



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR CALIDAD NATURAL EN ACUIFEROS

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO JAVIER AGUILERA PIÑONES

**PROFESOR GUIA:
CARLOS ALBERTO ESPINOZA CONTRERAS**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
MESENIA ATENAS VIVANCO
ANA MARIA SANCHA FERNANDEZ**

**SANTIAGO DE CHILE
MAYO 2010**

RESUMEN

La necesidad de regular la emisión de residuos a diferentes ambientes hídricos ha motivado el desarrollo de diversas normativas entre las que se destacan las desarrolladas para aguas subterráneas, particularmente el D.S. N° 46 de 2002 “Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas” dentro de la cual se establece la necesidad de determinar la calidad natural ante la eventualidad de que se tenga una vulnerabilidad alta en la zona de infiltración, pero dada la falta de una metodología que permita la determinación de la calidad natural, es lo que motiva el desarrollo de este trabajo de Tesis.

Para desarrollar la metodología fue necesario conocer el contexto bajo el cual se debe determinar una relación a esto se definió el concepto de vulnerabilidad, así como también se estudió la metodología aplicada en Chile para su determinación, comprendiendo así el contexto general bajo el cual se debe definir la calidad natural de un determinado lugar. Entendido esto último se definió el concepto de calidad natural, el cual corresponde a las características físicas y químicas que las aguas subterráneas adquieren producto de la interacción, tanto química como física, con el medio con el cual está en contacto, sin que las concentraciones de los más importantes cationes y aniones originados por las actividades antrópicas generen influencias perceptibles a los provenientes de las rocas o el suelo. A partir de lo anterior se desarrolló la metodología para determinar calidad natural, la cual se basó en diferentes esquemas internacionales estudiados y adaptados a las condiciones nacionales en relación a los niveles de información existentes, y que a partir de una serie de parámetros mínimos a monitorear y la recopilación de la información hidroquímica histórica, geológica e hidrogeológica y junto al catastro de las actividades antrópicas desarrolladas en el sitio de estudio definido para el caso, permite, utilizando una serie de criterios entre los cuales se destacan la preselección de muestras, valores límites para parámetros asociados a contaminación antrópica, entre otros, definir la calidad natural de un determinado lugar, lo cual se complementa con la incorporación de información más detallada, en términos geológicos, hidrogeológicos y hidroquímicos. Así mismo esta metodología tiene como objetivo adicional identificar los procesos involucrados en la hidroquímica natural del agua subterránea, lo cual se efectúa a partir de la medición de parámetros como Nitrato, Hierro, Oxígeno Disuelto, Potencial Redox entre otros. Para analizar los alcances de la aplicación de la metodología a diferentes escalas y niveles de información, ésta fue aplicada en dos casos, el primero a nivel nacional, en el cual se hizo latente la inaplicabilidad de la metodología producto de que la información existente a estas escalas no es detallada o simplemente no existe, así como también se hizo presente la distribución espacial no homogénea de la red de monitoreo de calidad en ciertas regiones; sin embargo lo anterior, si fue posible analizar la distribución, por zonas, de los parámetros más importantes, comparándose con los valores normativos existentes, dado como resultado una tendencia general al cumplimiento de estas. En el segundo caso, la metodología fue aplicada a un nivel de escala menor, particularmente en el acuífero de la cuenca del río Aconcagua, caso en el cual la metodología pudo ser aplicada con relativo éxito, dado que los niveles de información eran suficientes para determinar de forma cuantitativa los rangos máximos y mínimos de las concentraciones de una serie de parámetros, sin embargo, la falta de niveles más detallados de información no permitieron identificar los probables procesos y las condiciones existentes en el acuífero, como también identificar el origen real de la contaminación existente en el acuífero.

Finalmente, y a manera de conclusión, se puede decir que, a partir de las discusiones generadas en la aplicación de la metodología, se pudo establecer que la aplicabilidad de esta depende de factores críticos como el nivel de información disponible para las escalas a las cuales se desee trabajar ya sea geológica como hidrogeológica, contar con datos hidroquímicos históricos, monitoreo de parámetros asociados a los procesos que modifican la calidad de las aguas así como también de aquellos parámetros que permitan evaluar el grado de impacto antrópico existente en un determinado sitio. así como también se realizan una serie de recomendaciones las que apuntan fundamentalmente a una mejora en la red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas existente, la incorporación de parámetros a los análisis que se realicen en las muestras de la red de calidad entre otros.

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	17
1.1	GENERALIDADES.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.3	METODOLOGÍA.....	20
1.4	RESULTADOS ESPERADOS.....	23
1.5	CONTENIDO DEL INFORME.....	24
2	ANTECEDENTES GENERALES.....	27
2.1	INTRODUCCIÓN.....	27
2.2	REDES DE MONITOREO.....	27
2.3	VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y CALIDAD NATURAL ASOCIADA A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	34
2.3.1	<i>Aspectos generales.....</i>	<i>34</i>
2.3.2	<i>Método de determinación de Vulnerabilidad aplicado en Chile.....</i>	<i>35</i>
2.3.2.1	Vulnerabilidad.....	35
2.3.2.2	Metodología utilizada en Chile.....	37
2.4	CALIDAD NATURAL.....	40
2.5	FACTORES QUE INCIDEN EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS...	42
2.5.1	<i>Factores Físicos.....</i>	<i>42</i>
2.5.2	<i>Factores Atmosféricos.....</i>	<i>42</i>
2.5.3	<i>Factores Geológicos.....</i>	<i>43</i>
2.5.4	<i>Factores Biológicos.....</i>	<i>43</i>
2.6	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	45
3	GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA.....	47
3.1	INTRODUCCIÓN.....	47
3.2	GEOLOGÍA.....	47
3.2.1	<i>Contexto General.....</i>	<i>47</i>
3.2.2	<i>Contexto Geológico en Chile.....</i>	<i>55</i>
3.3	HIDROGEOLOGÍA.....	58
3.3.1	<i>Contexto General.....</i>	<i>58</i>

3.3.1.1	Depósitos Fluviales.	58
3.3.1.2	Depósitos eólicos.	59
3.3.1.3	Depósitos Glaciares.	59
3.3.1.4	Rocas Sedimentarias.	60
3.3.1.4.1	Areniscas.	60
3.3.1.4.2	Rocas Carbonatadas.	60
3.3.1.5	Esquisto o pizarra.	61
3.3.2	<i>Rocas Ígneas y Metamórficas.</i>	61
3.3.3	<i>Situación en Chile.</i>	64
3.3.3.1	Provincia altiplánica.	64
3.3.3.2	Provincia andina vertiente pacífico.	64
3.3.3.3	Provincia de Cuencas Costeras.	68
3.3.3.4	Islas del Pacífico.	68
4	MECANISMOS DE ADQUISICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.	75
4.1	INTRODUCCIÓN.	75
4.2	EQUILIBRIO QUÍMICO.	76
4.2.1	<i>Coefficiente de Actividad.</i>	77
4.2.2	<i>Equilibrio y energía Libre.</i>	78
4.2.3	<i>Gases Disueltos.</i>	80
4.3	SOLUBILIDAD Y DISOLUCIÓN DE MINERALES.	81
4.3.1	<i>Constantes de equilibrio y solubilidad.</i>	81
4.3.2	<i>Efectos de la fuerza iónica.</i>	87
4.3.3	<i>Sistema Carbonato.</i>	88
4.3.4	<i>El efecto Ión-Común.</i>	90
4.3.5	<i>Desequilibrio e índice de saturación.</i>	91
4.4	PROCESOS DE OXIDACIÓN Y REDUCCIÓN.	91
4.4.1	<i>Estados de oxidación y reacciones Redox.</i>	91
4.4.2	<i>Materia Orgánica y consumo de Oxígeno.</i>	93
4.4.3	<i>Condiciones de Equilibrio Redox.</i>	94
4.4.4	<i>Factores Microbiológicos.</i>	95
4.4.5	<i>Diagramas pE-pH.</i>	95

4.5	ADSORCIÓN E INTERCAMBIO DE IONES.....	100
4.5.1	<i>Mecanismos.....</i>	100
4.5.2	<i>Capacidad de intercambio Catiónico (CEC).....</i>	103
4.5.3	<i>Ecuaciones de Acción de Masas.....</i>	104
4.6	INTRUSIÓN SALINA.....	107
4.6.1	<i>Definición.....</i>	107
4.7	DRENAJE ACIDO.....	109
5	METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD NATURAL EN ACUIFEROS.....	111
5.1	INTRODUCCIÓN.....	111
5.2	DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	111
5.3	APROXIMACIÓN TEÓRICA DE LA CALIDAD NATURAL EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE INFORMACIÓN.....	113
5.4	DESARROLLO METODOLOGÍA.....	118
5.4.1	<i>Dimensiones del sitio de estudio.....</i>	118
5.4.2	<i>Adquisición de la Información Geológica e Hidrogeológica.....</i>	119
5.4.3	<i>Adquisición de análisis Químicos Disponibles.....</i>	121
5.4.4	<i>Estudio Elementos Mayores y Menores o Traza.....</i>	125
5.4.4.1	Descripción del Contexto Geológico e Hidrogeológico.....	125
5.4.4.2	Auditoria de los Análisis Químicos.....	126
5.4.4.3	Análisis Estadístico.....	127
5.4.4.4	Determinación de la calidad natural.....	127
5.4.4.4.1	Métodos de remoción de análisis influenciados por actividad antrópica. 127	
a)	Derivación de los niveles y umbrales naturales para cuerpos de agua subterránea en el Valle Superior del Rhine.....	128
b)	Guía Técnica: Calidad Natural de Aguas Subterráneas. Metodo de Caracterización de los estados de referencia de acuíferos Franceses.....	130
c)	Determinación de las concentraciones naturales de aguas subterráneas de estructuras hidrogeológicas de Alemania.....	132
5.4.4.4.2	Definición de Criterios para Determinar la Calidad Natural.....	135
5.4.4.4.3	Determinación de los rangos de calidad natural.....	136

5.4.4.5	Análisis Hidrogeoquímico.....	136
5.4.4.6	Descripción de procesos.....	140
5.4.5	<i>Análisis Complementarios.</i>	140
5.5	SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA PRESENTADA.....	141
6	APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA.....	144
6.1	INTRODUCCIÓN.....	144
6.2	CASO A NIVEL NACIONAL.	144
6.2.1	<i>Contexto geológico.</i>	144
6.2.2	<i>Contexto Hidrogeológico.</i>	144
6.2.3	<i>Información Recopilada.</i>	145
6.2.4	<i>Análisis Predictivo.</i>	145
6.2.5	<i>Auditoria de los datos de Calidad.</i>	146
6.2.6	<i>Curvas de Distribución.</i>	152
6.2.6.1	Conductividad.....	153
6.2.6.2	pH.....	155
6.2.6.3	Cloruro.	156
6.2.6.4	Sulfatos.....	158
6.2.6.5	Calcio.	160
6.2.6.6	Magnesio.....	162
6.2.6.7	Potasio.....	163
6.2.6.8	Sodio.	165
6.2.6.9	Nitrato.	167
6.2.6.10	Arsénico.....	169
6.2.6.11	Cobre.....	171
6.2.6.12	Hierro.	173
6.2.7	<i>Síntesis Caso Nivel Nacional.</i>	176
6.3	CASO CUENCA ACONCAGUA.	179
6.3.1	<i>Características principales.</i>	179
6.3.2	<i>Contexto Geológico.</i>	182
6.3.2.1	Rocas Intrusivas.....	182
6.3.2.1.1	Unidades Paleozoicas.....	182
6.3.2.1.2	Unidades Jurásicas.....	182

6.3.2.1.3	Unidades Cretácicas.....	182
6.3.2.2	Mesozoico.....	183
6.3.2.2.1	Unidades Cretácicas.....	183
6.3.2.2.2	Unidades Jurásicas.....	184
6.3.2.3	Cenozoico.....	184
6.3.2.3.1	Unidades Cuaternarias.....	184
6.3.2.3.2	Unidades Terciarias.....	185
6.3.2.4	Fallas.....	185
6.3.3	<i>Principales Yacimientos.....</i>	<i>188</i>
6.3.4	<i>Contexto Hidrogeológico.....</i>	<i>189</i>
6.3.4.1	Unidades Hidrogeológicas.....	190
6.3.4.1.1	Unidad A.....	190
6.3.4.1.2	Unidad B.....	193
6.3.4.1.3	Unidad C.....	197
6.3.4.1.4	Unidad D.....	198
6.3.4.2	Sectores Acuíferos en la Cuenca del Río Aconcagua.....	203
6.3.5	<i>Información recopilada.....</i>	<i>208</i>
6.3.6	<i>Análisis Predictivo.....</i>	<i>211</i>
6.3.6.1	Geología.....	211
6.3.6.2	Hidrogeología.....	213
6.3.6.3	Actividad Antrópica.....	214
6.3.7	<i>Auditoria análisis de calidad de agua subterránea.....</i>	<i>230</i>
6.3.8	<i>Análisis Estadístico.....</i>	<i>233</i>
6.3.9	<i>Determinación Calidad Natural.....</i>	<i>236</i>
6.3.10	<i>Análisis Hidrogeoquímico.....</i>	<i>240</i>
6.3.10.1	Efecto de Confinamiento sobre el comportamiento de la química del agua en el acuífero del Aconcagua.....	240
6.3.10.2	Efectos Transmisividad y Evaporación.....	245
6.3.10.2.1	Diagrama Piper.....	255
6.3.11	<i>Descripción de los procesos Involucrados en la Adquisición de la composición química de las aguas subterráneas.....</i>	<i>258</i>
6.3.11.1	Oxido Reducción.....	258
6.3.11.2	Recarga.....	258

6.3.12	<i>Complementos a la determinación de la calidad natural: Comparación de las muestras analizadas en sectores con registros históricos: Limache y Nogales.</i>	264
6.3.13	<i>Síntesis de la determinación de la calidad natural acuífero Aconcagua.</i>	272
7	CONSIDERACIONES FINALES.	276
7.1	DISCUSIÓN.	276
7.1.1	<i>Con Respecto a la Metodología.</i>	276
7.1.2	<i>Con Respecto a los Ejemplos de Aplicación.</i>	279
7.1.2.1	Caso Nivel Nacional.	279
7.1.2.2	Caso Acuífero Río Aconcagua.	281
7.2	CONCLUSIONES GENERALES.	283
7.3	RECOMENDACIONES.	287
8	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.	290
9	ANEXOS	296
9.1	ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.	298
9.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	299
9.2.1	<i>Introducción.</i>	299
9.2.2	<i>Características Físicas de las aguas subterráneas.</i>	300
9.2.2.1	Temperatura.	300
9.2.2.2	Turbiedad.	301
9.2.2.3	Color.	301
9.2.2.4	Olor y sabor.	302
9.2.3	<i>Características químicas.</i>	302
9.2.3.1	Dureza.	302
9.2.3.2	Conductividad Específica.	303
9.2.3.3	Concentración de ión Hidrógeno (pH).	307
9.2.3.4	Sólidos Disueltos Totales.	309
9.2.4	<i>Características de los sólidos disueltos</i>	310
9.2.4.1.1	Sílice.	310
9.2.4.1.2	Sodio.	311

9.2.4.1.3	Calcio.	313
9.2.4.1.4	Magnesio.	314
9.2.4.1.5	Potasio.	315
9.2.4.1.6	Carbonato y Bicarbonato.	315
9.2.4.1.7	Sulfato:	317
9.2.4.1.8	Cloruros.	319
9.2.4.1.9	Nitrato.	319
9.2.4.1.10	Hierro.	320
9.2.4.1.11	Aluminio.	323
9.2.4.1.12	Arsénico.	325
9.2.4.1.13	Cadmio.	325
9.2.4.1.14	Cobalto.	326
9.2.4.1.15	Cromo.	326
9.2.4.1.16	Cobre.	327
9.2.4.1.17	Plata.	327
9.2.4.1.18	Litio.	328
9.2.4.1.19	Manganeso.	329
9.2.4.1.20	Molibdeno.	330
9.2.4.1.21	Níquel.	331
9.2.4.1.22	Plomo.	332
9.2.4.1.23	Selenio.	333
9.2.4.1.24	Zinc.	333
9.2.4.1.25	Fosfato.	334
9.2.4.1.26	Boro.	335
9.2.4.2	Síntesis Sólidos Disueltos.	337
9.2.4.3	Valores Límite para Sólidos Disueltos Según Normativas Chilenas.	338
9.3	ANEXO 2: TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE INTRUSIÓN SALINA	340
9.4	TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE INTRUSIÓN SALINA	341
9.4.1	<i>Técnicas Convencionales.</i>	341
9.4.1.1	Métodos Físicos.	341
9.4.1.2	Métodos Hidrogeoquímicos.	342
9.4.2	<i>Técnicas no Convencionales.</i>	344
9.4.2.1	Técnicas Geofísicas.	344

9.4.2.2	Métodos Isotópicos.	345
9.5	ANEXO 3: GEOLOGÍA ZONA CUENCA DEL ACONCAGUA BASADA EN VON IGEL (1999).....	346

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Pozos de Monitoreo contemplados en la red de Monitoreo. -----	28
Tabla 2.2: Principales parámetros medidos por la Red de Monitoreo.-----	32
Tabla 2.3: Parámetros evaluados por la red de monitoreo en cada región.-----	32
Tabla 2.4: Clases de Efectividad Generalizada de Protección y Vulnerabilidad asociada -----	39
Tabla 3.1: Composición Promedio en partes por millón (ppm) de Rocas ígneas y algunos tipos de roca sedimentaria. -----	48
Tabla 3.2: Tipos de roca y composición mineral -----	49
Tabla 3.3: Composición Química de los principales minerales constituyentes de rocas. -----	50
Tabla 3.4: Principales minerales constituyentes de la corteza terrestre-----	51
Tabla 3.5: Rangos de contenido de elementos menores en minerales comunes formadores de rocas -----	51
Tabla 3.6: Constituyentes Mayores y su Fuente -----	53
Tabla 3.7: Constituyentes Menores y Elementos Traza y Su Fuente.-----	54
Tabla 3.8: Huella Litológica en la composición del agua subterránea. -----	63
Tabla 4.1: Tasas de Disolución de Minerales Comunes formadores de Roca a pH 5.-----	84
Tabla 4.2: Constantes de equilibrio y Solubilidades para ciertos minerales.-----	85
Tabla 4.3: Algunos minerales comunes y sus constantes de Disolución.-----	86
Tabla 4.4: Valores de CEC para los 5 grupos de arcilla. -----	103
Tabla 4.5: Minerales Sulfurados Presentes en la Geología Chilena. -----	109
Tabla 5.1: Parámetros mínimos a monitorear para determinar la calidad natural. -----	125
Tabla 5.2: Chequeos Generales. -----	126
Tabla 5.3: Relaciones Iónicas Útiles. -----	137
Tabla 5.4: Índices utilizados para deducir la roca en contacto con el agua subterránea. -----	138
Tabla 6.1: Resultados balance iónico.-----	146
Tabla 6.2: Resultados aplicación criterio preselección a los pozos de la red de monitoreo de calidad de la D.G.A., muestras con contenido de nitrato bajo los 10 mg/L. -----	148
Tabla 6.3: Pozos región de Tarapacá con contenidos de nitrato mayor a 10 mg/L-----	148
Tabla 6.4: Pozos región de Atacama con contenido de nitrato mayor a 10 mg/L. -----	149
Tabla 6.5: Pozos región de Valparaíso con contenidos de nitrato mayor a 10 mg/L.-----	149
Tabla 6.6: Pozos Región. Metropolitana con contenidos de nitrato mayor a 10 mg/L.-----	149

Tabla 6.7: Resultados de la aplicación de los índices de contaminación por Intrusión Salina. --	150
Tabla 6.8: Caudales en un Año Hidrológico Tipo. -----	181
Tabla 6.9: Parámetros a analizar en la cuenca del Aconcagua. -----	210
Tabla 6.10: Concentraciones Medias, Máximas y Mínimas registradas en estaciones de monitoreo de calidad superficial. -----	218
Tabla 6.11: Plantas Tratamiento cuenca Aconcagua. -----	219
Tabla 6.12: Vertederos en la cuenca del río Aconcagua. -----	219
Tabla 6.13: Valores históricos registrados en las estaciones del río Blanco. -----	226
Tabla 6.14: Muestras de los pozos de la red de monitoreo de la D.G.A. que presentan Balance Iónico menor al 5%. -----	230
Tabla 6.15: Cantidad de muestras de la campaña de monitoreo cuyo Balance Iónico es menor al 5%. -----	230
Tabla 6.16: Máximos y Mínimos registrados en los sectores San Felipe-Los Andes, Aconcagua las Vegas y Llay Llay. -----	233
Tabla 6.17: Máximos y Mínimos registrados en los sectores Catemu, Quillota y Rabuco. -----	234
Tabla 6.18: Máximos y Mínimos registrados en sectores Nogales, Limache y Aconcagua desembocadura. -----	234
Tabla 6.19: Desviaciones de los parámetros medidos en el estudio. -----	235
Tabla 6.20: Muestras que están por debajo de los límites establecidos para nitrato y cloruro---	236
Tabla 6.21: Valores medios y rangos de los parámetros analizados en el acuífero del río Aconcagua. -----	237
Tabla 6.22: Población residente en los asentamientos asociados a la cuenca del Aconcagua. Censo 2002. -----	239
Tabla 6.23: Parámetros Acuífero Libre y Confinado. -----	243
Tabla 6.24: Concentraciones medias, máximas y mínimas registradas en las estaciones de monitoreo de calidad superficial. -----	259
Tabla 6.25: Valores Máximos Y Mínimos registrados en los pozos pertenecientes a la red de monitoreo de la D.G.A. -----	264
Tabla 6.26: Valores monitoreados en parámetros característicos en Limache y Nogales. -----	265
Tabla 7.1: Parámetros mínimos requeridos para la determinación de la calidad natural. -----	284

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Distribución de pozos zonas Norte Grande y Norte Chico.....	30
Figura 2.2: Distribución de pozos de monitoreo Zona Centro Centro y Centro Sur.....	31
Figura 3.1: Relación entre el contenido de elementos en rocas y en aguas subterráneas.....	52
Figura 3.2: Mapa Hidrogeológico de Chile I, II y III Región.....	71
Figura 3.3: Mapa Hidrogeológico de Chile IV a IX Región.....	72
Figura 3.4: Mapa Hidrogeológico de Chile X, XI y XII Región.....	73
Figura 4.1: Mecanismos de mayor importancia en la composición de las Aguas Subterráneas...	75
Figura 4.2: Relación del coeficiente de actividad y la fuerza iónica de solución (25°C).....	79
Figura 4.3: Coeficiente de Adsorción a del CO ₂	81
Figura 4.4: Tasas de Disolución en función del pH.	82
Figura 4.5: Tasas de Disolución de la Calcita.....	83
Figura 4.6: Estabilidad de minerales frente a la degradación o disolución.....	84
Figura 4.7: Solubilidad del Yeso en solución acuosa de diferentes concentraciones de NaCl, a 25°C y 1 atm.....	87
Figura 4.8: Especies disueltas en agua en equilibrio con calcita en función de P _{CO₂} en un sistema de disolución abierta.....	89
Figura 4.9: Distribución de las principales especies inorgánicas disueltas de carbono.....	90
Figura 4.10: Diferentes zonas Redox existentes a lo largo de un acuífero confinado (Jackson and Inch, 1980).....	92
Figura 4.11: Diagrama pE-pH, 25°C y presión de 1 bar.....	97
Figura 4.12: Diagrama pE-pH Hierro a 25°C y 1 atm.....	98
Figura 4.13: Variación de la adsorción de diferentes especies de cationes metálicos en hidróxido de Hierro.....	102
Figura 4.14: Variación de la adsorción de diferentes especies de cationes metálicos en Amorfo Silicato.....	102
Figura 4.15: Comportamiento del CEC para diferentes valores de pH.....	104
Figura 4.16: Afinidad para la adsorción.....	106
Figura 4.17: Representación conceptual del problema de intrusión salina provocada por la explotación de pozos.....	108
Figura 4.18: Expresión genérica de la formación de aguas de drenaje ácido.....	110

Figura 5.1: Nivel de detalle y nivel de confianza en la aplicación de la metodología en función de la información disponible.	115
Figura 5.2: Niveles de información requeridos para distintos niveles escala.....	116
Figura 5.3: Modelo conceptual de los aportes naturales y antrópicos que conforman la distribución de las muestras observadas.	133
Figura 6.1: Ubicación Pozos con contenido de nitrato mayor a 10 mg/L I región.....	150
Figura 6.2: Pozos con contaminación por sales Región de Tarapacá.....	151
Figura 6.3: Distribución precipitaciones.	180
Figura 6.4: Distribución de la precipitación cuenca del río Aconcagua.....	180
Figura 6.5: Mapa Geológico Cuenca del Aconcagua.	186
Figura 6.6: Leyenda Mapa Geológico.	187
Figura 6.7: Menas en la Cuenca del Aconcagua.	188
Figura 6.8: Perfil Longitudinal Sector Los Andes San Felipe.....	191
Figura 6.9: Perfiles Transversales Sector San Felipe Los Andes.....	192
Figura 6.10: Perfil Longitudinal Sector San Felipe-Romeral.....	194
Figura 6.11: Perfil Longitudinal Sector Romeral-Tabolango.....	195
Figura 6.12: Perfil Longitudinal Sector Mauco-Con Con.....	196
Figura 6.13: Perfil Longitudinal y Transversal Sector Llay Llay.....	200
Figura 6.14: Perfil Transversal Sector Limache.....	201
Figura 6.15: Leyenda Figuras 6.8 a 6.12.	202
Figura 6.16: Leyenda Figuras 6.13 y 6.14.....	202
Figura 6.17: Sectores Acuífero Aconcagua.....	204
Figura 6.18: Distribución espacial de las estaciones y pozos utilizados para el estudio.....	209
Figura 6.19: Distribución Cloruro sectores Acuífero del Aconcagua.	215
Figura 6.20: Distribución Nitrato sectores Acuífero Aconcagua.	216
Figura 6.21: Estaciones Calidad Superficial.....	217
Figura 6.22: Ubicación Plantas de Tratamiento y Vertederos.....	220
Figura 6.23: Variación Espacial del Cloruro.	221
Figura 6.24: Distribución Espacial Nitrato.....	222
Figura 6.25: Distribución del Sulfato en la Cuenca del Aconcagua.....	225
Figura 6.26: Ubicación Estaciones de monitoreo Superficial. Tabla 6.13.	227
Figura 6.27: Distribución de las muestras seleccionadas.	238
Figura 6.28: Ubicación Muestras P15 y P15_2 Sector Llay Llay.	241

Figura 6.29: Ubicación Pozos A13, P15 y P29.	242
Figura 6.30: Variación Espacial del Potasio.....	246
Figura 6.31: variación Espacial Sodio.....	247
Figura 6.32: Variación Espacial Magnesio.	248
Figura 6.33: Transmisividades asociadas a los sectores del acuífero del río Aconcagua.	249
Figura 6.34: Ubicación pozos seleccionados monitoreados campaña 2008-2009.	250
Figura 6.35: Diagramas de Stiff Pozos Sector San Felipe-Los Andes A01 y A03.	251
Figura 6.36: Diagramas de Stiff Pozos Sector San Felipe-Los Andes A04 y P01_2.....	251
Figura 6.37: Diagramas de Stiff Pozos Sector San Felipe-Los Andes P02 y P05.....	251
Figura 6.38: Diagramas de Stiff Pozos Sector San Felipe-Los Andes P02 y P05.....	252
Figura 6.39: Diagramas de Stiff Pozos Sector Aconcagua Las Vegas P10 y P11.	252
Figura 6.40: Diagramas de Stiff Pozos Sector Aconcagua Las Vegas P10 y P11.	252
Figura 6.41: Diagramas de Stiff Pozos Sector Quillota P17 y P18.	253
Figura 6.42: Diagramas de Stiff Sectores Quillota P19 y Aconcagua Desembocadura P29_2... 253	253
Figura 6.43: Diagramas de Stiff Pozos Sector Aconcagua Desembocadura A14 y A13.	253
Figura 6.44: Tipos de Agua según Clasificación Diagrama Piper.	255
Figura 6.45: Diagrama de Piper Muestras Acuífero Aconcagua.....	256
Figura 6.46: Distribución concentraciones de Sulfato en aguas subterráneas y superficiales. ...	260
Figura 6.47: Distribución concentraciones de Bicarbonato en aguas subterráneas y superficiales.	260
Figura 6.48: Distribución concentraciones de Calcio en aguas subterráneas y superficiales.....	261
Figura 6.49: Distribución concentraciones de Sodio en aguas subterráneas y superficiales.....	261
Figura 6.50: Distribución espacial concentración Magnesio en aguas subterráneas y superficiales.	262
Figura 6.51: Distribución espacial concentración Potasio aguas subterráneas y superficiales. ...	262
Figura 6.52: Ubicación pozos monitoreados Sector Limache.....	265
Figura 6.53: Ubicación pozos monitoreados Sector Nogales.....	266

INDICE DE GRÁFICOS.

Gráfico 6.1: Distribución Conductividad Verano Invierno Chile General.....	153
Gráfico 6.2: Distribución Conductividad Verano Invierno Norte Grande.....	153
Gráfico 6.3: Distribución Conductividad Verano Invierno Norte Chico.	153
Gráfico 6.4: Distribución Conductividad Verano Invierno Centro Centro.	154
Gráfico 6.5: Distribución Conductividad Verano Invierno Centro Sur.....	154
Gráfico 6.6: Distribución pH Verano Invierno Chile General	155
Gráfico 6.7: Distribución pH Verano Invierno Norte Grande.....	155
Gráfico 6.8: Distribución pH Verano Invierno Norte Chico.....	155
Gráfico 6.9: Distribución pH Verano Invierno Centro Centro.....	156
Gráfico 6.10: Distribución pH Verano Invierno Centro Sur.	156
Gráfico 6.11: Distribución Cloruro Invierno Verano Chile General.....	156
Gráfico 6.12: Distribución Cloruro Invierno Verano Norte Grande.	157
Gráfico 6.13: Distribución Cloruro Invierno Verano Norte Chico.	157
Gráfico 6.14: Distribución Cloruro Invierno Verano Centro Centro.	157
Gráfico 6.15: Distribución Cloruro Invierno Verano Centro Sur.....	158
Gráfico 6.16: Distribución Sulfato Invierno Verano Chile General.....	158
Gráfico 6.17: Distribución Sulfato Invierno Verano Norte Grande.	158
Gráfico 6.18: Distribución Sulfato Invierno Verano Norte Chico.	159
Gráfico 6.19: Distribución Sulfato Invierno Verano Centro Centro.	159
Gráfico 6.20: Distribución Sulfato Invierno Verano Centro Sur.....	159
Gráfico 6.21: Distribución Calcio Invierno Verano Chile General.....	160
Gráfico 6.22: Distribución Calcio Invierno Verano Norte Grande.	160
Gráfico 6.23: Distribución Calcio Invierno Verano Norte Chico.	161
Gráfico 6.24: Distribución Calcio Invierno Verano Centro Centro	161
Gráfico 6.25: Distribución Calcio Invierno Verano Centro Sur.....	161
Gráfico 6.26: Distribución Magnesio Invierno Verano Chile General.	162
Gráfico 6.27: Distribución Magnesio Invierno Verano Norte Grande.....	162
Gráfico 6.28: Distribución Magnesio Invierno Verano Norte Chico.	162
Gráfico 6.29: Distribución Magnesio Invierno Verano Centro Centro.....	163
Gráfico 6.30: Distribución Magnesio Invierno Verano Centro Sur.	163

Gráfico 6.31: Distribución Potasio Invierno Verano Chile General.	163
Gráfico 6.32: Distribución Potasio Invierno Verano Norte Grande.	164
Gráfico 6.33: Distribución Potasio Invierno Verano Norte Chico.	164
Gráfico 6.34: Distribución Potasio Invierno Verano Centro Centro.	164
Gráfico 6.35: Distribución Potasio Invierno Verano Centro Sur.	165
Gráfico 6.36: Distribución Sodio Invierno Verano Chile General.	165
Gráfico 6.37: Distribución Sodio Invierno Verano Norte Grande.	166
Gráfico 6.38: Distribución Sodio Invierno Verano Norte Chico.	166
Gráfico 6.39: Distribución Sodio Invierno Verano Centro Centro.	166
Gráfico 6.40: Distribución Sodio Invierno Verano Centro Sur.	167
Gráfico 6.41: Distribución Nitrato Invierno Verano Chile General.	167
Gráfico 6.42: Distribución Nitrato Invierno Verano Norte Grande.	167
Gráfico 6.43: Distribución Nitrato Invierno Verano Norte Chico.	168
Gráfico 6.44: Distribución Nitrato Invierno Verano Centro Centro.	168
Gráfico 6.45: Distribución Nitrato Invierno Verano Centro Sur.	168
Gráfico 6.46: Distribución Arsénico Norte Grande.	169
Gráfico 6.47: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Verano Chile General.	170
Gráfico 6.48: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Norte Grande.	170
Gráfico 6.49: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Norte Chico.	170
Gráfico 6.50: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Centro Centro.	171
Gráfico 6.51: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Centro Sur.	171
Gráfico 6.52: Distribución Cobre Invierno Verano Chile General.	171
Gráfico 6.53: Distribución Cobre Invierno Verano Zona Norte Grande.	172
Gráfico 6.54: Distribución Cobre Invierno Verano Zona Norte Chico.	172
Gráfico 6.55: Distribución Cobre Invierno Verano Zona Centro Centro.	172
Gráfico 6.56: Distribución Cobre Invierno Verano Zona Centro Sur.	173
Gráfico 6.57: Distribución Hierro Invierno Verano Norte Grande.	173
Gráfico 6.58: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Chile General.	174
Gráfico 6.59: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Norte Grande.	174
Gráfico 6.60: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Norte Chico.	174
Gráfico 6.61: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Centro Centro.	175
Gráfico 6.62: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Centro Sur.	175

Gráfico 6.63: Nitrato versus Cloruro registrado en los sectores del Acuífero del río del Aconcagua.	223
Gráfico 6.64: Sulfato vs Nitrato medido en Sectores del Acuífero del Aconcagua.	228
Gráfico 6.65: Variación del contenido de Hierro y Manganeso a lo largo del Acuífero del Rio Aconcagua.	244
Gráfico 6.66: Conductividad Eléctrica y Bicarbonato registrado en pozos Sector Limache.	267
Gráfico 6.67: Cloruro y Sulfato registrado en pozos Sector Limache.	267
Gráfico 6.68: Calcio y Magnesio registrado en pozos Sector Limache.	267
Gráfico 6.69: Potasio y Sodio registrado en pozos Sector Limache.	268
Gráfico 6.70: Nitrato registrado en pozos Sector Limache.	268
Gráfico 6.71: Conductividad Eléctrica y Bicarbonato registrado en pozos Sector Nogales.	268
Gráfico 6.72: Cloruro y Sulfato registrado en pozos Sector Nogales.	269
Gráfico 6.73: Calcio y Magnesio registrado en pozos Sector Nogales.	269
Gráfico 6.74: Potasio y Sodio registrado en pozos Sector Nogales.	269
Gráfico 6.75: Nitrato registrado en pozos Sector Nogales.	270

1 INTRODUCCIÓN.

1.1 Generalidades.

En Chile, en relación a los recursos hídricos, existen diversas normativas para regular la emisión de contaminantes, siendo uno de estos es el D.S. N° 46 del 8 de marzo de 2002 que “establece la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas”. Esta última tiene como objetivo la protección ambiental de un acuífero y la prevención de la contaminación de las aguas subterráneas, mediante el control de la disposición de los residuos líquidos que se infiltran a través del subsuelo al acuífero, contribuyendo a mantener la calidad de las aguas subterráneas.

Dentro de este documento se establecen las concentraciones máximas de contaminantes permitidas en los residuos líquidos que son descargados por la fuente emisora, a través del subsuelo, a las zonas saturadas de los acuíferos, mediante obras destinadas a infiltrarlos.

Junto con lo anterior, la Norma designa a la Dirección General de Aguas como el organismo encargado de, la determinación de la vulnerabilidad del acuífero (la cual puede ser baja, media o alta) y del contenido natural del cuerpo receptor.

En la Norma se establece además que el contenido natural corresponde a la concentración o valor de un elemento en la zona saturada del acuífero en el lugar donde se produce la descarga de la fuente emisora, que corresponde a la situación original sin intervención antrópica del cuerpo de agua más las situaciones permanentes, irreversibles o inmodificables de origen antrópico.

Si la vulnerabilidad del acuífero es calificada por la Dirección General de Aguas como alta, sólo se podrá disponer residuos líquidos mediante infiltración, cuando la emisión sea de igual o mejor calidad que la del contenido natural del acuífero.

Es en este punto donde surge la justificación de la presente Tesis de título, ya que la D.G.A no cuenta con una metodología que establezca un procedimiento de cálculo estándar de la calidad natural de aguas subterráneas, en el cual se explique claramente qué parámetros se deben medir,

donde se debe medir, si las muestras de calidad de aguas subterráneas obtenidas a cierta distancia del punto de infiltración son representativas o no, entre otros.

Lo anterior genera interés para el desarrollo de una metodología para determinar la calidad natural de un acuífero en el marco del D.S. N° 46 de 2002, con el objeto que la DGA aplique un criterio uniforme a la largo de todo el país y por otra parte, que los particulares conozcan tales criterios, en el que se mezclen conceptos diversos como química, hidráulica de aguas subterráneas, hidrología, hidrogeología, geoquímica, etc.

1.2 Objetivos.

Los objetivos de éste trabajo se pueden separar en generales y específicos, los cuales se presentan a continuación.

- **Objetivos generales**

El principal objetivo es desarrollar una metodología para la determinación de la calidad natural de un acuífero, en el marco de la aplicación del D.S. N° 46 de 2002 “Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas”, utilizando criterios geológicos, hidrogeológicos, geoquímicos, métodos de muestreo, etc.

- **Objetivos Específicos**

- Definir y comprender los parámetros y criterios que determinan la vulnerabilidad de un acuífero.
- Definir calidad natural y actual de aguas subterráneas en un acuífero.
- Definir los parámetros y criterios necesarios para determinar la calidad natural de las aguas subterráneas de un acuífero.
- Estudiar casos y normativas internacionales relacionados con la determinación del contenido natural y normas de calidad de aguas subterráneas.
- Definir los parámetros y procesos involucrados en los cambios espaciales y temporales que experimenta un residuo líquido infiltrado en el suelo y que se moviliza a través de la zona no saturada
- Desarrollar los aspectos específicos de la metodología para determinar la calidad natural de aguas subterráneas de un acuífero, entre los cuales se destacan la definición de puntos de muestreo, tipo de información requerida, entre otros.
- Aplicación de la metodología de determinación de contenido natural de un acuífero a un caso real en Chile.

1.3 Metodología.

La metodología a utilizar para el desarrollo del tema es la siguiente:

- **Definir y comprender los parámetros y criterios que determinar la vulnerabilidad de un acuífero:**
 - Revisión Bibliográfica de normativas y estudios internacionales y nacionales relacionados con la determinación de la vulnerabilidad de un acuífero.
 - Revisión bibliográfica de materias relacionadas con la determinación de la vulnerabilidad del acuífero, como química, hidráulica de aguas subterráneas, geología, hidrología, entre otros.
 - Estudio de los parámetros y criterios utilizados por la D.G.A. para la evaluación de la vulnerabilidad de un acuífero.

- **Definir calidad natural y actual de aguas subterráneas en un acuífero:**
 - Revisión Bibliográfica de normativas y estudios internacionales y nacionales relacionados con la determinación de la calidad de un acuífero.

- **Definir los parámetros y criterios necesarios para determinar la calidad natural de las aguas subterráneas de un acuífero:**
 - Revisión Bibliográfica estudios internacionales y nacionales relacionados con la determinación de la calidad de un acuífero.
 - Revisión de temas relacionados con la calidad natural de aguas subterráneas, como química de aguas, geología, hidráulica de aguas subterráneas, entre otros.
 - Definición, en función de la revisión bibliográfica de los estudios, normativas y temas relacionados, de los parámetros relevantes en la determinación de la calidad natural de aguas subterráneas en acuíferos.

- **Estudiar casos y normativas internacionales relacionados con la determinación del contenido natural y normas de calidad de aguas subterráneas:**
 - Revisión bibliográfica de normativas internacionales relacionadas con la determinación del contenido natural.
 - Comparación de los estudios y normativas internacionales con los estudios realizados en Chile, de manera de obtener criterios y parámetros estándares en la determinación del contenido natural en aguas subterráneas.

- **Definir los parámetros y procesos involucrados en los cambios espaciales y temporales que experimenta un residuo líquido infiltrado en el suelo y que se moviliza a través de la zona no saturada:**
 - Revisión de temas relacionados con el transporte de residuos líquidos en suelos.
 - Revisión de temas relacionados con procesos que afecten la concentración de los contaminantes en un residuo líquido en un medio no saturado.
 - Revisión bibliográfica de estudios relacionados con el transporte de contaminantes en suelos no saturados.

- **Desarrollar los aspectos específicos de la metodología para determinar la calidad natural de aguas subterráneas de un acuífero:**
 - Revisión de las metodologías utilizadas a nivel internacional para la determinación de la calidad natural de aguas subterráneas.
 - Obtención de criterios y parámetros comunes para la determinación de la calidad natural de aguas subterráneas mediante la comparación de las metodologías internacionales.
 - Revisión de las normativas relacionadas con métodos de obtención de muestras de aguas subterráneas.
 - Revisión bibliográfica de las normativas relacionadas con análisis de calidad de aguas para muestras de aguas subterráneas.

- **Aplicación de la metodología de determinación de contenido natural de un acuífero a un caso real en Chile.**
 - Evaluación y validación de la metodología mediante aplicación en dos casos con diferentes escalas de trabajo.
 - Aplicación de los métodos de análisis contemplados por la metodología desarrollada durante el trabajo de estudio.
 - Definición de puntos críticos de la metodología

1.4 Resultados Esperados.

El principal resultado esperado de este trabajo corresponde al desarrollo de una metodología, para la determinación de la calidad natural de un acuífero para efectos de la aplicación del D.S. N° 46 de 2002 “Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas”. Esta Metodología será verificada mediante la aplicación a un caso práctico en Chile.

1.5 Contenido del Informe.

El informe presentado a continuación se divide en 7 capítulos, cuyo contenido se detalla de manera breve a continuación:

- Capítulo 1. Introducción: Como se fue mencionado en las páginas anteriores, éste capítulo contiene las motivaciones del desarrollo de la tesis, así como los objetivos planteados para la misma, tanto a nivel general como específico, la metodología con la cual se desarrollarán los objetivos y los resultados esperados de la tesis.
- Capítulo 2 Antecedentes Generales: Se presentan los antecedentes relacionados con la definición de calidad natural, los que incluyen una breve descripción de las redes de monitoreo de calidad, definición de vulnerabilidad según el D.S. N° 46, definición de calidad natural y por último se hace mención a aquellos factores que inciden en la composición química de las aguas subterráneas.
- Capítulo 3 Geología e Hidrogeología: En relación a la geología se presenta una breve descripción de los tipos de rocas que componen la corteza terrestre, entregando datos como el contenido en partes por millón de ciertos elementos en estos tipos de roca y la composición mineral de las principales rocas que componen la corteza. En lo que tiene que ver con la hidrogeología, se presentan antecedentes generales de las principales estructuras hidrogeológicas presentes en el mundo. En ambos puntos se realiza una breve descripción del contexto geológico e hidrogeológico chileno, haciendo mención sus principales características.
- Capítulo 4 Mecanismos de Adquisición de las Características Químicas de las Aguas Subterráneas: En este capítulo se presentan los principales procesos involucrados en la relación existente entre el agua subterránea y el medio en el cual se encuentra.
- Capítulo 5 Metodología para la determinación de la Calidad Natural en Acuíferos: En este capítulo se presenta de manera detallada los pasos a seguir para determinar la calidad natural en acuíferos, junto con presentar diversos esquemas por medio de los cuales puede

determinarse la calidad natural. Junto con lo anterior se presentan una serie de criterios, puntos críticos y requisitos mínimos relacionados con la información necesaria para la determinación de la calidad natural.

- **Capítulo 6 Aplicación de la Metodología:** En este capítulo se presentan dos casos de aplicación, uno a nivel nacional, y otro a escala de cuenca, específicamente la cuenca del río Aconcagua y su respectivo acuífero. En ambas aplicaciones se detalla paso a paso la aplicación de los criterios establecidos en el capítulo 5 y se presentan los resultados acompañados de los análisis pertinentes en relación a los niveles de información con los cuales se cuenta y, en función de los mismos, se hace mención a los posibles procesos o fenómenos que estén asociados a la calidad natural de las aguas subterráneas en cada aplicación.
- **Capítulo 7 Consideraciones Finales:** En este capítulo se discuten los resultados obtenidos tanto para el desarrollo de la metodología como tal y su aplicación en los dos ejemplos analizados en el capítulo 6, para finalmente entregar las conclusiones referentes al desarrollo de la metodología y los resultados de su aplicación y las recomendaciones necesarias para lograr un mayor alcance en la aplicación de la misma.
- **Anexos:** Los anexos contiene información relacionada con la revisión bibliográfica de los principales elementos monitoreados por la red de monitoreo de calidad de la D.G.A., como también una breve descripción de las técnicas de detección de intrusión salina y el detalle mineralógico de las estructuras geológicas presentes en la cuenca del río Aconcagua.

2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Introducción.

La determinación de la calidad natural en un acuífero parte con la pregunta qué es calidad natural, de qué depende y como se obtiene la información para determinarla, y lo más importante, cual es el motivo que fundamenta su determinación. En el presente capítulo se presenta todo lo concerniente a lo dicho anteriormente, comenzando con una breve descripción de las redes de monitoreo, principal elemento utilizado en la determinación de la calidad natural de un acuífero; así como también de la definición de vulnerabilidad de un acuífero y la metodología aplicada en Chile para su determinación. Como se verá en éste capítulo, la determinación de la vulnerabilidad, en ciertos casos, conlleva la determinación de la calidad natural, por lo cual se presentan diferentes argumentos y aspectos considerados para la definición de lo que es calidad natural, para finalmente conocer los principales factores que modifican la calidad natural de las aguas en general.

2.2 Redes de Monitoreo.

Para la evaluación de la calidad natural es fundamental conocer la composición química de las aguas subterráneas, y como veremos posteriormente, el conocimiento de la composición química sirve como entrada para análisis estadísticos que permiten determinar los rangos o los valores medios de concentración de los parámetros medidos en la red.

Una red de monitoreo de calidad se define principalmente por cuatro aspectos fundamentales:

- El número de pozos de muestreo.
- La ubicación de los pozos.
- La frecuencia del monitoreo.
- Parámetros a medir.

En Chile, el organismo encargado de la red de monitoreo es la Dirección General de Aguas (D.G.A.), perteneciente al Ministerio de Obras Públicas. La motivación de la implementación de esta red de monitoreo surge ante la necesidad, por parte de la D.G.A., de velar por el uso sustentable de los diferentes recursos hídricos de país, contándose entre ellos las aguas superficiales y las aguas subterráneas. La definición de los parámetros a medir por la Red de Monitoreo se fundamentó en las siguientes normativas relacionadas con el uso de las aguas para diferentes propósitos:

- Nch. 409/2004, que establece los requisitos para el uso del agua para consumo humano.
- Nch. 1333/78, que establece los requisitos para el uso del agua para regadío.

En función de estas normativas, en el año 1995 se comienza el monitoreo de las aguas subterráneas en dos regiones, RM y V, para posteriormente, durante los años siguientes, dar cabida a otras regiones del país entre las que se cuentan la I, II, III, IV, VI, VII y VIII región, dejando sin considerar las regiones de la IX a la XII, sumando un total, hasta la fecha, de 65 pozos de monitoreo de calidad de aguas subterráneas activos en el país. Las siguientes tablas presentan los diferentes pozos pertenecientes a la red de monitoreo presentes en cada una de las regiones anteriormente mencionadas.

Tabla 2.1: Pozos de Monitoreo contemplados en la red de Monitoreo.

