of the Earth. 15-18 : Vol. 29. - págs. 1135-1143.

MAKOVEC, M. (2008). Cap. VII Análisis factorial // Apuntes de Curso IN540: Métodos estadísticos para economía y gestión. - Santiago : Ingeniería industrial. U. de Chile.

MENA, P. (2007). Apuntes del curso CI66Q-1 Procesos avanzados de tratamiento, FCFM, Universidad de Chile. [Libro].

OCDE (2005). Evaluaciones de desempeño ambiental. Chile [Informe] / Organización de Cooperación y Desarrollo Económico.

OMS (2006). Guidelines for drinking water quality: incorporating first addendum. 3a Edition. - Vol. 1: recomendations.

OMS (2007). Chemical safety of drinking-water: Assessing priorities for risk management [Libro].

OTERO, N., TOLOSANA-DELGADO, R., SOLER, A., PAWLOWSKY-GLAHN, V. y CANALS, A. (2005). Relative vs absolute statistical analysis of compositions: A comparative

study of surface waters of a Mediterranean river [Publicación periódica] // Water Research. - 7 : Vol. 39. - págs. 1404-1414.

PASSARELLA, G. y CAPUTO, M.C. (2006). A methodology for space time classification of groundwater quality [Publicación periódica] // Environmental Monitoring and Assessment. 1-3 : Vol. 115. - págs. 95-117.

PONTIUS, F. (1996). Regulatory compliance using Membrane Processes [Publicación periódica]. 5 : Vol. 88. - págs. 12-14.

RENTIER, C., DELLOYE, F., BROUYÈRE, S. y DESSARGUES, A. (2006). A framework for an optimized groundwater monitoring network and aggregated indicators [Publicación periódica] // Environmental Geology. 50 : Vol. 2. - págs. 194-201.

ROBINSON, N. y CHILTON, P- (2007). Adapting existing experience with aquifer vulnerability and groundwater protection for Africa [Publicación periódica] // Journal of African Science. 47. - págs. 30-38.

SISS (2001). Análisis de presencia de contaminantes no controlados en agua potable [Informe] / Super Intendencia de Servicios Sanitarios. - Santiago : [s.n.].

SOLER, A., CANALS, A., GOLDSTEIN, L., OTERO, N., ANTICH, N. y SPANGENBERG, J. (2002). Sulphur and strontium isotope composition of the Llobregat River (NE Spain): Tracers of natural and anthropogenic chemicals in stream waters [Publicación periódica] // Water, Air & Soil Pollution. 1-4 : Vol. 136. - págs. 207-224.

TOLOSANA-DELGADO, R., OTERO, N., PAWLOWSKY-GLAHN, V. y SOLER, A. (2005). Latent Compositional factors in the Llobregat River Basin (Spain) Hydrogeochemistry [Publicación periódica] // Mathematical Geology. 7 : Vol. 37. - págs. 681-702.

YU, K.C., TSAI, L.J., CHEN, S.H y HO, S.T. (1998). Correlation analyses on binding behavior of heavy metals with sediment matrices [Publicación periódica] // Water research. 35. - págs. 2417-2428.