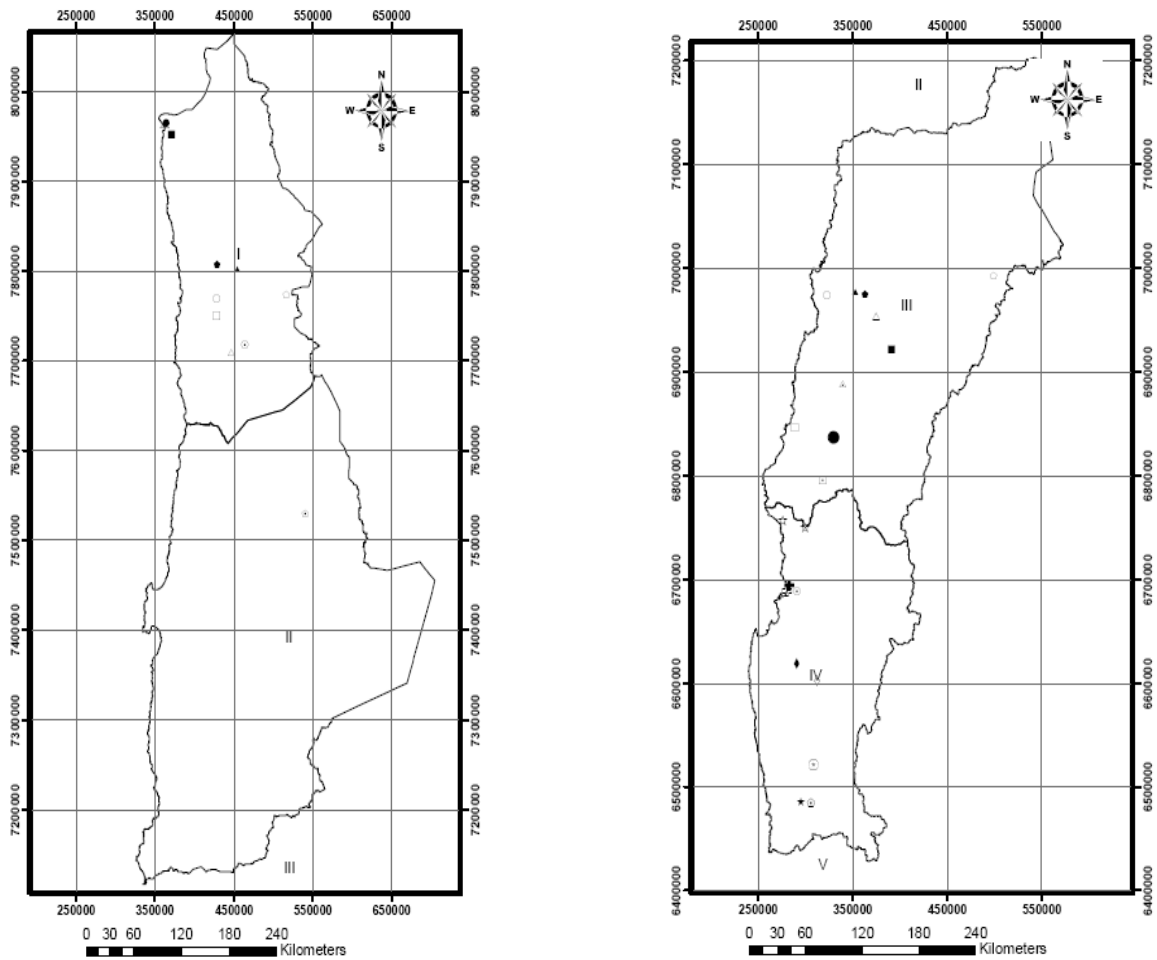
REGION	POZOS	Coordenadas		Codigo BNA
		N	E	
I Region de Tarapaca	JICA B	7964929	364115	01110012-0
	JICA D	7770453	428617	01700092-6
	JICA E	7750777	428438	01700093-4
	JICA F	7708698	447560	01700094-2
	JICA G	7774621	516760	01700095-0
	Pachina o Laonsana (Qda. De Tarapaca)	7802418	454632	01700091-8
	Qda de Aroma	7807960	429192	01720005-4
	Qda. De Chacarillas	7717351	464839	01700096-9
	Gallinazos	7964296	361596	01110013-9
	Albarracines	7953175	371502	01310075-6
Total	10			
II Region de antofagasta	Chui-Chui	7529912	541418	02104012-6
	Total	1		

Tabla 2.1: Pozos de Monitoreo contemplados en la red de Monitoreo. (Continuación)

REGION	POZOS	Coordenadas		Codigo BNA
		N	E	
III Región de Atacama	Escuela los Loros	6921434	391144	03430017-8
	Hacienda Bodega	6976491	363276	03450018-5
	Hacienda Maria Isabel	6974617	322991	03453008-4
	Agua Potable Vallenar	6837171	329850	03823009-3
	Planta Huasco Alto C-2	6847291	289304	03826011-1
	Estación Algarrobal	6887392	339527	03602000-8
	Domeiko o Casa Piedra	6796511	318527	03940008-1
	Cia. Minera Tres Cruces	6993278	499642	03041011-4
	Parcela 8 Nantoco	6953255	374975	03434010-2
	Fundo El carmen	6977322	352627	03451022-9
Total	10			
IV Región de Coquimbo	Los Choros N1 C-3	6757704	276566	04120018-9
	Parcela 164 Vega Norte A-2	6693839	282342	04335011-0
	Parcela 48 4 esquinas C-13	6688393	281107	04335012-9
	Alfalfares C-14	6687974	291312	04335013-7
	Los Choros N4 B-2	6750351	300131	04120019-7
	Mina Panulcillo	6618395	291675	04540013-1
	Monte Patria	6602578	312692	04524008-8
	Chuchiñi	64850110	305112	04715003-5
	Limahuida	6485628	295308	04715004-3
	Matancilla	6521371	308839	04724000-k
Total	10			
V Region de Valparaiso	Agua Potable Alicahue	6420195	333157	05200009-2
	Dren Los Caleos	6385363	294245	05424013-9
	Riego Bernal	6387850	273904	05310002-3
	C.C.U. Limache	6347952	287074	05427017-8
Total	4			
XIII Región Metropolitana	Fundo Algarrobal	6316417	341493	05736005-4
	Asentamiento Central Lo Vargas	6316645	325779	05736006-2
	Club de Golf	6302373	352344	05730040-k
	Agrícola Hermanos Poblete	6284250	331088	05737017-3
	Vertederos Cerro de Renca	6365823	341755	05730041-8
	Agua Potable Rural Casas Colo Colo	6307448	335965	05730048-5
	Estadio Corfo (Las Condes)	6305784	358493	05730042-6
	Cementerio Metropolitano	6289333	342126	05730043-4
	Parque O'Higgins	6296207	345851	05730044-2
	Complejo Angostura	6247881	339676	05715005-8
	Fundo Cachantun	6258677	346762	05714003-8
	Asentamiento Malloco	6281969	329188	05737018-1
	INIA	6284500	349251	05730045-0
	Crucero Peralillo	6306062	328170	05736007-0
Chacra El Olivo	6295432	335939	05730046-9	
Total	15			
VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins	Viña Santa Lucia	6181040	328686	06017004-5
	San Enrique	6154962	318838	06033010-7
	Minera Valle Central	6210568	344883	06010020-9
	Nogales en Fundo San Vicente Quilamuta	6227875	291566	06018019-9
	Fundo San Antonio de Petrel (sector Pichilemu)	6189968	228455	06120003-7
Total	5			
VII Región del Maule	Fundo La Estrella	6036436	210575	07410000-7
	Lara Benavente (Pocillas)	6014047	201939	07336004-8
	Viña Concha Y Toro (Rauquen)	6074159	248272	07379004-2
	Sector Lago Vichuquen	6139943	223766	07000005-9
	Sector Lora	6119204	220153	07123007-4
Total	5			
VIII Región del Bio Bio	Chillan en Fundo Cato o en Fundo El Alazan	5952271	242542	08113002-7
	San Vicente sector Chacay ex Pozo Niquen	6639276	233529	08118006-7
	Papelera Concepción (Coronel)	5911229	664697	08410003-k
	Captación Punteras Horcon 2 o Pozo Arauco	5879793	657575	08430002-0
	773-ESSBIO-Mulchen	5821947	743896	08330003-5
Total	5			

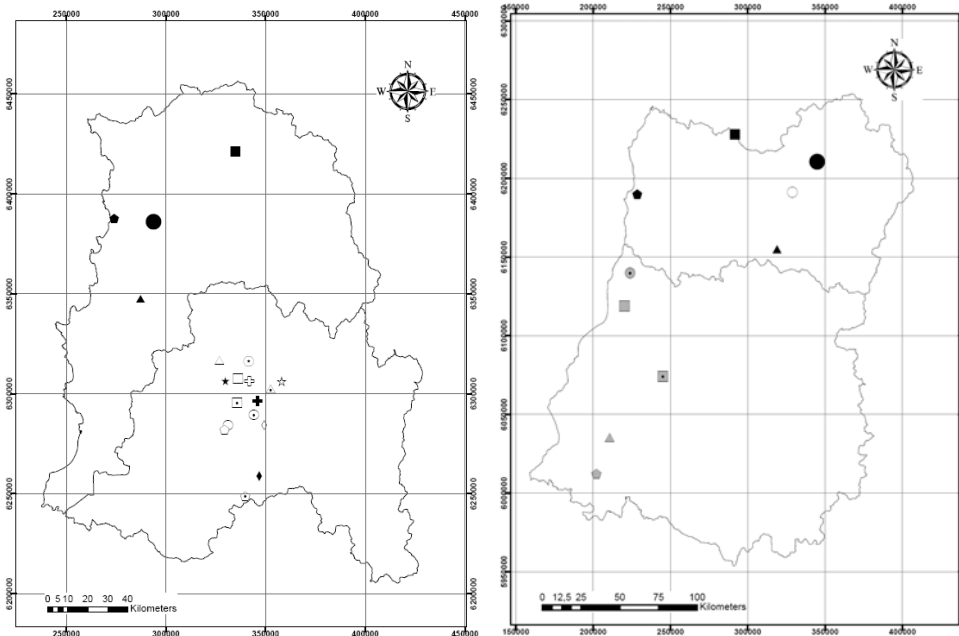
Las siguientes figuras ilustran la ubicación de los pozos en las regiones mencionadas en las tablas anteriores:

Figura 2.1. Distribución de pozos zonas Norte Grande y Norte Chico.



Elaboración Propia. Datum Psad 56 Huso 18S.

Figura 2.2: Distribución de pozos de monitoreo Zona Centro Centro y Centro Sur.



Elaboración Propia. Datum Psad 56 Huso 18S.

La red actual utilizada por el D.G.A. contempla únicamente pozos que se mantengan en funcionamiento. Es por esta razón que algunos pozos, entre los que se destacan Pozo Concón, Dren la Ligua, Pozo Agua potable Cachagua, Zapallar Oriente y Pozo Papudo, todos ubicados en la V Región, no son considerados en este trabajo, fundamentalmente por el hecho de que no presentan registros actuales. Los pozos de monitoreo de calidad de aguas subterráneas se encuentran en su gran mayoría en zonas urbanizadas y en centros industriales por lo cual la calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos existentes pueden estar alteradas.

Los parámetros estipulados por la red de monitoreo de calidad, creada por la D.G.A, considera una serie de parámetros, tanto físicos como químicos, que permiten determinar la calidad de las aguas subterráneas. Los parámetros analizados por la red de monitoreo de calidad se presentan en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Principales parámetros medidos por la Red de Monitoreo.

NORMA PARÁMETRO	NCh. 1333/78	NCh. 409/2004	D.S. N° 46	D.S. N° 90	NORMA PARÁMETRO	NCh. 1333/78	NCh. 409/2004	D.S. N° 46	D.S. N° 90
Temp.		ok		ok	Cu	ok	ok	ok	ok
pH	ok	ok	ok	ok	Fe		ok	ok	ok
C. E.	pk				Hg	ok	ok	ok	ok
Ox. Dis.					Li	ok		ok	
Turbiedad		ok			Mn	ok		ok	ok
CO ₃ ⁻²					Mo	ok		ok	ok
HCO ₃ ⁻					Ni	ok		ok	ok
Cl ⁻		ok		ok	Pb	ok	ok	ok	ok
SO ₄ ⁻²	ok	ok	ok	ok	Se	ok	ok	ok	ok
Ca ⁺²					Zn	ok	ok	ok	ok
Mg ⁺²		ok			N(NO ₃)		ok	ok	
K ⁺					N(NO ₂)		ok	ok	
Na ⁺	ok				N(NH ₄ ⁺)				
F ⁻					N _{kjendahl}			ok	ok
CN	ok	ok	ok	ok	N _{org}				
RAS					N _{tot}				
Ag					P(PO ₄ ⁻³)				ok
Al	ok		ok	ok	P _{tot}				
As	ok	ok	ok	ok	D.Q.O.				
B			ok	ok	DBO ₅				ok
Cd	ok	ok	ok	ok	SiO ₂				
Co	ok				Col. Fec				ok
Cr	ok	ok	ok	ok	Col. Tot				

La cantidad de parámetros considerados por la D.G.A. en la red de monitoreo es de un total de 46 parámetros, aunque no todos son medidos, ya sea porque estos no son medidos en todas las regiones o simplemente se miden en una única región. La Tabla 2.3 expone esta situación de forma más clara.

Tabla 2.3: Parámetros evaluados por la red de monitoreo en cada región.

Región	Temp.	pH	Conduct	Ox. Dis.	Turbiedad	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	F ⁻	CN ⁻	RAS	Ag	Al	As	B	Cd	Co	Cr	
I	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
II	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
III	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
IV	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
V	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
VI	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
VII	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
VIII	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK			OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
IX																								
X	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
XI																								
XII																								
XIII (RM)	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tabla 2.3: Parámetros evaluados por la red de monitoreo en cada región. (Continuación).

Región	Cu	Fe	Hg	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Zn	N(NO ₃)	N(NO ₂)	N(NH ₄ ⁺)	N _{org} (total)	N _{org}	N _{tot}	P(PO ₄ ⁻³)	P _{tot}	D.Q.O.	DBO ₅	SiO ₂	Col. Fec.	Col. Tot.
I	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK						OK		OK				
II	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK						OK		OK				
III	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK						OK		OK				
IV	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK					OK		OK	OK			
V	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK						OK		OK				
VI	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK						OK		OK	OK			
VII	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK						OK		OK				
VIII	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK						OK		OK				
IX																							
X	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK						OK		OK				
XI																							
XII																							
XIII (RM)	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK						OK		OK		OK		

Como se observa de la tabla anteriormente expuesta, ciertos parámetros no son medidos en ninguna región, en cambio otros, como el Litio, son medidos en ciertas regiones del país.

2.3 Vulnerabilidad de Acuíferos y Calidad Natural Asociada a las Aguas Subterráneas.

2.3.1 Aspectos generales.

El agua subterránea constituye, para nuestro país y muchos otros, una fuente fundamental de recursos hídricos para actividades diversas, puesto que ésta puede encontrarse a lo largo de todo el país. Los usos de este recurso, al igual que en el caso de las aguas superficiales, abarcan desde el consumo humano hasta su uso a nivel industrial, siendo el primero de los de éstos el principal uso de este recurso ya que del del agua utilizada por los servicios de agua potable rural, el 77% aproximadamente proviene de esta fuente, en cambio el 40% del agua utilizada para abastecimiento urbano es de origen subterráneo (Comisión Nacional de Medio Ambiente, 2006).

El agua subterránea, debido a diversos factores, entre los que se encuentran la temperatura, la presión, tiempo de residencia, vías de flujos, etc., posee una composición química muy diferente a la de las aguas superficiales. Esta composición química tiene su origen en los diferentes ambientes con los cuales el agua tiene contacto, entre las cuales se encuentran la geología local, los gases de la atmósfera, entre otros, así como también de infiltraciones desde la superficie, tanto artificial como natural.

Sin embargo, la calidad de las aguas subterráneas puede verse alterada por las actividades antrópicas, como la agricultura, la industria, la minería, etc. Estas actividades pueden generar cambios en la composición química del agua debido a la contaminación que estas actividades generan. A pesar de lo anterior, existen normativas que permiten la infiltración de residuos líquidos a las aguas subterráneas, siempre y cuando cumplan con ciertos criterios establecidos en éstas normativas. En el caso de Chile, “la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas” D.S. N°46, el cual establece que aquellos establecimientos considerados como fuentes emisoras podrán infiltrar sus residuos líquidos en función de la vulnerabilidad del acuífero, lo cual condicionará las concentraciones máximas a infiltrar.

Dado que la vulnerabilidad del acuífero condiciona las concentraciones a emitir, es fundamental conocer la calidad de las aguas subterráneas a las cuales se emite el contaminante, y en particular conocer la calidad natural en el caso en que la vulnerabilidad del acuífero sea alta.

2.3.2 Método de determinación de Vulnerabilidad aplicado en Chile.

2.3.2.1 Vulnerabilidad.

Desde que a fines de la década del 60 el hidrogeólogo francés J. Margat (1968) introdujo el término “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación”, basándose en el hecho real de que, en cierta medida, el medio físico protege al acuífero de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie, se han sucedido una serie de definiciones y metodologías para este concepto.

Según Daly y Warren, 1994, vulnerabilidad representa las características geológicas e hidrogeológicas intrínsecas que determinan la facilidad con la que el agua subterránea puede contaminarse por la actividad humana desde la superficie.

Custodio (1995) define vulnerabilidad a la contaminación, como la tendencia de los contaminantes a localizarse en un sistema de agua subterránea, luego de ser introducidos por encima del acuífero más somero.

La EPA (1991) se refiere a la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, en relación a un plaguicida, como la facilidad con que un contaminante aplicado a la superficie, puede alcanzar el acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica.

Auge (1995) considera la vulnerabilidad “un concepto cualitativo que se refiere al grado de protección natural de un acuífero a la contaminación”.

The National Academy Press (1993) define vulnerabilidad como la tendencia o probabilidad de que un contaminante alcance una posición específica en el sistema de aguas subterráneas

posterior a su introducción en alguna posición sobre la parte superior del acuífero. Así mismo, The National Academy Press considera la existencia de conceptos asociados a la vulnerabilidad, de un acuífero, Vulnerabilidad Intrínseca y Vulnerabilidad Específica:

- **Vulnerabilidad Intrínseca:** Depende de las propiedades del sistema acuífero, sin considerar las propiedades del contaminante, es decir, se evalúa la vulnerabilidad del acuífero ante la presencia de un contaminante en función de las propiedades del acuífero, es decir, depende de las propiedades físicas del medio saturado, así como del sistema ubicado en la zona no saturada
- **Vulnerabilidad Específica:** Se refiere a la vulnerabilidad de un sistema acuífero a un contaminante específico, a un grupo de estos o incluso a una actividad humana, es decir, depende del comportamiento físico y químico del contaminante con el medio saturado y no saturado.

La clasificación anterior permite enfocar el análisis de la vulnerabilidad según las de las propiedades del acuífero, como en el caso de la vulnerabilidad intrínseca, o según las propiedades tanto del acuífero como el de un contaminante específico, como en el caso de la vulnerabilidad específica.

En Chile, el concepto de vulnerabilidad se especifica en la “Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas” Decreto Supremo N°46 de 2002 en el cual se establece a la vulnerabilidad como una propiedad intrínseca del acuífero de manera tal que “la vulnerabilidad intrínseca de una acuífero dice relación con la velocidad con la que un contaminante puede alcanzar hasta la zona de saturación del subsuelo”, con lo cual el análisis se enfoca únicamente a las propiedades del acuífero y no a las del contaminante, simplificando la determinación de la vulnerabilidad. La obligación de determinar la Vulnerabilidad de los acuíferos en nuestro país recae La Dirección General de Aguas (D.G.A.) dependiente del Ministerio de Obras Públicas.

2.3.2.2 Metodología utilizada en Chile.

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, presencia de estructuras Kársticas, etc., como también la cantidad de variables utilizadas. Luego, en la práctica, el método a utilizar queda condicionado a la disponibilidad de información para cada una de las variables.

El método utilizado en nuestro país por la Dirección General de Aguas corresponde al método desarrollado por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (B.G.R.) en conjunto con los Servicios Geológicos Federales de Alemania, con modificaciones incorporadas a raíz de la particularidad de su uso. La elección de esta metodología se basó fundamentalmente en los siguientes puntos:

- Número razonable de parámetros que utiliza.
- La facilidad con que pueden ser obtenidos, en comparación con otras metodologías.
- La experiencia que tiene el Servicio Nacional de Geología y Minería utilizando este método.

El método B.G.R. adopta un compromiso entre la eficacia que presenta para evaluar la vulnerabilidad de un modo adecuado, versus la cantidad de información necesaria para realizarlo. Es relativamente barato, pues en su forma básica requiere esencialmente información existente o que en su defecto puede ser generada sin mayores dificultades.

El método se basa principalmente en la protección que brindan la cobertura de rocas y los depósitos de superficie, ya sea a través de la resistencia que éstos generan al paso del contaminante o la capacidad de adsorción que tienen los diferentes materiales según su composición. Originalmente, el método fue desarrollado para evaluar lo que ocurre en el acuífero en caso de un eventual ingreso de agua como parte de recarga por lluvia.

Dado que la forma de evaluación del método original no considera una recarga artificial ni puntual del residuo, ésta estimación no es adecuada. Lo anterior genera que, para efectos de este manual, el método se haya modificado en los siguientes puntos:

- Consideración de la recarga artificial debido a la propia descarga del contaminante
- El espesor del suelo que protege al acuífero se considera desde el fondo de la obra de infiltración.
- Clasificación más gruesa, ya que el método original considera 5 categorías de vulnerabilidad, en cambio el aplicado por la D.G.A. considera solo 3.

El método combina, mediante un esquema de rating o puntaje, cuatro factores relevantes que determinan o influyen en la rapidez con la que una determinada sustancia alcanza el acuífero, suponiendo una infiltración desde un sector en la superficie cercano a ella. Dichos factores son:

- a) La capacidad de campo efectiva del suelo atravesado por el contaminante.
- b) El monto de la recarga natural al acuífero, dada por la precipitación efectiva, y por la recarga artificial dada por la infiltración.
- c) La litología de la zona no saturada.
- d) Espesor de la zona no saturada atravesada por el contaminante antes de alcanzar el acuífero

La información necesaria para evaluar el efecto de cada uno de los parámetros que requiere el método BGR para determinar la vulnerabilidad de un acuífero es la siguiente:

- Efecto del Suelo y la Recarga:
 - i. Parámetro 1: Capacidad de campo Efectiva.
 - ii. Parámetro 2: Tasa de Percolación o Recarga.
 1. Artificial
 2. Natural
- Efecto de la litología de la zona no saturada bajo el suelo:
 - i. Parámetro 3: Tipo Litológico.

1. Depósitos no consolidados.
 2. Rocas.
- ii. Parámetro 4: Espesor Zona no Saturada
 - iii. Parámetro 5: Condiciones Artesianas

Los puntajes obtenidos por cada uno de los parámetros anteriormente indicados, permiten obtener un puntaje final que representa la “efectividad de protección generalizada” la cual es inversamente proporcional a la Vulnerabilidad del acuífero, la Tabla 2.4 establece la relación entre el puntaje obtenido para la “efectividad de protección y la vulnerabilidad del acuífero, así como también una relación entre el tiempo de residencia aproximado del contaminante en el suelo.

Tabla 2.4: Clases de Efectividad Generalizada de Protección y Vulnerabilidad asociada

P_t Número total de puntos	Efectividad generalizada de protección	Vulnerabilidad asociada, estimada, del acuífero ante emisiones	Tiempo de residencia aproximado en el suelo y subsuelo sobre el acuífero
≥ 4000	Muy alta	Baja	> 25 años
2000 - 3999	Alta		10- 25 años
1000 - 1999	Moderada	Media	3 -10 años
500 - 999	Baja	Alta	Varios meses a 3 años
≤ 499	Muy Baja		Unos pocos días a 1 año

Fuente: Comisión Nacional de Medio Ambiente.(2006)

2.4 Calidad Natural.

En el Título III de la “Norma Emisión a Aguas Subterráneas D.S. N°46 de 2002”, del artículo 9. se hace referencia a que “si la vulnerabilidad del acuífero es calificada por la Dirección General de Aguas como alta, sólo se podrán disponer residuos líquidos mediante infiltración, cuando la emisión sea de igual o mejor calidad que la del contenido natural del acuífero.”. Lo anterior motiva el conocimiento de la calidad natural de las aguas subterráneas o, como también se conoce, el contenido natural de las aguas subterráneas del acuífero donde se realizara la infiltración.

Según Harter (2003) la calidad de las aguas subterráneas compromete tanto la calidad física, química y biológica de las aguas. Entre los parámetros asociados a la calidad física del agua subterránea se encuentran la temperatura, turbiedad, color, sabor y olor, pero dado que la mayoría de las aguas subterráneas son incoloras, inodoras y sin gusto específico, estos parámetros son asociados a la calidad química y biológica de las aguas subterráneas.

Espinoza (2006) se refiere a que la calidad físico química de las aguas subterráneas depende de diversos factores, entre los que se encuentran la composición del agua de recarga, las interacciones entre el agua y el suelo, suelo – gas y las rocas con las cuales entra en contacto en la zona no saturada, el tiempo de residencia y las reacciones que se producen en el acuífero, siendo los procesos físicos, geoquímicos y bioquímicos los principales factores que determinan la calidad de las aguas subterráneas. Otro factor de importancia son las actividades humanas o antrópicas, ya que éstas generan contaminación, que puede alterar la calidad físico química de las aguas subterráneas.

Por otro lado, Porras & Thauvin (1979), establecen que la calidad natural de las aguas subterráneas se adquiere por la interacción química y física del agua con los diversos medios con que el agua tiene contacto, es decir, con la atmósfera, el suelo y el terreno geológico. Cada uno de estos medios entrega diversas propiedades que, en conjunto, definen el contenido natural de las aguas subterráneas.

Hem (1985) hace mención a que la composición natural de las aguas deriva de una variedad de fuentes de solutos, incluyendo gases atmosféricos, la erosión de las rocas y el suelo, soluciones o reacciones de precipitación que ocurran bajo el suelo y los efectos de las actividades humanas.

Con lo visto anteriormente, se puede establecer que la calidad natural o el contenido natural de las aguas subterráneas depende de las características físicas y químicas que las aguas subterráneas adquieran producto de la interacción, tanto química como física, con el medio con el cual está en contacto, como la atmosfera, el suelo, la geología por la cual atraviesan los flujos, entre otros.

Considerando que, en la mayoría de los casos, las actividades humanas o antrópicas alteran la composición química natural de las aguas, se suele utilizar el término o concepto de “calidad de las aguas subterráneas” y no “calidad natural” ya que, en cierta forma, la determinación de ésta última es muy difícil, debido a la omnipresencia de las actividades humanas desde cientos de años, por lo cual surge la interrogante hasta qué punto se puede considerar la calidad de un agua subterránea como natural.

En respuesta a lo anterior, Wendland et al. (2003) establecieron que las concentraciones de las aguas subterráneas serán naturales si las concentraciones de los más importantes cationes y aniones originados por las actividades antrópicas no generan influencias perceptibles a los provenientes de las rocas o el suelo. Esta definición permite determinar la calidad natural de las aguas subterráneas desde un punto de vista menos complejo, debido al reconocimiento del efecto inevitable que han tenido las actividades humanas en el pasado.

2.5 Factores que inciden en la composición química de las aguas subterráneas.

La química de las aguas naturales, en particular de las aguas subterránea depende de distintos factores físicos, geológicos, atmosféricos y biológicos, como también de la interacción del agua con los distintos medios con los cuales ésta toma contacto. Los factores de los cuales depende la fuente de la química de las aguas son los que se indican a continuación:

2.5.1 Factores Físicos.

Los principales factores físicos que modifican la composición de las aguas subterráneas son el tiempo de residencia y las vías de movimiento del agua en los distintos sistemas. El primero de estos factores tiene una importancia crucial para la composición de las aguas subterráneas, ya que en promedio, el tiempo de residencia de las aguas subterráneas varía desde 2 días a 10.000 años y dado que, como se verá posteriormente, a mayor tiempo de residencia, mayor será el tiempo en que el agua reaccione con el medio, con lo cual mayor influencia tendrá este último en la calidad del agua. El segundo factor cobra importancia desde el punto de vista químico, ya que dependiendo de los medios con los cuales el agua tome contacto, dependerá el tipo de calidad que ésta tenga (Salbu & Steinnes, 1995).

2.5.2 Factores Atmosféricos.

La atmósfera contribuye con una parte importante de la materia disuelta de gran parte de las aguas, ya que los procesos atmosféricos permiten el transporte de material que es finalmente depositado en la superficie y en los sistemas hídricos. Es así como, por ejemplo, la lluvia ácida puede causar un aumento en la meteorización de una determinada zona con elevada presencia de rocas, aumentando en las aguas el contenido de los minerales presentes en éstas, la cual posteriormente se infiltra y pasa a formar parte del sistema hídrico subterráneo. Entre las principales especies presentes en la atmosfera y que son transportadas por las precipitaciones se encuentran Ión de Hidrogeno, Sulfato y Nitrato (Salbu & Steinnes, 1995).

2.5.3 Factores Geológicos.

El suelo y sus diversas estructuras litológicas son el reservorio principal de las aguas subterráneas, y también la última fuente de la gran mayoría de los elementos principales y elementos traza presentes en las aguas subterráneas.

Sin embargo, dado que la corteza terrestre no es uniforme, existen diferencias importantes en la calidad natural de las aguas subterráneas dependiendo del lugar. Es así que, a pesar de que las rocas ígneas sean un 95% de la corteza terrestre, el 80% de la superficie de los continentes está cubierta por rocas sedimentarias y dado que las aguas subterráneas están cercanas a la superficie continental, se produce un mayor contacto con este tipo de litología que con las rocas ígneas.

Junto con esto, el contacto del agua con las distintas formaciones geológicas produce un efecto conocido como Meteorización que resulta ser uno de los mayores controles geológicos en la química de las aguas. En este caso, la meteorización física y química de las rocas, producida por diversos factores, da como resultados la liberación de constituyentes disueltos a las aguas, con lo que se llega a la conclusión de que la calidad de las aguas subterráneas depende de este proceso. Existen dos grandes razones por las cuales este proceso es de suma importancia, el primero es que determina la ocurrencia de las principales especies en las aguas subterráneas, y segundo que la presencia de elementos traza se debe únicamente a procesos de meteorización en rocas que contengan estos elementos. De ahí que un análisis de la litología y la geología de la zona permitan establecer la composición de las aguas subterráneas en una determinada zona (Salbu & Steinnes, 1995).

2.5.4 Factores Biológicos.

Las especies terrestres y acuáticas, como también los microorganismos, generan cambios en el medio que afectan directamente la calidad de las aguas, ya que remueven o generan material disuelto o procesan material orgánico e inorgánico, transformándolos en productos sólidos, líquidos o gaseosos de su metabolismo. Un ejemplo de esto es el caso de los microorganismos en suelos, donde elevan la concentración de CO₂, lo que genera que aumente el proceso o los

mecanismos de meteorización. En particular, en las aguas subterráneas, bacterias típicas de las profundidades de los acuíferos, son capaces de generar cantidades elevadas de CO₂ (hasta 10-2mmol/l). Los procesos biológicos pueden separarse en dos líneas: Los Procesos Físicos y Bioquímicos.

Los Procesos Físicos tienen que ver fundamentalmente con la estabilización del material sedimentario, pero que en el caso particular de las aguas subterráneas no reviste mayor importancia. Los Procesos Bioquímicos son procesos con mayor importancia desde un punto de vista de las aguas subterráneas, debido a que estos procesos son llevados a cabo por microorganismos, los cuales, debido a su proceso metabólico, son capaces de disolver metales de una forma más rápida que por procesos naturales, por lo que la producción de metales o sustancias disueltas se ve aumentada en gran medida (Salbu & Steinnes, 1995).

2.6 Características Físicas y Químicas de las Aguas Subterráneas.

Como se mencionó en el punto anterior, la calidad natural de las aguas subterráneas depende de distintos factores físicos, geológicos, atmosféricos y biológicos, como también de la interacción del agua con los distintos medios con los cuales ésta toma contacto. En función de lo dicho anteriormente, en este capítulo se procede a definir cada uno de los distintos factores que definen la composición de las aguas subterráneas, como también de las diversas interacciones que se producen en los distintos medios y el agua. Entre las características más importantes se pueden encontrar:

- Características Físicas:
 - Temperatura.
 - Turbiedad.
 - Color.
 - Olor y sabor.
- Características Químicas:
 - Dureza.
 - Conductividad Específica (CE).
 - Concentración de ión Hidrogeno (pH).
 - Sólidos Disueltos Totales (SDT).
 - Constituyentes mayores.
 - Constituyentes menores.
 - Elementos Traza.

Cada una de estas características permite definir la calidad de las aguas subterráneas, como también permiten analizar si la calidad de las aguas subterráneas. El detalle de cada una de las características mencionadas anteriormente se encuentra en la sección ANEXOS, específicamente en el ANEXO 1.

3 GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA.

3.1 Introducción.

En capítulos anteriores se ha visto que la geología tiene vital importancia para la composición química del agua subterránea, ya que la presencia de los elementos o compuestos se debe, en su mayoría, a la interacción entre la roca y el agua en el medio subterráneo y, como se verá posteriormente, las diferentes estructuras geológicas presentes en el subsuelo condicionan en gran medida el comportamiento del agua en el flujo de la misma, y por ende con los estratos con los que pueda tener contacto.

3.2 Geología.

3.2.1 Contexto General.

Como se mencionó en el capítulo anterior, uno de los factores que inciden en la composición química de las aguas subterráneas es la geología, ya que la composición de las rocas está directamente relacionada con la calidad de las aguas, esto último ha sido confirmado por diferentes autores como Meybeck (1984), Hem (1985), Salbu & Steinnes (1995), Mazor (2004), Frezze & Cherry (1979), entre otros. Desde el punto de vista geológico, existen tres tipos de rocas:

- Rocas Ígneas
- Rocas Metamórficas
- Rocas Sedimentarias

Los tres tipos de roca anteriormente mencionados tienen importancia desde el punto de vista hidroquímico, debido a que los minerales que componen cada una de estas rocas, junto con el grado de solubilidad o degradación, como también otros procesos, los cuales serán abordados en el capítulo posterior, definirán en gran medida la composición de las aguas subterráneas. Es importante destacar que, a pesar de que los tres tipos de roca anteriormente mencionadas

constituyen la corteza terrestre, más del 80% de la superficie continental está constituida por rocas sedimentarias y como se verá posteriormente, las características hidrogeológicas de estas últimas favorecen en gran medida la presencia de aguas subterráneas en estos sistemas geológicos. La Tabla 3.1 presenta la composición promedio de las rocas ígneas y las principales rocas sedimentarias, en particular para los elementos estudiados anteriormente:

Tabla 3.1: Composición Promedio en partes por millón (ppm) de Rocas ígneas y algunos tipos de roca sedimentaria.

Elemento	Rocas Ígneas	Rocas Sedimentarias		
		Resistentes	Hidrolizadas	Precipitadas
		(Areniscas)	(Esquisto)	(carbonatadas)
Al	79500	32100	81000	8970
Fe	42200	18600	38800	8190
Ca	36200	22400	22500	272000
Na	28100	3870	4850	393
K	25700	13200	24900	2390
Mg	17600	8100	16400	45300
P	1100	539	733	281
Mn	937	392	575	842
S	410	945	1850	4550
C	320	13800	15300	113500
Cl	305	15	170	305
Cr	198	120	423	7,1
Cu	97	15	45	4,4
Ni	94	2,6	29	13
Zn	80	16	130	16
N	46	-	600	-
Li	32	15	46	5,2
Co	23	0,33	8,1	0,12
Pb	16	14	80	16
B	7,5	90	194	16
As	1,8	1	9	1,8
Mo	1,2	0,5	4,2	0,75
Cd	0,19	0,02	0,18	0,048
Ag	0,15	0,12	0,27	0,19
Se	0,05	0,52	0,6	0,32

Fuente: Hem. (1985)

Como se puede observar de la Tabla 3.1, los macro-elementos (Anexo 1), son los elementos de mayor presencia en la corteza terrestre y en particular de las rocas sedimentarias, lo que revalida lo descrito por Salbu & Steinnes (1995) en el párrafo anterior.

Los tipos de roca mencionados anteriormente se componen de una serie de minerales, cada uno con características específicas, y elementos específicos. La Tabla 3.2, resumen de manera gruesa la composición de los principales tipos de rocas, tanto ígnea, metamórfica o sedimentaria:

Tabla 3.2: Tipos de roca y composición mineral

TIPO DE ROCA	ROCA	MINERALES ASOCIADOS
ÍGNEA	Granito	Cuarzo, Feldespato potásico, Plagioclasa sódica, Moscovita, biotita, Anfíbol
	Riolita	
	Diorita	Anfíbol, Plagioclasa intermedia, Piroxeno, Olivino, Anfíbol
	Andesita	
	Gabro	Plagioclasa cálcica, Piroxeno, Olivino, Anfíbol
	Basalto	
	Peridotita	Olivino, Piroxeno, Plagioclasa cálcica,
	Komatita	
METAMORFICA	Pizarras	Calcita, dolomita, feldespatos (degradados), micas, entre otros
	Filitas	
	Esquistos	Biotita, moscovita, Cuarzo y feldespatos
	Gneises	Cuarzo Feldespato potásico y plagioclasa, moscovita, biotita y hornoblenda
	mármoles	Calcita, dolomita
	Cuarcitas	Cuarzo
	Anfibolitas	Hornoblenda, Plagioclasa
SEDIMENTARIA	Areniscas	Cuarzo, arcilla (Illita, caolinita, esmecitita)
	Arcosa	Cuarzo, arcilla (Illita, caolinita, esmecitita), feldespato
	Grawaca	Cuarzo, arcilla (Illita, caolinita, esmecitita), feldespato, silicatos ferromagnesianos
	Brechas	Todo tipo de minerales
	Conglomerados	
	Rocas Calcareas	Calcita, dolomita
	Calizas	Calcita, arcilla, hematita, siderita, cuarzo
	Dolomías	Dolomita
	Rocas Ferruginosas	Carbonato de hierro, silicatos ferroaluminicos
	Bauxitas	hidróxidos de aluminio y aluminio
	Lateritas	
	Evaporitas	yeso, halita
Shale o Lutita	Arcillas (Illita, caolinita, esméctica)	

Fuente: Elaboración propia basado en Herve (2007) y Klein & Hurlbut (1996).

La tabla anteriormente presentada expone los principales tipos de rocas para cada una de las clasificaciones generales. Pero no solo es importante conocer los minerales que componen cada una de las rocas, sino que también es necesario conocer la composición química de cada mineral, ya que esto definirá, como se verá en el capítulo siguiente, las propiedades de solubilidad de cada uno de los minerales que componen la roca y por ende la ocurrencia de algún elemento asociado a este mineral en las aguas subterráneas. En función de lo anterior, se presenta la Tabla 3.3 la cual

resume la composición química de los principales minerales que componen a cada tipo de roca, ya sea ígnea, metamórfica o sedimentaria:

Tabla 3.3: Composición Química de los principales minerales constituyentes de rocas.

TIPO DE ROCA	MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA
ÍGNEA	Cuarzo	SiO ₂
	Feldespato-potásico (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈
	Plagioclasa Feldespar	NaAlSi ₃ O ₈ CaAlSi ₃ O ₈
	Muscovita (mica)	KAl ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂
	Biotita (mica)	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂
	Anfibol (Hornoblenda)	Ca ₂ (Mg,Fe) ₄ Al[AlSi ₇ O ₂₂](OH) ₂
	Piroxeno	Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆ (Mg,Fe) ₂ Si ₂ O ₆
	Olivino	(Mg,Fe)SiO ₄
	Albita	Na ₂ O-Al ₂ O ₃ -6SiO ₂
METAMORFICA	Cuarzo	SiO ₂
	Calcita	CaCO ₃
	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
	Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	Hematita	Fe ₂ O ₃
	Limonita	FeO·OH·nH ₂ O
	Halita	NaCl
	Yeso (Sulfato de Calcio)	CaSO ₄ ·2H ₂ O
SEDIMENTARIA	Talco	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (HO) ₂
	Clorita	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (HO) ₈
	Granate	(Fe,Mg,Ca) ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂
	Kaynita	Al ₂ SiO ₅
	Silimanita	Al ₂ SiO ₅
	Andalusita	Al ₂ SiO ₅
	Estauroлита	(Fe,Mg) ₂ Al ₉ Si ₄ O ₂₂ (OH) ₂
	Magnetita *	Fe ₃ O ₄

Fuente: Blyth & De Freitas (1988), Klein & Hurlbut (1996), Herve (2007)

La tabla anterior resume, de manera gruesa, los principales minerales presentes en las principales rocas presentes en la corteza continental. A pesar que son variados los minerales presentes en rocas, menos de una docena constituyen el 98% de las rocas en la corteza terrestre, los demás

minerales se presentan en forma local, como menas, pegmatitas o evaporitas. (Salbu & Steinnes, 1995). La siguiente tabla resume los minerales de mayor importancia en la corteza terrestre:

Tabla 3.4: Principales minerales constituyentes de la corteza terrestre

PRICIPALES MINERALES CONSTITUYENTES DE LA CORTEZA TERRESTRE
Feldespato (plagioclasa, ortoclasa)
Anfiboles y piroxenos
Cuarzo
Micas (Biotita, muscovita)
Minerales de arcilla (Illita, caolinita, esmectita)
Carbonatos (Calcita, aragonita, dolomita)
Evaporitas (Yeso, Halita)
Oxihidroxidos (goetita, ferrihidrita, birnesita)

Fuente: Salbu & Steinnes. (1995.)

En general, los minerales no solo se encuentran formados únicamente por los elementos descritos en la formulas químicas descritas en la Tabla 3.3, sino que también presentan otros elementos en proporciones menores a los elementos principales. La siguiente tabla muestra los rangos de estos elementos para algunos de los minerales mencionados anteriormente.

Tabla 3.5: Rangos de contenido de elementos menores en minerales comunes formadores de rocas

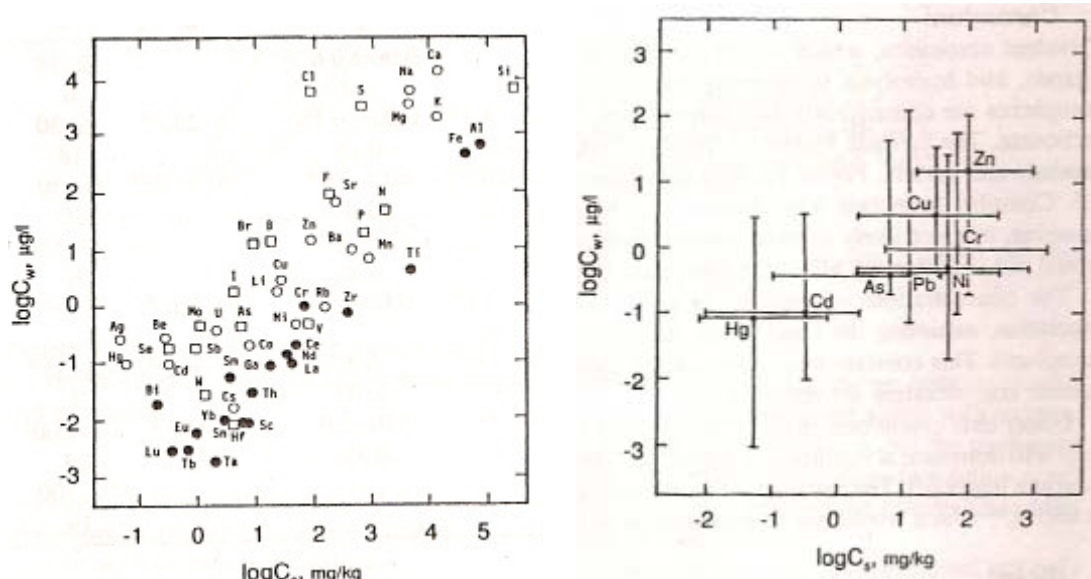
MINERAL	χ %	0,χ %	0,0χ %	0,00χ %	0,000χ %
Plagioclasa	K	Sr	Ba, Rb, Ti, Mn	P, Ga, V, Zn, Ni	Pb, Cu, Cr, Co, B
Feldespato Potásico	Na	Ca, Ba, Sr	Rb, Ti	P, Pb, Li, Ga, Mn	B, Zn, V, Cr, Ni, Co
Cuarzo				Al, Ti, Fe, Mg, Ca	Na, Ga, Li, Ni, B, Zn, Ge, Mn
Anfibolas		Ti, F, K, Mn, Cl, Rb	Zn, Cr, V, Sr, Ni	Ba, Cu, P, Co, Ga, Pb	Li, B
Piroxenos	Al	Ti, Na, Mn, K	Cr, V, Ni, Cl, Sr	P, Cu, Co, Zn, Li, Rb	Ba, Pb, Ga, B
Biotita	Ti, F	Ca, Na, Ba, Mn, Rb	Cl, Zn, V, Cr, Li, Ni	Cu, Sr, Co, P, Pb, Ga	B
Magnetita	Ti, Al	Mg, Mn, V	Cr, Zn, Cu	Ni, Co	Pb, Mo
Olivino		Ni, Mn	Ca, Al, Cr, Ti, P, Co	Zn, V, Cu, Sc	Rb, B, Ge, Sr, As, Ga, Pb

Fuente: Salbu & Steinnes. (1995.)

A pesar de que se conoce en gran medida la composición química de los principales minerales con los cuales el agua puede tener contacto, la relación entre el contenido de ciertos elementos en determinadas rocas no implica una relación directa con la concentración del mismo elemento en el agua subterránea, al menos desde el punto de vista de la aplicación local para la determinación de gradientes de concentración, etc. (Salbu & Steinnes, 1995). Aunque si existe una correlación

entre el contenido de un determinado elemento en una roca específica y el contenido del mismo elemento en aguas subterráneas, lo anterior puede observarse en las siguientes figuras:

Figura 3.1: Relación entre el contenido de elementos en rocas y en aguas subterráneas



Fuente: Salbu & Steinnes. (1995.)

El conocimiento de la composición mineralogía de la roca con la cual tiene contacto el agua subterránea es de vital importancia, pero también es de gran importancia conocer con que rocas el agua tiene contacto, lo cual queda definido fundamentalmente con la distribución geométrica que tienen los diferentes sistemas geológicos en el suelo, es decir, de la litología. Las litologías definen en gran medida el comportamiento del agua subterránea, desde el punto de vista del flujo de la misma, ya que definirán los estratos o sistemas geológicos por los cuales el agua subterránea se abrirá paso. Lo anterior se analizará en el punto 3.3 correspondiente a Hidrogeología.

Luego, utilizando la información entregada tanto en los puntos anteriores, como lo descrito en el ANEXO I, se presenta la Tabla 3.6, la cual resume las fuentes de diversos elementos mencionados en los puntos anteriores, así como también en el ANEXO I.

Tabla 3.6: Constituyentes Mayores y su Fuente

CONSTITUYENTES MAYORES	FUENTE
Ca	Principalmente Carbonatos, yeso y feldespatos
Mg	Feldespatos, Olivinos, Piroxenos, Anfíbolos, Micas y Calcita Magnésica
Na	Feldespatos, Evaporitas, Intercambio Catiónico, Agua Marina, Residuos Industriales
K	Feldespatos, Fertilizantes, Evaporitas potásicas, Glauconita
SiO ₂	Silicatos
NH ₄	Contaminación. Degradación de materia orgánica, Reducción de Nitrato, Intercambio Catiónico
SO ₄	Disolución de Yeso y Anhidrita, Oxidación de Piritita, Agua Marina
Cl	Agua Lluvia, Agua Marina y Salmueras, Disolución de Evaporitas, Contaminación
NO ₃	Deposición Atmosférica, Decaimiento del nitrógeno fijado por plantas, Oxidación de Amonio o Nitrógeno Orgánico, Contaminación
CO ₂ , HCO ₃ , CO ₃	Dióxido de Carbono del suelo y atmosférico, Rocas Carbonatadas, Oxidación de materia orgánica, Gases Volcánicos
O ₂	Gases del Suelo y Atmosféricos

Fuente: Kovalevsky, Kruseman, & Rushton. (2004)

Tabla 3.7: Constituyentes Menores y Elementos Traza y Su Fuente.

CONSTITUYENTES MENORES	FUENTE
Al	Arcillas, Feldespatos, Anfíboles, micas.
BO ₃	Turmalina, Evaporitas, Aguas Residuales, Agua marina, Emisiones Volcánicas
F	Fluorita, Algunos Silicatos, Emisiones Volcánicas
H ₂ S	Pirita, Reducción de Sulfato, Gases de yacimientos de petróleo, Emisiones Volcánicas
PO ₄	Apatita, Fertilizantes, Lodos de Aguas Residuales, Degradación de Materia Orgánica
Fe	Óxidos, Sulfuros, Carbonatos y Arcillas
Mn	Óxidos e Hidróxidos
Sr	Carbonatos
Ácidos Orgánicos (A. Húmicos y Fúlvicos)	Descomposición de Materia Orgánica
Ar	Aire
CH ₄	Degradación Materia Orgánica bajo condiciones de reducción intensas
N ₂	Aire, Reducción de Nitrato
CONSTITUYENTES MENORES	FUENTE
As	Insecticidas con Arsénico, Oxidación Pirita
Br	Evaporitas, Agua Marina, Agua Lluvia
Cr	Contaminación
I	Vegetación Marina, Evaporitas
Li	Meteorización de Silicatos
U	Dispersión de Mineral de Uranio
V	No muy Conocidas
Zn y Cd	Sulfuros, Desechos Industriales, Lodos de Aguas Residuales, Sales de Fertilizantes Fosfatados

Fuente: Kovalevsky, Kruseman, & Rushton. (2004)

3.2.2 Contexto Geológico en Chile.

Chile continental se ubica en el margen suroeste de América del Sur ocupando principalmente la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes hasta el Océano Pacífico. Presenta una longitud de aproximadamente 4.200 km, entre las latitudes 17°30'S y 56°30'S, con un ancho mínimo de 90 km a los 30°S, medio de 177 km y máximo de 360 km a los 23°. La superficie de Chile continental alcanza a 756.266 km². Sus principales rasgos geomorfológicos corresponden a la Cordillera de los Andes al oriente, la Cordillera de la Costa al poniente y una depresión intermedia entre ambas cordilleras. Este patrón es interrumpido por valles transversales entre los paralelos 27° S y 33° aproximadamente (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

- **Zona Norte (18° - 27°):** La Cordillera de los Andes alcanza grandes elevaciones cercanas a los 6.000 msnm y está constituida por un cordón oriental y uno prealtiplánico (Cordillera del Medio y Cordillera de Domeyko) y una meseta de altura entre ellas, denominada Altiplano, originada por relleno con material volcánico. La Depresión Intermedia es de gran amplitud y da origen a extensas planicies como la Pampa del Tamarugal (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
- **Zona de Valles Transversales (27° - 33° S):** Desaparece la Depresión Intermedia y la meseta altiplánica. El relieve es montañoso surcado por estrechos valles transversales que drenan la vertiente pacífica en sentido este-oeste con cauces de agua altamente fluctuantes, generalmente esporádicos excepto por aquellos que tienen su origen en la Cordillera de Los Andes y son alimentados por el derretimiento de las nieves (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
- **Zona Centro (33° - 42° S):** La Cordillera de los Andes alcanza aproximadamente 6.000 msnm hasta aproximadamente los 37°S, disminuyendo su altitud hacia el sur hasta aproximadamente 2000 m. En ella la Depresión Intermedia adquiere mayor desarrollo y las cuencas de los ríos se hacen más amplias. Desde el río Bío Bío al sur la actividad glacial ha originado numerosos y grandes lagos ubicados a los pies de la Cordillera de Los Andes. En ella la Cordillera de la Costa disminuye su elevación general a menos de 1.000 msnm (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

- **Zona Sur (42° - 56° S):** La Cordillera de los Andes presenta frecuente actividad volcánica y continúa disminuyendo de altitud hasta aproximadamente 1.800 m de altitud. Al sur de los 51° S el territorio chileno se extiende hacia el oriente ocupando parte de la vertiente Este de la Cordillera de los Andes. Al sur de los 42° S, la Depresión Intermedia se sumerge y la Cordillera de la Costa se manifiesta en islas y archipiélagos, desapareciendo ambas a sur del paralelo 47°S (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

La geología de nuestro país está determinada por la posición de una placa tectónica oceánica (Placa de Nazca) la cual se subducta bajo una placa tectónica continental (Placa Sudamericana). Esta situación produce una distribución claramente definida, marcada por unidades geomorfológicas y geológicas orientadas principalmente Norte-Sur en todo nuestro territorio, con excepción del extremo Sur de la XI Región, y de la XII Región (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

Se puede generalizar que entre al I y la XI Región existe una geomorfología orientada Norte Sur, la que se encuentra asociada a características geológicas muy determinadas, lo que permite dividirla en tres unidades principales, que son las siguientes:

- **Cordillera de la Costa:** Donde afloran principalmente rocas ígneas, intrusivas y extrusivas, de edad Triásico al Cretácico. Aparecen en la zona Central Sur afloramientos más antiguos, que corresponden a rocas metamórficas del Paleozoico. En algunos sectores esta secuencia esta subyaciendo a unidades sedimentarias marinas, principalmente del Terciario medio a superior, las cuales alcanzan su máxima expresión en la cuenca de Arauco, en la XIII Región (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
- **Depresión intermedia:** Corresponde principalmente a una zona tectónica deprimida, la cual está cubierta por sedimentos terrestres y continentales del Terciario Superior y Reciente. Esta unidad se interrumpe entre la II y la V región, donde aparecen valles transversales labrados principalmente sobre rocas volcánicas y continentales del

Cretácico-Terciario. En el sector Sur de la X Región esta zona se encuentra sumergida bajo aguas marinas (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

- **Cordillera Principal:** Asociada a las cumbres más altas de nuestro territorio, y marcando la divisoria de aguas continentales, se encuentra la Cordillera Principal donde afloran principalmente rocas Jurasicas en facies calcáreas, Cretácicas en facies volcánicas y Terciario superior al Reciente en facies también volcánicas. Entre la I y la II Región esta cordillera se divide en cordillera principal y precordillera o Sierra Moreno, dejando entre ellas la zona altiplánica de nuestro país, donde se desarrollan cuencas endorreicas. En este caso los afloramientos de la Precordillera corresponden a rocas principalmente del Paleozoico y Mesozoico, y los afloramientos de la Cordillera Principal (o de los Andes) corresponden a volcanismo del terciario superior al Reciente (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

La geología al extremo Sur está marcada por la migración de los elementos que conforman la Cordillera Principal hacia el Este, dejando una zona amplia de cuenca sedimentaria que corresponde a la cuenca de Magallanes. Esta cuenca se ha desarrollado a partir del Jurásico Superior, manteniendo en general su subsidencia y relleno hasta el Reciente (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

Todo el marco geológico descrito es susceptible de presentar esporádicamente zonas de alteración y mineralización, donde distintos elementos comerciales o no, están presentes en concentraciones anormalmente altas. Estas zonas podrán, en contacto con sistemas de drenaje, aportar elementos químicos en cantidades anormales que podrían significar una contaminación del agua en contacto (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

3.3 Hidrogeología.

3.3.1 Contexto General.

La naturaleza y distribución de los acuíferos, y por ende la calidad de las aguas que éste posea, serán controladas tanto por la litología, estratigrafía y las estructuras de los depósitos y formaciones geológicas presentes en el país. Freeze & Cherry (1979), establecen que los acuíferos están asociados comúnmente a inconformidades, las cuales son rasgos estratigráficos de particular importancia hidrogeológica debido a que son superficies que representan un intervalo de tiempo durante la cual la deposición de material es despreciable o prácticamente nula, o más comúnmente, durante la cual la superficie de la roca existente fue degradada, erosionada, o fracturada. Entre estas inconformidades se pueden hallar distintos tipos de sedimentos, así como también diferentes tipos de roca. A continuación se presenta de manera resumida las características de estos tipos de inconformidades.

3.3.1.1 Depósitos Fluviales.

Están compuestos por partículas de grava, arena, limo o arcilla que no están ligadas por cemento mineral (matriz), por presión o por alteración termal de los granos. En general los depósitos fluviales corresponden a aquel material que se deposita por procesos físicos en ríos o planicies de inundación. Los depósitos fluviales también son conocidos como depósitos aluviales.

Debido a la posición cambiante del canal del río, así como también de la cambiante velocidad de deposición del mismo, los depósitos de río tienen una gran variabilidad en sus características texturales, lo que implica en una gran heterogeneidad en la distribución de las propiedades hidráulicas.

La variabilidad de sedimentos presentes conlleva a diferentes dificultades del punto de vista práctico, como por ejemplo la delineación del acuífero, así como también de la definición de una conductividad hidráulica general, ya que la variabilidad de sedimentos genera diferencias de hasta 2 o 3 órdenes de magnitud en sus propiedades (Freeze & Cherry, 1979).

3.3.1.2 Depósitos eólicos.

Los depósitos eólicos son aquellos que son transportados y depositados por el viento y consisten básicamente en partículas de arena o limo y se presenta en zonas donde la precipitación es escasa y la superficie de arena es capaz de ser transportada y depositada por el viento. Se caracteriza por la escasa presencia de arcilla y por la textura uniforme compuesta por partículas de tamaño fino a mediano. En comparación con los depósitos fluviales, los depósitos eólicos son más homogéneos y la isotropía que presentan estos depósitos es mayor a la de cualquier otro depósito presente en la naturaleza (Freeze & Cherry, 1979).

3.3.1.3 Depósitos Glaciares.

Los depósitos glaciares están formados por o en asociación con glaciares continentales. Estos depósitos incluyen sedimentos glacio-fluviales y glaciolacustres. En lagos formados por glaciares durante el pleistoceno, predominan sedimentos como barro glacial (till), limo y arcilla, los cuales se encuentran depositados en el fondo. Depósitos de arena y grava que se encuentran depositados cerca de la orilla y sobre las playas son acuíferos en algunas aéreas. En comparación con acuíferos de origen glacio-fluvial, estos tipos de acuíferos (glacio-lacustres) son de menor importancia.

Barro Glacial (till) corresponde al material más abundante depositado durante el Pleistoceno, de ahí que predomine en éste tipo de depósitos. Además de los tipos clásicos depósitos de deshielo depositados por ríos formados a partir de glaciares, muchas áreas con glaciares tienen depósitos de arena y grava se forman sobre masas estancadas de glaciares durante episodios de retroceso del glacial. Estos depósitos son conocidos como depósitos contacto-hielo (Freeze & Cherry, 1979).

3.3.1.4 Rocas Sedimentarias.

3.3.1.4.1 Areniscas.

Del total de las rocas sedimentarias del planeta, el 25% de éstas corresponden a areniscas, las que en algunos países constituyen el estrato formador de acuíferos, ya que poseen bastas reservas de agua potable. La arenisca debe su origen a variados ambientes depositarios, incluyendo planicies de inundación, costas marinas, deltas y ambientes eólicos.

Las areniscas poseen porosidades en un rango que va desde el 30% al 50%, sin embargo, es común tener bajas porosidades debido a la compactación y al cemento mineral que liga las partículas, por lo que la porosidad se puede reducir a un 1%. El cemento mineral más común son los minerales de cuarzo, calcita y arcilla, los cuales pasan a ser parte de la matriz por procesos de precipitación mineral o alteración (Freeze & Cherry, 1979).

3.3.1.4.2 Rocas Carbonatadas.

Las rocas carbonatadas, en forma de caliza y dolomía, está compuesta básicamente de minerales de calcita y dolomita, con un bajo nivel de arcilla. La dolomía tiene su origen en la alteración geoquímica de la calcita, lo que causa un incremento en la porosidad y la permeabilidad debido fundamentalmente al entramado cristalino de la dolomita ocupa un 13% menos de espacio que la calcita.

Rocas carbonatadas geológicamente jóvenes tienen porosidades entre el 20% y 50%. Con el incremento de la profundidad, la matriz de minerales ligeros de carbonato se comprime y recristaliza a una roca más densa y menos porosa. La permeabilidad primaria para calizas y dolomías antiguas y no fracturadas es menor a 10^{-7} m/s. Muchos estratos carbonatados tienen permeabilidades secundarias apreciables como resultado de fracturas o aberturas en los planos del lecho. Esto tiene su origen por cambios en las condiciones de estrés debido a la disolución de calcita o dolomita producto del paso del agua subterránea (Freeze & Cherry, 1979).

3.3.1.5 Esquisto o pizarra.

Lechos de esquisto constituyen las más gruesos y extensivos acuitardos en la mayoría de las cuencas sedimentarias. El esquisto se origina como barro que se deposita en el fondo marino o a la salida de los deltas por dar un ejemplo. Procesos diagénicos relacionados con la compactación y la actividad tectónica convierten la arcilla en esquisto, la cual puede tener porosidades tan altas como entre 70 y 80 %.

Sin embargo, posterior a la compactación, el esquisto tiene porosidades menores al 20% y en ciertos casos menores al 5%. En afloramientos, el esquisto se presenta con fracturas, quebradizo y poco permeable. Sin embargo en zonas profundas, el esquisto es ligero, las fracturas son menos frecuentes y la permeabilidad es generalmente muy baja (Freeze & Cherry, 1979).

3.3.2 Rocas Ígneas y Metamórficas.

Este tipo de rocas posee porosidades que raramente sobrepasan el 2%, además la estructura intercrystalina impide o no permite conectar los poros existentes. Debido al bajo porcentaje de poros y el bajo grado de interconectividad entre los poros generan que la permeabilidad de estas rocas sea extremadamente baja. Mediciones realizadas en diferentes estudios exponen valores de 10^{-11} a 10^{-13} m/s para la cuarcita, la mica y otros minerales, en cambio para perforaciones en granito se tienen permeabilidades del orden de 10^{-11} m/s. (Freeze & Cherry, 1979).

En terrenos compuestos de rocas ígneas plutónicas y rocas metamórficas cristalinas, se suelen observar fracturas apreciables, lo que generan permeabilidades por fractura. Estas fracturas pueden tener de unos metros de largo a cientos de metros. Las fracturas se generan debido a cambios en las condiciones de estrés que han ocurrido durante la historia geológica de la roca. Estas fracturas se pueden incrementar debido a la acción del agua, al abrirse paso por las fracturas.

Diferentes factores limitan la tendencia hacia una apertura rápida en rocas cristalinas, una de ellas es que, debido a la incorporación de sílice en las fracturas previas, el agua tiende a ser menos agresiva para los minerales que se encuentran en las caras de la fractura. Otra característica

asociada a las rocas cristalinas es que la permeabilidad de éstas decrece a medida que aumenta la profundidad. Esto se debe a que las variaciones de estrés se producen cerca de la superficie, y a medida que la profundidad aumenta, las fracturas tienden a cerrarse debido al estrés vertical y horizontal impuesto por las sobrecargas y estrés horizontal de origen tectónico.

Rocas volcánicas formadas a partir de la solidificación del magma cerca de la superficie difieren de otras rocas cristalinas, en términos hidrogeológicos, en que tienen rasgos primarios que causan la permeabilidad dentro de estas rocas, que de otra forma serían solidas. Estos rasgos tienen relación con la forma en que el magma se solidifica, ya que en ese proceso se liberan gases, los que generan rutas o vías de escape hacia al superficie, generando de esta forma espacios dentro de la roca.

Del punto de vista hidroquímico, es posible reordenar los tipos de roca y sedimentos presentados anteriormente en tres clases (Mazor, 2004):

- Rocas en las cuales el agua subterránea fresca es común, es decir, aquellas rocas que aportan una fracción muy pequeña a la composición química de las aguas subterráneas. Entre las rocas que conservan la calidad del agua se encuentran las rocas ígneas y metamórficas, así como las areniscas puras.
- Rocas Carbonatadas: Que contribuyen en gran medida al material disuelto presente en las aguas subterráneas, pero mantienen su calidad del punto de vista del consumo humano en niveles aceptables. Principalmente dolomías y calcita.
- Rocas que tienden a enriquecer, de forma considerable, las concentraciones de sólidos disueltos. Rocas sedimentarias como el sulfato de calcio (yeso) y la halita.

La siguiente tabla muestra el efecto de cada una de estas rocas en el agua subterránea, en términos de su composición media:

Tabla 3.8: Huella Litológica en la composición del agua subterránea.

ROCA	COMPOSICIÓN DEL AGUA SUBTERRANEA
ARENISCA	Baja salinidad (300-500 mg/L); HCO_3^- es el anión principal, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} se pueden encontrar en concentraciones similares: Buen sabor
CALIZA	Baja salinidad (500-800 mg/L); HCO_3^- es el anión principal, Ca^{2+} es el catión principal. Buen sabor
DOLOMIA	Baja salinidad (500-800 mg/L); HCO_3^- es el anión principal, Ca^{2+} y Mg^{2+} tienen concentraciones similares. Buen sabor
GRANITO	Muy Baja salinidad (300 mg/L); HCO_3^- es el anión principal, Ca^{2+} y Na^{2+} principales cationes. Muy buen sabor
BASALTO	Baja salinidad (400 mg/L); HCO_3^- es el anión principal, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} se pueden encontrar en concentraciones similares. Buen sabor
SCHIST	Baja salinidad (300 mg/L); HCO_3^- es el anión principal, Na^+ y Ca^{2+} principales cationes. Buen sabor
MARMOL	Salinidad media (1200 mg/L); HCO_3^- y Cl^- son los aniones principales, Na^+ y Ca^{2+} principales cationes sabor pobre pero potable
ARCILLA Y ESQUISTO	Frecuentemente contiene rocas de sal y yeso. Alta salinidad (900-2000 mg/L); Cl^- anión dominante, seguido por SO_4^- ; Na^+ catión principal. Mal sabor, ocasionalmente no potable
YESO	Alta salinidad (2000-4000 mg/L); SO_4^- anión dominante, seguido por SO_4^- ; Ca^+ catión principal, seguido por Mg. Mal sabor, no potable.

Fuente: Mazor. (2004)

3.3.3 Situación en Chile.

Las formaciones acuíferas conocidas en el país corresponden básicamente a sedimentos cuaternarios no consolidados de origen fluvial, fluvio-glacial, aluvial, aluvional, laháricos y otros, que rellenan los valles delimitados por formaciones impermeables terciarias, mesozoicas y paleozoicas. Son acuíferos en general libres o semiconfinados con niveles estáticos poco profundos (menores que 50 metros), y de características granulométricas muy heterogéneas aún cuando predominan acuíferos de productividad elevada.

Se distinguen tres provincias hidrogeológicas: altiplánica, andina vertiente pacífico y cuencas costeras.

3.3.3.1 Provincia altiplánica.

Esta provincia considera dos tipos de acuíferos. Los primeros se desarrollan en formaciones cuaternarias – terciarias de rocas volcánicas de permeabilidad secundaria que permiten la infiltración del recurso en las cuencas superiores. Los segundos se ubican en sectores bajos y son acuíferos de sedimentos no consolidados de tipo fluvial, aluvial o lacustre. Normalmente en estas últimas zonas se presentan salares. Los acuíferos no consolidados tienen en general una elevada productividad y calidad de agua aceptable mientras no alcanzan las zonas con salares, y revisten gran interés para el abastecimiento de demandas domésticas y mineras (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

No existen mediciones en estos acuíferos, aunque se ha demostrado su existencia no se ha podido lograr su extracción eficiente.

3.3.3.2 Provincia andina vertiente pacífico.

Esta provincia se encuentra dividida en cinco subprovincias, cuyas características principales se describen a continuación.

- a) **Subprovincia Norte Grande:** incluye acuíferos formados por rellenos cuaternarios adyacentes a los escasos cauces superficiales de la zona; el gran sistema acuífero de la Pampa del Tamarugal, un extenso y potente relleno aluvional terciario y cuaternario; y el sector del Desierto de Atacama, con sistemas acuíferos aluvionales de características poco favorables para su explotación por su escasa recarga (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

Los recursos subterráneos de esta provincia se han cuantificado a través del cálculo de las recargas a la napa producto de infiltraciones: de las precipitaciones, de ríos, de riego a través de canales, desde embalses, etc., y flujos propios del agua subterránea. Las siguientes son las estimaciones de los volúmenes y flujos más relevantes (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

- Pampa del Tamarugal: cuenta con recargas de 1 [m³/s], las cuales provienen de las quebradas de Aroma, Tarapacá, Quipisca y Juan de Morales (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
 - Cuenca del Loa: cuenta con 1,28 [m³/s] de aportes provenientes de la ribera oriental del río, los cuales luego sirven como aportes al río aguas abajo, alcanzando valores de 0,92 [m³/s] en el tramo Yalquincha-Chintoraste (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
 - Salar de Atacama: recibe una recarga permanente desde los sectores Norte y Este, proveniente de la Cordillera de Los Andes. Además recibe unos 0,250 [m³/s] de excedentes de riego y aguas no utilizadas del río San Pedro. Se estima que en los acuíferos se almacenan 230 m³ por cada kilómetro de ancho con una recarga de 1,9 [m³/s] (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
- b) **Subprovincia Valles Transversales:** en este sector los acuíferos están constituidos por rellenos cuaternarios fluviales adyacentes a los cauces de los ríos, proviniendo su alimentación de la infiltración de los recursos superficiales. En general, son acuíferos libres, de elevada productividad (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

Los recursos subterráneos de esta provincia se han estimado en los siguientes montos:

- Cuenca del Copiapó: recibe una recarga de 2,25 [m³/s], provenientes en un 80% del mismo río, un 18% a entradas subterráneas y un 2% a infiltraciones del embalse Lautaro (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
 - Cuenca del Elqui: dentro del sector se distinguen 6 sectores hidrogeológicos, que suman un almacenamiento total de 134,7 millones de m³, con caudales subterráneos que llegan hasta los 0,24 [m³/s] (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
 - Cuenca del Limarí: muy relacionado con los embalses en superficie, existen embalses subterráneos que contendrían 62 millones de m³ (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
- c) **Subprovincia Central – Sur:** ubicada entre los 33° S y 42° S, esta zona está ligada a la unidad fisiográfica de la Depresión Intermedia, no restringida por los cauces de los ríos. Las napas se alimentan de distintas fuentes, y el material constitutivo corresponde a rellenos cuaternarios no consolidados, provenientes de acarreo fluviales y fluvio-glaciales. En general son acuíferos libres, aunque existen situaciones de confinamientos debido a la existencia de estratos impermeables arcillosos y/o volcánicos (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
- Cuenca del Aconcagua: cuenta con 21,2 millones de m³ almacenados, recargado principalmente desde el río Aconcagua y otros cauces (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
 - Cuenca del río Maipo: existen numerosos caudales en las distintas zonas homogéneas que se han definido en el valle, pero muy pequeños cada uno para ser individualizados; destaca el caudal de 5,578 [m³/s] en la sección principal de los ríos Maipo y Mapocho, el cual va paulatinamente aflorando al sur - poniente de Santiago (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

- Cuenca del Rapel: existen numerosas zonas hidrogeológicas, por donde escurren caudales significativos, destacándose las recargas en el río Cachapoal (1,6 [m³/s] en algunas secciones particulares) (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
- Cuenca del Mataquito: existen altos caudales en las secciones de los ríos Teno (hasta 3,55 [m³/s]) y Lontué (hasta 8,2 [m³/s]) (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).
- Cuenca del Maule: se ha calculado que ingresa un caudal de 4,078 [m³/s] desde ríos como el Claro, Maule y Longaví, entre otros (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

D) Subprovincia Zona de los Canales: ubicada entre los 42° S y 56° S, se caracteriza por la poca cantidad de recursos subterráneos debido al afloramiento de rocas metamórficas y plutónicas impermeables y carentes de permeabilidad secundaria. Sólo existen pequeñas acumulaciones de depósitos glacio-fluviales cuaternarios de buenas condiciones (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

En la península Brunswick existen recargas de origen nival y pluvial e infiltración de esteros y quebradas que ascienden a cerca de 4,5 [m³/s] y 2,2 [m³/s], con un 50% y 85% de probabilidad de excedencia respectivamente (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

e) **Subprovincia Pampa Magallánica:** en esta zona existen depósitos fluvio – glaciales y fluviales en capas permeables de poca potencia. Se han explotado acuíferos surgentes formados por areniscas terciarias en torno al Estrecho de Magallanes y Tierra del Fuego (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

En los distintos sectores de Tierra del Fuego existen recargas, entre 4,9 [m³/s] al oriente de ésta y 1,6 [m³/s] al poniente (ambas con un 50% de probabilidad de excedencia) (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

3.3.3.3 Provincia de Cuencas Costeras.

Esta provincia incluye aquellas de vertientes pacífico sin respaldo andino, nacientes en la Cordillera de la Costa. Está dividida en dos subprovincias: Costeras Arreicas y Costeras Exorreicas. La primera incluye aquellas en el Norte Grande que no presentan ningún tipo de escurrimiento por la ausencia de recursos hídricos; la segunda corresponde a los acuíferos frente a los valles transversales y al sector centro - sur del país, libres, de productividad baja o mediana, de espesor inferior a 100 m, y su uso está limitado por la intrusión salina en las napas(Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

Las recargas naturales de estos acuíferos son las siguientes:

- Cuencas costeras entre ríos Biobío y Carampangue: se han calculado flujos que suman cerca de 3,1 [m³/s];
- Cuencas costeras entre Río Aconcagua y Maipo: se destaca el Estero Casablanca que presenta un promedio anual de 0,76 [m³/s].

3.3.3.4 Islas del Pacífico.

Se cuentan entre éstas principalmente las islas San Félix, San Ambrosio, Sala y Gómez, el archipiélago Juan Fernández y la Isla de Pascua. Sólo para la más grande de ellas, que es la Isla de Pascua (con 180 km² y 1.600 habitantes), existe algún conocimiento acerca del recurso subterráneo (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

La isla es de edad cuaternaria reciente, y está constituida enteramente por conos volcánicos. Los suelos son pedregosos y muy permeables, y favorecen fuertemente la infiltración de las aguas meteóricas (1.000 mm/año), de modo que superficialmente sólo hay escurrimiento esporádico. Los estratos acuíferos, alimentados por las lluvias, están predominantemente compuestos de cenizas volcánicas y brechas de lava porosa; son muy permeables y dan lugar a un extenso acuífero freático de agua dulce. El recurso aflora hacia la costa. Las productividades de los pozos son elevadas (> 10 m³/h/m), pero la explotación es escasa, y se destina al uso doméstico y a la

actividad pecuaria. La calidad del agua es buena hacia el centro de la isla. Cerca de la costa y en pozos muy profundos hay contaminación salina (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

Existen grandes diferencias en el grado de explotación de los acuíferos en Chile dependiendo de su ubicación geográfica, la disponibilidad de recursos superficiales y las actividades económicas que los utilizan. Según la intensidad de la explotación de los recursos subterráneos, se puede realizar la siguiente clasificación (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

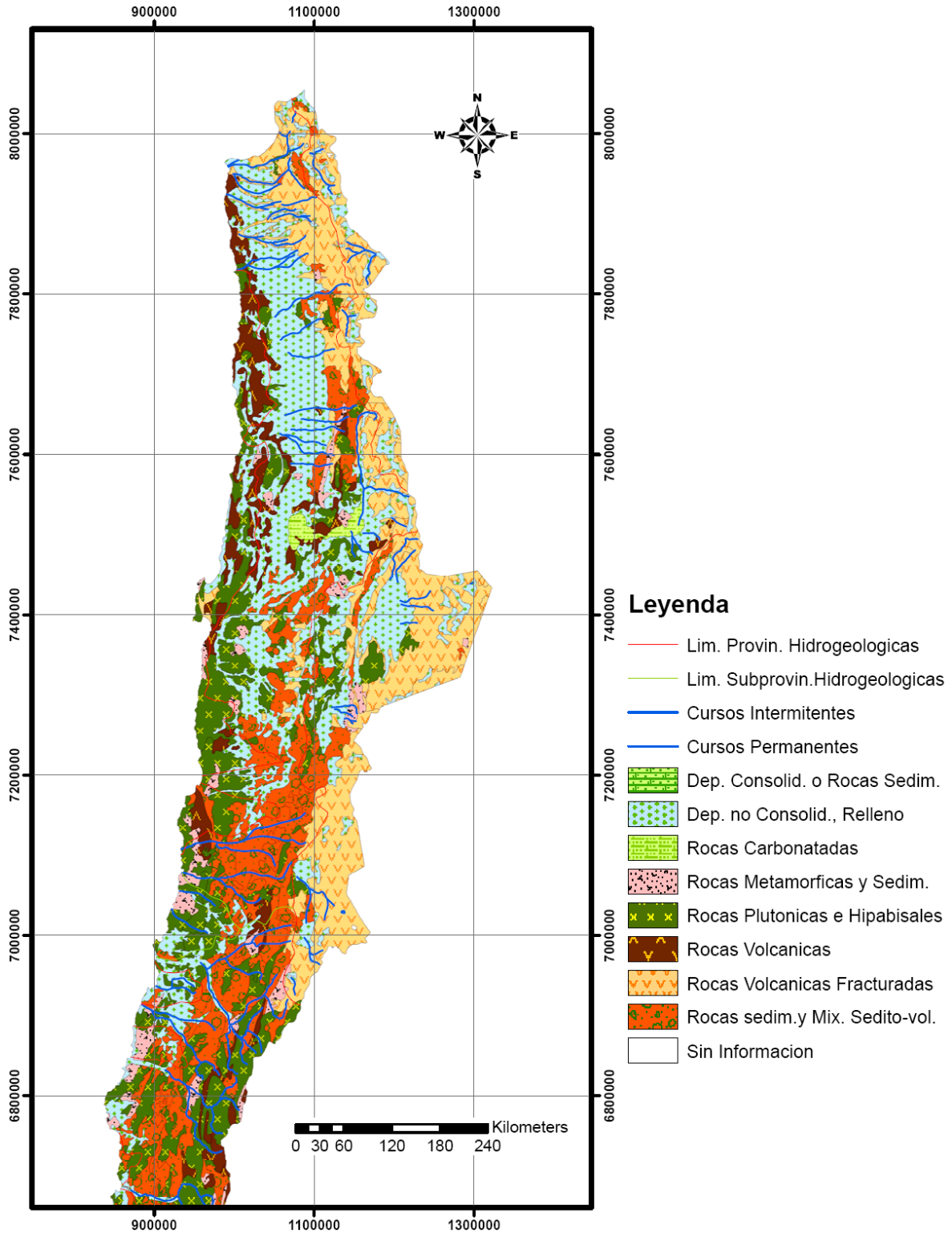
- *Áreas de explotación intensiva a crítica:* han presentado o presentan una tendencia mantenida de descenso por períodos de más de 15 años. Los casos más claros se ven en la Pampa del Tamarugal, cuenca del Copiapó y algunos sectores de la cuenca del Maipo;
- *Áreas de equilibrio:* las descargas y recargas se compensan, logrando una capacidad de aprovechamiento basándose en la regulación propia del acuífero. Esto se aprecia en la zona de los valles transversales y en el resto de la cuenca del Maipo.
- *Áreas subexplotadas:* las descargas artificiales no provocan mayor alteración de las recargas naturales, ni siquiera en el corto plazo. Ejemplos son gran parte de las cuencas altiplánicas (salvo donde se realizan extracciones para la minería), los acuíferos de la zona central - sur (interior y cuencas costeras), y en la Pampa Magallánica.
- *Acuíferos con peligro de intrusión salina:* tienen tendencia al deterioro de su calidad producto del bombeo, casos presentes en acuíferos costeros, donde se han explotado recursos para dotar de agua a poblaciones cercanas, como en Arica y Concepción, y en zonas adyacentes a los salares altiplánicos.

Las aguas subterráneas, por la importancia que tienen esencialmente las regiones I a III del norte del país, donde no se puede contar con los recursos superficiales por su mala calidad, están siendo sobreexplotados en algunas cuencas, a un nivel mayor que sus recargas naturales. Estas situaciones son críticas en la Pampa del Tamarugal y la cuenca del Río Copiapó, además de otros lugares como el Valle de Azapa, en la cuenca del río Lluta y la subcuenca de Chacabuco-Polpaico en la cuenca del Maipo, donde los caudales extraídos de pozos superan a la recarga

afluente. No obstante, el resto del país da signos de una evidente subexplotación (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2001).

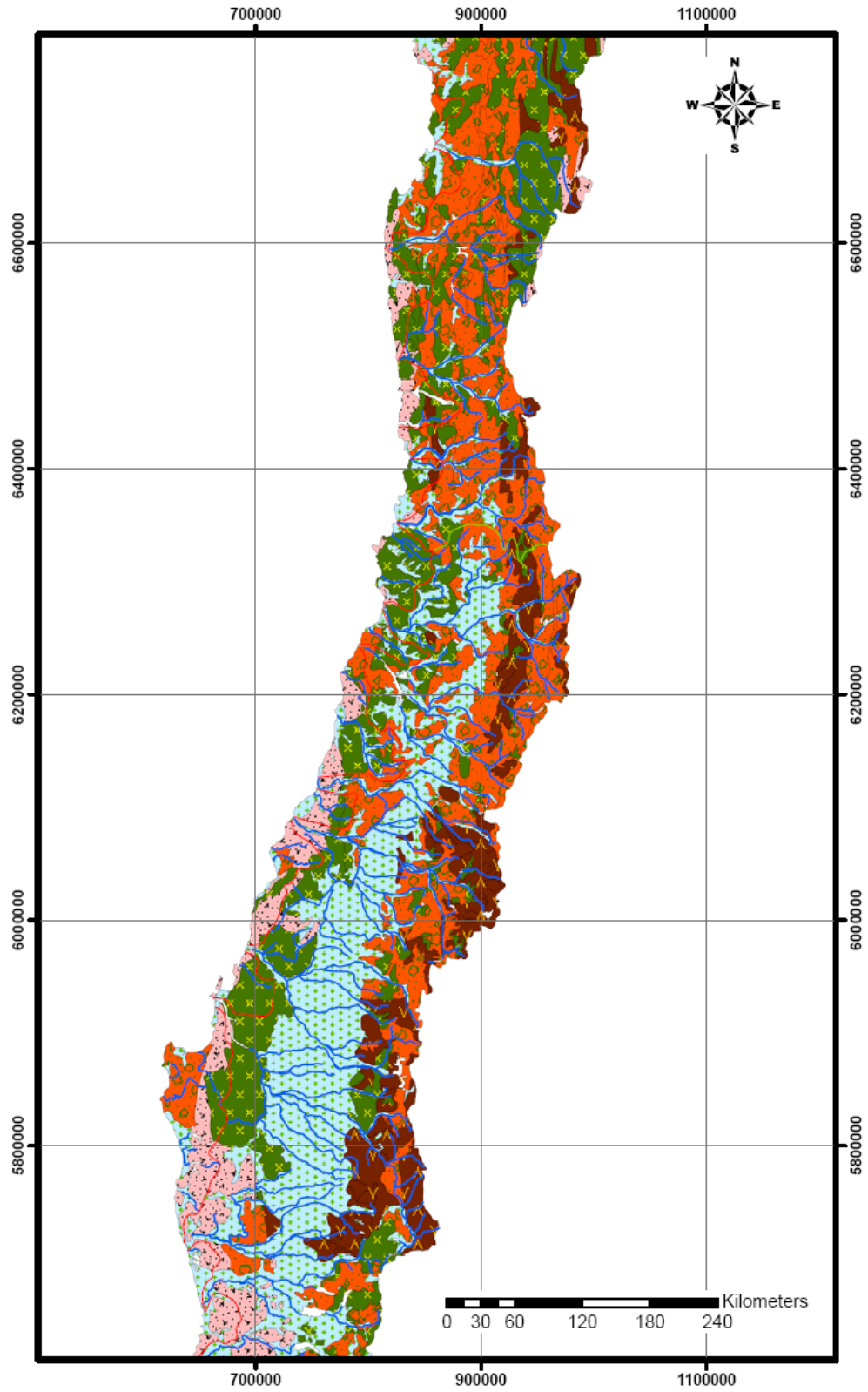
Las siguientes figuras presentan el mapa hidrogeológico de Chile, donde se presentan las estructuras más importantes desde el punto de vista hidrogeológico, así como también se identifican los límites de las provincias hidrogeológicas:

Figura 3.2: Mapa Hidrogeológico de Chile I, II y III Región.



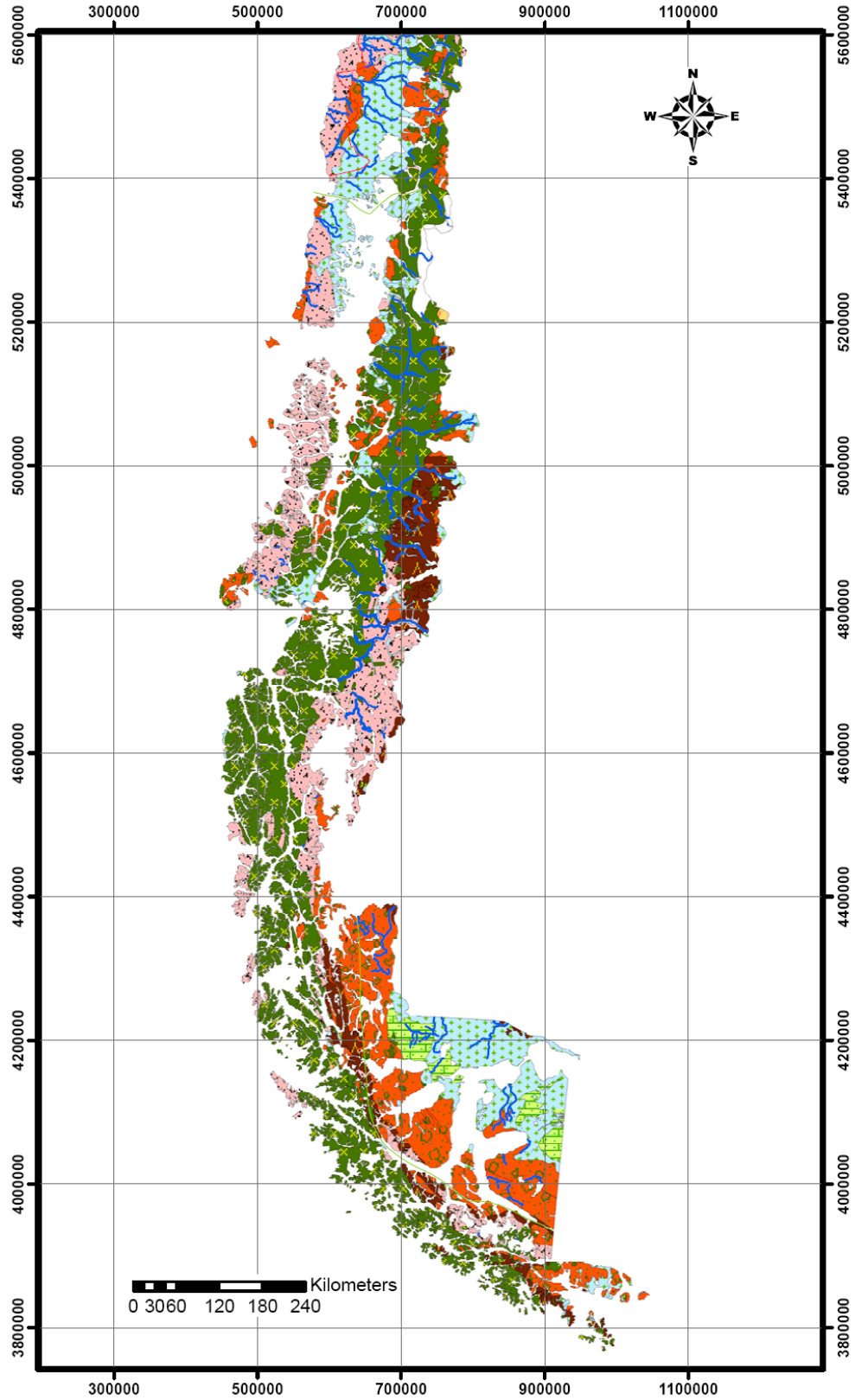
Fuente: Elaboración Propia Basado en Mapa Hidrogeológico de Chile (Ministerio de Obras Públicas, 1986)

Figura 3.3: Mapa Hidrogeológico de Chile IV a IX Región.



Fuente: Elaboración Propia Basado en Mapa Hidrogeológico de Chile (Ministerio de Obras Públicas, 1986)

Figura 3.4: Mapa Hidrogeológico de Chile X, XI y XII Región.



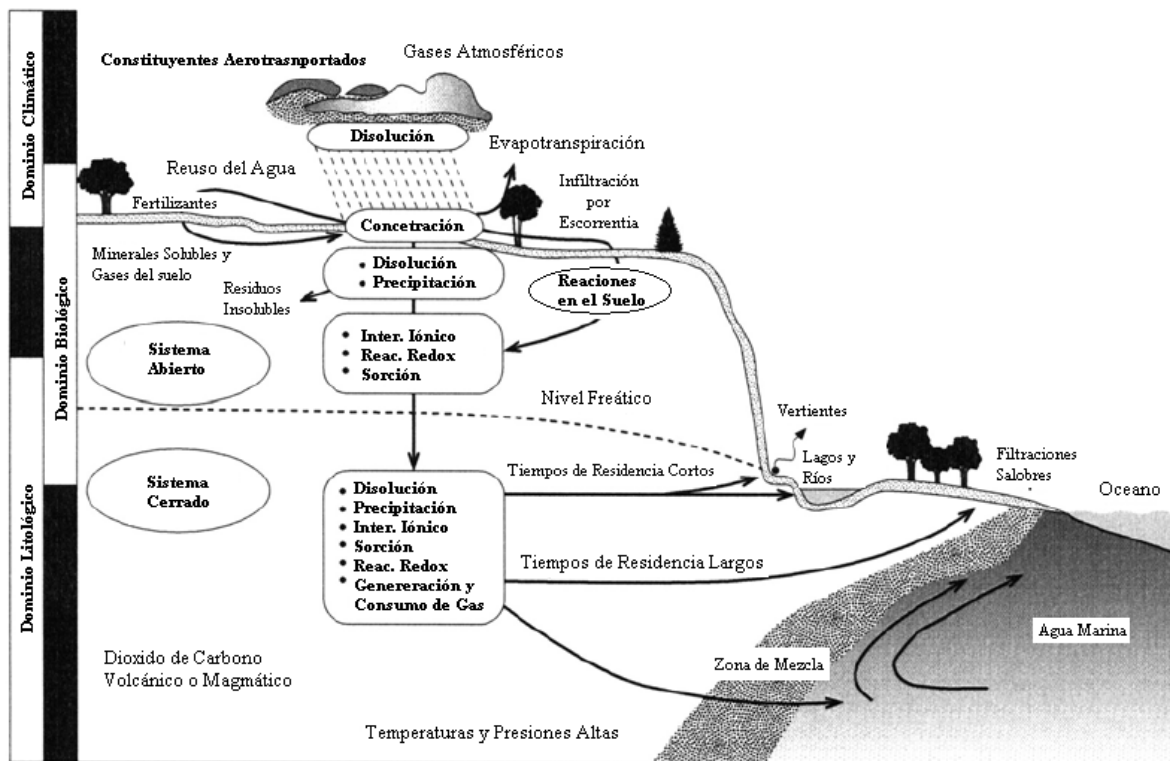
Fuente: Elaboración Propia Basado en Mapa Hidrogeológico de Chile (Ministerio de Obras Públicas, 1986)

4 MECANISMOS DE ADQUISICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

4.1 Introducción.

En los capítulos previos se ha podido ver que el agua posee diversas características asociadas a diferentes factores, tanto naturales como antrópicos, así como también la importancia de la geología y su influencia en la composición de las aguas subterráneas. El capítulo que sigue describe las propiedades geoquímicas y los principios que controlan el comportamiento de los constituyentes disueltos de las aguas subterráneas, algunos de los cuales se presentan en la siguiente figura, que ilustra aquellos mecanismos de mayor importancia en cada sistema que está asociado con las aguas subterráneas.

Figura 4.1: Mecanismos de mayor importancia en la composición de las Aguas Subterráneas.



Fuente: Elaboración Propia Basado en Kovalevsky, Kruseman, & Rushton. (2004).

4.2 Equilibrio Químico.

Para entender los mecanismos de adquisición de la composición química de las aguas subterráneas, es necesario comprender la relación más importante para el análisis químico de las aguas subterráneas, la Ley de Acción de Masa.

La Ley de Acción de Masa, cuyo principio fue establecido por Guldberg y Waage a mediados del siglo 19 (Hem, 1985), establece el estado en el cual la tasa de una reacción química es proporcional a la actividad de masas de las sustancias participantes, todo esto en equilibrio. La siguiente expresión resume lo anterior:



Donde b, c, d y e representan el número de moles de los constituyentes químicos B, C, D y E respectivamente. Dado que la reacción anterior se produce en equilibrio, se puede definir un coeficiente que establece la relación entre los reactantes y los productos, conocida como Constante de Equilibrio Termodinámico, definida por la siguiente expresión:

$$K_{eq} = \frac{[D]^d [E]^e}{[A]^a [B]^b} \quad 4.2$$

La expresión anterior indica que, para condiciones iniciales, la ecuación (4.1) procederá hasta que los reactantes y los productos alcancen su actividad de equilibrio, y dependiendo de la actividad inicial, la reacción se producirá hacia la derecha o hacia la izquierda. La expresión 4.2 también se conoce como *actividad*. Es importante destacar que la ley de acción de masa no tiene parámetros que expresen la tasa a la cual se produce la reacción ni tampoco nos dice nada sobre la cinética de la reacción, solo es la expresión de un estado de equilibrio.

La implicancia de la ley de acción de masa para las aguas subterráneas se relaciona con la descripción del comportamiento de un determinado mineral, ya que si la reacción se produce hacia la derecha, entonces se tendrá una disolución del mineral, en cambio si se produce hacia la

izquierda, el mineral tenderá a precipitar. Para ejemplificar mejor lo dicho anteriormente se presenta la reacción que describe el equilibrio termodinámico de la calcita:



Precipitación mineral \Leftrightarrow Disolución mineral

4.2.1 Coeficiente de Actividad.

En la Ley de Acción de Masa, las concentraciones de soluto están expresadas como actividades. La actividad y la molaridad están relacionadas por la siguiente expresión:

$$a_i = m_i \gamma_i \quad 4.4$$

Donde a_i es la actividad de soluto de la especie i , m_i la molaridad y γ_i el coeficiente de actividad. El objetivo de realizar esta transformación es para determinar la fracción de moles que es termodinámicamente efectiva, es decir, permite determinar que fracción participa en la reacción, razón por la cual el coeficiente de actividad resulta ser solo un factor de ajuste que puede ser usado para convertir concentraciones a una forma más adecuada para ser usada en la mayoría de las ecuaciones basadas termodinámicamente (Freeze & Cherry, 1979).

El coeficiente de actividad de un soluto dado es el mismo para cualquier solución con la misma fuerza iónica, la cual está definida por la siguiente expresión:

$$I = \frac{1}{2} \sum m_i z_i^2 \quad 4.5$$

Donde m_i es la molaridad de la especie i y z_i es la valencia de la especie respectiva. Luego, la Fuerza Iónica estará dada por la molaridad de cada uno de los componentes principales del soluto, lo que implica que entre mayor concentración molar de los elementos, mayor fuerza iónica presentará el soluto.

Un incremento en la fuerza iónica tiene como consecuencia una disminución en el coeficiente de actividad y en consecuencia una disminución en la actividad de la especie, lo que se traduce en que una menor cantidad de moles de una especie determinada se ve involucrada en la reacción descrita en la ecuación 4.1. Lo anterior se puede observar en la Figura 4.2.

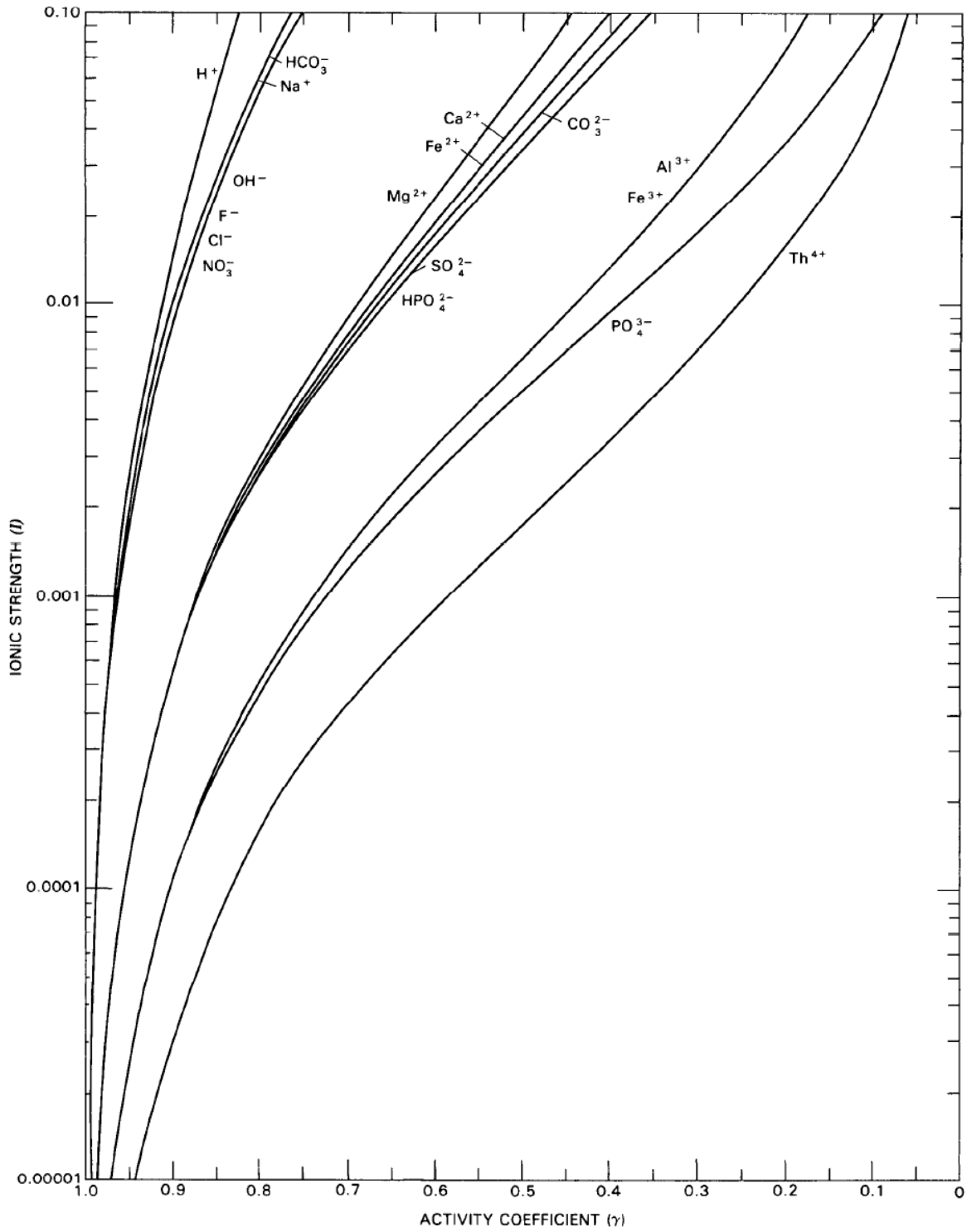
4.2.2 Equilibrio y energía Libre.

Desde el punto de vista termodinámico, el estado de equilibrio es un estado de estabilidad máxima a través del cual un sistema físico-químico cerrado procede por un proceso irreversible (Stumm y Morgan, 1970). Diferentes autores se han referido al concepto de estabilidad e inestabilidad, como Guggenheim (1949), Morgan (1970), entre otros (Freeze & Cherry, 1979).

Si el sistema químico existe en condiciones cerradas y bajo temperatura y presión constante, la respuesta del cambio puede ser descrita en términos de una función particular de energía conocida como Energía Libre de Gibbs (Freeze & Cherry, 1979)

La fuerza dominante en una reacción química es comúnmente representada por la energía libre de reacción de Gibbs, dada por el parámetro ΔG_r . Este parámetro, según Hem (1985) ha sido definido como una medida de la fuerza dominante termodinámica disponible para una reacción dada de izquierda a derecha (Ecuación 4.1).

Figura 4.2: Relación del coeficiente de actividad y la fuerza iónica de solución (25°C)



Fuente: (Hem, 1985)

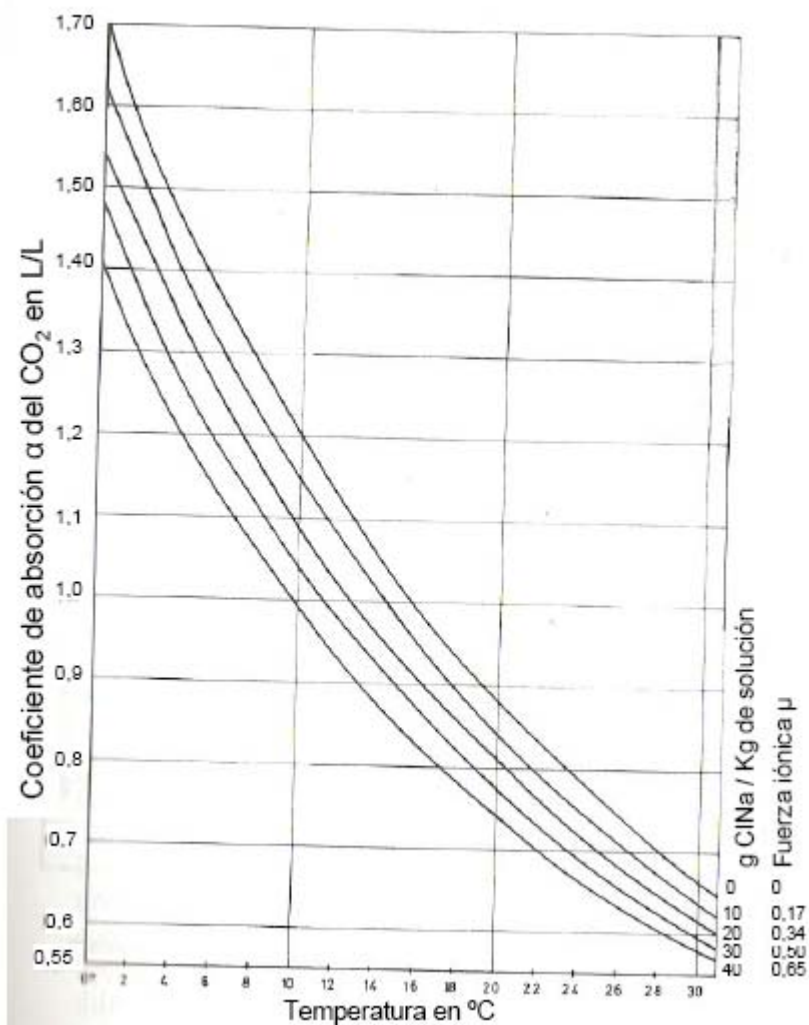
4.2.3 Gases Disueltos.

Cuando el agua está expuesta a una fase gaseosa, se establece un equilibrio entre el gas y líquido, el que se produce debido al intercambio de moléculas en la interfaz líquido-gas, lo cual se producirá para cada gas presente en una fase gaseosa mezclada. La presión a la que se produce el intercambio se le conoce como presión parcial. Las aguas subterráneas contienen gases disueltos como resultado de tres factores, (1) exposición a la atmósfera previa infiltración, (2) contacto con gases del suelo durante la infiltración a través del suelo no saturado o (3) producción de gas debajo de la napa por reacciones químicas o bioquímicas, las cuales involucran tanto al agua subterránea, como a minerales, materia orgánica y actividad bacteriana.

En la Figura 4.3 se presenta la variación del coeficiente de adsorción α , el cual representa el volumen de gas que puede ser disuelto por el agua, a 0°C cuando la presión parcial del gas es 1 atm. Como se observa de la Figura 4.3, la disminución del coeficiente se ve afectada tanto por la temperatura, como por la fuerza iónica. En este último caso, la adsorción de dióxido de carbono será menor debido a que se necesitará una menor reposición de éste último para suplir la deficiencia de la especie dominante de carbonato presente en el agua, ya que su consumo disminuirá conforme aumente la fuerza iónica.

El gas disuelto más importante en aguas subterráneas es el Dióxido de Carbono, el cual en fase disuelta se le denomina Ácido Carbónico (H_2CO_3). La solubilidad de este gas en el agua decrece con el incremento de la fuerza iónica, efecto que se conoce como *efecto salting-out*. Otro factor que puede afectar el coeficiente de actividad de estos gases tiene que ver con el tipo de electrolito presente en el agua así como también la temperatura, como se observa en la Figura 4.3, es un factor limitante para la disolución de este gas en el agua.

Figura 4.3: Coeficiente de Adsorción a del CO₂



Fuente: Codina. (2009)

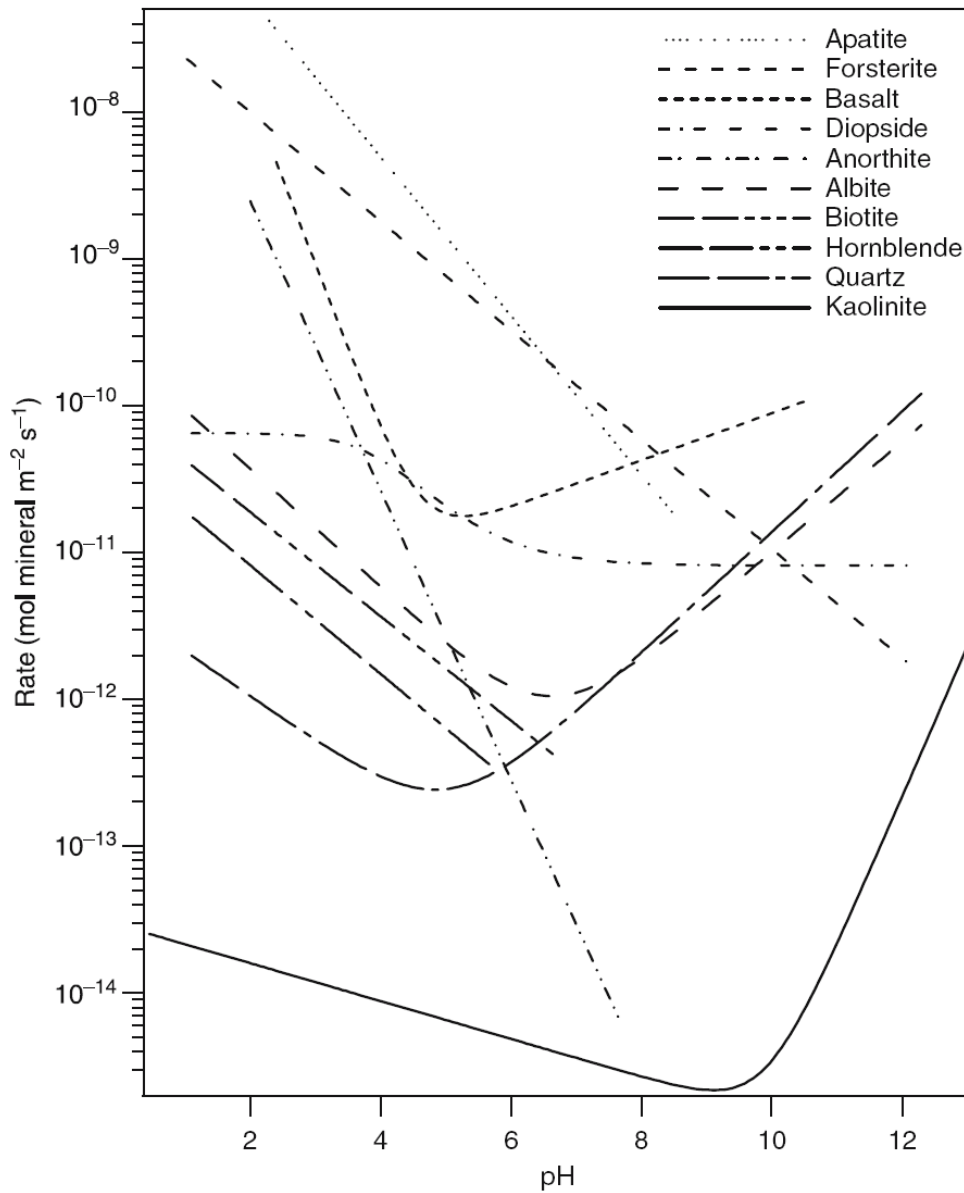
4.3 Solubilidad y disolución de minerales.

4.3.1 Constantes de equilibrio y solubilidad.

La **solubilidad** de un mineral se define como la masa de mineral que será **disuelta** en un volumen unitario de solución, bajo ciertas condiciones específicas (Freeze & Cherry, 1979) La solubilidad de los minerales que se encuentran en las vías de flujo de las aguas subterráneas varía en varios órdenes de magnitud. De este modo, dependiendo de los minerales con que el agua tiene contacto durante el flujo de la misma, las aguas subterráneas pueden tener sólidos disueltos ligeramente

elevados en comparación con las aguas lluvias ser o más salada que el agua de mar (Freeze y Cherry 1979). La Figura 4.4 expone las tasas de disolución de diferentes minerales en diferentes condiciones de pH, presentando en general una tendencia al aumento de las tasas de disolución a medida que disminuye el pH, aunque la presencia de minerales de silicio condicionan de igual manera las tasas de disolución, ya que a mayor contenido de silicio (Cuarzo, Kaolinita), menor será su tasa.

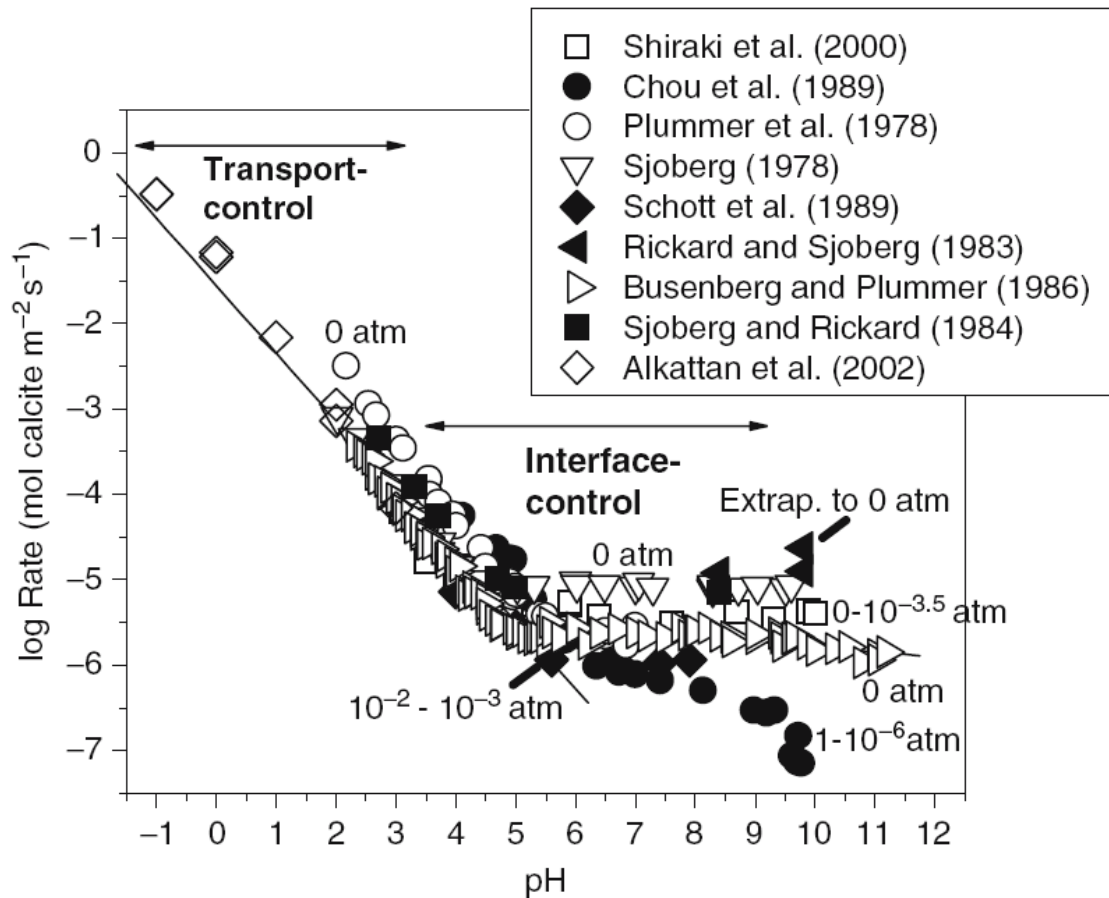
Figura 4.4: Tasas de Disolución en función del pH.



Fuente: Brantley, Kubicki, & White. (2008)

La dependencia de la solubilidad de un mineral en términos del pH (Figura 4.4) tiene como consecuencia una limitación en la capacidad de transporte y difusión del mineral disuelto (Brantley, Kubicki y White, 2008), lo cual se puede observar en la Figura 4.5.

Figura 4.5: Tasas de Disolución de la Calcita.



Fuente: Brantley, Kubicki, & White. (2008)

En la Figura 4.5 se puede observar que en ambientes con pH inferior a 3.5 la disolución está controlada por la capacidad de transporte del soluto, en cambio para pH mayores a 3.5, se observa que la disolución está controlada por la reacción entre interface agua-superficie mineral, la cual es más baja que en pH menor a 3.5, por lo que la difusión pasa a tener un rol importante en la disolución (Brantley, Kubicki & White, 2008).

La siguiente tabla presenta valores de tasas de disolución de diferentes minerales.

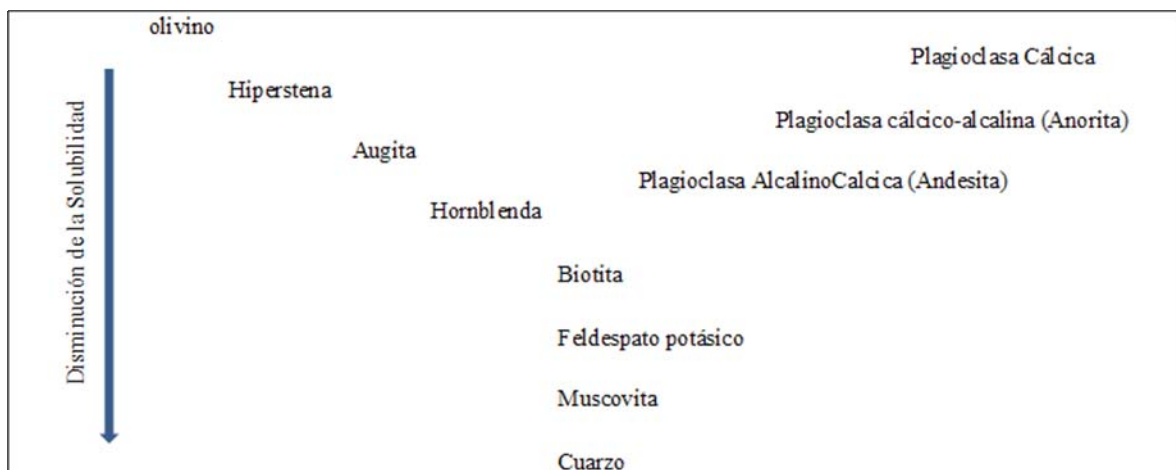
Tabla 4.1: Tasas de Disolución de Minerales Comunes formadores de Roca a pH 5.

MINERAL	Formula Química	GRUPO	TASAS DE DISOLUCIÓN (Log)
			[mol m ⁻² s ⁻¹]
Cuarzo	SiO ₂	Cuarzo	-14.0
Feldespato Potásico	KAlSi ₃ O ₈	Feldespato	-12.4
Muscovita	KAl ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Mica	-12.5
Flogopita	KMg ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)*6H ₂ O	mica	-12.5
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	Feldespato (plagioclasa Sodica)	-12.2
Diópsido	CaMgSi ₂ O ₆	Piroxeno	-11.4
Anorita	CaAlSi ₃ O ₈	Feldespato (plagioclasa Cállica)	-11.4
Enstatita	MgSiO ₃	Piroxeno	-10.5
Tremolita	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Anfibol	-11.0
Forsterita	Mg ₂ SiO ₄	Olivino	-9.4
Fayalita	Fe ₂ SiO ₄	Olivino	-9.4

Fuente: Holland & Turekian. (2005)

Otro punto importante en el efecto de la disolución mineral, es la resistencia de los minerales a ser disueltos en agua. Esto último, como se observa en la Figura 4.4, varía según el tipo de mineral y el contenido de Silicio presenten en cada uno de estos. La Figura 4.6 ilustra de manera más práctica lo comentado anteriormente.

Figura 4.6: Estabilidad de minerales frente a la degradación o disolución.



Fuente: Elaboración Propia Basado en Salbu & Steinnes (1995).

Comparaciones entre la solubilidad del mineral y las constantes de equilibrio indican que las magnitudes relativas de las constantes de equilibrio son un indicador pobre de las solubilidades relativas de los minerales debido a que en las relaciones de equilibrio la actividad de los iones o de las moléculas son elevadas a la potencia del número de moles en la expresión del balance dissociado. Para ejemplificar lo anterior, se presentan la Tabla 4.2 y Tabla 4.3, la cual presenta algunos minerales comunes en roca, su constante de equilibrio y su solubilidad (en pH 7).

Tabla 4.2: Constantes de equilibrio y Solubilidades para ciertos minerales.

MINERAL	CONSTANTE DE EQUILIBRIO	SOLUBILIDAD
	Log k_{eq}	[mg/L]
Gibbsite	-34	0,001
Cuarzo	-3,7	12
Hidroxiapatita	-55,6	30
Amorfo Silicato	-2,7	120
Fluorita	-9,8	160
Dolomita	-17	90 (*), 480 (')
Calcita	-8,4	100 (*), 500 (')
Yeso	-4,5	2100
Silvita	0,9	264000
Epsomita	-	267000
Mirabilita	-1,6	280000
Halita	1,6	360000

Fuente: Freeze & Cherry. (1979)

(*): Presión parcial del Dióxido de carbono (CO_2) = 10^{-3} bar.

(') Presión parcial del Dióxido de Carbono (CO_2) = 10^{-1} bar.

Es importante destacar que las diferencias observadas en las tasas de algunos minerales puede deberse a que los autores realizaron los ensayos en condiciones diferentes.

Tabla 4.3: Algunos minerales comunes y sus constantes de Disolución.

GRUPO MINERAL	MINERAL	CONSTANTE DE EQUILIBRIO
		Log k_{eq}
CLORUROS Y SULFATOS	Halita	1.54
	Silvita	0.98
	Yeso	-4.62
CARBONATOS	Magnesita	-7.46
	Aragonita	-8.22
	Calcita	-8.35
	Siderita	-10.7
	Dolomita	-16.7
HIDRÓXIDOS	Brucita	-11.1
	Hidróxidos Ferrosos	-15.2
	Gibsita	-33.5
SULFUROS	Pirrotita	-18.1
	Asfarelita	-23.9
	Galena	-27.5
SILICATOS Y ALUMINO-SILICATOS	Cuarzo	-4
	Montmorillonita Sodica	-9.1
	Caolinita	-9.4

Fuente: Domenico & Schwartz. (1997)

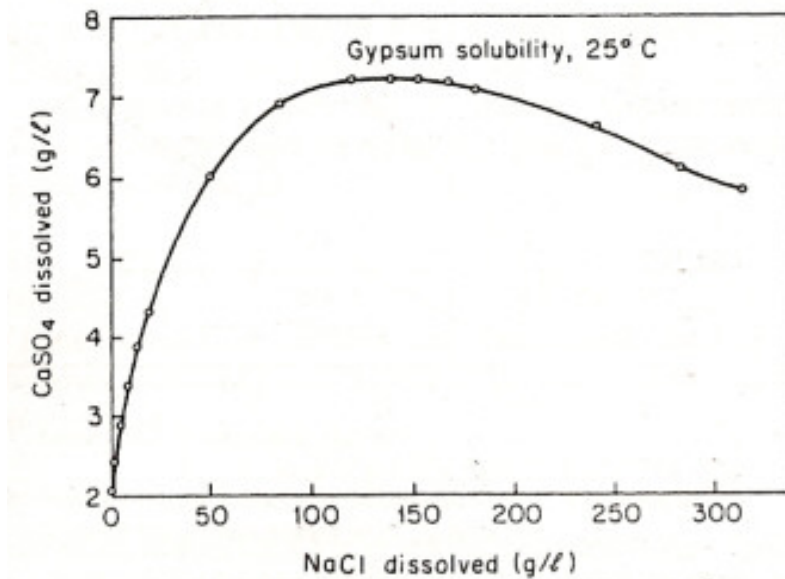
En general, una parte importante de los minerales se disuelven de manera congruente, estos minerales corresponden a los presentados en la Tabla 4.1; esto quiere decir que los productos de la reacción disolutiva del mineral son especies disueltas, como la Halita. En cambio existen otros minerales, que debido a la evolución química producida por las aguas subterráneas, los productos de la reacción de disolución no son productos disueltos, sino que son minerales o sustancias solidas amorfas. Ejemplo de lo anterior son los minerales de silicato de aluminio, como el feldespato y la albita; esta última además de los productos disueltos, produce el mineral de arcilla caolinita.

Como hemos visto hasta ahora, la solubilidad varía según el tipo de mineral, Figura 4.6, como también de otros factores, como el nivel de pH presente en el agua subterránea (Figura 4.4 y Figura 4.5), pero existen otras condiciones que regulan el nivel de solubilidad de un mineral, entre los que destacan, la fuerza iónica, el sistema carbonato, el efecto ión común y el desequilibrio e índice de saturación.

4.3.2 Efectos de la fuerza iónica.

Comparaciones entre la solubilidad de los minerales en agua pura versus agua con alto contenido de sales demuestra que un aumento en la salinidad incrementa la solubilidad del mineral. Este fenómeno se conoce como *el efecto de fuerza iónica* debido a que la baja en la fuerza iónica genera una baja en el coeficiente de actividad, lo que conlleva a un aumento en la solubilidad (Freeze & Cherry, 1979). La Figura 4.7 ilustra, por medio de la aplicación del efecto sobre la disolución de la calcita, el fenómeno anteriormente comentado:

Figura 4.7: Solubilidad del Yeso en solución acuosa de diferentes concentraciones de NaCl, a 25°C y 1 atm.

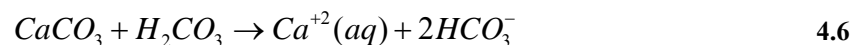


Fuente: Freeze & Cherry. (1979)

4.3.3 Sistema Carbonato.

Se ha estimado que sobre el 99% del carbono terrestre existe en minerales de carbonato, donde los principales son la Calcita (CaCO_3) y la Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Cerca de todos los terrenos sedimentarios y en muchas áreas con rocas metamórficas e ígneas, las aguas subterráneas están en contacto con minerales de carbonato durante una parte de su historia de flujo. La habilidad de las aguas subterráneas para minimizar los efectos de diversos tipos de contaminantes puede depender de la interacción entre el agua y los minerales de carbonato.

Es importante destacar que las constantes de equilibrio de las reacciones entre el agua y los minerales de carbonato dependen de la temperatura y de la presión existente en el medio, como también del tipo de sistema en el cual se genere la reacción. De las variables mencionadas anteriormente, la presión de dióxido de carbono y el tipo de sistema son las más relevantes desde el punto de vista de la disolución de minerales carbonatados. La siguiente ecuación representa el caso típico de una reacción de disolución de calcita bajo condiciones de abundancia de dióxido de carbono, lo que se ve acompañado de una estabilidad en la presión de CO_2 debido a la abundancia de este elemento.



(aq): Especie disuelta

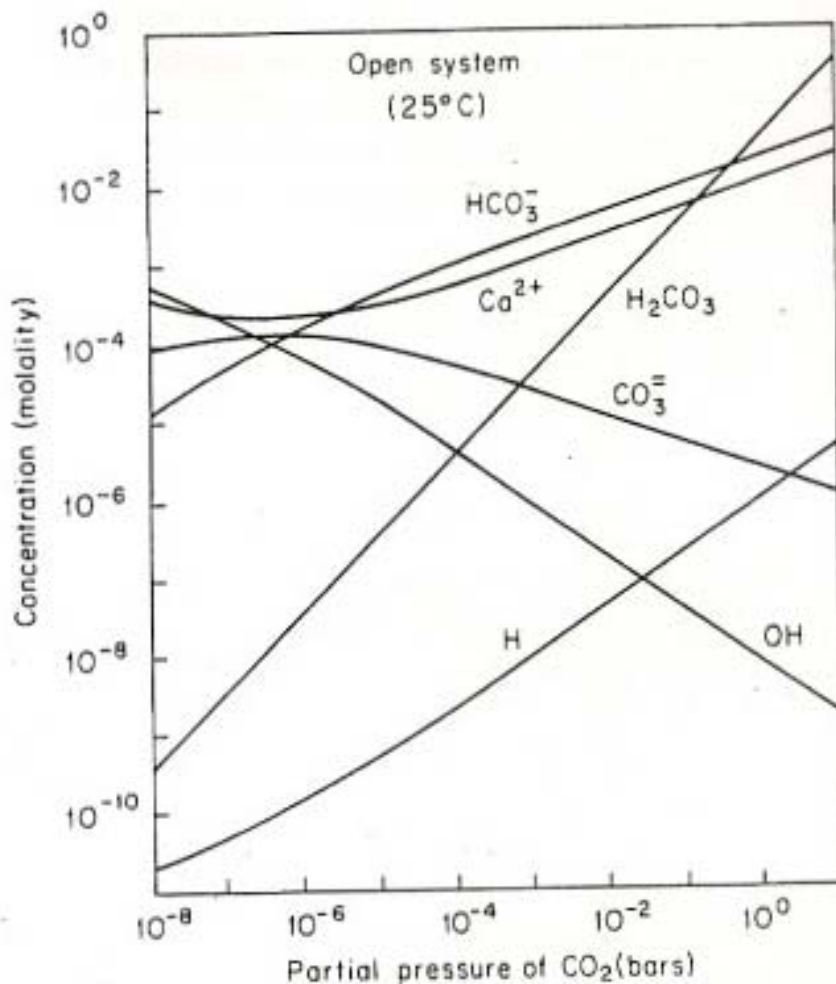
En estas condiciones, el dióxido de carbono disuelto, conocido como Ácido Carbónico (H_2CO_3) permanece constante, lo se traduce en la generación de condiciones adecuadas para la disolución de calcita. Si se incrementa la presión de CO_2 , mayor será la disponibilidad de Ácido Carbónico (Figura 4.8), lo que a su vez incrementa la disolución de minerales carbonatados, en particular de la calcita (ecuación 4.6), por ende, la disponibilidad de CO_2 condicionará la capacidad disolutiva de los minerales carbonatados. Luego, en función de la disponibilidad de CO_2 disuelto el sistema se puede clasificar en abierto (CO_2 disuelto y presión CO_2 constante) o cerrado, caso en el cual el CO_2 disuelto consumido en la reacción no es repuesto por entradas de CO_2 .

Así mismo, el pH puede controlar el comportamiento de la reacción, ya que si el ambiente en el cual se encuentre el agua subterránea es ácido, la especie predominante será el ácido carbónico,

aumentando la disolución de minerales carbonatados, en particular para condiciones de pH menores a 6.5 (Figura 4.9) en cambio en ambientes con pH mayores a 6.5 predominan otras especies, por lo que la disolución de minerales de carbonato disminuye, aumentando la cantidad que CO_3^{2-} (Figura 4.9).

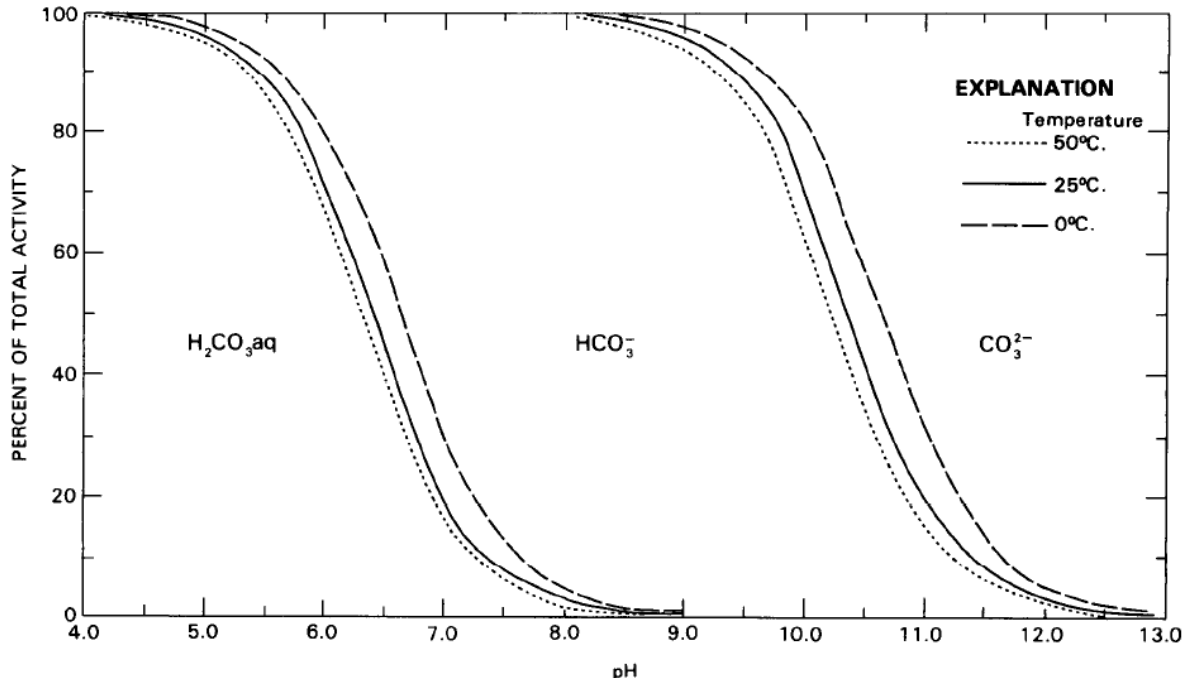
A manera de resumen, se puede establecer que las variables que condicionan de manera importante la disolución de minerales carbonatados son el pH, el tipo de sistema y la presión de CO_2 existente en el ambiente en que se desarrolle la reacción.

Figura 4.8: Especies disueltas en agua en equilibrio con calcita en función de P_{CO_2} en un sistema de disolución abierta.



Fuente: Freeze & Cherry. (1979)

Figura 4.9: Distribución de las principales especies inorgánicas disueltas de carbono.



Fuente: Hem. (1985)

4.3.4 El efecto Ión-Común.

Este efecto se produce cuando la adición de iones por la disolución de un mineral puede influenciar la solubilidad de otro mineral en un grado mayor que el ejercido por el cambio de coeficientes de actividad, es decir, la disolución de un determinado mineral, genera la saturación de un ión presente de igual manera en otro mineral. A este fenómeno se le conoce como *efecto ión común*. Un ejemplo de esto ocurre con los minerales de calcita y yeso, en cuyo caso, aguas subterráneas con contenido de sales (NaCl) aumentará o disminuirá la solubilidad de uno o del otro y particularmente, cuando la concentración de sal es elevada, ambos minerales aumentan su solubilidad.

4.3.5 Desequilibrio e índice de saturación.

El desequilibrio en una reacción genera diversas reacciones en ambas partes de la ecuación de equilibrio (ecuación 4.1). Para comparar el estado de la reacción disolución-precipitación de un determinado mineral se utiliza el *índice de saturación* el cual permite, en un momento particular del tiempo y del espacio, saber si la reacción se encuentra en equilibrio o no. La expresión que define el índice de saturación es la siguiente:

$$S_i = \frac{Q}{K_{eq}}, \quad Q = \frac{[B]^b [C]^c}{[D]^d [E]^e} \quad 4.7$$

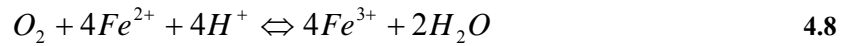
Donde b, c, d y e representan el número de moles de los constituyentes químicos B, C, D y E respectivamente. Si $S_i > 1$, el agua contiene un exceso de iones constituyentes por lo que la reacción tendería a equilibrarse hacia la izquierda, generando precipitación mineral, en cambio si $S_i < 1$, la reacción tendería hacia la derecha, generando disolución mineral; si $S_i = 1$, la reacción esta en equilibrio, lo que significa que el agua se encuentra saturada con respecto al mineral en cuestión.

Para que el índice de saturación sea de interés, es necesario conocer la composición mineralógica de la zona en estudio para tener un mejor entendimiento de este fenómeno.

4.4 Procesos de Oxidación y Reducción.

4.4.1 Estados de oxidación y reacciones Redox.

Estado de oxidación o número de oxidación representa la carga hipotética que un átomo pudiese tener si el ión o molécula estuviese dissociada. En cambio, en las *reacciones de oxido-reducción*, más conocidas como *Redox*, no existe electrones libres, ya que el proceso de oxidación genera una pérdida de electrones y la reducción una ganancia de electrones, por lo que el balance iónico siempre se mantiene. La expresión que define la reacción Redox se presenta en el siguiente ejemplo:



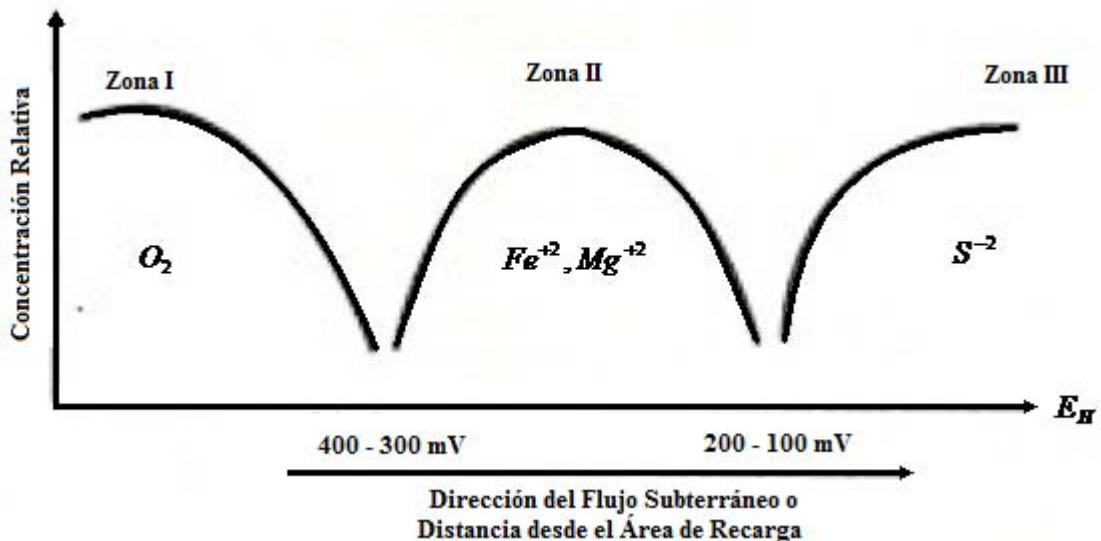
La reacción Redox anterior también puede ser descrita de la siguiente forma:



Las expresiones anteriormente presentadas corresponden a un sistema de “semi-reacciones”. Es importante destacar que la mayoría de las reacciones que ocurren en aguas subterráneas involucran tanto al oxígeno como al hidrógeno (Freeze & Cherry, 1979).

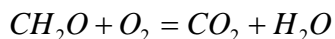
Las condiciones Redox pueden variar a lo largo del sistema de flujo, lo cual puede verificarse mediante mediciones cuidadosas de pH, Eh, Oxígeno Disuelto (OD) y la concentración total de sulfuro (S⁻²). La siguiente figura ilustra los cambios generales que ocurren en un sistema acuífero a lo largo del sistema de flujo:

Figura 4.10: Diferentes zonas Redox existentes a lo largo de un acuífero confinado (Jackson and Inch, 1980).



Fuente: Basado en Domenico & Schwartz. (1997)

En la zona I, el oxígeno inicial presente en la recarga tenderá a declinar a través de la reducción de carbón orgánico:



4.11

En la zona II, la concentración de Fe^{2+} y Mn^{2+} aumenta debido a que los minerales oxidados de Fe(III) y Mn(IV) no son estables en ambientes reducidos, por lo que se produce la disolución de estos minerales.

En la zona III, el incremento de S^{-2} se debe a la disolución de sulfatos, la cual, al superar la tasa de disolución de los óxidos de magnesio y hierro, las concentraciones de Fe^{2+} y Mn^{2+} se reducen, debido a la precipitación de éstos como sulfatos metálicos (Domenico & Schwartz, 1997).

4.4.2 Materia Orgánica y consumo de Oxígeno.

Ríos no contaminados y lagos tienen, generalmente, condiciones oxidadas debido a la mezcla de oxígeno desde la atmósfera. Sin embargo, en las aguas subterráneas se tienen condiciones de agotamiento de oxígeno y condiciones de reducción, debido al aislamiento de ésta con respecto a la atmósfera, por lo que el oxígeno consumido por reacciones hidro o bioquímicas no es restituido.

Para que la reducción de materia inorgánica se produzca es necesario que otros constituyentes sean oxidados. Estos constituyentes corresponden a materia orgánica, la cual es oxidada por medio de reacciones catalizadas por bacterias y enzimas aisladas que derivan en energía para facilitar los procesos de transferencia de electrones.

Dada la baja solubilidad del oxígeno, 9 mg/l a 25°C y 11 mg/l a 5°C, y que la reposición de O_2 en la sub-superficie es limitada, la oxidación de una pequeña fracción de materia orgánica resulta en un consumo casi total del oxígeno disponible. Una vez que el oxígeno disuelto de las aguas subterráneas es completamente consumido, los factores oxidantes de materia orgánica pasan a ser NO_3^- , MnO_2 , $Fe(OH)_3$, SO_4^{2-} entre otros. Debido al consumo de estos agentes oxidantes, el ambiente se vuelve cada vez más reducido, por lo que la degradación de materia orgánica se realiza bajo condiciones anaeróbicas, generándose metano y otros productos derivados de la degradación anaeróbica, y a su vez se ve acompañado de una reducción de sulfato (SO_4^{2-}).

4.4.3 Condiciones de Equilibrio Redox.

Para describir la actividad relativa de los electrones se utiliza el parámetro pE, definido por la siguiente expresión:

$$pE = -\log[e] \quad 4.12$$

El pE de una solución es la medida de la tendencia de oxidación o reducción de la misma. Cuando una reacción redox se produce, las condiciones finales que se obtendrán serán tales que se tendrá un único valor para el pH como también un único valor para el pE, lo cual se cumplirá sólo en condiciones de equilibrio.

Otro indicador que permite medir la energía que se traspa en las reacciones es el *potencial redox*, Eh. Utilizado ampliamente en investigaciones previas a 1970, el Eh está definido como la energía que se gana en la transferencia de 1 mol de electrones desde un oxidante a H₂. El Eh se utiliza para medir la tendencia a la oxidación-reducción del sistema. La expresión que relaciona a ambos parámetros es la siguiente:

$$pE = 16.9Eh \quad 4.13$$

El h en la expresión Eh, indica que el potencial esta en escala de hidrogeno y la letra E simboliza la fuerza electromotriz. Otra expresión recurrente para el potencial redox está dada por la expresión de Nernst:

$$Eh = Eh_o + \frac{2.3RT}{nF} + \log\left(\frac{[Oxidantes]}{[Reductantes]}\right) \quad 4.14$$

De la expresión anterior, Eh_o es el potencial redox estándar, medido en Volts, y se encuentra tabulado para diferentes elementos. El pE y el Eh están relacionados por el parámetro F, correspondiente a la constante de Faraday, la constante de gases R, la temperatura absoluta T y el

numero de electrones n , las que a 25°C adquieren valores tales que se genera la expresión anteriormente presentada.

Ambos parámetros, pE y Eh , pueden ser utilizados para el estudio de sistemas acuáticos como parámetros que representan las condiciones redox.

4.4.4 Factores Microbiológicos.

Los microorganismos catalizan la mayoría de las más importantes reacciones redox que ocurren en las aguas subterráneas, esto significa que, aunque las reacciones son termodinámicamente espontáneas, éstas necesitan del efecto catalizador de los microorganismos.

Los microorganismos de mayor importancia en las aguas subterráneas corresponden a las bacterias, aunque otros tipos de microorganismos como algas, hongos, levaduras y protozoos tienen gran importancia en otros medio ambientes acuosos. La capacidad catalizadora de las bacterias proviene de la actividad de las enzimas, que son sustancias proteicas formadas por organismos vivos que tienen el poder de incrementar la tasa de reacciones redox por medio de la disminución de las energías de activación de las reacciones. Para cumplir esto, las enzimas interactúan con moléculas complejas que representan estructuras moleculares a medio camino de los reactantes y los productos. Las bacterias y las enzimas se involucran en los procesos redox para adquirir energía para sintetizar nuevas células y mantener las más viejas.

Este proceso ocurre por medio de la síntesis de una estructura almacenadora de energía, conocida como adenosin trifosfato o ATP, la cual se sintetiza utilizando energía, parte de la cual se obtiene de las reacciones Redox. Entre las fuentes más importantes de energía para las bacterias en aguas subterráneas se encuentra en la oxidación de materia orgánica.

4.4.5 Diagramas pE - pH .

Estos diagramas permiten observar el equilibrio de la ocurrencia de los iones o minerales como dominio relativo a pE (o Eh) y pH , y son conocidos como diagramas pE - Eh o Eh - pH . Estos diagramas han sido ampliamente utilizados en diversas disciplinas y particularmente en la

investigación de la calidad de aguas subterráneas, donde este tipo de diagrama ha cobrado vital importancia para el desarrollo y el entendimiento de los procesos que controlan la ocurrencia y movilidad de los elementos menores y traza, ya que caracterizan la distribución de las diferentes especies de un determinado elemento en diferentes condiciones.

Para entender, desde el punto de vista de la aplicación de los diagramas pE-pH (o Eh-pH), la ocurrencia del equilibrio de especies y minerales disueltos en ambientes acuosos, es necesario considerar la relación pE-pH para determinar las condiciones en que el agua es estable. La Figura 4.11 presenta los diferentes estados posibles del agua, como el estado reducido, oxidado y estable, como también las zonas que caracterizan ciertos tipos de agua, como agua de mina, de lluvia, de río y por supuesto aguas subterráneas.

Las líneas o condiciones de borde del diagrama representan las condiciones de disociación de la molécula de sus componentes gaseosos. Las ecuaciones que definen estas líneas se presentan a continuación:

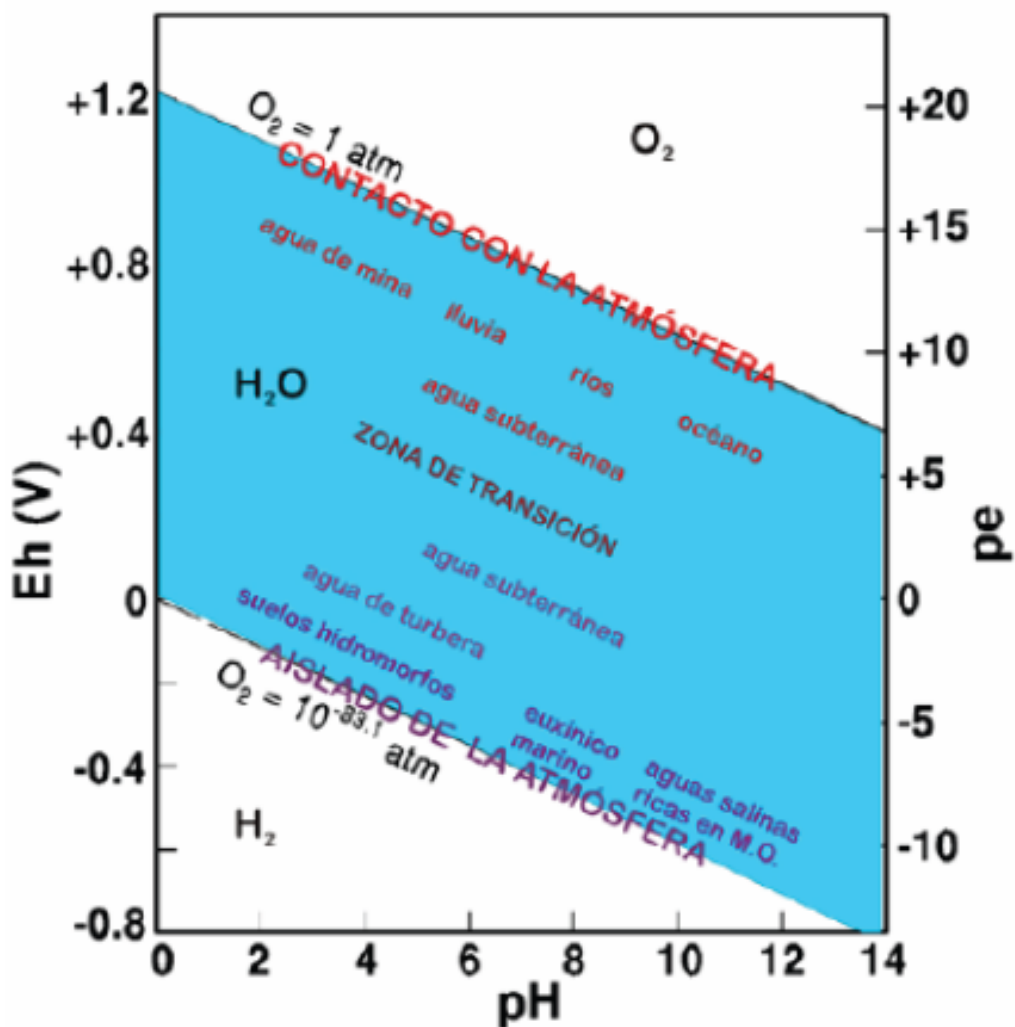


De las semi-reacciones anteriores se obtienen las condiciones a 25°C:

$$pE = 20.8 - pH + \frac{1}{4} \log P_{O_2} \quad 4.17$$

$$pE = -pH - \frac{1}{2} \log P_{H_2} \quad 4.18$$

Figura 4.11: Diagrama pE-pH, 25°C y presión de 1 bar.

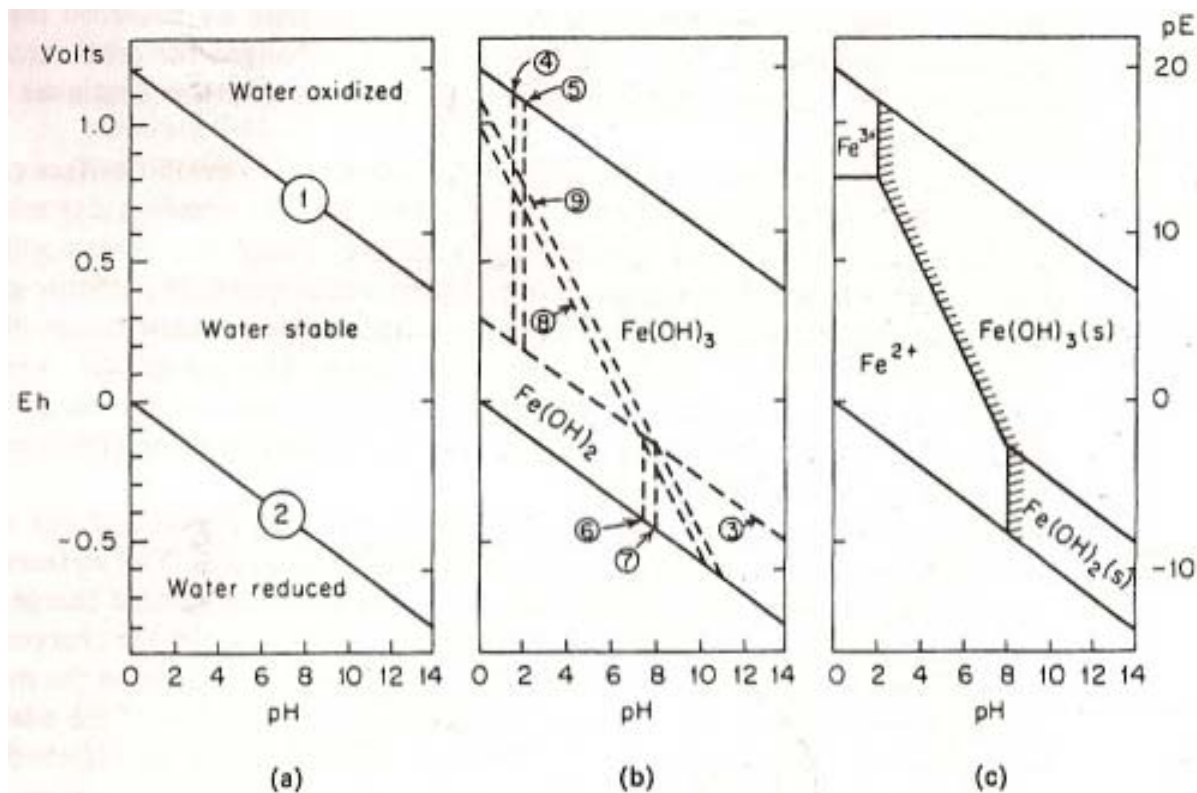


Fuente: L. V. Codina (2008)

pE también puede escribirse como pe.

A partir de este diagrama es posible construir otros diagramas de diferentes elementos o compuestos. Uno de los más utilizados corresponde al elemento Hierro, cuyo diagrama se presenta a continuación:

Figura 4.12: Diagrama pE-pH Hierro a 25°C y 1 atm.



Fuente. Freeze y Cherry. (1979).

En la figura anteriormente presentada, (a) representa el diagrama pE-Eh del agua y sus diferentes estados (Figura 4.11), y las líneas 1 y 2 corresponden a las ecuaciones 4.17 y 4.18 respectivamente. El Diagrama (b) representa el proceso de construcción del diagrama pE-Eh del hierro, y las ecuaciones que representan las líneas dibujadas en el diagrama son las siguientes, las línea 3 está representada por la siguiente ecuación:

$$\log[K] - pH - pE = 0 \quad 4.19$$

Las líneas 4 y 5 están representadas por la siguiente ecuación, evaluando la actividad del Fe³⁺ con los valores [10⁻⁵] y [10⁻⁶] respectivamente.

$$\log[Fe^{3+}] = 0.32 - 3pH \quad 4.20$$

Las líneas 6 y 7 están representadas por la siguiente ecuación, la cual, al igual que en el caso anterior, ha sido reemplazada por la actividad de Fe^{2+} iguales a $[10^{-5}]$ y $[10^{-6}]$ respectivamente.

$$\log[Fe^{3+}] = 10.23 - 2pH \quad 4.21$$

Las líneas 8 y 9 corresponden a la solución de la siguiente ecuación evaluado la actividad del ión de hierro Fe^{2+} en 10^{-5} y 10^{-6} respectivamente:

$$\log[Fe^{3+}] = \log K_{Fe(HO)_3} - 3pH - pE \quad 4.22$$

Luego, el diagrama (c) representa el diagrama pE-pH en limpio del Hierro. Para mayor detalle de la utilización de las ecuaciones y los valores utilizados para la actividad específica consultar a *Freeze & Cherry (1979), Capítulo 3.*

4.5 Adsorción e intercambio de Iones.

4.5.1 Mecanismos.

Material geológico poroso que está compuesto de un porcentaje significativo de partículas coloidales, tienen la capacidad de intercambiar iones presentes en solución mediante la adsorción de éstos en la superficie de la partícula. Las partículas Coloidales tienen diámetros que se encuentran entre los 10^{-3} y 10^{-6} mm. Aunque su tamaño es significativamente mayor que el de las partículas moleculares, éste es suficientemente pequeño para que las fuerzas interfaciales controlen su comportamiento. Un ejemplo de partículas coloidales son las arcillas. En general el proceso de degradación de minerales genera coloides amorfos (poco o no cristalizados) e inorgánicos, los que pueden precipitar como capas de sedimento, por lo que pueden estar presentes incluso en depósitos limpios de arena y gravas.

Los procesos de Intercambio Iónico están limitados exclusivamente a partículas coloidales debido a que éstas tienen una gran carga eléctrica relativa a su área de superficie. La importancia de esta carga superficial es el resultado de:

- Imperfecciones o sustituciones iónicas dentro del entramado cristalino.
- Reacciones de disociación química en la superficie de la partícula.

En particular, en el caso de la sustitución iónica, ésta causa una red de carga negativa o positiva en el entramado cristalino. Esta carga no balanceada es compensada por medio de la acumulación de iones de una carga opuesta en la superficie, a la cual se le conoce con el nombre de *Contra-iones*. Los contra iones componen una capa adsorbente de composición variable. Los iones de esta capa pueden ser intercambiados por otros iones del entramado cristalino de manera que este siga siendo equilibrado.

En materiales geológicos, los coloides que exhiben una característica carga superficial causada por la sustitución iónica son los minerales de arcilla. Los minerales de arcilla pueden ser subdivididos en cinco grupos:

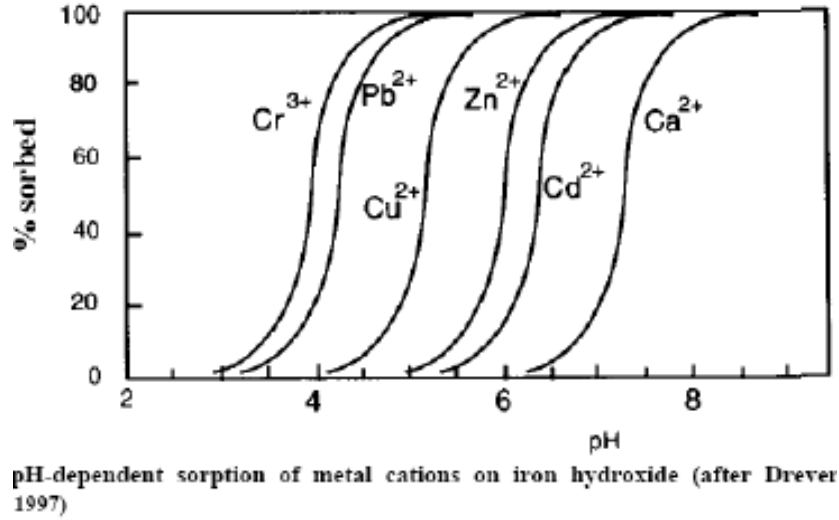
- Caolinita
- Montmorillonita (referido comúnmente como el grupo esméctita)
- Illita
- Clorita
- Vermiculita

Cada grupo puede incluir unas cuantas o varias variedades estructurales y composicionales con nombres minerales separados. Sin embargo, de los 5 grupos mencionados anteriormente, la totalidad de ellos pertenece a capas tipo aluminosilicatos.

El óxido más común en la corteza terrestre y uno de los óxidos simples, característico por superficies eléctricamente cargadas, es el Sílice. Las superficies del sílice contienen iones que no están completamente coordinados, de ahí su carga no balanceada. En el vacío, la red de carga es extremadamente pequeña, pero en exposición con el agua, los sitios de carga son convertidos en grupos de superficie hidróxido que controlan la carga en la superficie del mineral. La carga superficial es desarrollada debido a la disociación de grupos OH^- adsorbidos sobre la superficie particular. Para neutralizar esta carga, una capa adsorbente de cationes y aniones se forma en una zona adyacente a la capa hidroxilada. Este tipo de condiciones de superficie hidroxilada pueden esperarse en todos los materiales oxidados que han tenido un cambio para llegar al equilibrio con el ambiente acuoso. Dependiendo de si la disociación del grupo hidroxil es predominantemente ácida o básica, la carga de la red en la capa hidroxilada puede ser negativa o positiva. La carga superficial puede también ser producida por la adsorción de iones complejos cargados.

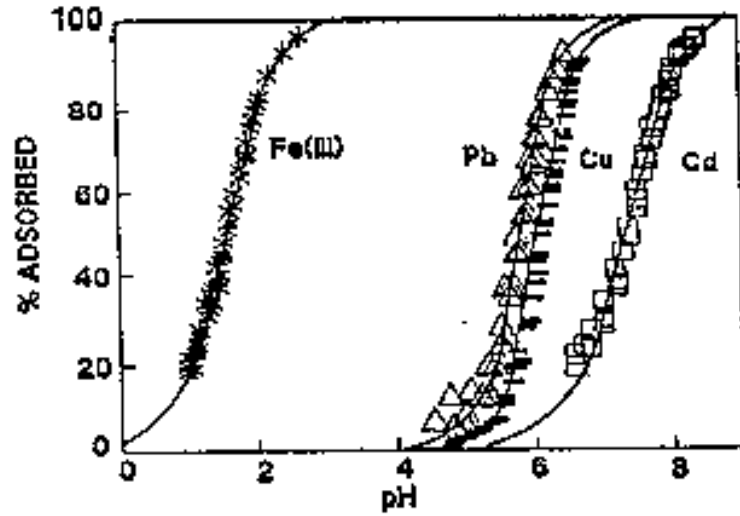
La naturaleza de la carga superficial es función del pH. A pH bajos, una carga superficial positiva prevalecerá, en cambio, a pH altos, una carga superficial negativa se desarrollará. Si el pH tiene un valor intermedio, la carga superficial será cero, una condición conocida como *carga de punto cero* (pH_{zpc}). La tendencia de Adsorción de cationes o aniones dependerá por lo tanto del pH de la solución. Las siguientes figuras ilustran lo comentado anteriormente:

Figura 4.13: Variación de la adsorción de diferentes especies de cationes metálicos en hidróxido de Hierro.



Fuente: L. V. Codina (2008)

Figura 4.14: Variación de la adsorción de diferentes especies de cationes metálicos en Amorfo Silicato



Fuente: <http://www.cepis.org.pe/muwwww/fulltext/repind46/transport/transport.html>

4.5.2 Capacidad de intercambio Catiónico (CEC).

La *Capacidad de Intercambio Catiónico* (CEC) de un material coloidal se define como el exceso de iones contrarios en la zona adyacentes a la superficie o capa cargada, los cuales pueden ser cambiados por otros cationes. La CEC de materiales geológicos se expresa normalmente como el número de miliequivalentes de cationes que pueden ser intercambiados en una muestra con una masa seca de 100 gramos (Freeze & Cherry, 1979).

Por otro lado, Domenico (1997) define a la capacidad de intercambio catiónico como la cantidad de cationes intercambiables adsorbidos en la superficie o indirectamente la carga negativa del suelo. Minerales de arcilla exhiben una preferencia en cuanto a cual ión ocupa un sitio de intercambio y la secuencia más publicada en diferentes investigaciones es la siguiente:



En general, entre mayor la carga sobre un catión, mayor será la afinidad por un sitio de intercambio. Para minerales que deben su capacidad de intercambio a reacciones químicas de disociación en su superficie, la capacidad de intercambio puede depender en gran medida del pH de la solución. La siguiente tabla presenta valores de CEC para diferentes minerales de arcilla:

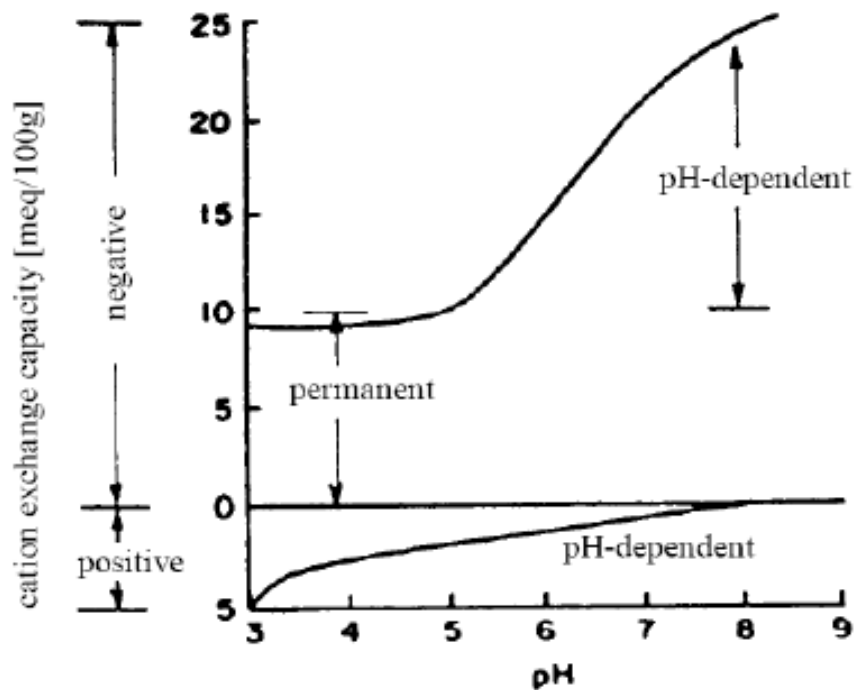
Tabla 4.4: Valores de CEC para los 5 grupos de arcilla.

MINERALES DE ARCILLA	CEC [meq/100gr]
Caolinitas	5-15
Illitas	25
Cloritas	10-40
Vermiculitas	100-150
Montmorillonitas	80-100

Fuente: Domenico & Schwartz. (1997)

xxEl siguiente grafico muestra el comportamiento del CEC para diferentes valores de pH:

Figura 4.15: Comportamiento del CEC para diferentes valores de pH.



Fuente: Codina. (2009)

Los valores positivo y negativo de la capacidad de intercambio catiónico son relativos al valor de la carga de la superficie.

4.5.3 Ecuaciones de Acción de Masas.

Un sistema de intercambio puede determinarse a partir de la ley de acción de masas, para lo cual se asume que existen dos fases características, la primera, asociada a la solución y la segunda, asociada al intercambio (fase de intercambio), la cual representa a todo o parte del medio poroso. Luego, el proceso de intercambio puede ser representado de forma simplificada por medio de la ley de acción de masas (Freeze y Cherry 1979).

El interés sobre los procesos de intercambio catiónico en zonas de aguas subterráneas está comúnmente enfocado en la pregunta de qué le pasaría a la concentración de cationes en aguas subterráneas si éstas pasaran por medio de una zona en la cual la capacidad de intercambio catiónico fuese importante. Cuando el agua subterránea, con una composición particular, se

mueve dentro de una zona de intercambio catiónico, la concentración de cationes se ajustará a una condición de intercambio en equilibrio. Éste equilibrio depende de dos condiciones iniciales principalmente: (1) La concentración de cationes del agua que entra a los espacios porosos donde se produce el intercambio y (2) la fracción de moles de los cationes absorbidos en las superficies porosas previas a la entrada de una nueva agua porosa.

Debido a que las reacciones de intercambio entre cationes y arcillas son normalmente rápidas, la concentración de cationes en aguas subterráneas debería encontrarse en un equilibrio de intercambio.

Intercambios que involucran cationes de la misma valencia son caracterizados, de preferencia, por uno de los iones, solo si el coeficiente de selectividad, que es la tasa de moles de un elemento versus la molaridad del otro, es mayor o menor que uno. El coeficiente de selectividad se define como:

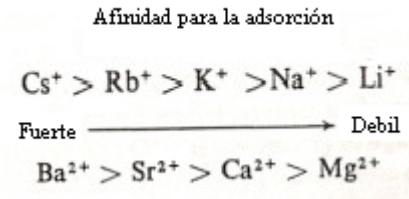
$$N_A = \frac{(A)}{(A)+(B)} \quad \text{y} \quad N_B = \frac{(B)}{(A)+(B)} \quad 4.23$$

$$\bar{K}_{(A-B)} = \frac{\gamma_B^b (B)^b N_{A(ad)}^a}{\gamma_A^a (A)^a N_{B(ad)}^b} \quad 4.24$$

Donde A y B representan los iones intercambiables, γ , representa el coeficiente de actividad y N la fracción molar de A y B. El subíndice (ad) representa la fracción adsorbida de moles de A y B respectivamente.

El orden de preferencia normal para algunos cationes mono y divalentes para la mayoría de las arcillas es:

Figura 4.16: Afinidad para la adsorción



Fuente: (Freeze y Cherry 1979)

Los iones divalentes tienen normalmente una mayor afinidad de adsorción que los monovalentes, sin embargo esto depende, en cierta medida, de la naturaleza del intercambio y de la concentración de la solución. No obstante, se debe tener presente que la dirección en que se realiza la reacción de intercambio catiónico depende de la proporción de la fracción adsorbida en la condición inicial y la proporción de la concentración de ambos iones en la solución.

Las más importantes reacciones de intercambio catiónico en aguas subterráneas son aquellas que involucran cationes monovalentes y divalentes como:

- $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$
- $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$
- $\text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$
- $\text{K}^+ - \text{Mg}^{2+}$

4.6 Intrusión Salina.

4.6.1 Definición.

Los acuíferos costeros entran en contacto con el océano en las cercanías de la línea de costa y bajo condiciones naturales el agua dulce es descargada en el mar, estableciéndose la condición de equilibrio que sólo sufre modificaciones naturales a muy largo plazo, debido a cambios climáticos o movimientos relativos entre la tierra y el mar.

Sin embargo, al existir actividad de carácter antrópica, esta condición natural entre el agua dulce y agua salada, se ve modificada con una intensidad muy superior a la normal, dando origen a un problema de gran complejidad, puesto que además del problema del movimiento del agua subterránea, se suma la existencia de un agua de densidad diferente y miscible, presentándose además pequeñas diferencias de viscosidad y a veces de temperatura.

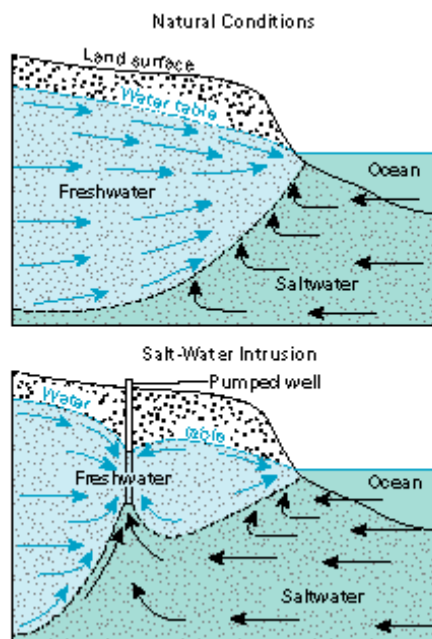
En países como Chile, que disponen de una franja costera extensa, gran parte de su desarrollo económico, como también poblacional, se asienta en estas zonas, incrementando la demanda por el recurso hídrico subterráneo y por tanto, originando que el flujo de agua dulce que naturalmente es descargado hacia el mar disminuya paulatinamente debido a la acción antrópica y por ende causando la incorporación de agua salada a los acuíferos, dando origen al fenómeno de Intrusión Salina.

En términos generales, se llama intrusión salina al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando u ocupando el volumen correspondiente al agua dulce. El agua captada en un acuífero costero se contamina por efecto de la salinización cuando la zona activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de ambos fluidos o por la propia agua salada. Sin embargo, no es este el único proceso de salinización, puesto que si la captación se establece en una masa de agua subterránea dulce por sobre el agua salada, puede producirse un ascenso de agua salada formando un domo o cono salino en la zona de la extracción del recurso hídrico.

Otras veces esta contaminación puede provenir de infiltración de agua de otros acuíferos salinizados, que comúnmente se producen por deficiencias en la construcción y operación del pozo de extracción.

La Figura 4.17 presenta la representación conceptual del problema de intrusión salina, en el caso de la explotación de un pozo cercano a la costa.

Figura 4.17: Representación conceptual del problema de intrusión salina provocada por la explotación de pozos.



Fuente: Molina (2006).

Las técnicas de detección de la contaminación por intrusión salina se pueden clasificar en convencionales y no convencionales (Molina, 2006). Las primeras, se caracterizan por ser utilizadas frecuentemente en el estudio de aguas subterráneas, y corresponden a métodos físicos e hidroquímicos. Las técnicas no convencionales, en cambio, presentan un mayor desarrollo tecnológico que las técnicas convencionales, contribuyendo de manera eficaz en el estudio de la salinización de acuíferos en casos en que no se cuenta con captaciones o puntos de control construidos. Dichas técnicas corresponden a métodos de prospección geofísica y análisis isotópico (En éste último caso se requiere de pozos para realizar el análisis) (Molina, 2006). Las técnicas anteriormente mencionadas se detallan en la sección ANEXO 2.

4.7 Drenaje Acido.

El drenaje ácido se define como aquellas entradas ácidas provenientes de sales metálicas existentes o que se intensifican cuando los trabajos mineros perturban el equilibrio químico de yacimientos de sulfuros metálicos al modificar drásticamente las condiciones naturales predominantes, de condiciones reducidas a oxidadas.

El origen del drenaje ácido se asocia frecuentemente a la oxidación de pirita, siendo esta reacción la principal causante del drenaje ácido de forma natural. En cambio el origen antrópico del drenaje ácido se asocia a la explotación de yacimientos de sulfuros metálicos. En Chile, los minerales sulfurados presentes en la geología local son los siguientes:

Tabla 4.5: Minerales Sulfurados Presentes en la Geología Chilena.

METAL CONTENIDO	NOMBRE MINERAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA
Cobre	Calcosina	Cu_2S
Cobre	Covelina	CuS
Cobre Arsénico	Enargita	Cu_3AsS_4
Cobre Hierro	Calcopirita	$CuFeS_2$
Hierro	Pirita	FeS_2
Hierro Arsénico	Arsenopirita	$FeAsS$
Mercurio	Cinabrio	HgS
Molibdeno	Molibdenita	MoS_2
Plomo	Galena	PbS
Zinc	Esfalerita	ZnS
Manganeso	Albandita	MnS

Fuente: CODELCO (2008)

El proceso de lixiviación, proceso por el cual un fluido que percola disuelve minerales solubles y se incorporan a este dejando los minerales insolubles separados; es activado y acelerado, en general, por bacterias, las que permiten la separación de los minerales solubles. Estos minerales se mantienen en solución solo si el pH de la solución es bajo, luego, si éste aumenta, los metales disueltos se precipitan, formando minerales secundarios como sulfatos, carbonatos, hidróxidos, etc.

Figura 4.18: Expresión genérica de la formación de aguas de drenaje ácido.

Mineral sulfurado + oxígeno + agua = sulfato + acidez + metales

Fuente: CODELCO (2008)

Este fenómeno de lixiviación está controlado por las condiciones climáticas del área, y cuyo impacto en un curso de agua no se observa de forma puntual, sino que de manera difusa, aportada por la escorrentía natural desde una zona de alteración. Dado que el proceso depende de las condiciones climáticas del área, el proceso de lixiviación queda determinado por patrones climáticos y las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas locales, presentando en la mayoría de los casos, una significativa variación estacional e interanual de caudal, por lo que la generación de drenajes ácidos quedará sujeta al régimen hídrico presente en la zona.

5 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD NATURAL EN ACUIFEROS.

5.1 Introducción.

La metodología presentada a continuación se basa en un esquema de análisis desarrollado por el Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) como iniciativa del Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable y seis Agences de l'eau, la cual ha sido adaptada y modificada a las condiciones y realidad actual sobre el conocimiento existente en relación a los acuíferos en el país.

5.2 Definición de la metodología.

La implementación de la metodología para determinar calidad natural en acuíferos se basa fundamentalmente en la información que pueda ser recopilada para un sitio en particular, como también los análisis que se puedan realizar a partir de ésta, como la identificación de estructuras claves para el flujo subterráneo (estratos de mayor permeabilidad, lentes de arcilla, etc.) y el análisis estadístico de las muestras. Para realizar lo anterior, se plantean una serie de etapas que permitirán conocer la calidad natural de las aguas de un determinado acuífero.

Las etapas de la metodología son las siguientes:

- a) Adquisición de la Información Geológica e Hidrogeológica Disponible.
- b) Adquisición Análisis Químicos Disponibles.
- c) Estudio de Elementos Mayores.
- d) Estudio de Elementos Menores o Traza.
- e) Reconocimiento o identificación de los procesos naturales.

Estas cinco etapas, claramente diferenciadas, tienen como objetivo la determinación de la calidad natural de las aguas subterráneas de un acuífero o de un sitio específico, pero como se mencionó

anteriormente, la aplicación de la metodología depende del tipo de información utilizada para ese objetivo, por lo cual se tienen diferentes niveles de aplicación de la metodología, los cuales son:

- **Aplicación Predictiva:** Basada fundamentalmente en el conocimiento teórico entregado por estudios geológicos o hidrogeoquímicos de la zona, tiene como objetivo fundamental definir, en base a los estudios mencionados anteriormente, qué elementos podrían estar presentes en el agua subterránea, y sirve de base para las etapas de análisis posteriores.
- **Aproximación o aplicación Sustractiva:** Este nivel de aplicación tiene como objetivo sustraer o corregir los datos recopilados en los análisis de las muestras. Lo anterior se realiza debido a que los aportes antrópicos y atmosféricos alteran la composición natural del agua subterránea, por lo que su corrección o eliminación permite obtener la composición hidrogeoquímica natural de las aguas subterráneas. Este mecanismo será explicado posteriormente
- **Aplicación Prospectiva:** Tiene como objetivo la realización de recomendaciones sobre el futuro análisis del acuífero, como el planteamiento de mejoras en el sistema de monitoreo o muestreo, incentivar estudios que permitan mejorar el nivel de información de la zona, como estudios geológicos e hidrogeológicos, campañas de muestreo, etc. El objetivo de realizar lo anterior es la determinación futura de la calidad natural del acuífero.

A continuación se procede a explicar cada una de las etapas involucradas en la metodología anteriormente presentada, pero antes se hará mención de un punto de vital importancia dentro de la aplicación de la metodología y que tiene que ver con el nivel de detalle que se puede lograr en la determinación de la calidad natural de las aguas de un acuífero en función de la información disponible.

5.3 Aproximación teórica de la calidad natural en función del nivel de información.

Antes de presentar la metodología es necesario hacer énfasis en relación a los alcances o aproximaciones teóricas que se puedan lograr en la estimación de la calidad natural, es decir, en función del nivel de información disponible, determinar el nivel de detalle que se pueda alcanzar en la definición de la calidad natural del acuífero o del sitio en cuestión. Lo anterior se basa en el hecho de que a mayor nivel de información sobre el acuífero, mayor será el nivel de comprensión acerca de la composición química del agua, su origen y por supuesto de los mecanismos relacionados con la adquisición de su composición. Para analizar los alcances que pueda tener la aplicación de la metodología se debe, en primer lugar, clasificar la información que se recopile para lo cual Chèry (2006) establece 4 niveles de información en función de los datos recopilados.

- **No Geoquímica.**
 - Cartas Geológicas
 - Cartas Hidrogeológicas

- **Geoquímica.**
 - Análisis Químicos de captaciones.
 - Banco de datos de Análisis Químicos
 - Análisis Químicos de aguas superficiales y precipitaciones

- **Geoquímica Específica.**
 - Tesis en Geoquímica o Hidrogeología.
 - Monografías o Estudios de Ingeniería Locales.
 - Estudios de Impacto Ambiental.

- **Geoquímica Específica Complementaria.**
 - Análisis específicos sobre aguas (elementos traza asociados a un problema específico, estados isotópicos o radiogénicos)
 - Análisis específicos sobre la litología en la que está contenida el agua: mineralogía; análisis geoquímicos, etc.

A partir de la información recopilada, se pueden alcanzar tres niveles diferentes de detalle en la determinación de la calidad natural de las aguas de un acuífero, los cuales se mencionan a continuación.

- **Descripción teórica de la composición química de las aguas.**

La descripción teórica se relaciona con la predicción de los elementos que posiblemente se encuentren en el agua subterránea, para lo cual no es necesario utilizar información de origen **No Geoquímico**, ya que solo se trata de una descripción teórica basada en la litología y la hidrogeología de la zona.

- **Eliminación de los datos influenciados por la actividad antrópica.**

La eliminación de datos que se encuentren influenciados por actividades antrópicas desarrolladas en el sector se realiza si se tienen los análisis químicos de las aguas subterráneas, y se basa en la eliminación de aquellas muestras en que los parámetros asociados a la actividad antrópica, como el Cloruro y el Nitrato, sobrepasen cierto límite. Los métodos de eliminación se detallarán posteriormente.

- **Corrección de la contaminación antrópica y reconstrucción de la composición química de las aguas subterráneas.**

Este último método permite la reconstrucción de las muestras representativas de la composición química del agua con la ayuda de parámetros claves. La utilización de análisis isotópicos es fundamental para esta etapa, ya que permiten cuantificar la parte antrópica en la muestra, con lo cual se puede eliminar aquella componente.

Las limitaciones de los resultados que se puedan alcanzar aplicando la metodología se resumen en la Figura 5.1, en la cual se presenta, mediante una matriz, el nivel de detalle que se puede lograr en función de nivel de información disponible, como también el nivel de confianza que se puede esperar.

Figura 5.1: Nivel de detalle y nivel de confianza en la aplicación de la metodología en función de la información disponible.

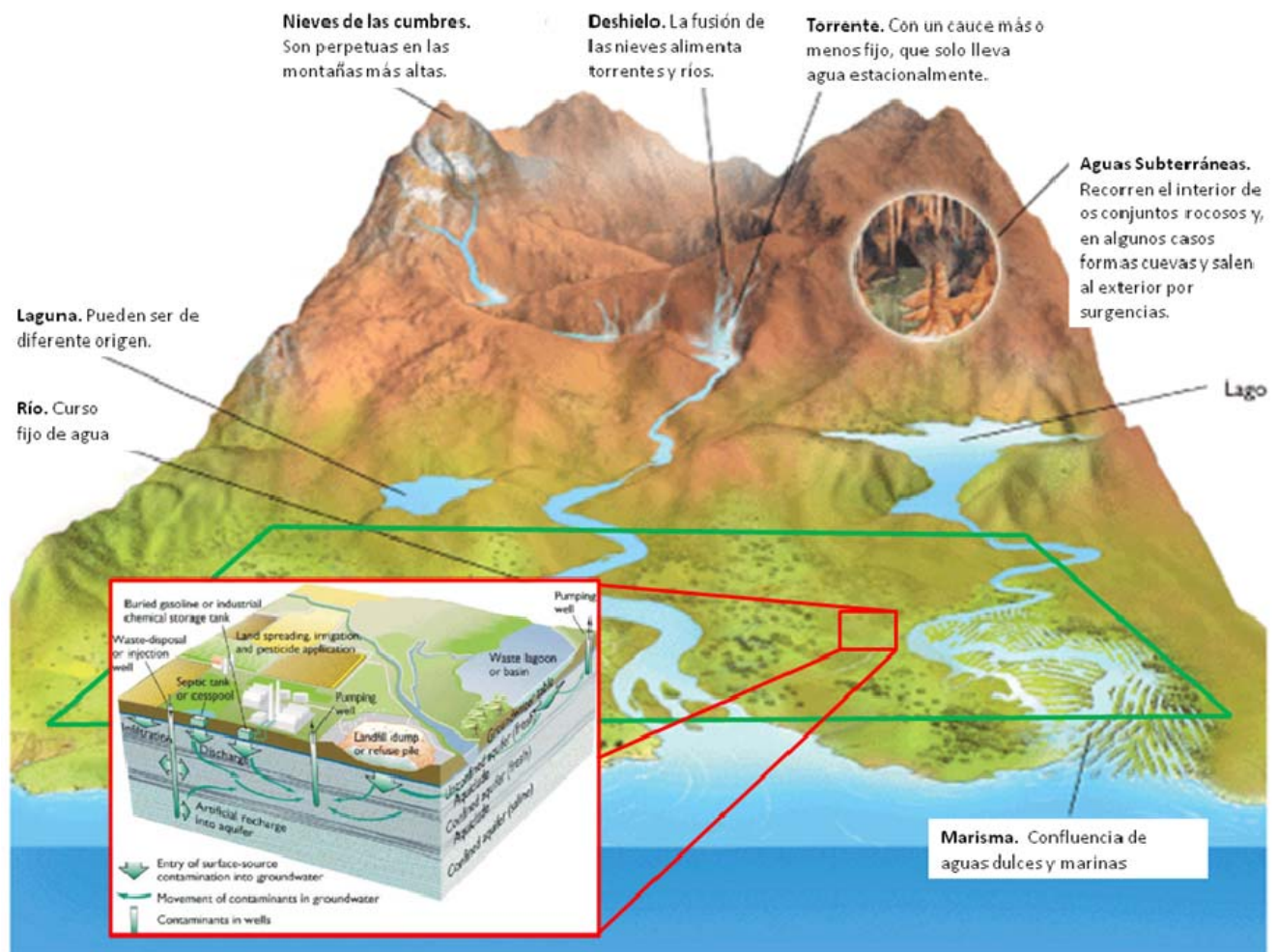
		Método de enfoque factible			Nivel de confianza esperado		
		Simple	Elaborado		Debil	Elevado	
Nivel de conocimiento del acuífero		Descripción teórica de las facies geoquímicas	Compilación de muestras existentes y eliminación de puntos antropologicos	Reconstitución de base natural geoquímica por corrección del aporte antropologico	Cualitativo	Semi-Cuantitativo	Cuantitativo
Debil ↓ Elevada	Base no geoquímica	OK			OK		
	Base geoquímica	OK	OK		OK	OK (mayores)	
	Geoquímica específica	OK	OK	OK		OK (trazas)	OK (mayores)
	Geoquímica específica a adquirir		OK	OK		OK	OK (trazas)

Fuente: Elaboración propia basado en Chèry (2006)

De la Figura 5.1 se desprende que el alcance y la confianza asociada a los resultados obtenidos aumentan a medida que se incrementa el nivel de detalle en la información recopilada, razón por la cual es necesario un nivel adecuado de información para poder generar los resultados esperados para la determinación de la calidad natural.

La Figura 5.2 resume la información requerida para cada escala.

Figura 5.2: Niveles de información requeridos para distintos niveles escala.



Fuente: Elaboración propia basado en www.kalipedia.com y www.efn.uncor.edu.

Luego, la información requerida, según la metodología, es la siguiente:

1. Escala Puntual, u obtenida en el lugar de infiltración (1):

- Niveles piezometricos para determinar gradientes.
- Geología.
- Hidrogeología.
- Muestras históricas, en lo posible, sino Actuales.
- Análisis Isotópicos

2. Escala Local o de Cuenca (2):

- Geología.
- Hidrogeología.
- Actividades Antrópicas desarrolladas.
- Calidad de Aguas Subterráneas Histórica. Recopilada por medio de pozos de la red de monitoreo o de estudios desarrollados en la cuenca.
- Calidad de Aguas Superficial
- Análisis Isotópicos
- Muestreos Actuales, para complementar análisis históricos realizados en estudios.
- Otros estudios Geológicos e hidrogeológicos desarrollados en la cuenca.

De lo descrito en los puntos anteriores se desprende que la información crítica para la determinación de la calidad natural corresponde a la geología, hidrogeología y los análisis de calidad, tanto puntual como localmente, así como las actividades antrópicas desarrolladas en la cuenca, por lo que la integración de la información de ambas escalas es fundamental.

5.4 Desarrollo Metodología.

Una vez mencionados los requerimientos de información, como también los alcances de la metodología, se procede a detallar paso a paso el desarrollo de la metodología, la cual se puede dividir en los siguientes puntos:

- Dimensión del sitio de estudio.
- Adquisición de información geológica e hidrogeológica.
- Adquisición de análisis de calidad.
- Estudio Elementos Mayores y Elementos Traza.
 - Desarrollo del Contexto Geológico e Hidrogeológico.
 - Auditoría de los Análisis Químicos
 - Análisis Estadístico
 - Determinación calidad natural
 - Análisis Hidrogeoquímico
 - Descripción de procesos.
- Análisis Complementarios.

A continuación se procede a explicar, en forma detallada, cada uno de los puntos anteriormente mencionados.

5.4.1 Dimensiones del sitio de estudio.

Dado que la metodología se enmarca dentro del D.S. N° 46, donde se considera la infiltración puntual de un residuo y por ende la estimación puntual de la vulnerabilidad, llámese puntual al hecho de que la infiltración se realiza en una zona definida del acuífero, la información recopilada quedará sujeta a la disponibilidad de la misma en la zona de infiltración.

El tamaño del sitio de estudio puede variar en función del tamaño del sitio del cual sea propietario la entidad que desee infiltrar los residuos; de ahí que, en función de esto, no hay otro límite superior más que el mismo tamaño del sitio, el cual puede ser de varias hectáreas. Sin embargo, el mínimo recomendado debe ser de al menos unos 2 Km de ancho por 2 Km de largo,

de manera de observar los cambios locales que se producen en el agua al pasar por la geología inmediatamente por debajo de esta área.

A lo anterior se debe agregar la necesidad de incorporar información a escalas mayores, de manera de entender de mejor manera lo que ocurre particularmente en el sitio de infiltración. Esto se fundamentará posteriormente.

5.4.2 Adquisición de la Información Geológica e Hidrogeológica.

En esta etapa se debe recopilar la información disponible en relación a la geología del sector o acuífero en estudio. Esta etapa, al igual que todas las demás, quedarán sujetas a la disponibilidad de la información existente en el sector como en las áreas cercanas, tanto aguas arriba como aguas abajo del sentido del flujo de las aguas subterráneas, por lo que la estimación de los flujos mediante el monitoreo de los niveles piezométricos circundantes a la zona se vuelve indispensable

La información que se debe recopilar en esta etapa es básicamente la siguiente:

1. Niveles estáticos de los pozos cercanos al sitio del estudio o la cuenca en la cual se ubica el sitio. De no existir, se deben generar mediante campañas de monitoreo.
2. Geología local, con una escala mínima de 1:100.000 o inferior. Para obtener la geología local se puede recurrir al Servicio Nacional de Geología y Minería, donde se puede verificar la existencia de la información. De no existir, debe ser generada por medio de estudios geológicos llevados a cabo en el área de estudio definida.
3. Estudios hidrogeológicos, ya sea modelos hidrogeológicos de la cuenca en la cual se ubica el sitio, o la generación de la hidrogeología local por medio de la revisión de los expedientes de los pozos existentes en la zona circundante al sitio de estudio. La verificación de la existencia de cartas Hidrogeológicas del sector se debe verificar en el Servicio Nacional de Geología y Minería.

4. Catastro de las actividades industriales, mineras y agrícolas desarrolladas en sectores aledaños al sitio, tanto aguas arriba como aguas abajo. Junto con lo anterior, se debe determinar la ubicación de los asentamientos humanos, como también la ubicación de rellenos sanitarios y lugares de disposición de aguas residuales tratadas y no tratadas. Los antecedentes anteriormente mencionados pueden solicitarse a entidades estatales como la Superintendencia de Servicios Sanitarios, Servicio Agrícola Ganadero, etc.
5. Estudios anexos a los mencionados anteriormente, disponibles en los bancos de datos o bibliotecas de los organismos relacionados con las aguas subterráneas, como por ejemplo el Servicio Nacional de Geología y Minería, Dirección de Obras Hidráulicas, Dirección General de Aguas, etc., y que tengan relación con temas hidrogeológicos y geológicos y que hayan sido realizados a una escala mayor.

La información recopilada anteriormente es de vital relevancia, ya que se utiliza como base para determinar las propiedades hidrogeológicas del sitio del estudio, para realizar los análisis predictivos en relación a los efectos de la geología sobre la composición de las aguas subterráneas, como también generar un esquema general de las actividades antrópicas desarrolladas en las cercanías del sector. En particular, la información recopilada anteriormente permitirá determinar las siguientes variables.

1. Direcciones de flujo: la determinación de los gradientes, por medio de los niveles piezométricos, permite la ubicación de la red de monitoreo en el sitio de estudio.
2. Transmisividades: El conocimiento de las transmisividades puede aportar información en relación al comportamiento del flujo, así como dar una idea de los tiempos de residencia en el sitio o la cuenca.
3. Niveles Piezométricos: Permite no sólo conocer los gradientes y determinar flujos, sino que también permite conocer las estructuras litológicas que tiene contacto el agua subterránea en su movimiento.

4. **Litología:** Permite conocer tanto las rocas como los minerales que están presentes en la geología, y da una idea de los minerales que podrían estar en contacto con las aguas subterráneas, no solo de la cuenca, sino que del sitio de infiltración.
5. **Condiciones de recarga del acuífero:** Permite identificar los principales mecanismos de recarga del acuífero, como la recarga por efecto de un curso superficial, por escorrentía o por interacción con otros acuíferos de la zona. Lo anterior se debe verificar tanto puntualmente como en la cuenca o localidad donde se encuentre el sitio de infiltración.
6. **Identificación de sitios de actividad antrópica:** Permite identificar sitios que podrían generar cambios en la calidad del agua debido a la actividad desarrollada en el sector o la cuenca. Este punto es de vital importancia debido a que permite identificar zonas con mayor o menor impacto, y así, poder determinar criterios adecuados para cada sector en particular.

La información que se detalla anteriormente, sirve de base para el siguiente punto, que corresponde al análisis predictivo. Se recomienda el uso de softwares que permitan el manejo de sistemas de información geográfica como ARCGIS o ARCVIEW, así como también sistemas de procesamiento de imágenes. Estas herramientas permitirán una mejor integración de la información recopilada tanto en este punto como en los demás.

5.4.3 Adquisición de análisis Químicos Disponibles.

La segunda etapa de la metodología consiste en la obtención de las muestras de calidad, tanto de aguas subterráneas como de aguas superficiales, así como también de precipitación. La utilización de análisis de calidad de las aguas subterráneas permiten conocer las características químicas y físicas de las mismas, razón por la cual las muestras deben cumplir una serie de requisitos mínimos para que éstas sean representativas de la química de las aguas del acuífero. Los criterios que deben cumplir los análisis tienen que ver con la representatividad de los mismos en relación al tiempo y el espacio, es decir:

- a) **Representación Espacial:** Los análisis a utilizar deben tener cierta representatividad espacial, esto quiere decir que los datos obtenidos o las fuentes de las cuales fueron

obtenidas las muestras, entiéndase pozos de monitoreo, bombeo y/o observación, deben estar distribuidos uniformemente en el área abarcada por el acuífero o la zona en estudio. Otro punto importante dentro de la variabilidad espacial, tiene relación con la obtención de muestras a lo largo del perfil vertical del acuífero, es decir, considerar la opción de tomar muestras en distintos niveles, de manera de conocer la variabilidad vertical de la calidad.

- b) Representatividad Temporal:** Otro punto importante a destacar tiene relación con la cantidad de análisis o información disponible que existe a lo largo de un periodo de tiempo, es decir, contar con datos de varios años de antigüedad. En relación a este último punto diversos autores plantean como criterio un mínimo de 5 años de monitoreo histórico, lo cual se fundamenta en el hecho de que el tiempo de residencia de las aguas subterráneas es de 2 semanas a 10.000 años (Salbu & Steinnes, 1995), como también que la existencia de análisis históricos puede representar mejor el comportamiento de los componentes químicos presentes en el agua (Mazor, 2004). Dada la dificultad que implica esta adquisición se hace indispensable la recopilación de diversos estudios asociados a la zona, como por ejemplo Memorias, Tesis, Estudios Medio Ambientales, etc., de manera de poder contar con un volumen de información mayor en relación a la calidad del agua del acuífero en estudio.
- c) Representatividad de la muestra tomada:** Este último punto tiene relación con el sitio en el cual se obtiene la muestra, entiéndase un pozo, noria u otro sistema de captación, ya que la influencia la construcción de éstos altera el normal flujo de las aguas subterráneas. Esto último ocurre principalmente en pozos profundos, donde además puede existir mezcla vertical de distintas aguas, por lo que las muestras pueden verse influenciadas por este efecto (Foster & Caminero, 1989). Así mismo, si la muestra obtenida proviene de un sitio cercano a una fuente de contaminación antrópica, esta debe ser eliminada del registro. Una última consideración en este punto tiene que ver con la calidad de las muestras. Esto apunta a la obtención de análisis fiables, para lo cual se debe tener en consideración lo siguiente:
- **Privilegiar muestras más actuales:** Esto tiene origen en la evolución sistemática de las técnicas de análisis de las muestras de calidad, por lo cual se han disminuidos los

límites de detección y aumentado la precisión de los análisis. Por lo que la antigüedad de los sistemas de medición utilizados por los diversos laboratorios certificados, como también de los laboratorios de la D.G.A., se vuelve relevante para verificar la utilización de las muestras en un conjunto único o en años separados en función de los límites de cada parámetro.

- **Identificar el método de análisis aplicado por el laboratorio:** Este punto se complementa con el anterior en términos de que es necesario conocer, de la antigüedad del dato analizado, cual es el tipo de análisis y por ende los límites de detección involucrados.

Una vez considerados todos los puntos anteriores, la información que se necesita recopilar, en relación a los análisis químicos es la siguiente.

1. **Análisis Químicos Actuales:** Estos análisis se deben recopilar en la zona de estudio, previa definición de los flujos subterráneos y sus gradientes, de manera de conocer la dirección predominante del flujo y así definir la ubicación de la red de monitoreo. Las muestras deben ser tomadas en sentido del flujo subterráneo, es decir obtener muestras tanto aguas arriba como aguas abajo, de manera de observar la posible variación espacial de la calidad antes y después de su paso por el sitio de estudio. Es importante que el muestreo actual se desarrolle al menos en 4 épocas estacionales diferentes y con un tiempo mínimo de al menos 3 a 5 años, de manera de observar efectos asociados a la variación estacional. De no poder realizar lo anterior, se debe recurrir a la información histórica existente en la cuenca o localidad donde se encuentre el sitio de estudio.
2. **Análisis Químicos Históricos:** Estos se deben obtener para la cuenca o localidad donde se emplaza el sitio de estudio. Estos datos permitirán, ante una eventual falencia de datos históricos en el sitio, comprobar el comportamiento de las muestras en relación a los datos históricos que se tengan en la cuenca. La recopilación de esta información histórica se debe realizar por medio de la revisión de informes, evaluaciones de impacto ambiental, trabajos de ingeniería relacionados, estudios desarrollados por entidades del Estado, etc., desarrollado en la cuenca o sub cuenca en cuestión. Si el comportamiento de los datos

obtenidos en el punto anterior se encuentra dentro de los rangos históricos observados en la cuenca o sub cuenca, se considerará a estos datos como los representativos de la calidad natural para el sector bajo la justificación del comportamiento similar entre las aguas de la cuenca y el sitio de estudio.

3. **Análisis Químicos de las aguas superficiales:** De existir cursos cercanos al sitio, se debe verificar la calidad del curso superficial, previa confirmación de que la recarga se produzca entre el río y el acuífero y no de manera inversa, ya que en este caso, la obtención de los datos de calidad del curso superficial no serán necesarios. La recolección de los análisis químicos se debe obtener de los estudios existentes en la zona, como de la red de monitoreo de aguas superficiales de la D.G.A. existente en la zona.
4. **Análisis Químicos de las Aguas Lluvias:** A pesar que no son frecuentes en estudios relacionados con el tema de la calidad de las aguas superficiales ni subterráneas, el contar con esta información puede entregar claves en relación al contenido de ciertos parámetros en las aguas subterráneas, siempre y cuando las condiciones hidrogeológicas no digan lo contrario (condiciones confinantes).
5. **Análisis Isotópicos:** Para realizar un estudio detallado de los aportes reales a cada tipo de actividad, como también conocer la edad de las aguas y su origen, en términos de cuál es la recarga con mayor importancia hacen de estos análisis una herramienta necesaria para la determinación de la calidad natural. La realización de estos análisis puede realizarse en conjunto con la toma de muestras actuales en el sitio.

Luego, en función de lo dicho anteriormente, y considerando el esquema de analisis y los ejemplos de aplicación desarrollados por Chèry (2006), así como otros autores como Wendland y otros (2003), se pueden indentificar los parametros críticos necesarios para determinar la calidad natural de las aguas de un acuífero determinado,

Tabla 5.1: Parámetros mínimos a monitorear para determinar la calidad natural.

PARÁMETROS				
pH	Temperatura	SiO ₂	K ⁺	Fe
Eh (pot. Redox)	NO ₂ ⁻	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻	Mn
O. Disuelto	NO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HS ⁻
TDS	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Cu	Al
C. Eléctrica	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	As	

Fuente: Elaboración propia basado en Chèry (2006).

La Tabla 5.1 presenta los parámetros mínimos con que se deben contar para analizar la calidad natural de un determinado lugar de estudio. Los parámetros mencionados permitirán obtener una impresión de los distintos procesos que se produzcan en el sitio de estudio de, evaluar el impacto antrópico, determinar el origen del mismo, etc. A los parámetros anteriormente mencionados se pueden agregar parámetros asociados al tipo de residuo líquido que se desee infiltrar así como también los estipulados por el Decreto Supremo N° 46.

5.4.4 Estudio Elementos Mayores y Menores o Traza.

La siguiente etapa dentro de la metodología tiene relación con el estudio de los elementos mayores y menores o traza. Este estudio, o análisis, puede desarrollarse de manera paralela, es decir, estudiar ambos tipos de elementos en conjunto, o por separado. A continuación se detalla paso a paso el proceso por el cual se determinan los rangos de calidad natural de éstos elementos

5.4.4.1 Descripción del Contexto Geológico e Hidrogeológico.

En esta etapa se utiliza la información del punto anterior para, a partir de las condiciones hidrológicas y geológicas, presentes en la cuenca o el sitio de infiltración, determinar cuáles son aquellos elementos que podrían estar presentes debido a la interacción Agua-Roca, así como también generar hipótesis en relación a las condiciones de recarga y su relación con el contenido de los distintos parámetros analizados, como también identificar zonas con mayor impacto antrópico. Para tener una idea de cómo se comporta el agua con el medio, el capítulo 4 detalla los mecanismos por los cuales el agua adquiere su composición química. Esta etapa puede

desarrollarse de manera individual tanto para los elementos mayores como para los elementos traza, así como también de manera conjunta.

5.4.4.2 Auditoria de los Análisis Químicos.

Un punto importante dentro de la determinación de la calidad natural corresponde la etapa de auditoría de los datos químicos. La auditoria consiste básicamente en la realización de diversas verificaciones, cuyo objetivo es identificar muestras que presenten análisis dudosos o erróneos generados en el laboratorio o en el muestreo en terreno. La auditoria realiza por medio de los siguientes análisis:

1. Balance Iónico: Principal herramienta para identificar muestras que tengan algún grado de error en la determinación en laboratorio. Se considera que las muestras adecuadas para los análisis posteriores deben cumplir con un error de balance inferior al 5%. Muestras que superen este valor, son eliminadas de la estadística general.
2. Chequeos Generales: Estos chequeos permiten identificar muestras con anomalías que deben ser observadas con mayor detalle. Estos chequeos son los siguientes:

Tabla 5.2: Chequeos Generales.

Chequeos generales	
Dureza: $[(\text{Lab}-\text{Calculada})/\text{Lab}]*100$	> 5%
$[(\text{STD}_{\text{medido}}-\text{STD}_{\text{calculado}})/\text{STD}_{\text{medido}}]$	> 5%
$[(\text{STD}_{\text{medido}}-\text{STD}_{180\text{calculado}})/\text{STD}_{\text{medido}}]$	> 5%
$(\text{STD}_{\text{medido}}/\text{C.E.})$	< 0,55 o > 0,75
$(\text{STD}_{\text{calculado}}/\text{C.E.})$	< 0,55 o > 0,75
$(\text{C.E.}/(\Sigma \text{ cationes}))$	< 90 ó > 110
Carbonatos informado por laboratorio	calculado
Montos Relativos de iones	
$\text{K}/(\text{Na}+\text{K})$	> 20%
$\text{Mg}/(\text{Ca}+\text{Mg})$	> 40%
$\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{SO}_4)$	< 50%
$\text{Na}/(\text{Na}+\text{Cl})$	< 50%

Fuente: Hounslow (1995).

Realizados los chequeos, tanto del balance iónico, como los mencionados en la tabla anterior, se puede proceder a la siguiente etapa de la metodología.

5.4.4.3 Análisis Estadístico.

En esta etapa se presenta la estadística descriptiva de los análisis de la química de las aguas subterráneas, identificando, en lo posible, muestras pertenecientes a una geología similar o a un mismo estrato, de manera de observar las posibles diferencias entre las zonas identificadas. Esto permite entre otras cosas verificar las hipótesis en relación a las actividades antrópicas desarrolladas en la zona.

5.4.4.4 Determinación de la calidad natural.

La determinación de la calidad natural de un sitio específico o de una cuenca en particular, se realiza en una serie de pasos, algunos de los cuales han sido mencionados anteriormente, los cuales, de acuerdo al nivel de información disponible o de los mecanismos de remoción o corrección de muestras que se encuentren afectadas por actividades antrópicas, tienen como objetivo entregar los rangos asociados a la calidad natural para cada parámetro estudiado.

De las etapas para determinar la calidad natural se destaca aquel que tiene relación con la remoción o corrección de la estadística disponible, ya que dependiendo de la ventana temporal o de la dispersión espacial, es el tipo de método de remoción que se puede aplicar.

5.4.4.4.1 Métodos de remoción de análisis influenciados por actividad antrópica.

A continuación se detalla los mecanismos de determinación de la Niveles Naturales de la Calidad. Es importante destacar que la aplicación de estas metodologías queda a elección de cada usuario, pero se debe recalcar que es necesario contar con una estadística importante para el desarrollo de cada una de las metodologías presentadas a continuación.

a) Derivación de los niveles y umbrales naturales para cuerpos de agua subterránea en el Valle Superior del Rhine.

Esta metodología fue desarrollada por Wendland, y otros (2006) y establece, en base a otros estudios desarrollados en Europa, el “Método del Preselección, el cual corresponde a la selección de muestras bajo un límite determinado de concentración, siendo aplicable a amplias zonas geográficas y sin la necesidad de contar con un análisis estadístico mayor. Esta idea se basa en que existe una correlación entre la concentración de ciertas sustancias indicadoras y la influencia de actividad antrópica, caso en el cual la calidad natural se determina a partir de los análisis químicos de las aguas subterráneas seleccionadas bajo el establecimiento de una concentración límite para estas sustancias asociadas a actividades antrópicas (Wendland, y otros, 2006).

El establecer límites específicos para estos parámetros tiene la desventaja de que las concentraciones de estas sustancias pueden estar ligadas tanto a fenómenos antrópicos como naturales, de ahí la necesidad de vincular más indicadores a éstos parámetros, como es el caso del amonio con el nitrato, y el amonio con el potasio.

Wendland, y otros (2006) hacen, además, una diferenciación entre los indicadores para ambientes reducidos y oxidados, lo que permiten eliminar muestras de acuerdo a estas dos condiciones. El criterio de selección o el método de preselección establecido responde a parámetros característicos de la contaminación antrópica, como el nitrato y el amonio, así como también según el tipo de acuífero presente, el cual se determina según las concentraciones de hierro y oxígeno disuelto presentes en el agua subterránea. Los criterios de exclusión de muestras se presentan a continuación.

- Exclusión de muestras que presenten sustancias puramente antrópicas.
- Para ambientes o acuíferos oxidados: Nitrato > 10 mg/L (condiciones oxidadas: $O_2 > 2$ mg/L y $Fe(II) < 0.2$ mg/L)
- Para ambientes o acuíferos reducidos: Amonio > 0.5 mg/L (condiciones reducidas $O_2 < 2$ mg/L y $Fe(II) > 0.2$ mg/L)

Luego, una vez excluidas las muestras según los criterios anteriores, se puede obtener la calidad natural, lo cual se realiza a partir de los percentil 90 (P_{90}) y el Percentil 10 (P_{10}) de la distribución de las concentraciones que no fueron removidas.

Obtenidos los valores asociados al percentil 90 de cada uno de los parámetros, se procede a obtener los valores umbrales (TV) asociados a éstos. Los valores umbrales se obtienen a partir de los niveles obtenidos en la etapa anterior (valores asociados al percentil 90), valores de referencia (REF) asociados principalmente a normativas relacionadas con agua potable (Drinking Water Standard Value, DWS) y normativas relacionadas con la calidad medio ambiental (Environmental Quality Standard, EQS). Luego el cálculo del valor umbral asociado a un parámetro determinado estará dado por las siguientes condiciones.

- Caso 1: Calidad natural (NBL) \leq Valor de referencia (DWS o EQS). En este caso el valor umbral (TV) de la concentración quedará dado por la siguiente expresión:

$$TV = (REF + NBL) / 2 \quad \mathbf{5.1}$$

- Caso 2: NBL menor a un tercio del valor de referencia. En este caso el valor umbral (TV) queda dado por la siguiente expresión:

$$TV = 2 \cdot NBL \quad \mathbf{5.2}$$

- Caso 3: $NBL \geq$ valor de referencia. En este caso el valor umbral (TV) queda dado por la siguiente expresión:

$$TV = NBL \quad \mathbf{5.3}$$

La metodología presentada requiere de una cantidad considerable de muestras, debido a que existe una remoción importante de datos, si es que éstos no cumplen con los criterios establecidos en los puntos anteriores. Las ventajas de esta metodología están asociadas a la ventana de muestreo, ya que se requiere de un muestreo actual con una gran cantidad de puntos de muestreo (buena dispersión espacial), y que es un método fácil de desarrollar, ya que únicamente se

requiere conocer el percentil 90 para determinar el valor asociado a la calidad natural, y conocer la normativa que servirá de referencia para determinar los valores umbrales de las concentraciones.

b) Guía Técnica: Calidad Natural de Aguas Subterráneas. Método de Caracterización de los estados de referencia de acuíferos Franceses.

Esta metodología fue desarrollada por Blum A., Chéry L., Barbier J., Baudry D., Petelet-Giraud E. en el año 2002 (Chéry, 2006), y es la base para la metodología descrita en esta tesis, aunque como se mencionó anteriormente, con ciertas modificaciones de acuerdo con la realidad sobre el conocimiento existente sobre los acuíferos actualmente en nuestro país, como también a la información disponible en relación de análisis químicos.

El mecanismo por el cual se determina la calidad natural se basa en un método de preselección, en el cual se identifican o parámetros sustancias indicadoras del impacto de las actividades antrópicas en la zona de estudio. Chéry (2006) establece que estos parámetros son:

- Nitrato: Cuyo contenido debe ser menor a 10 mg/L.
- Fosfato (PO_4): Cuyo contenido debe ser menor a 0.1 mg/L.
- Amoníaco: Cuyo contenido debe ser menor a 0.1 mg/L.

Los límites anteriormente mencionados hacen referencia a un agua subterránea con poco o casi nulo impacto antrópico.

Otros parámetros identificados en esta metodología, asociados a impactos antrópicos, son el Cloruro, el cual se debe estimar de acuerdo a las condiciones geológicas y antrópicas del sitio de estudio, por lo que se debe analizar para cada caso en particular; el hierro y el sulfato, estos dos últimos asociados a drenaje ácido, por lo que también requieren del análisis local para determinar los límites según geología y actividades antrópicas. Luego las muestras que cumplan estos criterios serán eliminadas de la base de datos original, debido a que presentan algún grado de alteración por efecto de las actividades antrópicas desarrolladas en el sector.

Chèry (2006), establece además que se debe remover el efecto atmosférico y el efecto de los aportes antrópicos, lo cual se realiza por medio de las siguientes expresiones:

- Corrección de la concentración en función de la altura a la cual se presenta la precipitación:

$$[X] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i [X]_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \right) \quad 5.4$$

Donde $[X]_i$ corresponde a la concentración de un elemento X en la lluvia y H_i corresponde a la altura de la precipitación del episodio i.

- Corrección de las muestras por entradas atmosféricas.

$$[X]_{COR} = [X]_{RÍO} - \left(\frac{[X]_{LLUVIA}}{[Cl]_{LLUVIA}} \cdot [Cl]_{Lrío} \right) \quad 5.5$$

Donde $[X]_{COR}$ corresponde a la concentración del elemento X corregida por entradas atmosféricas, $[X]_{RÍO}$ concentración elemento X contenido en las aguas del río, $[X]_{LLUVIA}$ elemento X contenido en agua de lluvia, $[Cl]_{lluvia}$ Cloruro contenido en agua lluvia y $[Cl]_{río}$ Cloruro contenido en agua del río.

- Corrección por aportes antrópicos

Esta se realiza a partir del contenido de cloruros contenidos en la lixiviación de fertilizantes naturales (estiercol) y el contenido de cloruros corregidos por el aporte atmosférico.

$$[X]_{COR} = [X]_{RÍO_ATM} - \left(\frac{[X]_{Fertilizante}}{[Cl]_{Fertilizante}} \cdot [Cl]_{RÍO_ATM.} \right) \quad 5.6$$

Donde $[X]_{COR}$ corresponde a la concentración del elemento X corregida por los aportes antópicos, $[X]_{RÍO_ATM}$ es la concentración elemento X corregido por aportes atmosféricos, $[X]_{Fertilizante}$ es la concentración elemento X contenido en la lixiviación o lavado de fertilizantes, $[Cl]_{Fertilizante}$ es el Cloruro contenido en la lixiviación o lavado de fertilizantes y $[Cl]_{RÍO_ATM}$ es el Cloruro corregido por aportes atmosféricos.

A partir de las expresiones mencionadas anteriormente, se obtienen los valores medios y las desviaciones estándar, como también los máximos y mínimos, siendo estos los rangos asociados a la calidad natural del sitio de estudio.

Las ventajas de esta metodología radica en su simpleza, pero es necesario el conocimiento de diversos niveles de información para poder realizar una determinación adecuada de la calidad natural (Figura 5.1). Lo anterior genera que la aplicación de la metodología no sea elemental, ya que es necesario conocer las propiedades hidrogeológicas, geológicas y las actividades antrópicas desarrolladas en la zona para poder generar los análisis predictivos y los análisis posteriores, lo que puede convertirse en una desventaja para el usuario. Otra desventaja es que, dado que se requiere de niveles elevados de información, la remoción tanto de los efectos atmosféricos como los antrópicos se dificulta, así como también la discriminación de los aportes reales de recarga, contaminación antrópica entre otros datos asociados al conocimiento de análisis isotópicos desarrollados en la zona. La estadística histórica de análisis también se convierte en otra dificultad, ya que el método requiere de un volumen considerable de muestras para analizar.

c) Determinación de las concentraciones naturales de aguas subterráneas de estructuras hidrogeológicas de Alemania.

Esta técnica fue desarrollada por Wendland, Hannappel, Kunkel, Schenk, Voigt, & Wolter (2003) la cual, a diferencia a las otras dos metodologías presentadas anteriormente, presenta las siguientes diferencias sustanciales.

1. Se asume que las distribuciones de las concentraciones muestreadas es el resultado de la suma de dos distribuciones independientes entre sí. La primera asociada a la componente

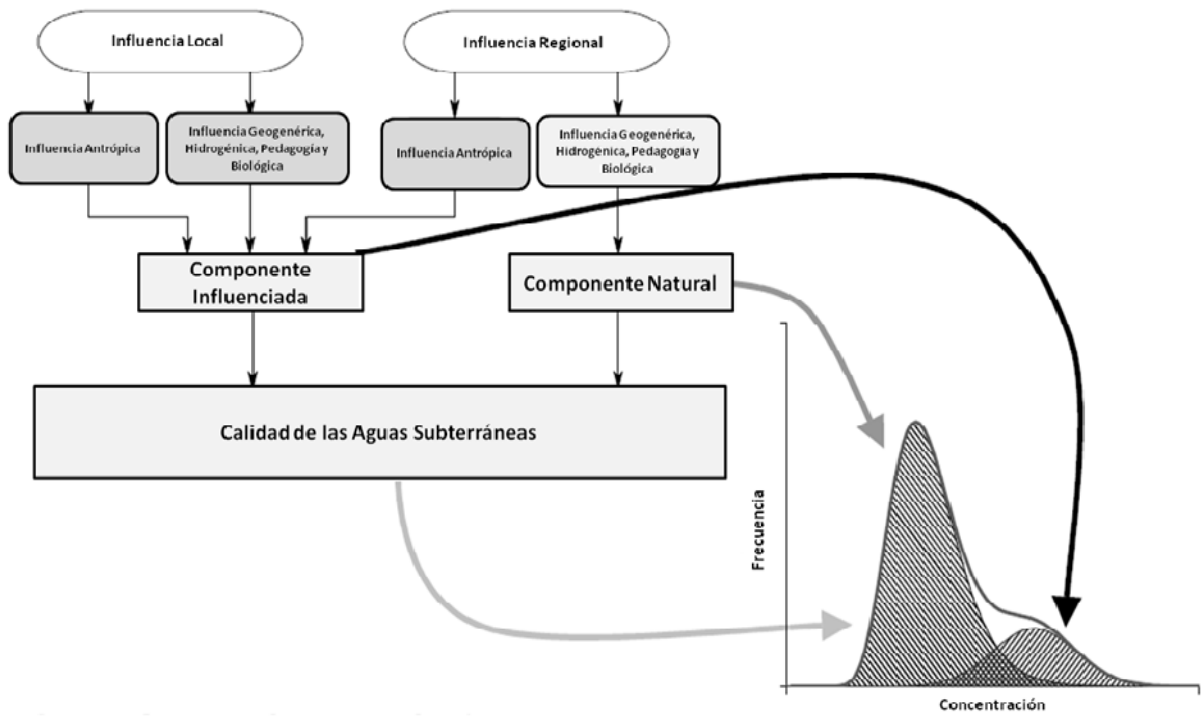
natural del parámetro, y la otra correspondiente a la componente antrópica, por lo que se obtiene la siguiente relación.

$$f(c)_{obs} = f(c)_{nat} + f(c)_{ant} \quad 5.7$$

Donde $f(c)_{obs}$ corresponde a la distribución de los datos observados para un cierto parámetro, $f(c)_{nat}$ corresponde a la distribución asociada a la componente natural de los datos observados y $f(c)_{ant}$ corresponde a la distribución asociada a la componente antrópica de los datos observados. El concepto general de lo descrito anteriormente se presenta en la Figura 5.3

2. No existe remoción de muestras, ya que este método permite la remoción del efecto antrópico de los datos observados sin la aplicación de criterios, como los establecidos en los dos métodos anteriores, es decir, no existe un método de preselección.

Figura 5.3: Modelo conceptual de los aportes naturales y antrópicos que conforman la distribución de las muestras observadas.



Fuente: Voigt, Hannappel, Kundel, & Weandland (2005)

Es importante recalcar que la forma de las distribuciones asociadas a la componente natural y antrópica son conocidas a priori, ya que se establece que las concentraciones naturales siguen una distribución del tipo LogNormal, esto debido a que se espera que el contenido natural de un determinado parametro esté asociado a procesos de Oxido Reducción producidas en el ambiente subterráneo o por la degradación de rocas presentes en el medio, en cambio las distribuciones asociadas a la componente antrópica siguen una distribución del tipo Normal. (Wendland, Hannappel, Kunkel, Schenk, Voigt, & Wolter, 2003)

La metodología para determinar el ajuste de ambas distribuciones se realiza mediante la determinación de tres parametros claves: Amplitud, Media y Varianza. El ajuste de ambas distribuciones a la de los datos observados se realiza mediante algoritmos estantádares que permiten manejar los párametros anteriormente mencionados y lograr un calce adecuado. Este ajuste debe ser tal, según los trabajos desarrollados por Wendland, Hannappel, Kunkel, Schenk, Voigt, & Wolter (2003) que se presenten correlaciones de una valor cercano a 1 (0.99).

Una vez determinados los parametros de las distribuciones asociadas a la componente natural y antrópica, se determinan los rangos de calidad natural, los cuales corresponden a los valores asociados a los percentiles 10 y 90, valores propuestos por Blum y otros (2006) para determinar la calidad natural.

Las ventajas de este método de determinación tienen relación con el hecho de que no se eliminan muestras de la base datos original, que es un método que tiene fundamentos matemáticos y estadísticos, y que ha sido probado en diferentes oportunidaes (Wendland, Hannappel, Kunkel, Schenk, Voigt, & Wolter (2003) y Voigt, Hannappel, Kundel, & Weandland (2005)) y que puede utilizarse información de calidad actual.

Las desventajas del método tienen relación con el ajuste que se pueda lograr de ambas distribuciones y la distribución de los datos observados, asi como tambien las complejidades matemáticas asociadas a los algoritmos que permitan el ajuste de las distribuciones y que por ende hacen de este metodo uno de los más complejos de realizar. Otras dificultades, no menores, tienen relación con la cantidad de datos que se requiere para generar las distribuciones, por lo que para su aplicación es necesario una ventana de muestreo importante o un area considerable de estudio; otra dificultad asociada al metodo tiene que ver con el hecho que las distribuciones

asociadas a la componente natural siguen una distribución tipo LogNormal, fenómeno que se asocia a procesos de Oxido Reducción y a degradación de la roca presente en el medio, pero no considera fenómenos como la recarga producida por cuerpos superficiales (caso acuífero en ciclo superficial (Freeze & Cherry, 1979)) por lo que las distribuciones pueden no seguir necesariamente una distribución del tipo LogNormal, lo que derriba una de las hipótesis centrales de la metodología, por lo que la metodología no podría ser aplicada en este caso.

5.4.4.4.2 Definición de Criterios para Determinar la Calidad Natural.

En base a las metodologías planteadas anteriormente, y en función del nivel de conocimiento existente en Chile sobre sus acuíferos, se ha considerado que las metodologías que podrían tener mejores resultados a nivel nacional son las desarrolladas por Wendland, y otros (2006) y por Chèry (2006), las cuales establecen un “metodo de preselección” claro y consistente con la actividades desarrolladas en el País, como lo es la agricultura, y permiten establecer los niveles de calidad natural mediante un analisis estadístico simple.

Definido lo anterior, el siguiente paso constituye la definición de los criterios que permitirán seleccionar aquellas muestras que no presenten impacto antrópico, y que por ende, permitan determinar la calidad natural del sitio o del acuífero, para lo cual es necesario tomar en consideración las actividades desarrolladas y al geología presentes en la zona de estudio. La definición de los criterios se basará en los siguientes puntos:

1. **Identificación de zonas con mayor impacto antrópico:** Esto permitirá analizar los contenidos de cloruro, sulfato, nitrato entre otros en relación a otros sectores menos contaminados. Lo anterior se desarrollará en el caso en que se conozcan las condiciones generales de la cuenca donde se ubique el sitio, como geología, actividades antrópicas desarrolladas, etc., ya que su aplicación al sitio de infiltración no sería posible debido a que no podría no existir una diferenciación por sectores más o menos contaminados.
2. **Determinación de niveles límite:** En base al punto anterior, se deben determinar los valores límites de cada parámetro asociado con las actividades antrópicas. Esto se realiza a nivel de cuenca o sub cuenca, y en el caso de existir una diferenciación por geología u otra clasificación, esto debe realizarse para cada una de ellas. Luego, se asume que los

límites de la cuenca o el sector en el cual se encuentra el sitio de infiltración son aplicables a éste último.

Definidos los límites para el sitio de estudio y para la cuenca o sub cuenca, se procede a la determinación de los rangos de calidad natural.

5.4.4.4.3 Determinación de los rangos de calidad natural.

La determinación de los rangos de calidad natural puede desarrollarse de cualquiera de las tres formas mencionadas anteriormente. La aplicación dependerá fundamentalmente del nivel de información disponible en términos del número de muestras analizadas, tiempo desde que se han realizados los muestreos, entre otros. En general se espera lo siguiente:

- Si la información disponible, en términos de que la cantidad de muestras, es bajo, pero su representatividad espacial es adecuada, los rangos de calidad natural corresponderán al máximo y al mínimo registrados en la estadística general ya procesada.
- Si la información disponible, en términos de la cantidad de muestras, es importante y la representatividad espacial es adecuada, entonces los rangos de calidad se determinarán por medio de los percentiles 10 y 90 de la distribución de los datos seleccionados por los criterios establecidos anteriormente.
- Si existe una estadística histórica anexa al estudio de calidad actual desarrollado en el sitio de estudio, y los parámetros muestreados en este estudio se encuentran dentro de los máximos y mínimos registrados en la estadística histórica anexa, y si las características geológicas e hidrogeológicas son similares, entonces la determinación se hará tanto para los datos actuales como para los datos históricos. Si los rangos de calidad son similares, se aceptarán los datos históricos como los datos que definen los rangos de calidad natural.

5.4.4.5 Análisis Hidrogeoquímico.

Definidos los rangos de calidad natural se deben analizar los resultados obtenidos, comparándolos fundamentalmente con la etapa predictiva, así como también estudiar los efectos

que genera el flujo ante avance por el medio. Los análisis generales que se pueden realizar para observar el comportamiento del agua subterránea en su paso por el sitio de estudio son los siguientes:

- Cálculo de índices geoquímicos: Estos índices permiten establecer, de manera general, con qué tipo de roca han tenido contacto las aguas subterráneas y cuál sería el origen de ciertos parámetros. Estos índices se presentan a continuación:

Tabla 5.3: Relaciones Iónicas Útiles.

RELACIÓN	AGUA CONTINENTAL	AGUA MARINA	INFORMACIÓN QUE APORTA
rMg/rCa	0.3 - 1.5	igual o similar a 5	igual o similar a 1: Terrenos dolomíticos
			> 1: Silicatos magnésicos (Basaltos, Garbos)
			> 1 y ↑ Implica intrusión marina
			Si ↑ + ↑ Cl implica intrusión marina
			↑ al precipitar CaCO ₃
			↓ al disolver CaCO ₃
rCl/rHCO ₃	0.1 - 5	20 - 50	Si ↑ + ↓ SO ₄ implica reducción sulfatos
			↓ al disolver CaCO ₃ (aportes de sales)
			↑ al precipitar CaCO ₃
			↑ implica mineralización
rSO ₄ /rCl	0.2 - 0.4	0.11	↑ implica intrusión marina
			↑ implica mayor dureza
			Similar al anterior en aguas algo salinas;
rK/rNa	0.001 - 1	0.02 - 0.025	↓ implica reducción de sulfatos
			↑ implica contaminación agrícola / industrial
rNa/rCa rNa/(rCa+rMg) rNa/rMg	Variable	Variable	↑ implica intrusión marina
			Origen Continental o marino del K. Limitada si existe adsorción de Na o K.
Icb = (rCl - r(Na+K))/rCl	Variable	Variable	Deducir procesos de intercambio iónico. Método: Comparar con el valor de cada relación en el terreno, ver evolución espacial y temporal
			↑ implica intercambio iónico de endurecimiento (intrusión salina) ↓ implica intercambio iónico de ablandamiento (lavado del agua salina)
rBr/rCl rHalógenos/rCl	Variable pero < que en agua de mar	1.7 - 10 ⁻³	Indica el origen: Marina, continental, residual,.....
rCa/rCl rMg/rCl rNa/rCl			Indican intercambios iónicos, precipitaciones, disoluciones, origen del agua, etc.
rNO ₃ /rCl			Indica posible contaminación agrícola y procesos de reducción
Cualquier otra que tenga significado local ayuda a interpretar el origen de la composición química del agua del acuífero. Icd: Índice de cambio de bases.			

Fuente: Hounslow (1995).

Tabla 5.4: Índices utilizados para deducir la roca en contacto con el agua subterránea.

PARÁMETRO	VALORES	CONCLUSIONES
SiO ₂	> 0.5	Vidrio Volcánico o Agua Termal
HCO ₃ ⁻ /SiO ₂	> 10	Intemperismo (Meteorismo) de Caliza
	> 5 y < 10	Ambiguo
	< 5	Intemperismo de Silicato
SiO ₂ /(Na+K-Cl)	< 1	Cambio Catiónico
	> 1 y < 2	Intemperismo de Albita
	> 2	Minerales ferromagnesianos
(Na+K-Cl)/(Na+K-Cl+Ca)	> 2 y < 0,8	Posiblemente intemperismo de plagioclasa
	< 0,2 ó > 0,8	Improbable intemperismo de plagioclasa
Na/(Na+Cl)	> 0,5	Fuente Na otro que halita (Albita o Cambio iónico)
	= 0	Solución de Halita
	< 0,5; STD > 500	Ablandamiento reverso, agua de mar
	< 0,5; 50 < STD < 500	Error Analítico
Mg/(Ca+Mg)	>> 0,5; STD < 50	Agua de Lluvia
	HCO ₃ ⁻ /SiO ₂ > 10	Intemperismo de caliza
	= 50	Intemperismo de Dolomita
	< 0,5	Intemperismo de Dolomita-Caliza
	> 0,5	Solución de dolomita, precipitación de calcita o agua marina
Ca/(Ca+SO ₄)	HCO ₃ ⁻ /SiO ₂ < 5	Intemperismo de Silicato
	> 0,5	Minerales ferromagnesianos
	< 0,5	Intemperismo de granitos
	= 0,5	Solución de Yeso
(Ca+Mg)/SO ₄	< 0,5; pH < 5,5	Oxidación de pirita
	< 0,5; pH neutro	Remoción de Ca-cambio iónico o precipitación calcita
	> 0,5	Ca no de yeso-Carbonatos o Silicatos
	> 0,8 y < 1,2	Deodomilitización
TDS calculado (mg/L)	> 500	Intemperismo de caliza o salmuera o agua marina
	< 500	Intemperismo de Silicato
Cl/Σaniones	> 0,8; STD > 500	Agua de mar, o salmuera; o evaporíticos
	< 0,8; STD < 100	Agua de Lluvia
	< 0,8	Intemperismo de roca
HCO ₃ ⁻ /Σaniones	> 0,8	Intemperismo de Silicato o Caliza
	< 0,8; Sulfato alto	Solución de Yeso
	< 0,8; Sulfato Bajo	Agua del Mar o Salmuera
Indice de Langelier (Calcita)	Positivo	Super Saturado con respecto a Calcita
	0	Saturado con respecto a calcita
	Negativo	No-Saturado con respecto a Calcita

Fuente: Hounslow (1995).

Las relaciones anteriormente presentadas se determinan en meq/L.

- **Determinación de diagramas:** Como diagramas de Piper, Stiff, bidimensionales de dispersión. Estos diagramas permiten conocer entre otras cosas el tipo de agua, y su comportamiento tanto espacial, como temporalmente. La utilidad de estos diagramas es que permiten verificar fenómenos como el aumento o disminución de las concentraciones de ciertos parámetros en función de otros, o su variación espacial, así como también el efecto de las actividades antrópicas sobre el comportamiento de las concentraciones de los parámetros analizados.
- **Diferenciación acuíferos:** Si es que se tiene esta condición, se debe analizar el acuífero freático de manera conjunta con el confinado, de manera de poder establecer mecanismos de mezcla entre ambos acuíferos, así como también analizar la calidad natural del acuífero confinado
- **Análisis de los estudios isotópicos:** Estos análisis permitirán identificar el origen de la contaminación, el origen del agua subterránea estudiada, como también la edad de la misma. Esos datos permitirán cuantificar la contaminación antrópica, de manera de identificar de manera más detallada el origen de la misma, así como también verificar la existencia de procesos determinados como oxido reducción, drenaje ácido, intrusión salina, etc.
- **Relación grafica entre cloruro vs nitrato, nitrato vs Sulfato, entre otros:** Estas relaciones podrán entregar una idea del comportamiento de las muestras en relación con su ubicación a sectores con una actividad antrópica importante. Estos tipos de gráficos pueden servir para determinar los criterios para los límites para los valores de cloruro y nitrato, entre otros parámetros, por lo que su determinación se puede realizar en la etapa de análisis predictivo.
- **Determinación de Índices de Solubilidad:** Estos índices, como se establece en el capítulo 4.3, permiten conocer el proceso predominante en el sitio de estudio, ya sea de precipitación, disolución o equilibrio, por lo que su determinación es fundamental para entender este tipo de procesos. La utilización de software como el PHREEQC permiten la estimación de estos índices.

5.4.4.6 Descripción de procesos.

Una vez estudiadas las características hidrogeoquímicas del agua subterránea, se pueden determinar los procesos que controlan la composición química de estas. La descripción de los procesos dependerá exclusivamente del nivel de información disponible, ya que a menor detalle en la información, el detalle en la descripción será menor. Esta etapa está influenciada además por la estadística histórica disponible, ya que si no se cuenta con una estadística adecuada, los procesos, que no se producen sino en tiempos superiores a meses o años, no podrán ser descritos con mayor detalle, y la descripción quedará limitada a una descripción puntual de un fenómeno que puede ser general o particular.

5.4.5 Análisis Complementarios.

Los análisis complementarios se refieren a análisis del punto de vista estadístico por medio de la aplicación de herramientas que permiten la clasificación de muestras de acuerdo a su similitud de las covarianzas de un parámetro en relación a otros, creando así familias que presentan características similares. Estas herramientas permiten profundizar el conocimiento de la zona de estudio, pudiendo ésta estar dentro de una familia particular, lo que permitiría no solo analizar este sitio en particular sino que a varios contenidos en estas familias. Es importante recalcar que estos análisis deben ser realizados y comparados con otras fuentes de información, principalmente geológicas, ya que estas herramientas se utilizan para clasificar familias según la geología existente en la zona, por lo que los resultados obtenidos al aplicar estas herramientas no deben interpretarse sin la debida información y conocimiento de las características locales.

Las herramientas estadísticas, más conocidas como análisis multivariable, son las siguientes:

- Análisis de Componentes Principales o ACP.
- Análisis de Cluster.

Ambos análisis pueden ser realizados tanto para las variables muestreadas como para las observaciones realizadas.

5.5 Síntesis de la metodología presentada.

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal de la metodología es determinar la calidad natural de las aguas de un acuífero determinado. Este objetivo queda sujeto a varios factores como los niveles de información, los análisis, tanto hidrogeoquímicos como estadísticos que se realicen a partir de la información recopilada, etc., siendo el más crítico el nivel de información que pueda recopilarse sobre el sitio de estudio, ya que como se observó en la Figura 5.1 y la Figura 5.2, la información que se requiere para la determinación de la calidad natural determinará en gran medida el alcance de la aplicación de la metodología, y por ende, el nivel de detalle que se pueda alcanzar tanto en los análisis a realizar como en las conclusiones que se puedan obtener.

La presentación de las tres metodologías para determinar los rangos de calidad natural demuestran la existencia de variadas técnicas disponibles para determinarla; aunque de las tres metodologías descritas anteriormente, las dos primeras resultan ser las más aplicables en términos de la menor dificultad matemática que implica su aplicación. Sin embargo, a pesar que las dos primeras metodologías son menos complicadas desde el punto de vista matemático, existe una diferencia no menor, y que tiene relación con el nivel de conocimiento sobre el acuífero de estudio. En el caso de la primera metodología, el nivel de conocimiento que se debe tener sobre el acuífero es menor que en el caso de la segunda metodología, por lo que la primera de éstas es la más practicable en términos del nivel de información necesario para la aplicación de esta.

Sin embargo, los pasos detallados para determinar la calidad natural, para cualquiera de las tres metodologías son los mismos, es decir, las etapas correspondientes al análisis predictivo y las etapas sucesivas tienen igual o mayor importancia que la determinación misma de la calidad, debido a que estas etapas son el fundamento que permiten correlacionar los resultados obtenidos con las condiciones locales, razón por la cual contar con los niveles adecuados de información se vuelve absolutamente relevante para una correcta interpretación de los resultados obtenidos.

Como se destacó en los tres métodos descritos anteriormente, así como también en otros puntos de la metodología descrita anteriormente, contar con una estadística adecuada, ya sea en términos

temporales como espaciales, es igual o más importante aún, ya que los métodos descritos anteriormente necesitan de una estadística importante para la determinación de la calidad natural.

A pesar que, en algunos de los métodos descritos anteriormente, se utiliza información que no es de común determinación, como por ejemplo los análisis de calidad de aguas lluvias, la utilización de los criterios en relación al contenido de nitrato, amonio, fosfato, cloruro, así como también el análisis de las condiciones locales en relación a las actividades antrópicas desarrolladas son más que suficientes para poder determinar la calidad natural tanto en una localidad específica, como en un sitio específico.

En relación a lo mencionado anteriormente y rescatando lo dicho a lo largo de la descripción de la metodología, es de vital importancia la integración de la información que se tenga tanto puntualmente como localmente, ya que la metodología descrita, así como los métodos mencionados anteriormente, trabajan a escalas que van desde pequeñas localidades hasta nivel de país, con los debidos niveles de información y conocimientos que implica trabajar a esas escalas, por lo que la aplicación de la metodología a un punto específico no es factible si no se considera al integración de un área mayor que incluya el sitio de interés. Así mismo, la utilización de métodos de preselección permite integrar información a diferentes escalas, por lo que la metodología es aplicable a las escalas mencionadas anteriormente.

Así mismo, el análisis químico de los parámetros mencionados en Tabla 5.1 debe ser considerado como requisito mínimo para conocer los procesos, involucrados en la adquisición de la composición de las aguas subterráneas. Esto se basa tanto en la información requerida para determinar los índices descritos en la Tabla 5.3 y en la

Tabla 5.4.

En general, la metodología centra su eficacia en los niveles de información recopilada, y en la cantidad de observaciones con las que se cuenta, así como también en la interpretación adecuada de los resultados por medio del cruce de información geológica, hidrogeológica y de actividades antrópicas desarrolladas tanto en el lugar de estudio como en sus alrededores y a nivel local.

6 APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA

6.1 Introducción.

A continuación se presentan dos aplicaciones de la metodología descrita en el capítulo anterior. Las aplicaciones serán realizadas a escalas y de detalle distintos, de manera de analizar la efectividad de la metodología a distintos niveles de información. La primera de las aplicaciones es a nivel nacional, en la cual se utilizará la información disponible a esta escala, como la carta geológica 1:1.000.000 y los pozos de monitoreo de aguas subterráneas de la red de monitoreo de la D.G.A. La segunda aplicación se realizará en el acuífero del Aconcagua, en el cual se tiene un nivel de detalle mayor al disponible para el caso a nivel nacional.

6.2 Caso a nivel nacional.

6.2.1 Contexto geológico.

El contexto geológico a nivel nacional fue detallado en el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en el punto 3.2. por lo que no se realizará mayor énfasis en este punto.

6.2.2 Contexto Hidrogeológico.

Al igual que en el punto anterior, el contexto hidrogeológico a nivel nacional fue detallado en el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en el punto 3.3, por lo que no se realizará mayor énfasis en este punto.

6.2.3 Información Recopilada.

La información recopilada para este ejemplo de aplicación corresponde a los datos de calidad de aguas de la red de monitoreo de la D.G.A., la cual cuenta, como se mencionó en el punto 2.2, con 65 pozos de monitoreo ubicados según lo muestran la Figura 2.1 y la Figura 2.2.

6.2.4 Análisis Predictivo.

Dado que la información con la que se cuenta no es detallada, no es posible realizar un análisis predictivo minucioso ni tampoco general. Junto con lo anterior, el desconocimiento de los flujos subterráneos, así como la complejidad de realizar una recopilación a nivel regional de la información requerida para realizar los análisis posteriores, no permite realizar un análisis predictivo, así como también la distribución espacial de los pozos de la red no permite un mayor análisis, ya que cada pozo representa únicamente a una pequeña fracción del territorio, por lo que realizar predicciones a partir de la geología disponible a esta escala no sería posible.

Otra dificultad asociada a la red de monitoreo, es que su pobre distribución espacial, así como la distribución dispar de los pozos ya existentes (en algunas regiones existen 15 pozos y en otras en cambio existe solo uno) no permite realizar una clasificación en grupos, lo cual se dificulta por el hecho de que los acuíferos que monitorean estos pozos, en algunos casos, no se encuentran definidos ni estudiados, y en algunos casos no se cuenta con los modelos hidrogeológicos que los describan, los que deben generarse para realizar un análisis detallado de las características del acuífero y el comportamiento del flujo subterráneo.

A lo anterior se suma el hecho de que la hidrogeología disponible a esta escala no es detallada, junto con el hecho de que la mayoría de los acuíferos se encuentran en zonas de rellenos cuaternarios, por lo que se hace indispensable el conocimiento de la geología local para determinar las rocas que componen el relleno y por ende los minerales que están presentes, y dado que la geología disponible a esta escala no es detallada, realizar esta descripción con este nivel de información se torna difícil, por lo que sería necesario recurrir a niveles de información a escalas menores. Sin embargo, la geología disponible a escala más detallada no se encuentra para

todas las zonas, por lo que sería necesario generar esta información, objetivo que está fuera de los alcances de este trabajo.

Otro punto que dificulta el análisis predictivo, y por ende el resto de los análisis, es que para determinar los criterios que definen la calidad natural, es necesario estudiar las condiciones locales, lo que a esta escala se vuelve complejo, debido a que para realizar este tipo de análisis se debe, como se menciona en la metodología, estudiar las actividades antrópicas desarrolladas a nivel local, lo que requeriría de niveles de información a escalas más finas

Luego, en función de lo anterior, los análisis que se realizarán se limitarán a la verificación del cumplimiento de los requerimientos mínimos descritos en la metodología, como el balance iónico. Junto con lo anterior, se realizará un catastro de aquellos sitios en que se hayan detectado niveles de nitrato por sobre los 10 mg/L, y un análisis de aquellos lugares con indicios de intrusión salina. Finalmente se presentarán las distribuciones obtenidas para los principales parámetros medidos por la red de monitoreo para cada una de las zonas descritas en el punto 2.2.

6.2.5 Auditoria de los datos de Calidad.

La realización del balance iónico constituye un paso importante dentro de la determinación de la calidad natural, por lo que el primer paso de los análisis mencionados anteriormente es la determinación del balance iónico. La siguiente tabla resume los resultados obtenidos para las muestras de cada región en la cual se cuenta con una red de monitoreo.

Tabla 6.1: Resultados balance iónico.

Balance iónico					
Región	Rangos	< 2%	< 3%	<5%	< %5
	Total muestras	Muestras que cumplen	Muestras que cumplen	Muestras que cumplen	% de muestras que cumplen
I	243	135	176	214	88.07
II	27	15	18	20	74.07
III	237	108	140	171	72.15
IV	354	221	270	317	89.55
V	101	55	72	81	80.20
RM	505	190	266	324	64.16
VI	184	52	64	83	45.11
VII	123	28	39	50	40.65
VIII	58	8	11	14	24.14
Total	1832	812	1056	1274	69.54

La tabla anteriormente presentada expone los resultados de la aplicación del criterio del balance iónico menor al 5%. Sin embargo, para que una muestra fuese aceptada por el criterio anterior, ésta debe cumplir con un criterio más, el cual se relaciona con la medición de un número mínimo de parámetros, en este caso en particular, 10 parámetros. Estos parámetros son los siguientes:

- pH
- Conductividad
- Oxígeno Disuelto
- Cloruro
- Sulfato
- Calcio
- Magnesio
- Potasio
- Sodio
- Nitrato

Luego, si alguna de las muestras analizadas no posee estos 10 parámetros como mínimo, la muestra es eliminada de la estadística general. Posterior a este primer filtro, se realiza una segunda clasificación, la cual selecciona aquellas muestras que presentan niveles de nitrato menores a los 10 mg/L. Este último filtro responde a las experiencias desarrolladas por Chèry (2006), Wendland y otros (2003), la cual responde al nivel máximo permitido en diversas normativas internacionales y aplicaciones técnicas de la metodología. Este criterio es, para este ejemplo en particular de aplicación, el único criterio de preselección que se utilizará, esto acorde a lo mencionado en la metodología planteada en el capítulo anterior. Los resultados de esta selección se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6.2: Resultados aplicación criterio preselección a los pozos de la red de monitoreo de calidad de la D.G.A., muestras con contenido de nitrato bajo los 10 mg/L.

REGIÓN	NITRATO			
	RANGOS	<5%	< %5	MUESTRAS CON NITRATO > 10 mg/L
	TOTAL MUESTRAS 1ER CRITERIO	MUESTRAS CON NITRATO < 10 mg/L	% MUESTRAS CON NITRATO < 10 mg/L	
I	214	189	88,32	25
II	20	20	100	0
III	171	165	96,49	6
IV	317	317	100	0
V	81	80	98,77	1
RM	324	266	82,10	58
VI	83	83	100	0
VII	50	50	100	0
VIII	14	14	100	0
Total	1274	1184	92,94	90

La Tabla 6.2 resume los resultados de la aplicación del criterio de preselección a los pozos de la red de monitoreo de calidad de la D.G.A. En la primera columna se presentan el número de muestras que cumplen con el primer criterio establecido anteriormente, la segunda columna presenta el número de muestras por Región que tienen un contenido de nitrato menor a los 10 mg/L, la tercera columna presenta el mismo resultado pero en porcentajes y la última columna presenta el número de muestras con contenido de nitrato mayor a 10 mg/L.

De la tabla anterior se observa que la región del Bio Bio presenta una estadística bastante pobre en relación al resto de las regiones, debido a lo anterior se optó por descartar a esta región del conjunto inicial de regiones. Otro punto importante es que las regiones con mayor número de muestras con contenido de nitrato son las regiones de Tarapacá y Metropolitana, siendo esta última la que cuenta con el mayor número de muestras con contenido de nitratos sobre los 10 mg/L, situación que comparten las regiones de Atacama y Valparaíso pero con una menor cantidad de muestras. A continuación se detalla cual de los pozos, por región, posee niveles mayores a 10 mg/L

Tabla 6.3: Pozos región de Tarapacá con contenidos de nitrato mayor a 10 mg/L

POZO	NITRATO	
	POZO LAONSANA (QUEBRADA TARAPACA)	POZO ALBARRACINES
Nº MUESTRAS	9	17
PROMEDIO	32,936	14,50
MÁXIMO	60,425	18,03
MÍNIMO	13,376	10,21
D. ESTANDAR	4,377	1,91

Tabla 6.4: Pozos región de Atacama con contenido de nitrato mayor a 10 mg/L.

NITRATO		
POZO	POZO ESCUELA LOS LOROS	POZO DOMEYKO
	1	9
PROMEDIO	21,03	11,78
MÁXIMO	21,03	14,43
MÍNIMO	21,03	10,03
D. ESTANDAR	-	1,34

Tabla 6.5: Pozos región de Valparaíso con contenidos de nitrato mayor a 10 mg/L.

NITRATO	
POZO	POZO RIEGO BERNAL
Nº MUESTRAS	1
PROMEDIO	10,94
MÁXIMO	10,94
MÍNIMO	10,94
D. ESTANDAR	-

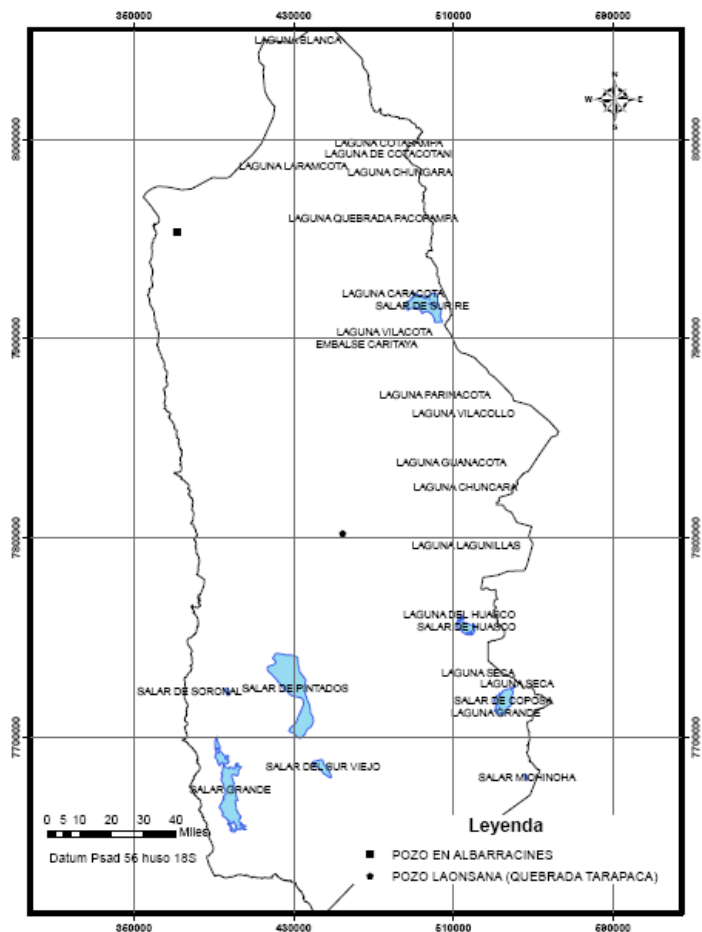
Tabla 6.6: Pozos Región. Metropolitana con contenidos de nitrato mayor a 10 mg/L.

NITRATO					
POZO	Nº MUESTRAS	PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	D. ESTANDAR
POZO FUNDO ALGARROBAL	3	16,70	24,28	11,02	6,83
POZO ASENTAMIENTO CENTRAL LO VARGAS	1	10,31	10,31	10,31	-
POZO VERTEDERO CERROS DE RENCA	3	12,66	15,55	10,42	2,63
POZO CEMENTERIO METROPOLITANO	35	20,13	31,13	12,33	3,38
POZO PARQUE O'HIGGINS	3	14,08	16,08	10,09	3,45
POZO FUNDO CACHANTUN	13	12,87	16,89	10,60	2,01
POZO ASENTAMIENTO MALLOCO	1	10,07	10,07	10,07	-
POZO INIA	1	11,83	11,83	11,83	-
POZO CHACRA EL OLIVO	34	26,03	80,98	10,33	16,24

Como se puede observar de las tablas anteriormente presentadas, el pozo con mayor número de muestras con contenidos de nitrato mayor a 10 mg/L es el pozo Cementerio Metropolitano, ubicado en la Región Metropolitana. Esta situación es considerada normal debido a los aportes de nutrientes. El pozo ubicado en la chacra El Olivo presenta valores elevados, al igual que el pozo Cementerio Metropolitano, debido fundamentalmente a la actividad agrícola desarrollada en ese sector.

En el caso de la primera región, el contenido de nitrato presente en el pozo Laonsana se debe a su cercanía los salares presentes en la zona, por lo que no se descarta la presencia de flujos subterráneos que generen esta condición, así como algún factor de contaminación puntual. La siguiente figura expone la ubicación de los pozos de la 1ra región:

Figura 6.1: Ubicación Pozos con contenido de nitrato mayor a 10 mg/L I región.



Fuente: Elaboración Propia

Una situación particular que ocurre también en la primera región es que existen 7 pozos con índices de contaminación por intrusión salina. Estos resultados se presentan en la siguiente tabla.

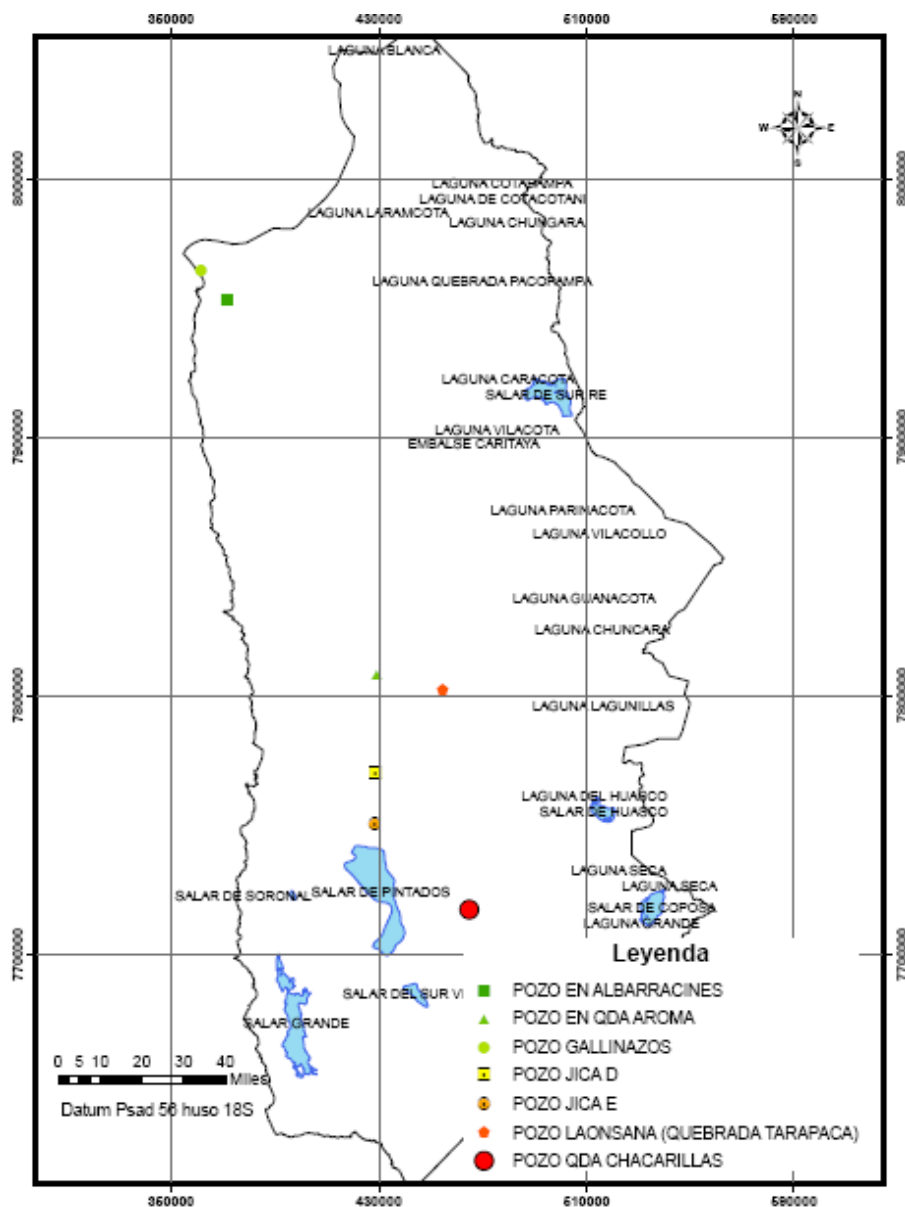
Tabla 6.7: Resultados de la aplicación de los índices de contaminación por Intrusión Salina.

Pozo	Cl/Bicarbonato	Mg+2/Ca+2	(Na+K)/(Mg+Ca)
JICA D	116,632	0,121	1,714
Pozo Jica E	139,758	0,064	1,645
POZO JICA F	4,232	0,496	2,569
POZO JICA G	0,616	0,886	5,133
POZO LAONSANA (QUEBRADA TARAPACA)	10,637	0,019	0,883
POZO QUEBRADA AROMA	29,055	0,626	14,504
POZO QUEBRADA CHACARILLA	1,796	1,042	92,006
POZO GALLINAZOS	17,426	0,518	0,921
POZO ALBARRACINES	10,318	0,266	0,553
Pozo JICA B	85,336	0,051	2,204

En la Tabla 6.7, si la relación Cloruro/Bicarbonato es mayor a 5, entonces existe contaminación por intrusión salina, pero si se observa la Figura 6.2, se podrá observar que la ubicación de

algunos de los pozos en los cuales se detectó contaminación por intrusión salina es bastante alejada de la costa, específicamente en el interior de la Región de Tarapacá. Esta situación se debe al deterioro general de las aguas subterráneas que escurren hacia las zonas Sur y Oeste de la Pampa del Tamarugal, debido a la presencia de rocas sedimentarias como Halita y por efectos de intercambio iónico con minerales presentes en las secuencias sedimentarias. Efectos de evaporación incrementarían el contenido de sales en la zona (Centro de Recursos Hidráulicos. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. 1986)

Figura 6.2: Pozos con contaminación por sales Región de Tarapacá.



Fuente: Elaboración Propia

6.2.6 Curvas de Distribución.

Una vez analizados los efectos de la intrusión salina y el contenido de nitratos, se procede a presentar las distribuciones de una serie de parámetros, entre los que se destacan:

- Conductividad
- pH
- Cloruro
- Sulfatos
- Calcio
- Magnesio
- Potasio
- Sodio
- Nitrato
- Arsénico
- Cobre
- Hierro

La presentación de las distribuciones se realizará de acuerdo a la siguiente clasificación por zonas:

- Zona Norte Grande: Región de Tarapacá y Antofagasta.
- Zona Norte Chico: Región Atacama y Coquimbo
- Zona Centro Centro: Región de Valparaíso y Metropolitana.
- Zona Centro Sur: Región del Libertador Bernardo O'Higgins y del Maule.

La distribución espacial de los pozos en cada región se puede observar en la Figura 2.1 y en la Figura 2.2. Otro punto importante es que el análisis se realizará por periodos estacionales, Verano e Invierno, esto según recomendaciones realizadas por los peritos del laboratorio de la Dirección General de Aguas.

En los gráficos que se presentan a continuación la línea Verde representa el límite que se establece en la norma NCh 1333 para riego y la roja corresponde al valor límite establecido por la norma NCh 409 de agua potable. La ausencia de las líneas mencionadas anteriormente en los gráficos que a continuación se presentan implica la ausencia de límites para el parámetro graficado o la existencia de concentraciones límites mayores a las concentraciones registradas en la red. Es importante recalcar que las distribuciones aquí mostradas corresponden a aquellas muestras que fueron procesadas mediante los filtros anteriormente presentados.

6.2.6.1 Conductividad.

Gráfico 6.1: Distribución Conductividad Verano Invierno Chile General.

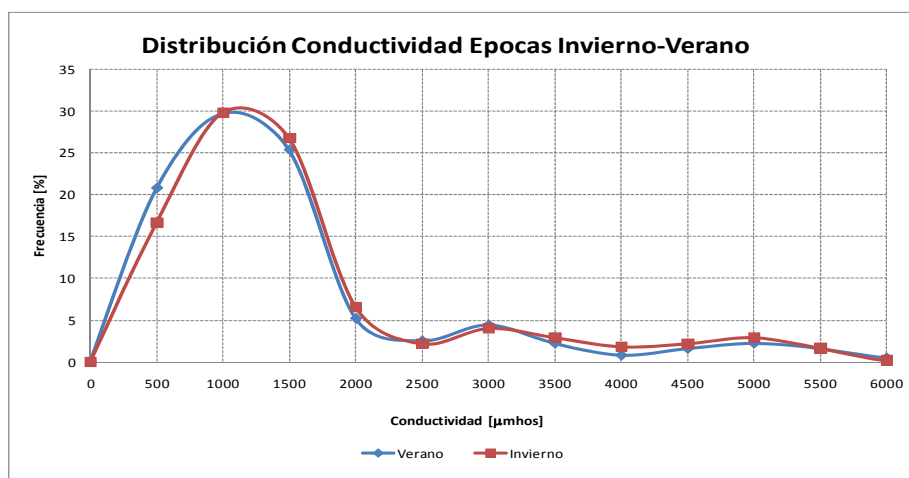


Gráfico 6.2: Distribución Conductividad Verano Invierno Norte Grande

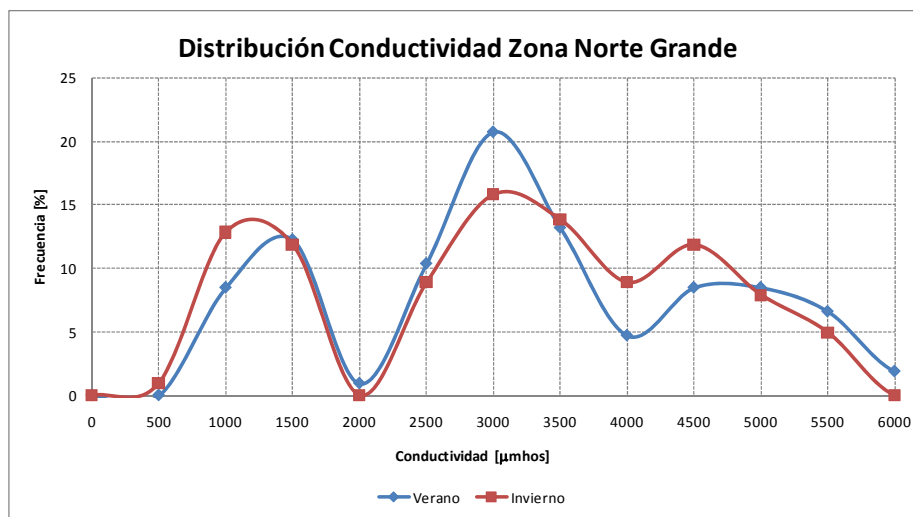


Gráfico 6.3: Distribución Conductividad Verano Invierno Norte Chico.

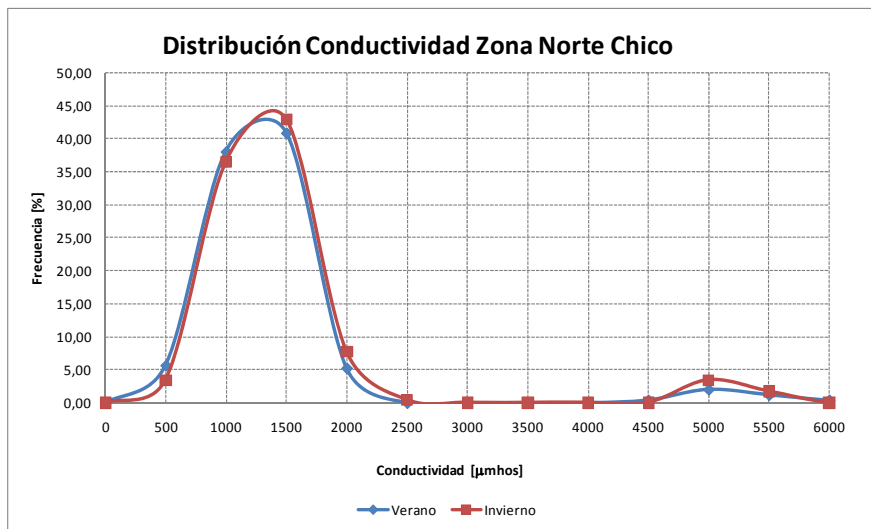


Gráfico 6.4: Distribución Conductividad Verano Invierno Centro Centro.

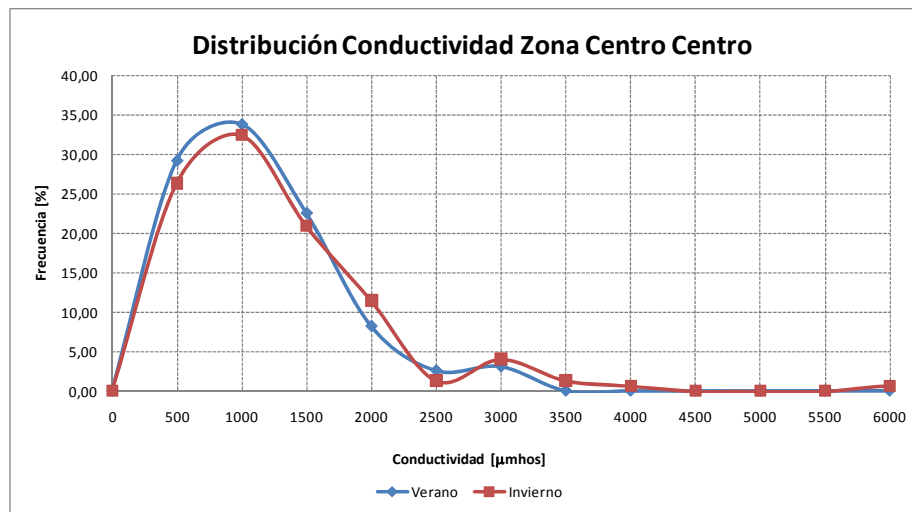
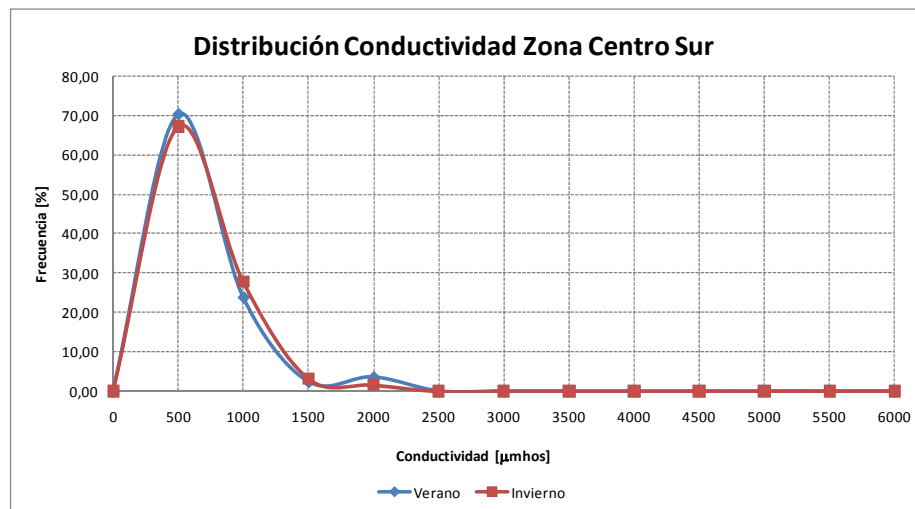


Gráfico 6.5: Distribución Conductividad Verano Invierno Centro Sur.



6.2.6.2 pH.

Gráfico 6.6: Distribución pH Verano Invierno Chile General

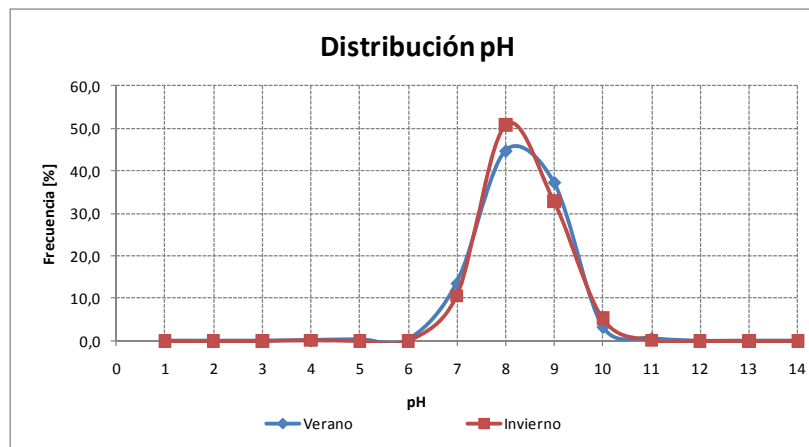


Gráfico 6.7: Distribución pH Verano Invierno Norte Grande.

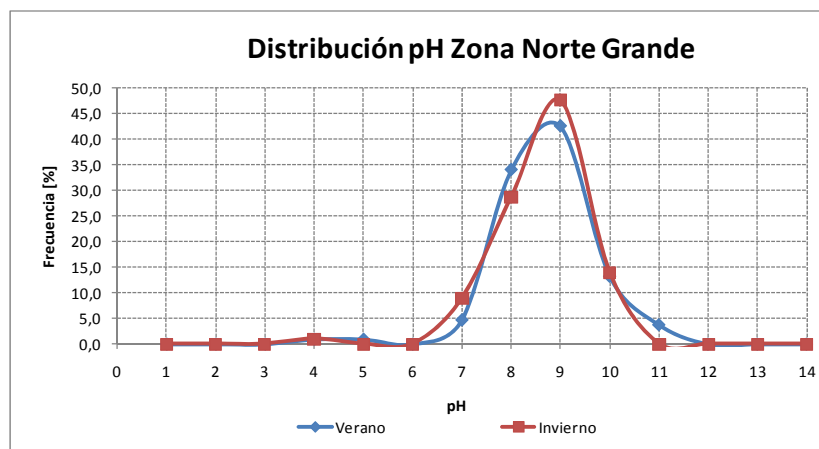


Gráfico 6.8: Distribución pH Verano Invierno Norte Chico.

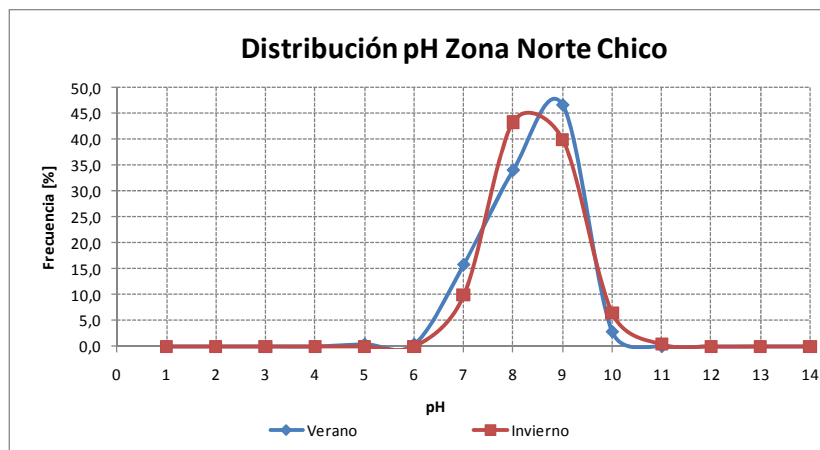


Gráfico 6.9: Distribución pH Verano Invierno Centro Centro.

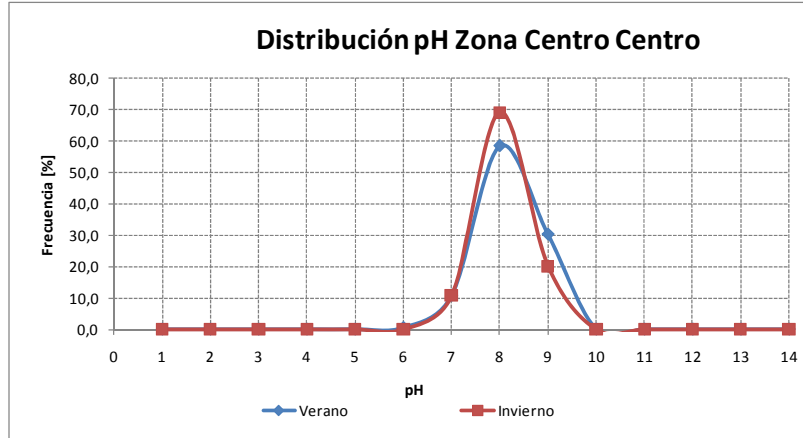
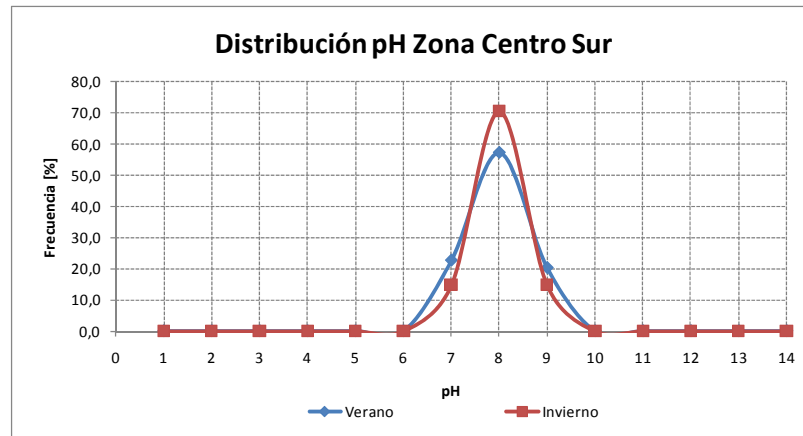
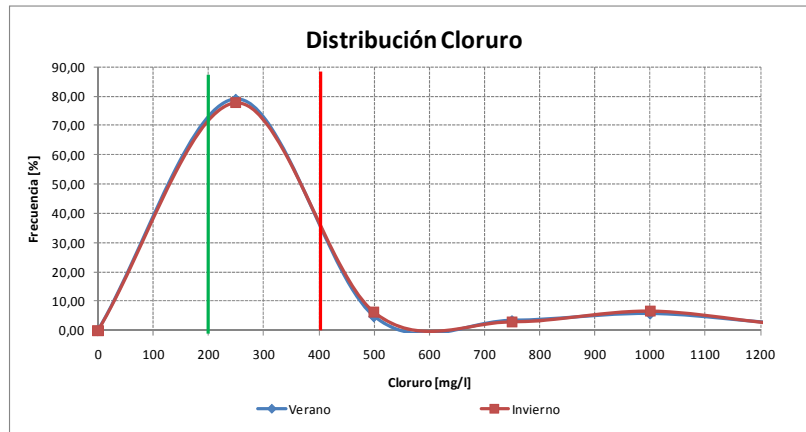


Gráfico 6.10: Distribución pH Verano Invierno Centro Sur.



6.2.6.3 Cloruro.

Gráfico 6.11: Distribución Cloruro Invierno Verano Chile General.



Línea roja y verde: Límite concentración según NCh 1333 y NCh 409 respectivamente.

Gráfico 6.12: Distribución Cloruro Invierno Verano Norte Grande.

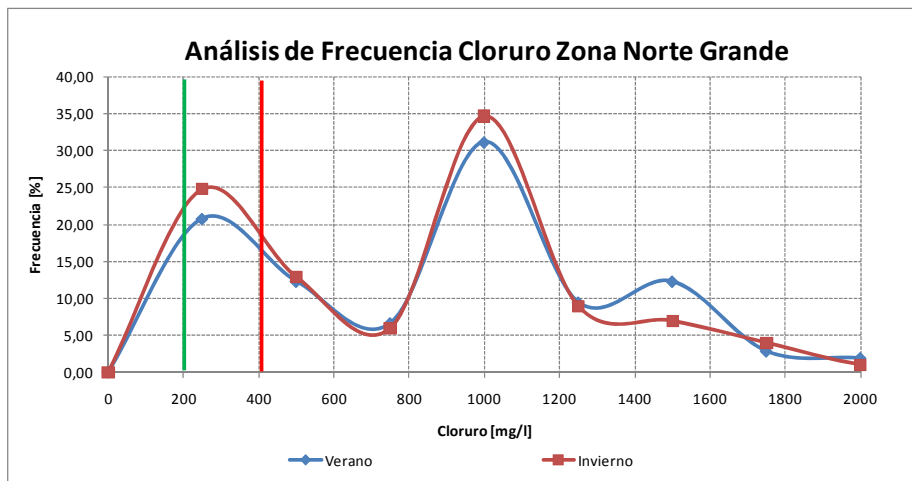


Gráfico 6.13: Distribución Cloruro Invierno Verano Norte Chico.

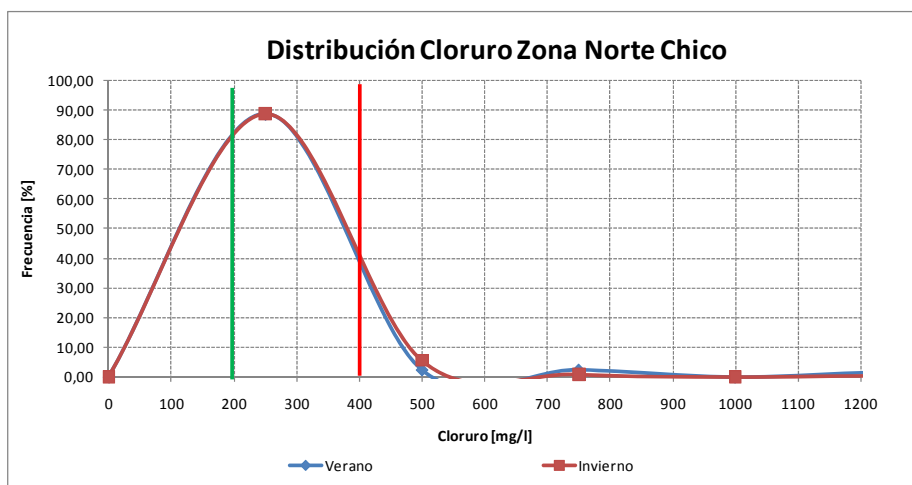
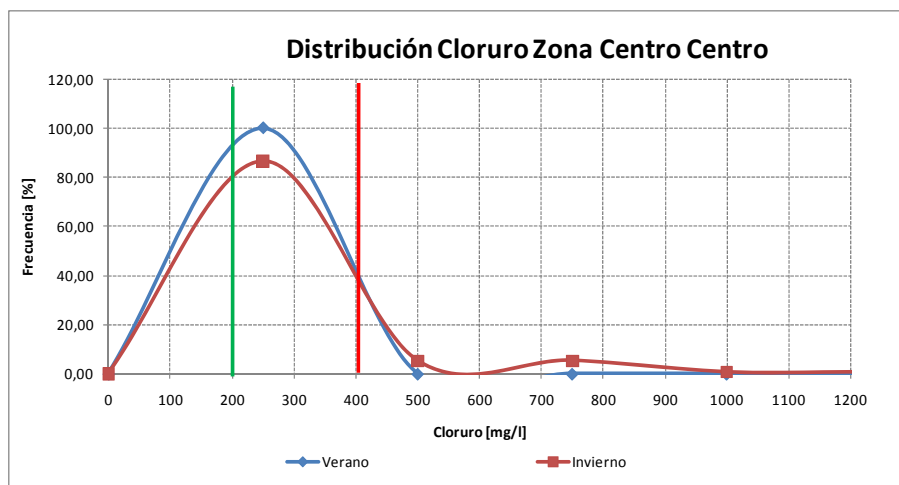
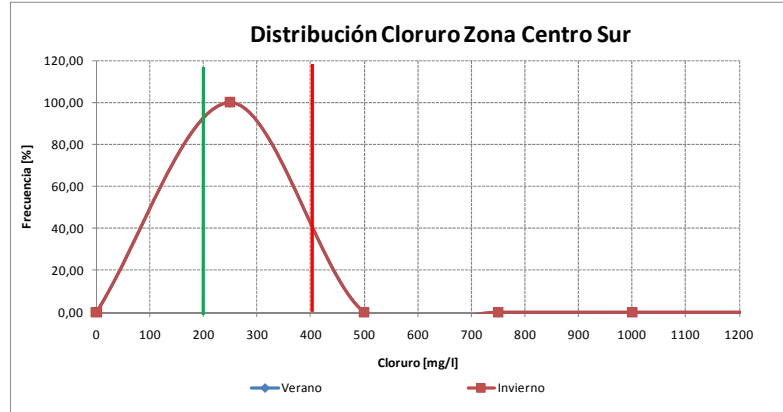


Gráfico 6.14: Distribución Cloruro Invierno Verano Centro Centro.



Línea roja y verde: Límite concentración según NCh 1333 y NCh 409 respectivamente.

Gráfico 6.15: Distribución Cloruro Invierno Verano Centro Sur.



6.2.6.4 Sulfatos.

Gráfico 6.16: Distribución Sulfato Invierno Verano Chile General.

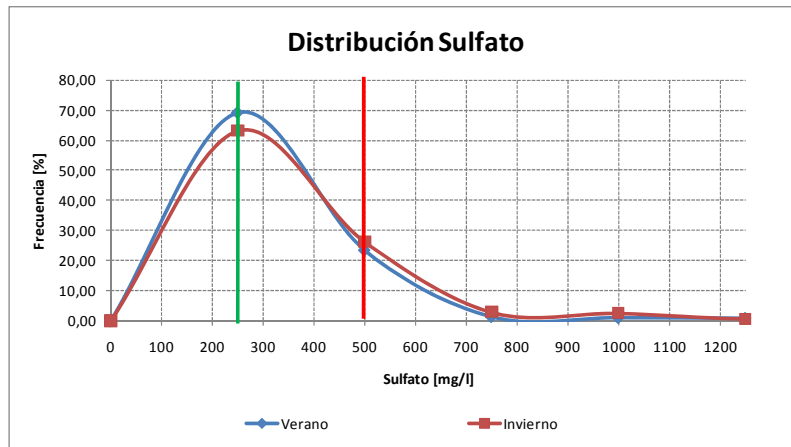
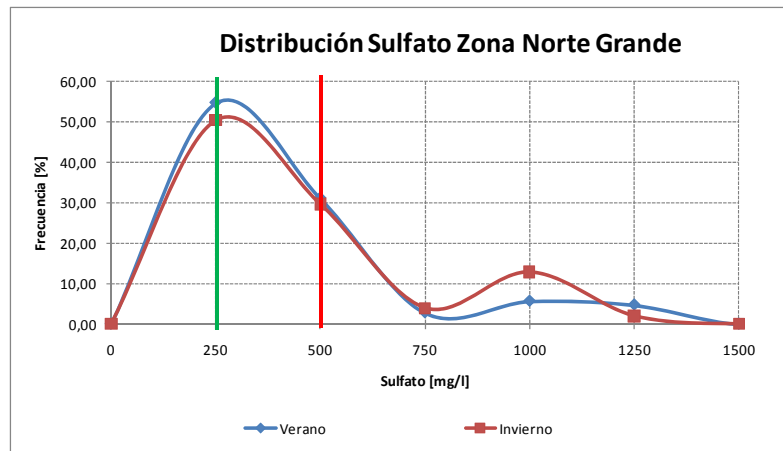


Gráfico 6.17: Distribución Sulfato Invierno Verano Norte Grande.



Línea roja y verde: Límite concentración según NCh 1333 y NCh 409 respectivamente.

Gráfico 6.18: Distribución Sulfato Invierno Verano Norte Chico.

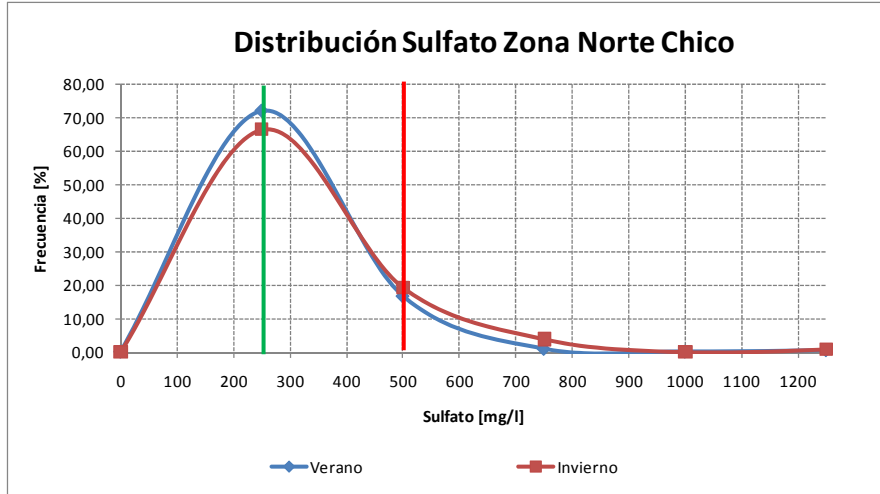


Gráfico 6.19: Distribución Sulfato Invierno Verano Centro Centro.

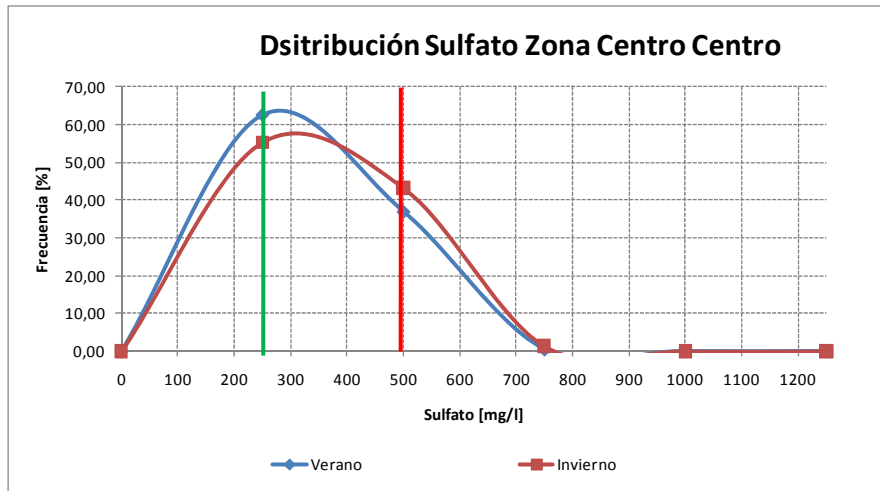
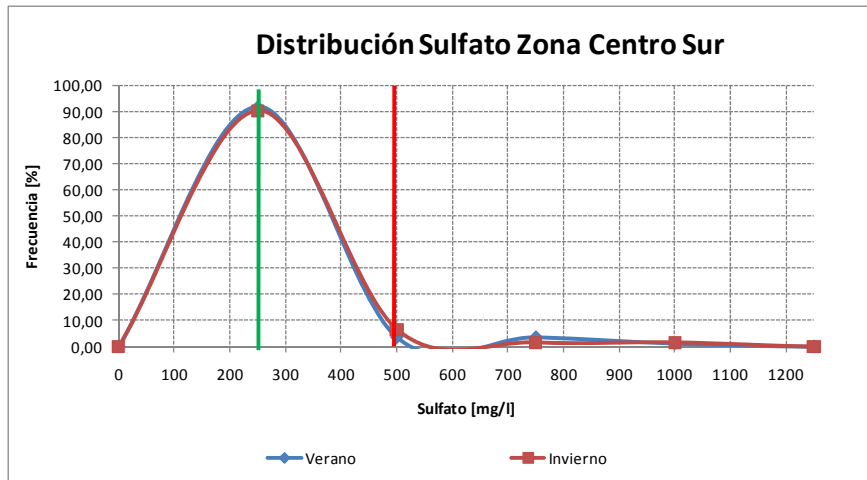


Gráfico 6.20: Distribución Sulfato Invierno Verano Centro Sur.



Línea roja y verde: Límite concentración según NCh 1333 y NCh 409 respectivamente.

6.2.6.5 Calcio.

Gráfico 6.21: Distribución Calcio Invierno Verano Chile General.

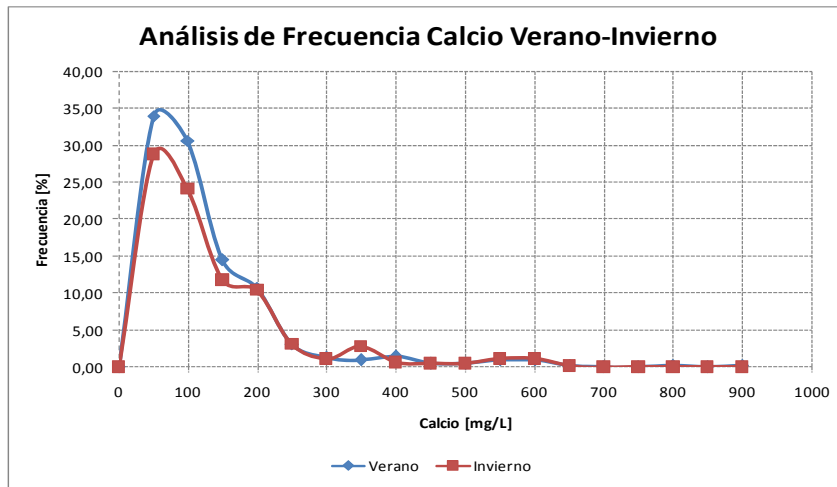


Gráfico 6.22: Distribución Calcio Invierno Verano Norte Grande.

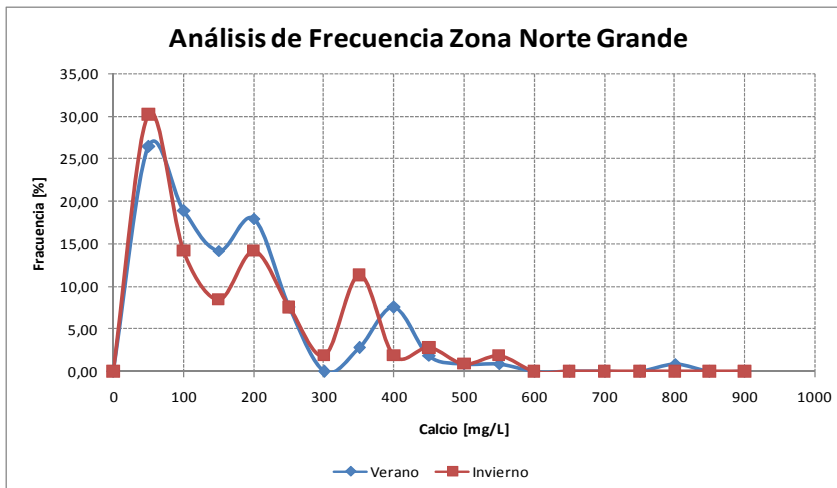


Gráfico 6.23: Distribución Calcio Invierno Verano Norte Chico.

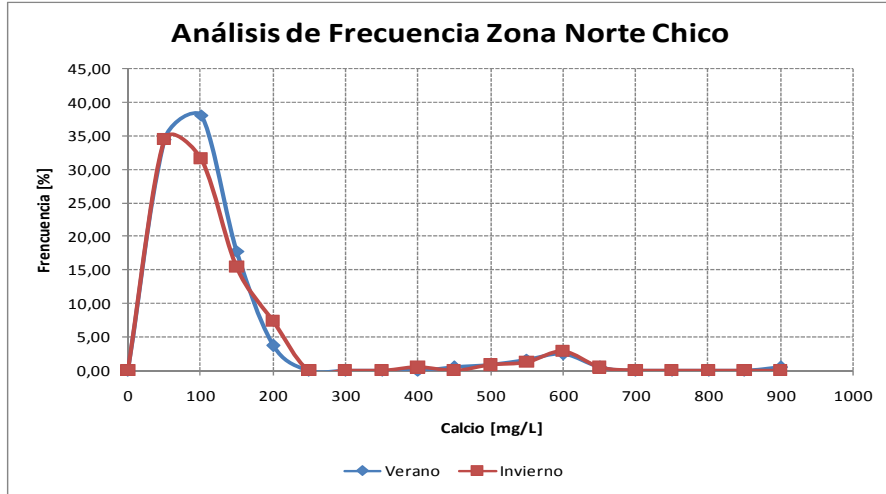


Gráfico 6.24: Distribución Calcio Invierno Verano Centro Centro

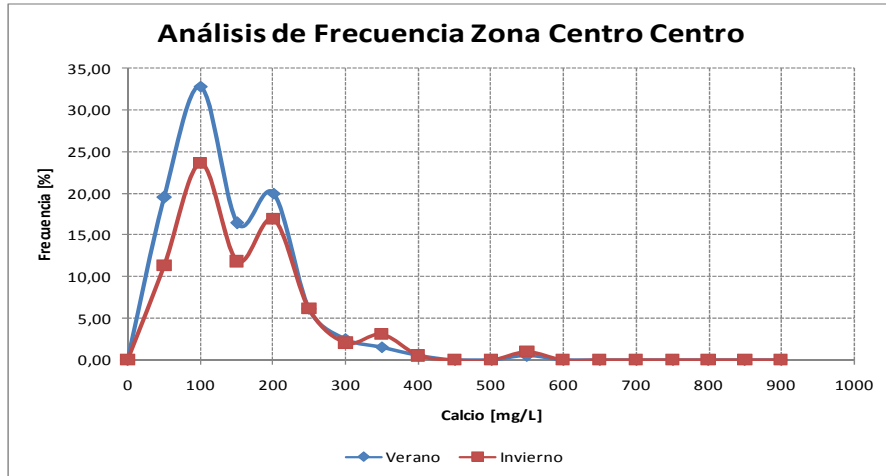
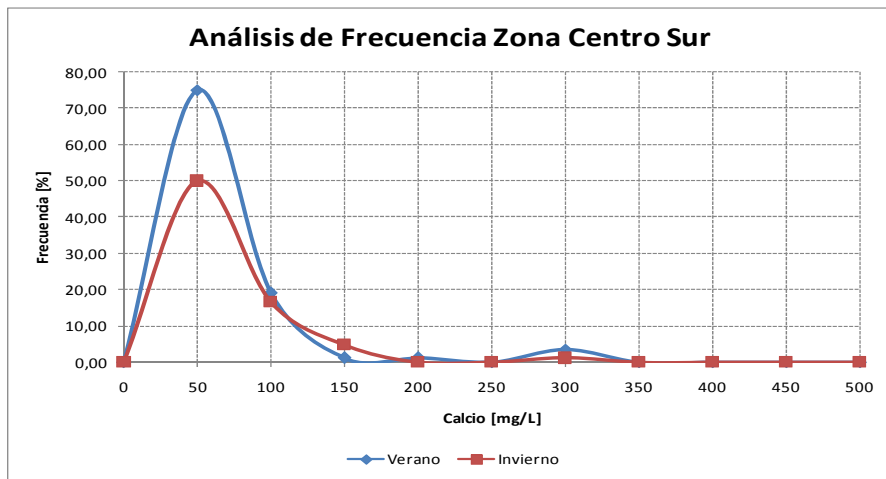


Gráfico 6.25: Distribución Calcio Invierno Verano Centro Sur.



6.2.6.6 Magnesio.

Gráfico 6.26: Distribución Magnesio Invierno Verano Chile General.

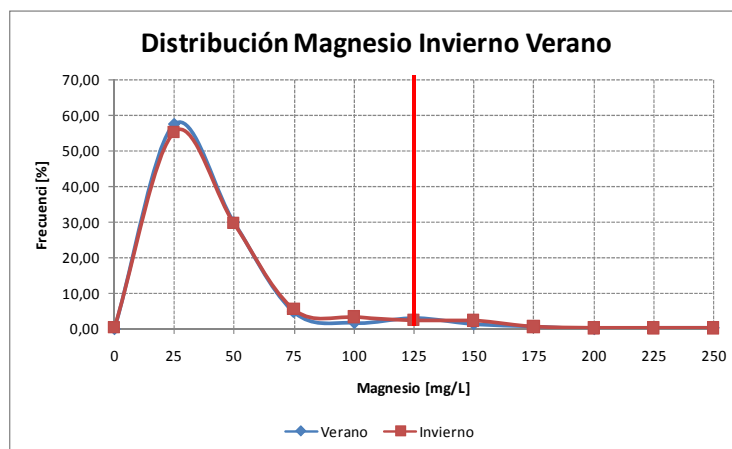


Gráfico 6.27: Distribución Magnesio Invierno Verano Norte Grande.

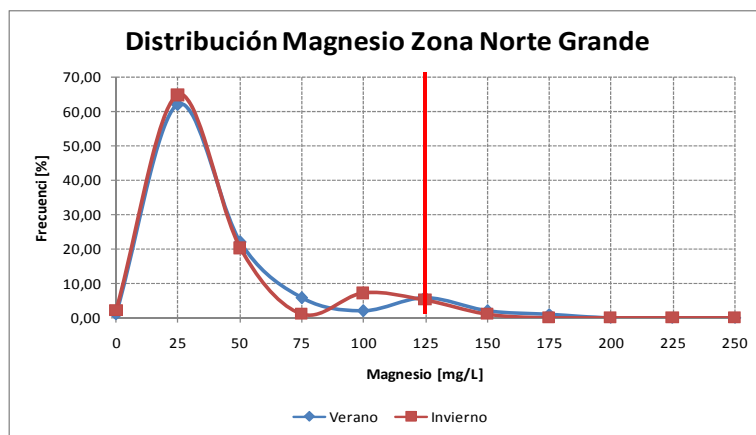
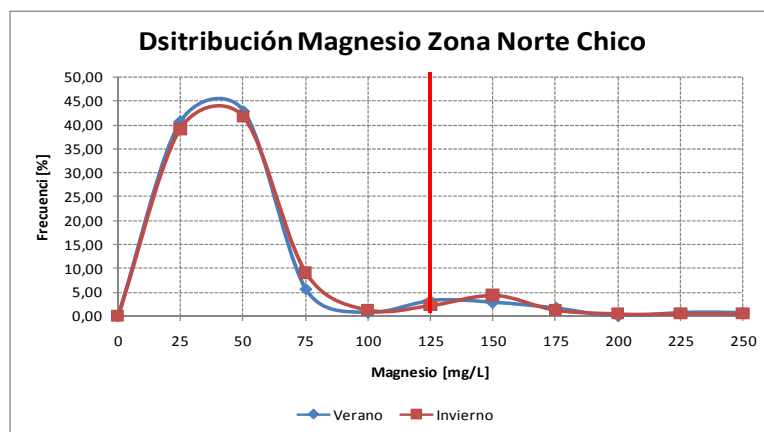


Gráfico 6.28: Distribución Magnesio Invierno Verano Norte Chico.



Línea verde: Límite concentración según NCh 409.

Gráfico 6.29: Distribución Magnesio Invierno Verano Centro Centro

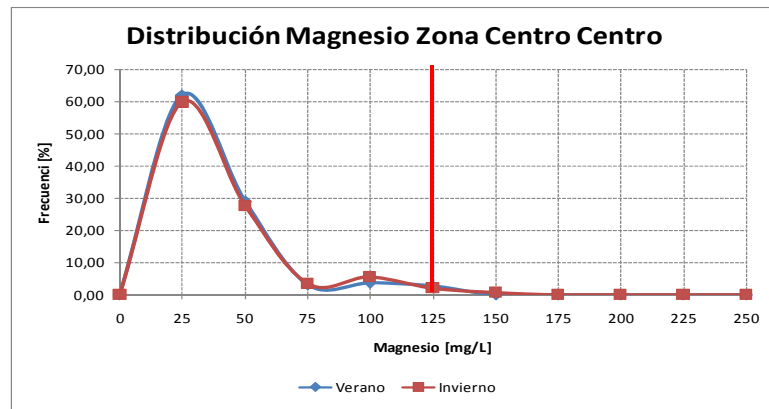
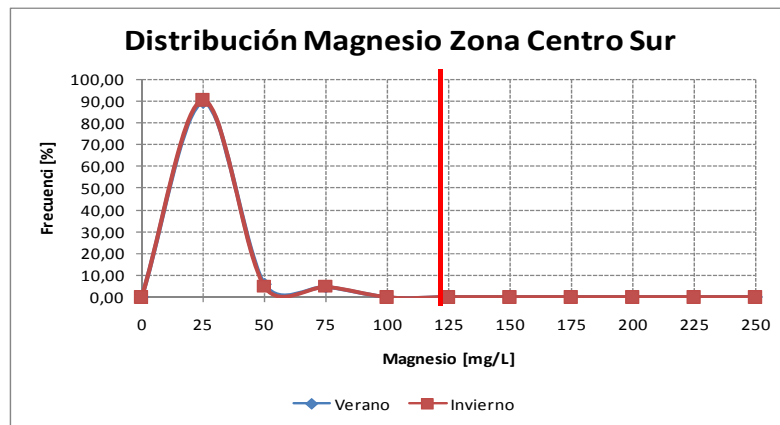


Gráfico 6.30: Distribución Magnesio Invierno Verano Centro Sur.



Línea verde: Límite concentración según NCh 409.

6.2.6.7 Potasio.

Gráfico 6.31: Distribución Potasio Invierno Verano Chile General.

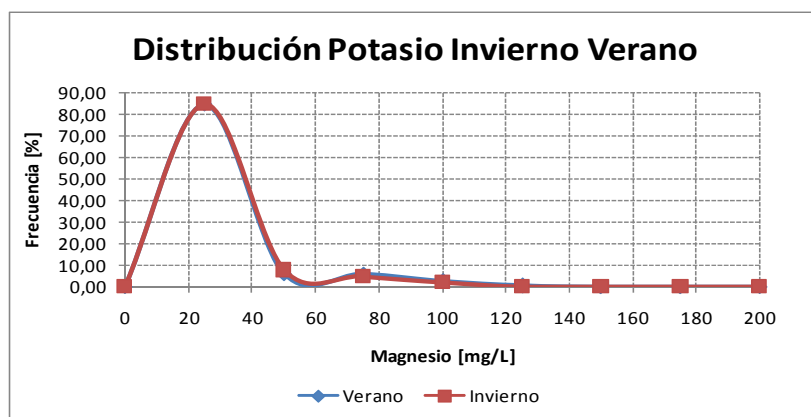


Gráfico 6.32: Distribución Potasio Invierno Verano Norte Grande.

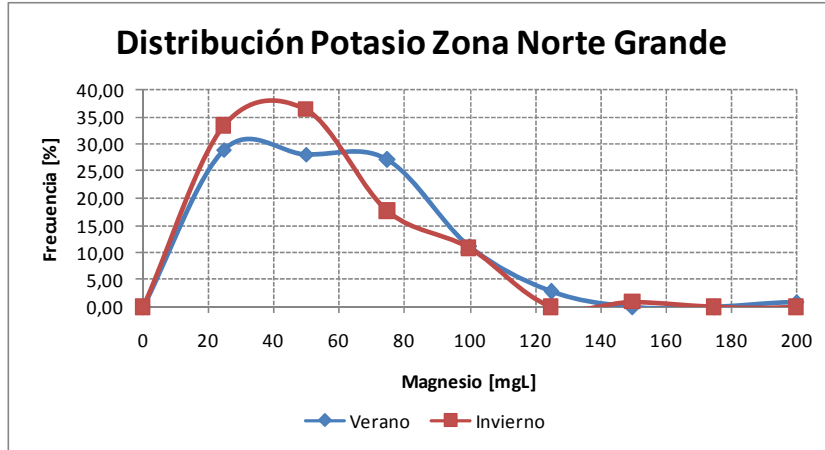


Gráfico 6.33: Distribución Potasio Invierno Verano Norte Chico

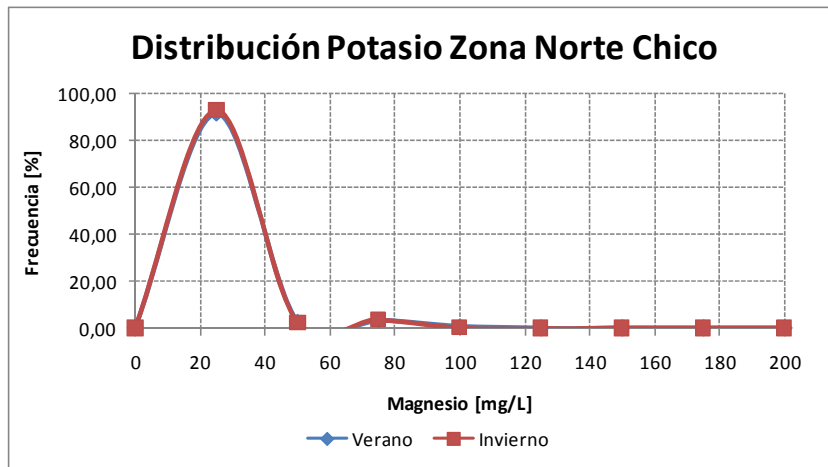


Gráfico 6.34: Distribución Potasio Invierno Verano Centro Centro.

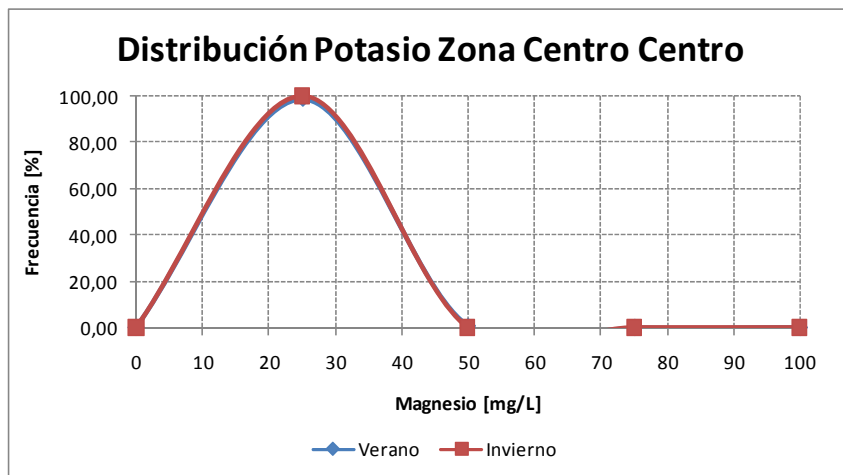
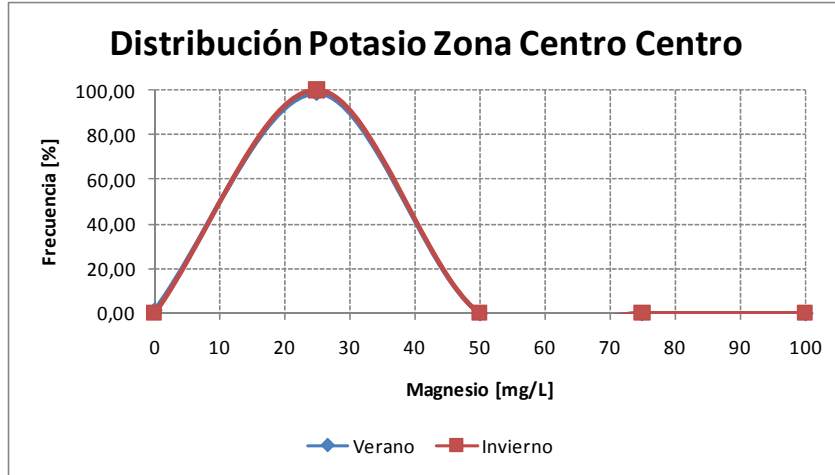


Gráfico 6.35: Distribución Potasio Invierno Verano Centro Sur.



6.2.6.8 Sodio.

Gráfico 6.36: Distribución Sodio Invierno Verano Chile General.

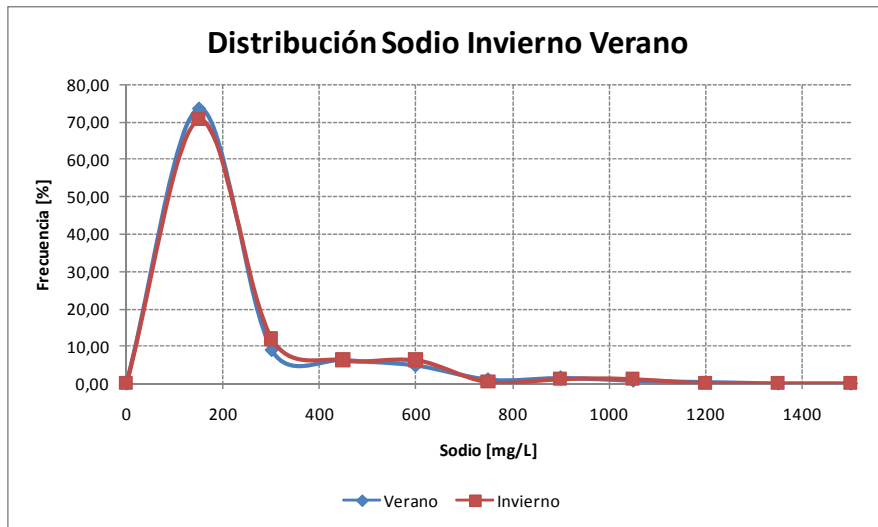


Gráfico 6.37: Distribución Sodio Invierno Verano Norte Grande.

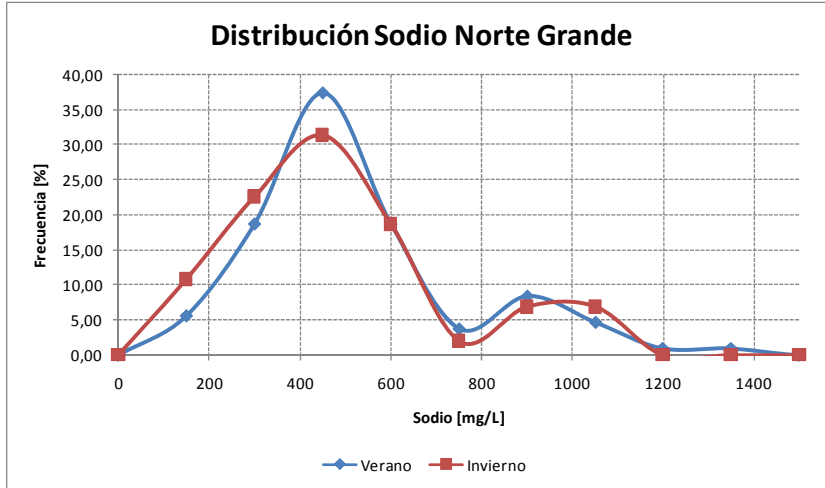


Gráfico 6.38: Distribución Sodio Invierno Verano Norte Chico.

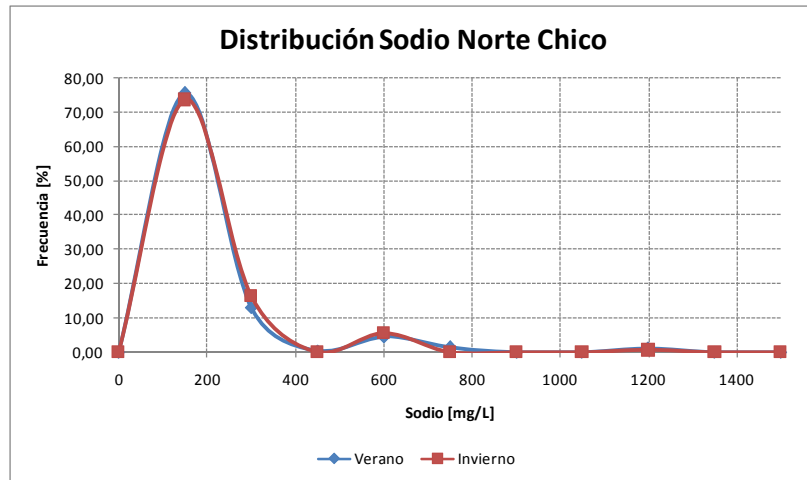


Gráfico 6.39: Distribución Sodio Invierno Verano Centro Centro.

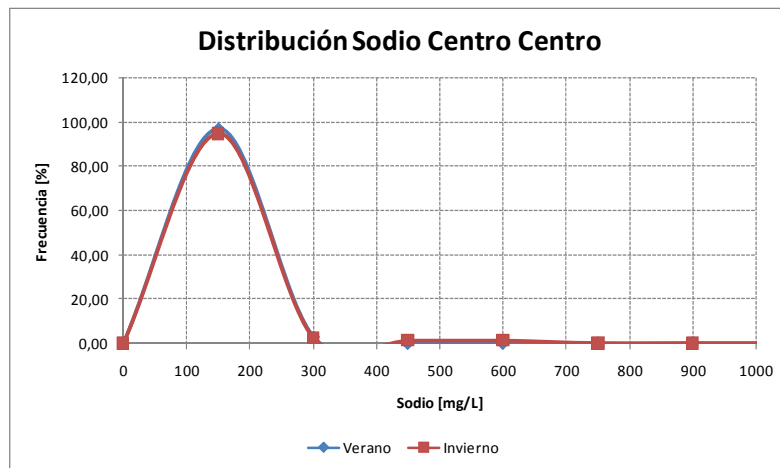
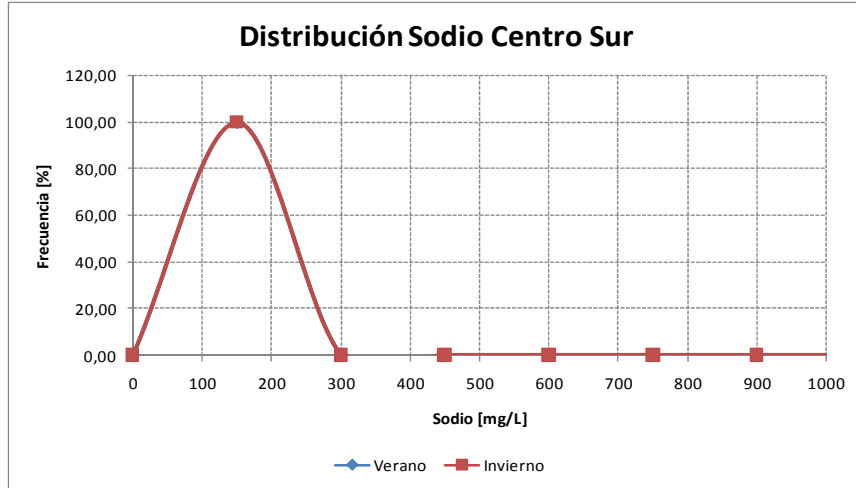


Gráfico 6.40: Distribución Sodio Invierno Verano Centro Sur.



6.2.6.9 Nitrato.

Gráfico 6.41: Distribución Nitrato Invierno Verano Chile General.

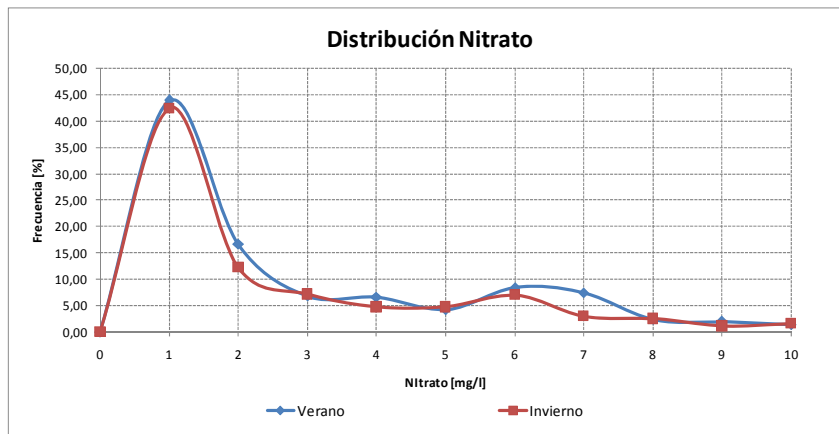


Gráfico 6.42: Distribución Nitrato Invierno Verano Norte Grande.

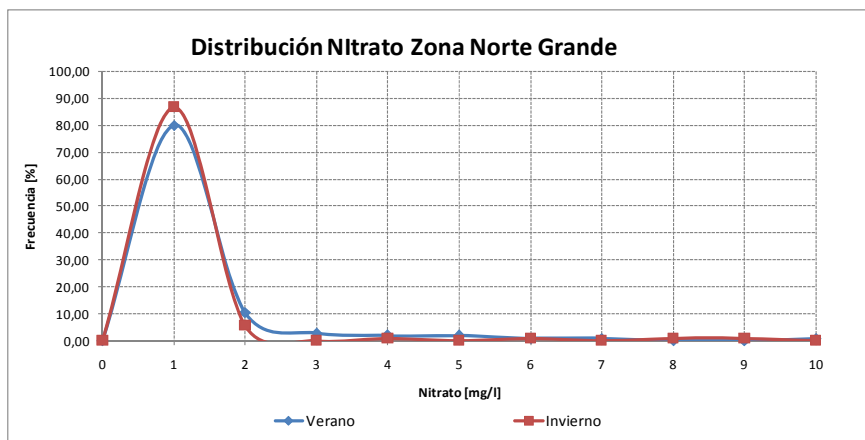


Gráfico 6.43: Distribución Nitrato Invierno Verano Norte Chico.

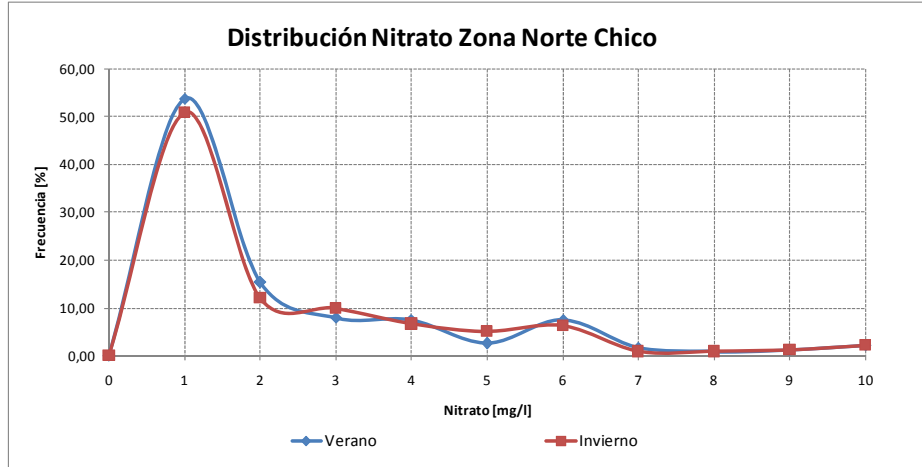


Gráfico 6.44: Distribución Nitrato Invierno Verano Centro Centro

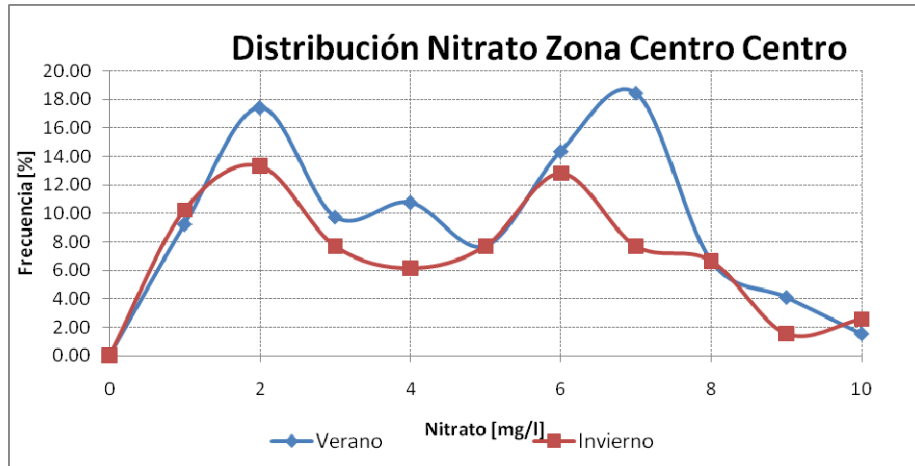
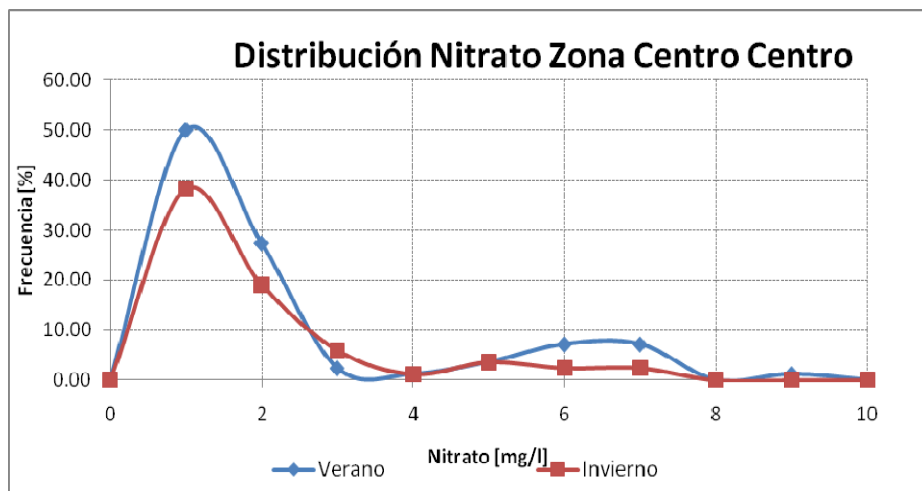


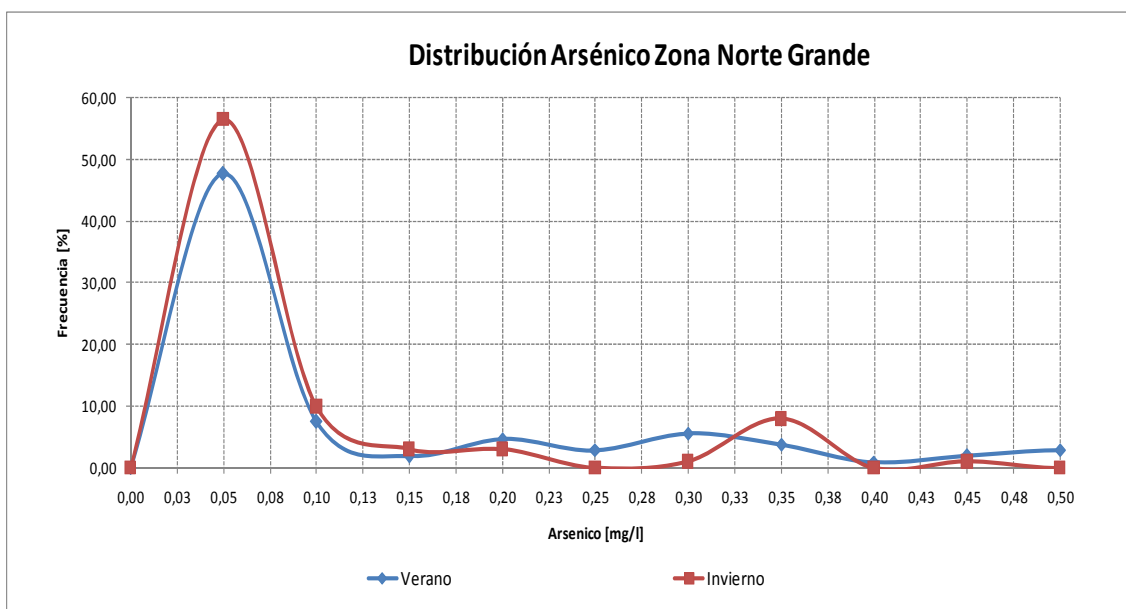
Gráfico 6.45: Distribución Nitrato Invierno Verano Centro Sur.



6.2.6.10 Arsénico.

El comportamiento del arsénico en todas las zonas, menos la zona Norte Grande, presenta valores inferiores a los 0.05 mg/L, razón por la cual se analizó la distribución de este elemento para valores menores a 0.05 mg/L para las zonas Norte Chico, Centro Centro y Centro Sur, en cambio para la zona Norte grande se analizaron ambas distribuciones.

Gráfico 6.46: Distribución Arsénico Norte Grande.



Es importante destacar que los porcentajes de muestras por sobre los 0.05 mg/L es de más del 50%, lo que claramente sobrepasa el límite establecido por la norma NCh 409 para el contenido de arsénico en aguas subterráneas.

Los siguientes gráficos muestran la situación del contenido de arsénico para las zonas mencionadas anteriormente. La línea vertical amarilla representa el límite establecido en las normativas chilenas para agua potable (NCh 409) y para riego (NCh 1333)

Gráfico 6.47: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Verano Chile General.

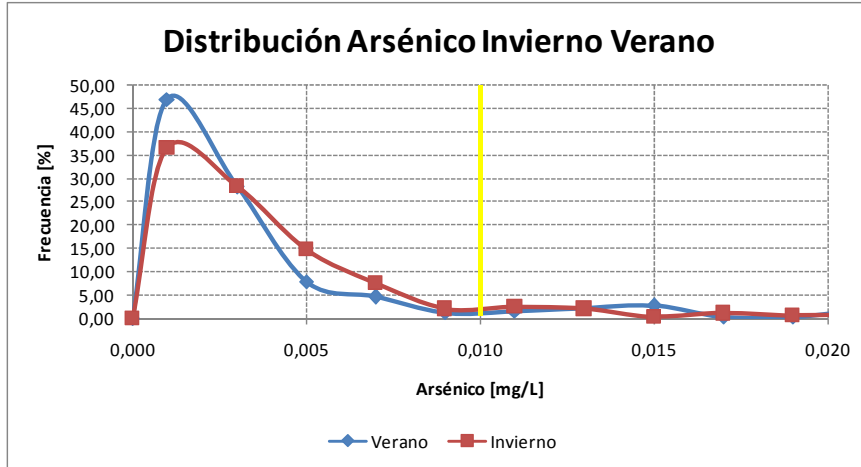


Gráfico 6.48: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Norte Grande.

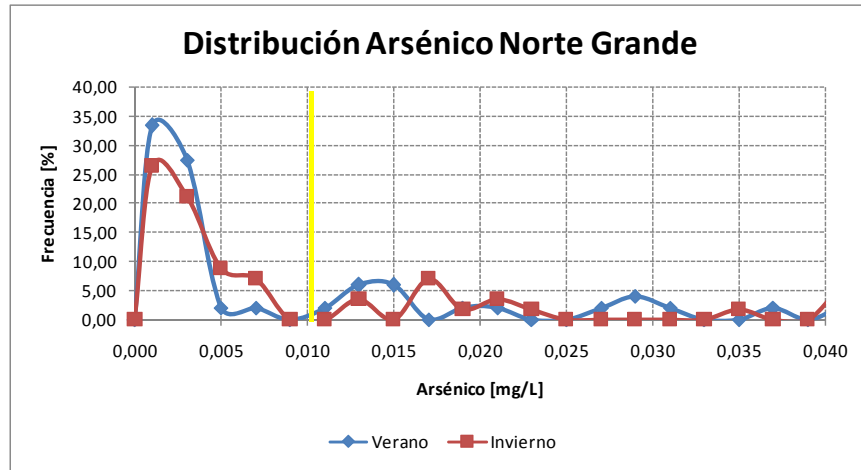
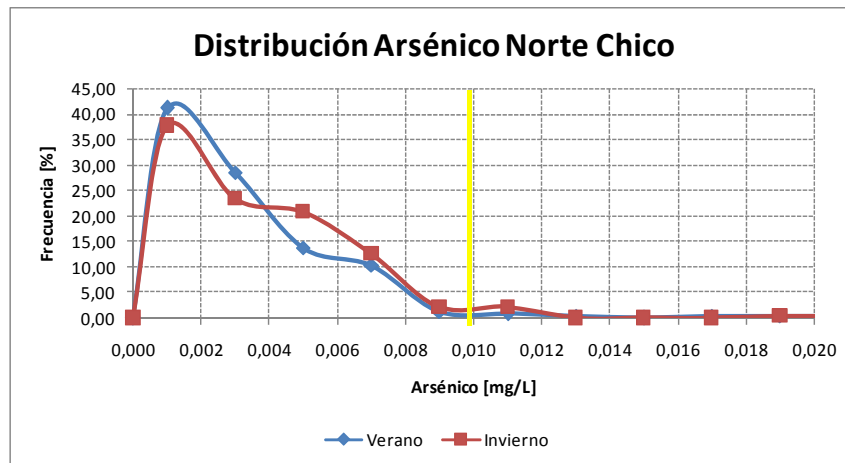


Gráfico 6.49: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Norte Chico.



Línea amarilla: Límite concentración según NCh 409 y NCh 1333.

Gráfico 6.50: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Centro Centro.

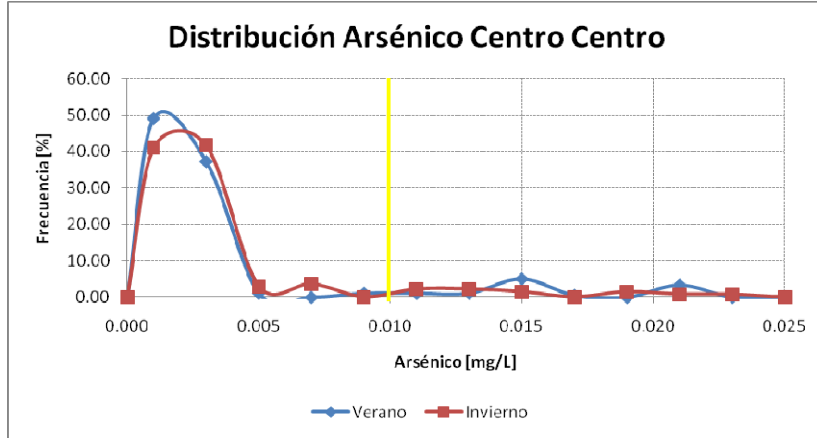
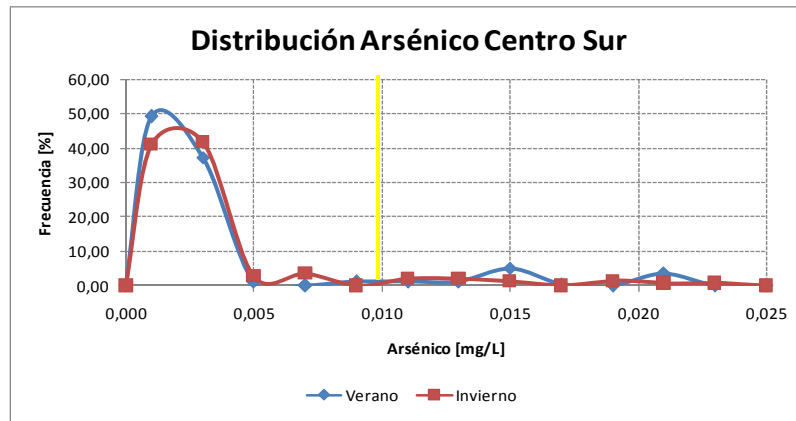


Gráfico 6.51: Distribución Arsénico menor a 0.05 mg/L Invierno Centro Sur.



Línea amarilla: Límite concentración según NCh 409 y NCh 1333.

6.2.6.11 Cobre.

Gráfico 6.52: Distribución Cobre Invierno Verano Chile General.

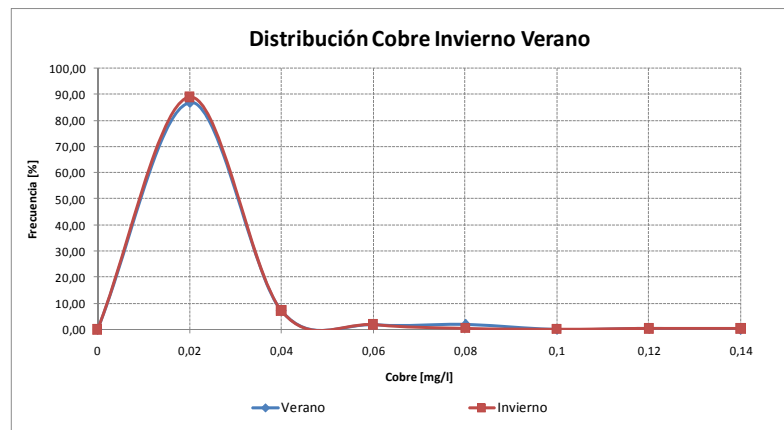


Gráfico 6.53: Distribución Cobre Invierno Verano Zona Norte Grande.

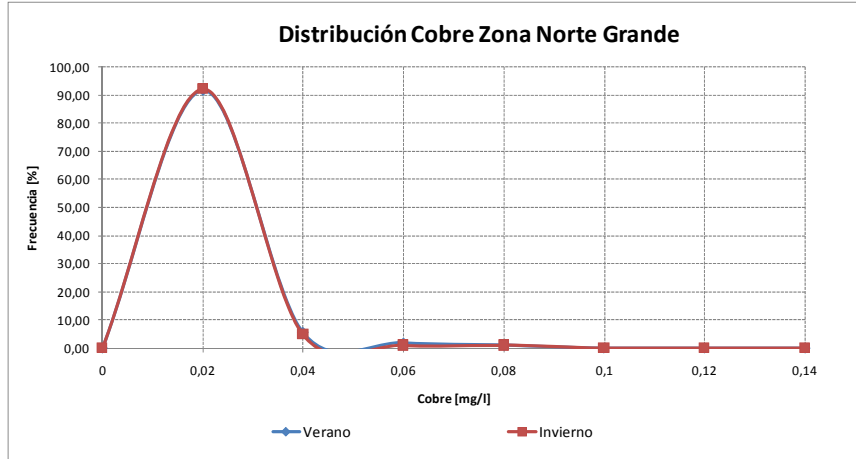


Gráfico 6.54: Distribución Cobre Invierno Verano Zona Norte Chico.

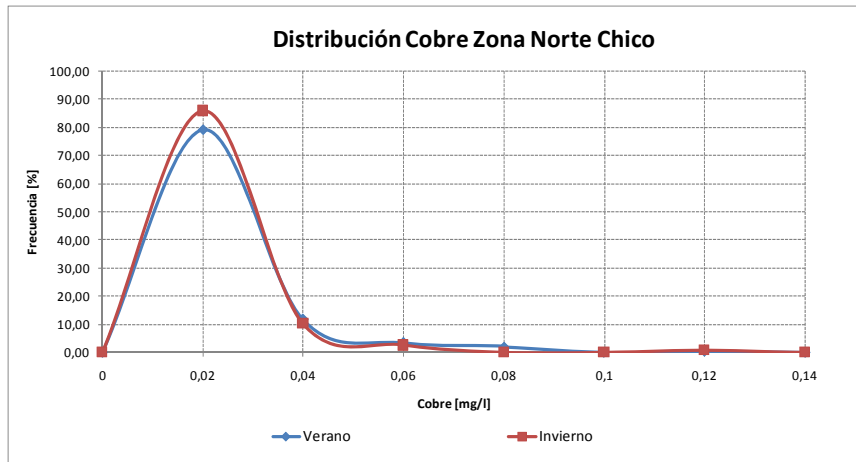


Gráfico 6.55: Distribución Cobre Invierno Verano Zona Centro Centro.

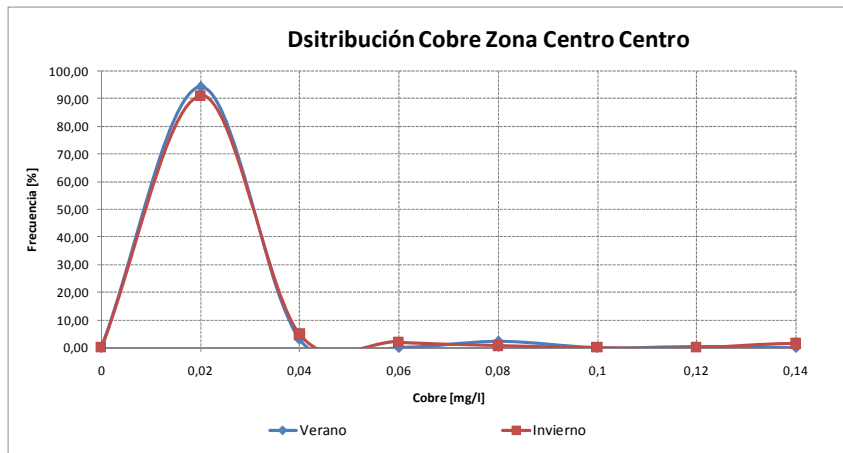
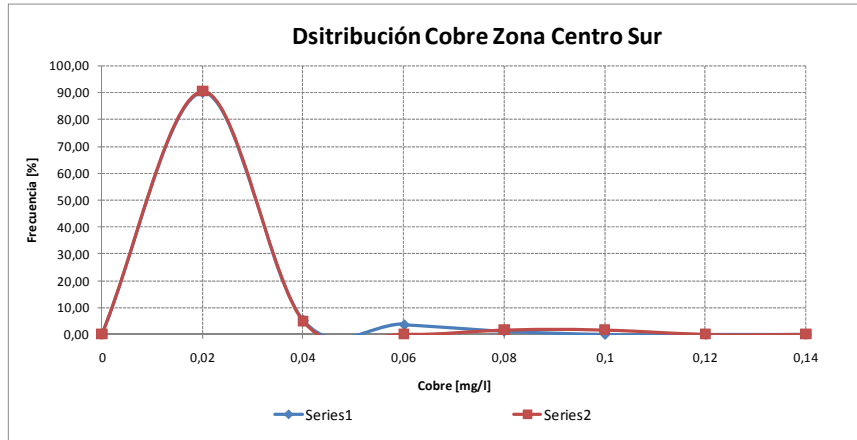


Gráfico 6.56: Distribución Cobre Invierno Verano Zona Centro Sur.



6.2.6.12 Hierro.

Para el Hierro ocurre una situación similar a la del Arsénico, debido a que en la Zona Norte Grande existen niveles elevados de hierro registrados en ciertas muestras, en cambio, para el resto de de las zonas definidas, este hecho no es tan frecuente, ya que en le resto de las zonas, los valores de hierro se encuentran, en su gran mayoría bajo los 5 mg/L, y como se verá posteriormente en los gráficos, los niveles de hierro para estas zonas están por debajo de los 0.3 mg/L, límite establecido por la normativa NCh 409. En cambio en la zona Norte Grande existe un gran porcentaje sobre este nivel de concentración, lo cual se observa en el siguiente gráfico.

Gráfico 6.57: Distribución Hierro Invierno Verano Norte Grande.

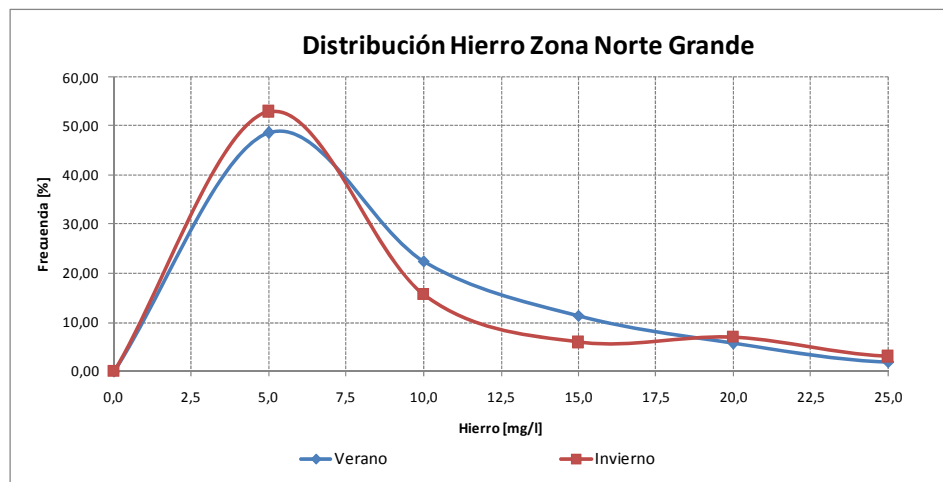


Gráfico 6.58: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Chile General.

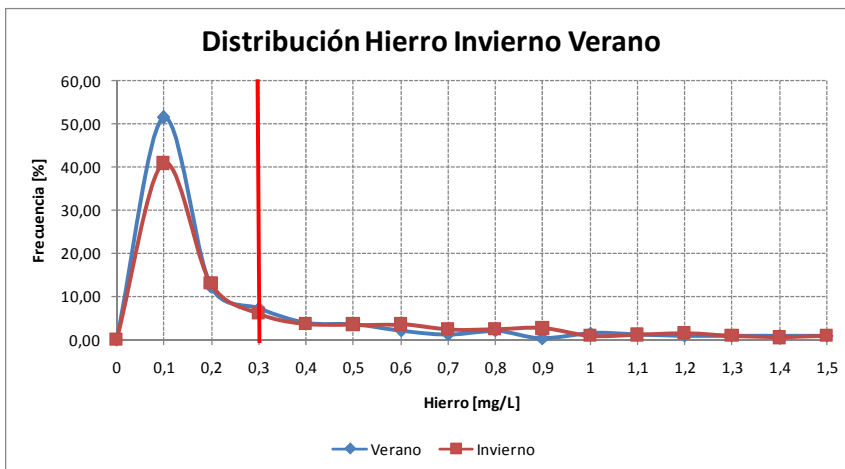


Gráfico 6.59: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Norte Grande.

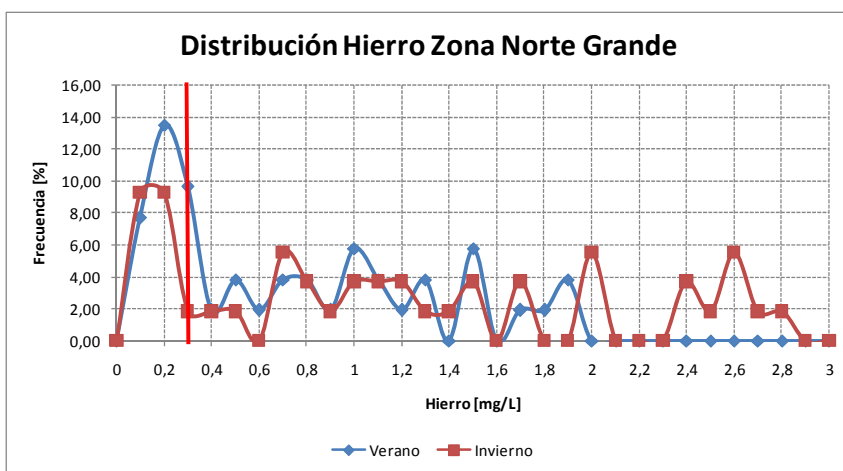
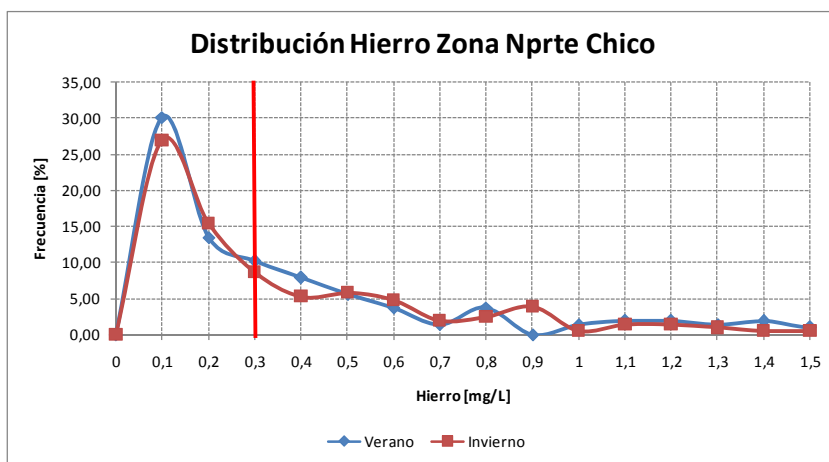


Gráfico 6.60: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Norte Chico



Línea roja: Límite concentración según NCh 409.

Gráfico 6.61: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Centro Centro.

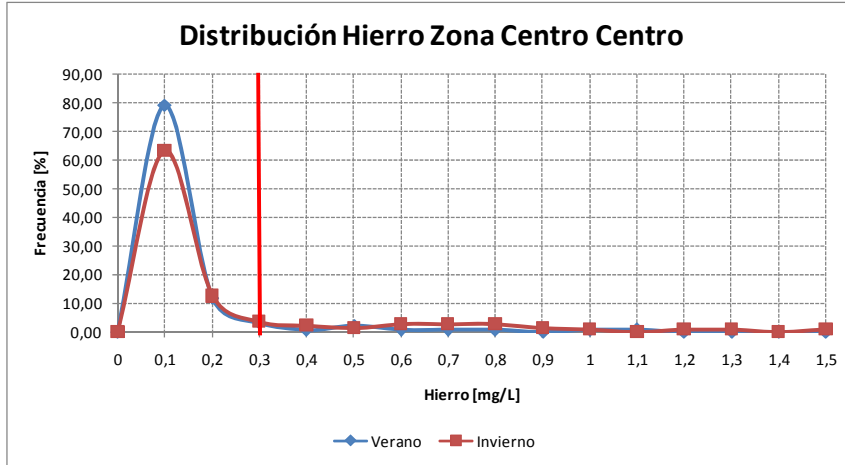
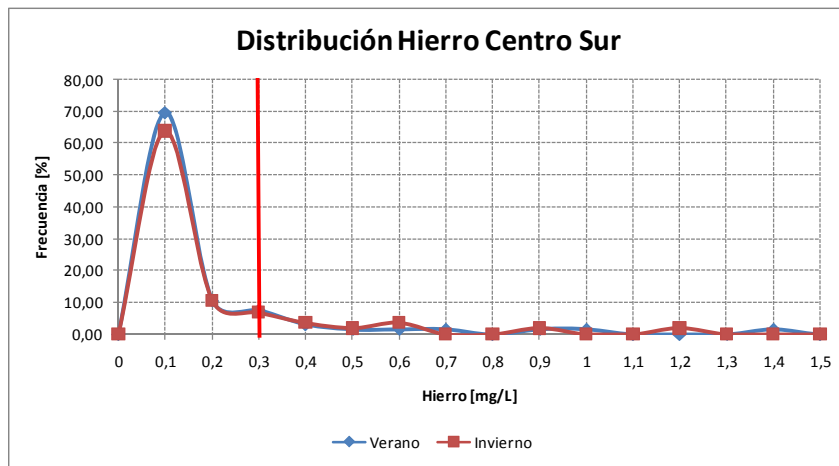


Gráfico 6.62: Distribución Hierro menor a 5 mg/L Invierno Verano Centro Sur.



Línea roja: Límite concentración según NCh 409.

6.2.7 Síntesis Caso Nivel Nacional.

A pesar de que los resultados anteriormente presentados pueden parecer coherentes, su interpretación debe ser llevada a cabo con el cuidado correspondiente, fundamentalmente por las razones mencionadas en la etapa de análisis predictivo, entre las cuales se destacan el hecho de que la pobre dispersión espacial de la red en ciertas regiones hacen que los análisis no sean más que una mera descripción local de sectores aledaños al pozo.

A lo mencionado anteriormente se añade el hecho de la inaplicabilidad de un análisis detallado a la escala del presente caso, debido fundamentalmente a la dificultad de recopilar información necesaria para la escala en la cual se trabajó, ya sea por su inexistencia o la poca información detallada que ésta pudiese proporcionar, sino que también a escalas inferiores, lo que hubiese generado mayores tiempos de análisis de la información.

Los puntos mencionados anteriormente no permiten un estudio adecuado de las condiciones naturales del sector, lo que deja de manifiesto que la red de monitoreo no fue diseñada bajo criterios específicos y que es utilizada únicamente para mantener un monitoreo constante de la calidad de los sitios donde se emplazan los pozos, sin un objetivo mayor al de ser un generador para una base de datos de calidad de aguas subterráneas.

En función de lo anterior, la utilidad de la red de monitoreo para la determinación de la calidad natural, tal y como lo decreta el D.S. 46, Título II, artículo 4, donde se establece que “la determinación de la calidad natural del agua se realizará en función de los datos de la actual red de monitoreo de calidad de la Dirección General De Aguas, Estudios afines en la cuencas o zonas respectivas y muestreo específico de parámetros para la determinación de ésta”, no es factible a estas escalas de trabajo, y que incluso la aplicación de la metodología a un nivel menor, como por ejemplo el de una cuenca, podría ser, de igual manera, poco factible debido a la pobre dispersión espacial de la red.

A lo anterior se agrega el hecho que, dado que la gran mayoría de los acuíferos se encuentran en rellenos cuaternarios, que básicamente corresponde a rellenos formados por rocas y sedimentos de geologías más antiguas presentes en la zona, lo que implica que para conocer la mineralogía

de los rellenos, es fundamental conocer la geología local, lo que no se puede lograr a esta escala de trabajo. Esto se debe fundamentalmente por el hecho de que la información disponible a esta escala, que corresponde a la carta geológica 1:1.000.000 editado por el Servicio Nacional de Geología y Minería, no posee un nivel de detalle que permita identificar las formaciones presentes en un sitio determinado ni menos identificar mineralogía específica, ya que esta carta es únicamente una referencia, por lo que, para obtener un nivel de detalle adecuado, es necesario recurrir a escalas menores de información, como lo son las cartas 1:100.000, pero dado que el Servicio Nacional de Geología y Minería no cuenta con este tipo de cartas para todo el país, la aplicación de la metodología se dificulta extremadamente para estas escalas.

Una situación similar ocurre para el caso de los mapas hidrogeológicos disponibles; ya que, a pesar de que existe un mapa Hidrogeológico 1:1.000.000 generado por la Dirección General de Aguas, los mapas disponibles a escalas inferiores a ésta no se encuentran disponibles para todo el país, sino que para zonas específicas. A lo anterior se agrega el hecho de que si se observa la leyenda del mapa hidrogeológico, en particular la columna que describe las formaciones asociadas a un tipo particular de permeabilidad, ésta no se corresponde con la leyenda descrita en la carta geológica 1:1.000.000, por lo que la utilización conjunta de ambas cartas no es posible sin la adecuada interpretación de un geólogo, lo que deja al descubierto el hecho de que cualquier profesional no vinculado a esta especialidad tenga dificultades importantes a la hora de cruzar la información entregada por ambas cartas.

Las discusiones desarrolladas anteriormente no se basan únicamente en la mera subjetividad, sino que han sido el resultado tanto de los análisis presentados anteriormente, como el de diversas entrevistas realizadas con diferentes profesionales tanto del Servicio Nacional de Geología y Minería y la Dirección General De Aguas, con docentes de la Universidad de Chile, actualmente presentes en los Departamentos de Geología e Ingeniería Civil, como también mediante la comparación de la metodología francesa desarrollada por Chèry (2006).

En relación a los resultados obtenidos, se puede desatacar el hecho de que en la gran mayoría de los parámetros analizados, la gran parte de las muestras analizadas se encuentran por debajo de los valores límites establecidos por la normativa chilena, lo anterior se puede observar en las distribuciones graficadas anteriormente. Sin embargo, debido a la pobre dispersión espacial de los pozos de la red de monitoreo de calidad, algunos de los resultados deben ser entrepretados

con sumo cuidado, fundamentalmente aquellos obtenidos para la zona Norte Grande, dado que si se observan los gráficos presentados en los resultados, se podrá ver que en varios casos, como por ejemplo la Conductividad Específica, el Cloruro y el Calcio, el comportamiento del parámetro es muy disímil del resto de las zonas. Esto se debe fundamentalmente al hecho de que la zona Norte Grande, compuesta por las regiones de Tarapacá y Antofagasta, presenta una distribución particular de los pozos (Figura 2.1), ya que la mayoría de los pozos presentes en esta zona se encuentran ubicados en la región de Tarapacá, fundamentalmente en la Pampa del Tamarugal, por lo que se puede decir que las distribuciones obtenidas son representativas de este sector y no de ambas regiones.

Así mismo, los análisis detallados fueron realizados únicamente para los casos del Arsénico y el Hierro debido a que solo en algunas zonas se registraban valores mayores a los establecidos por la normativa, por lo que no se hizo mayor énfasis en el resto de los parámetros. Lo anterior se basa fundamentalmente en el hecho de que los gráficos presentados en esta sección solo tiene como objetivo visualizar el comportamiento del parámetro en diferentes zonas del país y analizar si las muestras registradas para estos parámetros se cumplen con las normativas Chilenas.

Situación similar ocurre con el resto de las regiones, por lo que la interpretación de los resultados, como se mencionó anteriormente, debe ser realizada con sumo cuidado, ya que el objetivo de presentar las distribuciones es únicamente mostrar el comportamiento de los parámetros, diferenciando la zona donde es medido, pero en ningún caso representan un resultado definitivo; por lo que es necesario el desarrollo de campañas de monitoreo a gran escala para poder lograr resultados como los mencionados anteriormente.

6.3 Caso Cuenca Aconcagua.

Como se pudo observar en el ejemplo anterior, la aplicación de la metodología a nivel nacional no es factible debido a la falta de información adecuada que permita trabajar a esas escalas, por lo que en el ejemplo a seguir se aplicará la metodología a un caso particular, la Cuenca del Río Aconcagua y específicamente al acuífero del Río Aconcagua.

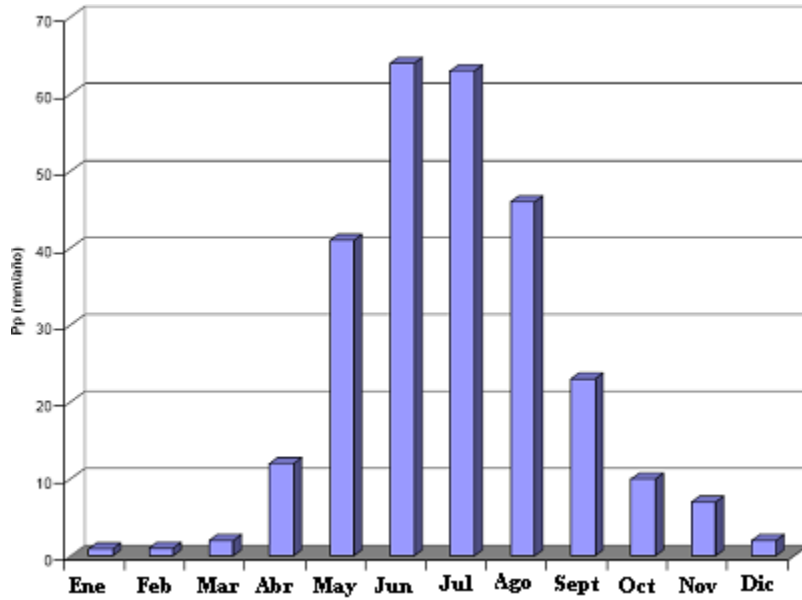
6.3.1 Características principales.

La hoya del río Aconcagua se desarrolla en el extremo sur de la zona de los Valles Transversales o Semiárida, en la V Región de Valparaíso. Su extensión alcanza a 7.340 km², y su rumbo general es de E a W. Sus más caudalosos afluentes los recibe por la ribera norte y todos sus tributarios formativos asientan sus cabeceras en el interior de la cordillera andina en un sector donde ésta alcanza elevaciones excepcionales, como son los cerros Juncal (6.110 m); Alto de los Leones o Cabeza de León (5.400 m.) y el macizo del Aconcagua (7.021 m.) (CADE-IDEPE, 2004).

El Aconcagua se forma de la unión en la cordillera de los Andes, a 1.430 m de altitud, de los ríos Juncal, que proviene del oriente, y Blanco, que vienen del sureste. Desde la junta con el río Blanco, el río Aconcagua recorre 142 km hasta su desembocadura en la bahía de Concón en el Mar Chileno. Sin embargo, si se considera el desarrollo del río Juncal desde su nacimiento, el recorrido alcanza a 177 km. (CADE-IDEPE, 2004). Los ríos tributarios más importantes son Estero Riecillos, Estero Pocuro, Río Putaendo, Estero Catemu, Estero Los Loros, Los Litres y Limache.

Los climas que se distinguen en la cuenca del Río Aconcagua corresponden a los climas: Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes. En general, para ambos tipos climáticos, los valores registrados de precipitación, son mayores durante las temporadas invernales especialmente durante los meses de junio, julio y agosto (Figura 6.3 y Figura 6.4)

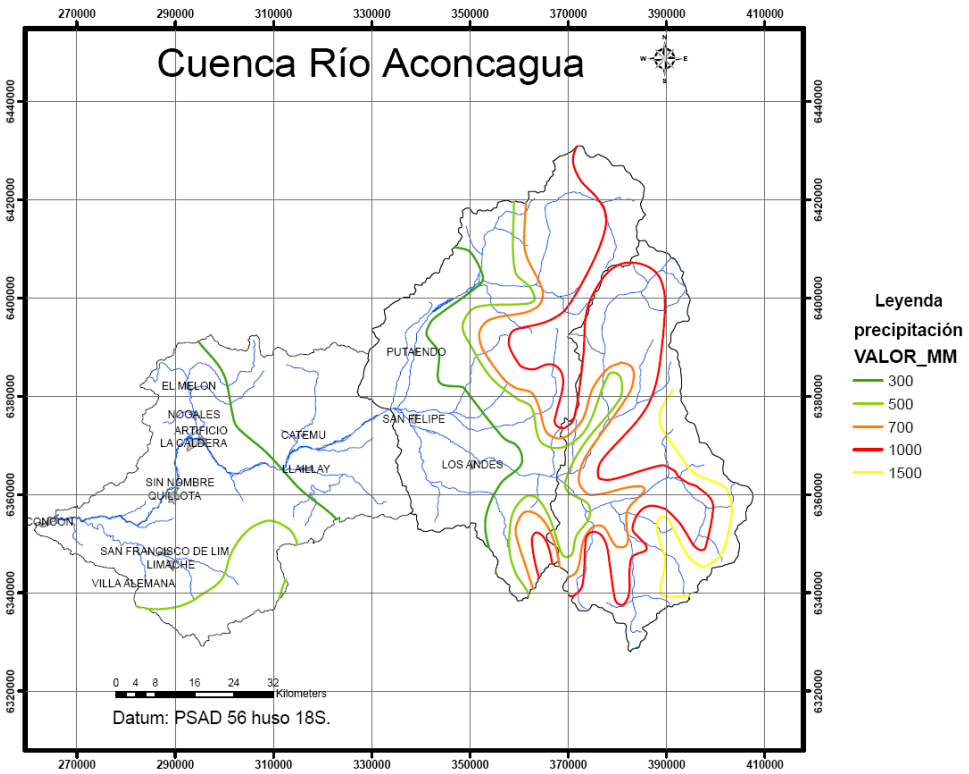
Figura 6.3: Distribución precipitaciones.



Fuente: CADE-IDEPE (2004)

La siguiente figura presenta la distribución espacial de la precipitación en la cuenca:

Figura 6.4: Distribución de la precipitación cuenca del río Aconcagua.



Fuente: Elaboración Propia

Si se observa la figura anterior, se podrá ver que las precipitaciones se producen, en gran medida, en la parte alta de la cuenca, con valores que promedian los 1.000 mm/año.

El régimen del río Aconcagua es nivo - pluvial, ya que en la parte alta de su cuenca, donde están sus ríos tributarios de alta cordillera Colorado, Juncal y Blanco, presenta un régimen nival; en cambio en la parte baja de la cuenca comienza a tomar importancia la influencia pluvial. La siguiente tabla presenta la disponibilidad de recursos hídricos superficiales (m^3/s) durante régimen natural para dos probabilidades de excedencia (CADE-IDEPE, 2004):

Tabla 6.8: Caudales en un Año Hidrológico Tipo.

AÑO HIDROLÓGICO TIPO				
SECTOR	Probabilidad de Excedencia de 50%		Probabilidad de Excedencia de 85%	
	Caudal Medio Anual	Caudal medio mes mínimo	Caudal Medio Anual	Caudal medio mes mínimo
Río Blanco	9,53	3,05	6,74	2,15
1era Sección de Riego (San Felipe-Los Andes)	30,64	12,99	19,76	8,94
2da Sección de Riego (San Felipe-Romeral)	33,6	14,53	20,51	4,46
3era Sección de Riego (Romeral-Tabolango)	55,7	35,04	36,87	24,1
4ta Sección de Riego (tabolango-Con Con)	57,12	35,46	37,26	24,22
Río Putanedo	6,98	3,18	3,51	2,06
Estero Limache	1,41	0,22	0,39	0,06

Fuente: Von Igel (1999)

En general, el río Aconcagua presenta sus mayores caudales producto de los deshielos en verano, especialmente en su curso superior. Sin embargo, las crecidas extraordinarias más importantes han tenido origen pluvial y se han originado como producto de precipitaciones con línea de nieve alta en los meses de Junio y Julio (Von Igel, 1999).

6.3.2 Contexto Geológico.

En esta área afloran unidades principalmente volcánicas e intrusivas, interestratificadas con sedimentos marinos y continentales, cuyas edades fluctúan entre el Paleozoico y el Cenozoico Inferior. (Parraguez, 1985). Los sedimentos marinos están restringidos al Jurásico y Cretácico Inferior distribuyéndose en el sector occidental de la Cordillera de la Costa y en la frontera con Argentina en la Cordillera de los Andes. A continuación se detalla de manera general la geología de la cuenca

6.3.2.1 Rocas Intrusivas.

6.3.2.1.1 Unidades Paleozoicas.

La unidad que destaca en el Valle del Aconcagua es la Unidad Cochoa, la cual aflora entre Con Con y Reñaca y su composición varía desde granodioritas a tonalitas gneisicas de grano grueso (Von Igel, 1999).

6.3.2.1.2 Unidades Jurásicas.

En la Cuenca del Aconcagua destaca la Súper Unidad Mincha, en la cual se destaca la presencia de dioritas cuarcíferas de piroxeno y/o anfíbola, monzodiorita de biotita, granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda (Von Igel, 1999) (SERNAGEOMIN, 2003)

6.3.2.1.3 Unidades Cretácicas.

Una de las unidades asociada a esta edad geológica, y presente en la cuenca del Aconcagua, es la Súper Unidad Illapel, la cual está compuesta por dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, como también granodioritas y monzodioritas de hornblenda y biotita, como también sienogranitos (Von Igel, 1999). Asociada a ésta unidad se encuentran una serie de yacimientos de Fe, Cu y Al (Figura 6.7) (SERNAGEOMIN, 2003).

Otra unidad presente en la cuenca es la Unidad Fredes, la cual está formada por monzogranitos de hornblenda y biotita, grabos de anfibola y granodioritas (Von Igel, 1999)

6.3.2.2 Mesozoico.

6.3.2.2.1 Unidades Cretácicas.

Corresponden a unidades principalmente volcánicas constituidas por coladas y depósitos piroclásticos riolíticos, dacíticos, andesíticos y basálticos, asociados a volcanes antiguos bien conservados o activos, y unidades intrusivas. Las principales formaciones de éste periodo son Formación Lo Prado, Veta Negra, Las Chilcas, San José, Cristo Redentor, Los Pelambres y Salamanca (Von Igel, 1999)

Rocas de calcilitas y calcarenitas, como también andesita y areniscas calcareas conforman la Formación Lo Prado. La formación Veta Negra está conformada por rocas volcánicas andesíticas (miembro inferior Purehue) como también lavas andesíticas y ocoitas (miembro superior Ocoa). La Formación las Chilcas está formada por rocas volcánico-sedimentarias provenientes de lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones marinas. La presencia lavas andesíticas también se observa en las formaciones Pelambres y Salamanca. La Formación San José destaca por la presencia de lutitas y areniscas calcareas como también yeso. (Von Igel, 1999)

6.3.2.2.2 Unidades Jurásicas.

Corresponden a unidades volcánicas constituidas por coladas y depósitos piroclásticos riolíticos, dacíticos, andesíticos y basálticos, asociados a volcanes antiguos bien conservados o activos, y a unidades sedimentarias constituidas por areniscas, lutitas, conglomerados y calizas con intercalaciones volcánicas. Las formaciones de esta edad presentes en el valle del Aconcagua son principalmente Ajial, Cerro Calera, Horqueta, Río Damas y Yeso Principal

En estas unidades destacan la presencia de lavas queratofíricas (rocas volcánicas alteradas que presentan enriquecimientos meta somáticos de Sodio y está compuesta por minerales de albita y biotita) con intercalaciones de tobas, brechas y rocas sedimentarias lenticulares (F. Ajial), como también sedimentos marinos como areniscas tobaceas, calcarenitas, calizas dolomíticas, lutitas calcáreas y conglomerados (Fm. Cerro Calera). La presencia de lavas andesítico-basálticas y niveles de brechas y tobas riolíticas se aprecian en la Formación Horqueta, en cambio afloramientos de yesos diapíricos se observan en Yeso Principal. (Von Igel, 1999)

6.3.2.3 Cenoico.

6.3.2.3.1 Unidades Cuaternarias.

Corresponden a depósitos no consolidados, constituidos por sedimentos fluviales, glaciales, aluviales, lacustres, aluvionales, eólicos. Los sedimentos de los rellenos, hacia las cabecera de los valles Aconcagua, la Ligua y Petorca, se componen de material de granulometría heterogénea y están asociados a procesos glaciales y corrientes de barro, llenando gran parte de las quebradas tributarias y los tramos superiores de los valles principales (Parraguez, 1985). Los sedimentos más recientes son productos de la acción erosiva de los cursos fluviales del área conjuntamente con procesos gravitacionales, los cuales representan los abanicos o depósitos aluviales presentes en los valles tributarios y principales. En los flancos de estos depósitos se encuentran los conos de deyección, los cuales representa al material depositado por efectos de meteorización, gravedad y eventual escorrentía de vertientes (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998)

En términos generales, se puede afirmar que la mayoría de los detritos que constituyen estos rellenos cuaternarios, provienen de la denudación de rocas volcánicas e ígneas intrusivas del área, presentando una fracción bastante subordinada de fragmentos sedimentarios. (Parraguez, 1985)

6.3.2.3.2 Unidades Terciarias.

Corresponden a unidades principalmente volcánicas constituidas por coladas y depósitos piroclásticos riolíticos, dacíticos, andesíticos y basálticos, asociados a volcanes antiguos bien conservados o activos, y unidades intrusivas. Las formaciones correspondientes a esta edad son la Formación Farellones y Confluencia.

La Formación Farellones se destaca por la presencia de riolitas y dacitas, así como también de flujos de lava andesítico-basálticas, en cambio en la Formación Confluencia se destaca la presencia de gravas y ripios, así como también areniscas, brechas y limolitas. (Von Igel, 1999)

6.3.2.4 Fallas.

En Toda la zona es posible observar numerosas fallas que muestran sets de orientación bien definidos, que se pueden agrupar en tres grupos.

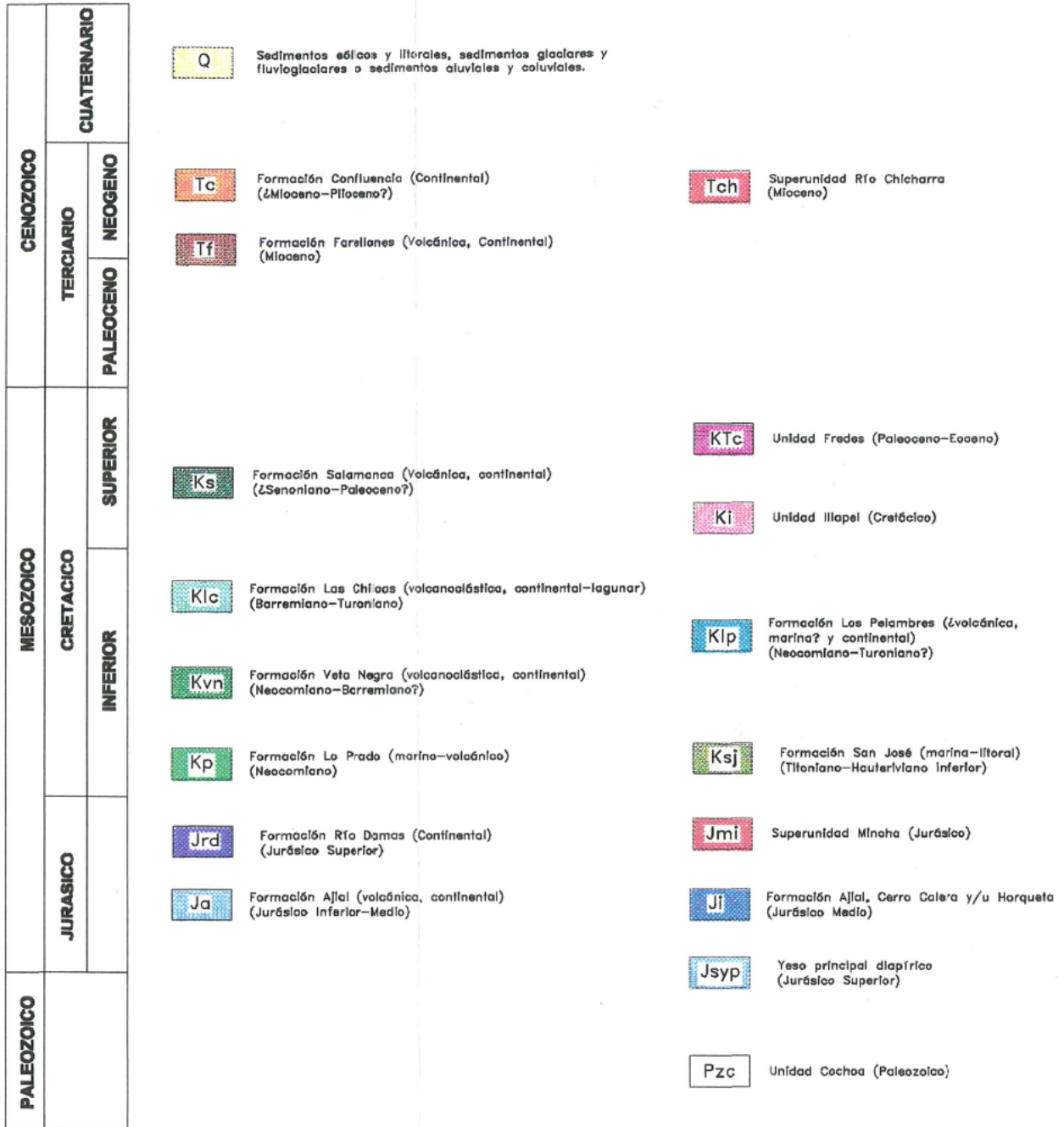
Fallas sentido NS-NNW

Fallas sentido NNW-NW

Fallas sentido NNE-NE

De estos grupos, el primero es el que tiene vital relevancia dado que en algunos sectores, las fallas atraviesan la roca base que se encuentra bajo el relleno que conforma al acuífero, lo que implica que posea cierta importancia hidrogeológica. Estas fallas aparecen bien representadas tanto en el Dominio Central como en el Cordillerano (Figura 6.5). La Megafalla Pocuro representa el límite entre estos dominios y destaca como uno de los mayores elementos de la zona, extendiéndose desde los 31° a los 34° latitud sur y corresponde a una zona de fallas extensiva. Al interior de la zona de fallas se desarrolla una serie de fallas menores de rumbos más o menos paralelos al rumbo de la estructura mayor y fallas conjugadas, que generan una zona de

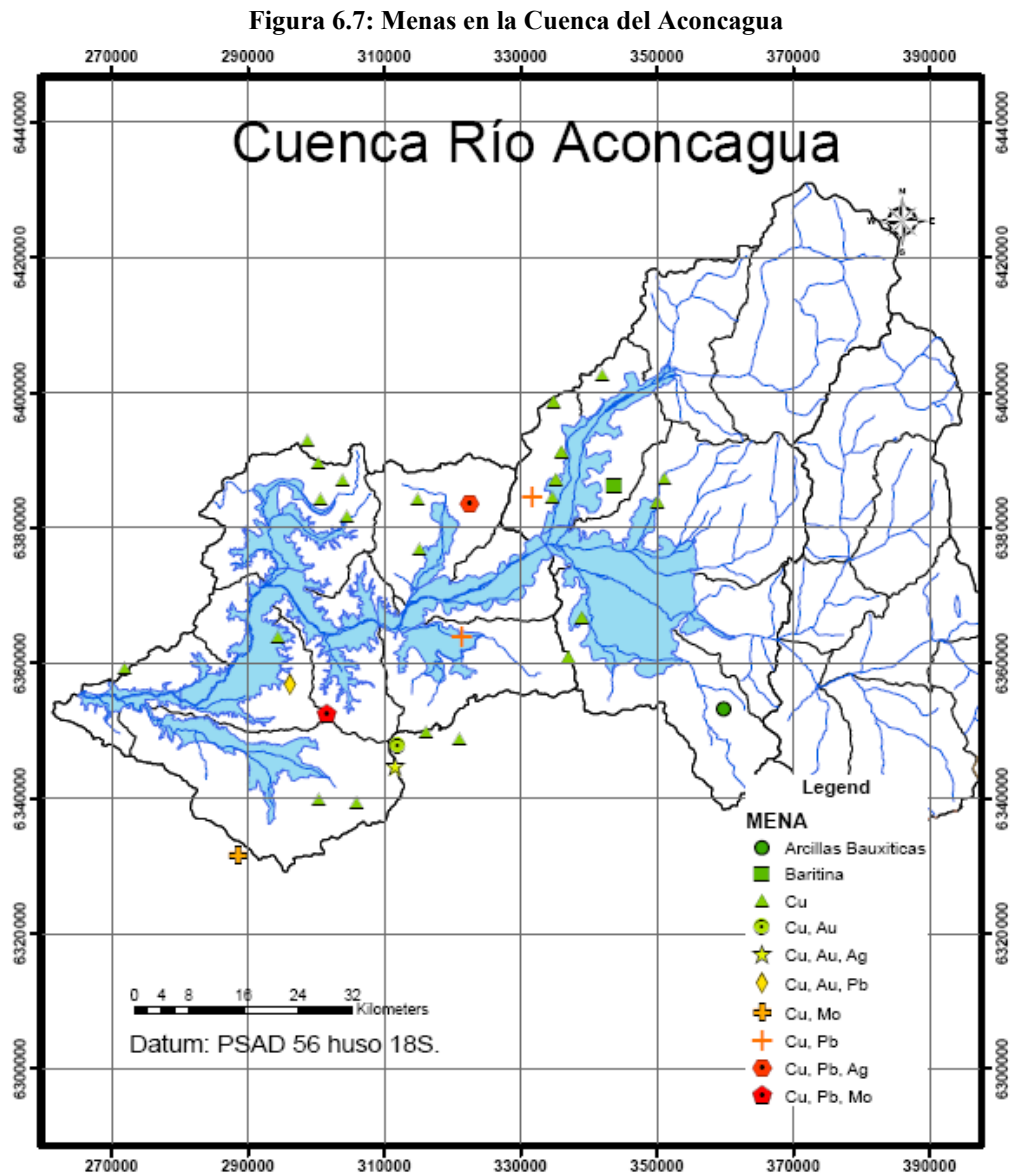
Figura 6.6: Leyenda Mapa Geológico.



Fuente: Von Igel. (1999)

6.3.3 Principales Yacimientos.

En esta área existen principalmente yacimientos de cobre (algunos pórfidos cupríferos: Andina, Los Bronces), y algunos yacimientos no metálicos de arcillas bauxíticas y baritina. La Figura 6.7 muestra las principales menas y yacimientos explotados en la cuenca del Río Aconcagua.



Fuente: Elaboración propia basado en Análisis de Presencia de Contaminantes no Controlados en Agua Potable (Superintendencia de Servicios Sanitarios, Octubre 2001)

6.3.4 Contexto Hidrogeológico.

El tipo de relleno del cual se compone el acuífero del valle del Aconcagua es predominantemente Relleno Cuaternario, los cuales cubren una superficie de aproximadamente 700 Km² y sus espesores varían entre los 600 m y 400 m (Von Igel, 1999).

Hacia las cabeceras del valle del Río Aconcagua se acumulan grandes volúmenes de sedimentos de variada granulometría. Los depósitos de tipo morrénico se distribuyen por sobre la cota 2500 m.s.n.m. hacia aguas arriba. Depósitos de corrientes de barro originados durante el período de glaciación se exponen hasta la localidad de Santa María. Estos depósitos son los que rellenan gran parte de las quebradas tributarias y los tramos superiores de los valles principales. Los sedimentos de rellenos más recientes, son producto de la erosión ejercida por los cursos fluviales del área que, conjuntamente con los procesos gravitacionales, han re trabajado los accidentes topográficos existentes. Se reconocen estructuras depositacionales como conos de deyección, terrazas, fluviales, llanuras aluviales, depósitos de pie de monte y taludes de detritos. (Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas, 2002)

El origen de los fragmentos clásticos pertenecientes a estos depósitos cuaternarios proviene de la erosión de rocas volcánicas e intrusivas, con un aporte menor de rocas sedimentarias. Los sedimentos en el área conforman una capa que cubre una extensa superficie de aproximadamente 1155 km². Los depósitos exhiben menor amplitud superficial en la desembocadura de los valles de Llay Llay, Rabuco y hacia aguas abajo de la localidad de San Pedro donde el valle se estrecha notoriamente. Los valles y quebradas tributarias del río Aconcagua, aportan al valle principal importantes volúmenes de sedimentos, que normalmente presentan fracciones finas y que se despliegan a modo de abanico de pendiente baja, que fluctúa entre el 0,6% y el 10%. (Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas, 2002)

6.3.4.1 Unidades Hidrogeológicas.

En el Valle del Aconcagua se han distinguido 4 unidades hidrogeológicas, las cuales han sido designadas con las letras A, B, C y D. (Parraguez, 1985; Von Igel, 1999). Estas Unidades son descritas a continuación:

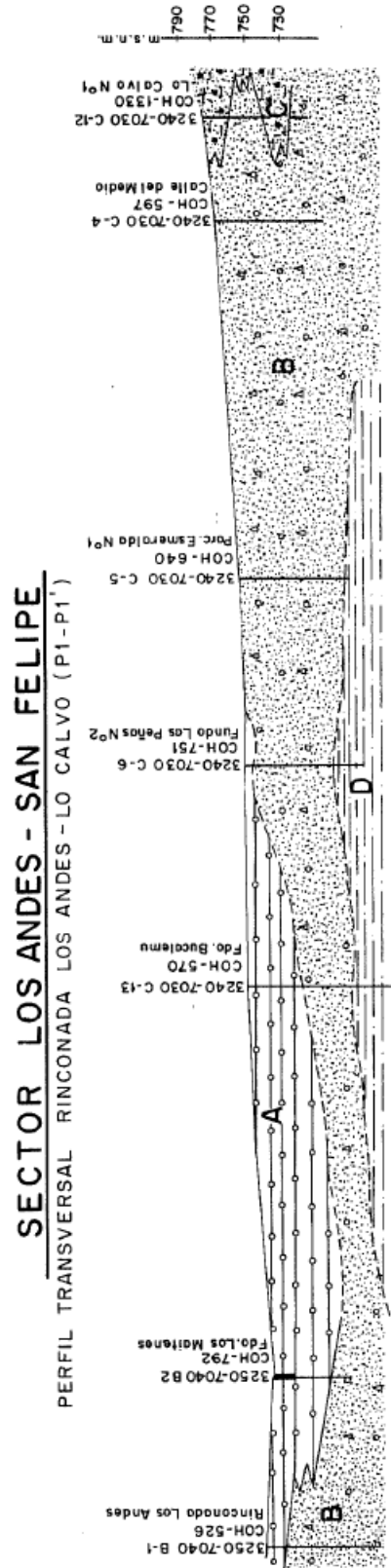
6.3.4.1.1 Unidad A.

Corresponde a un conjunto de sedimentos de granulometría heterogénea con abundante matriz de arenas finas, limos y arcillas. La fracción clástica está constituida por fragmentos volcánicos que fluctúan entre el rango arenas medias a gravas finas y representan a lo sumo el 35% del volumen total del sedimento. La participación de arcillas imprime a los depósitos un carácter de regular permeabilidad. Es común encontrar también fracciones subordinadas de ripios y bolones, que no representan más allá de un 10% del volumen total de sedimento. Estos rellenos deben su origen, primordialmente, a la acción depositacional del estero Pocuro, a probables efectos de borde del Río Aconcagua durante crecidas y posibles flujos rápidos que irrumpieron en el valle desde el Sur y Surponiente.

Estos sedimentos se emplazan hacia el Sur y Poniente de la ciudad de Los Andes, adosándose a la vertiente del valle y desplegándose casi hasta el río Aconcagua. El estero Pocuro escurre prácticamente bordeando el área cubierta por estos rellenos, por su flanco Sur y Sur poniente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

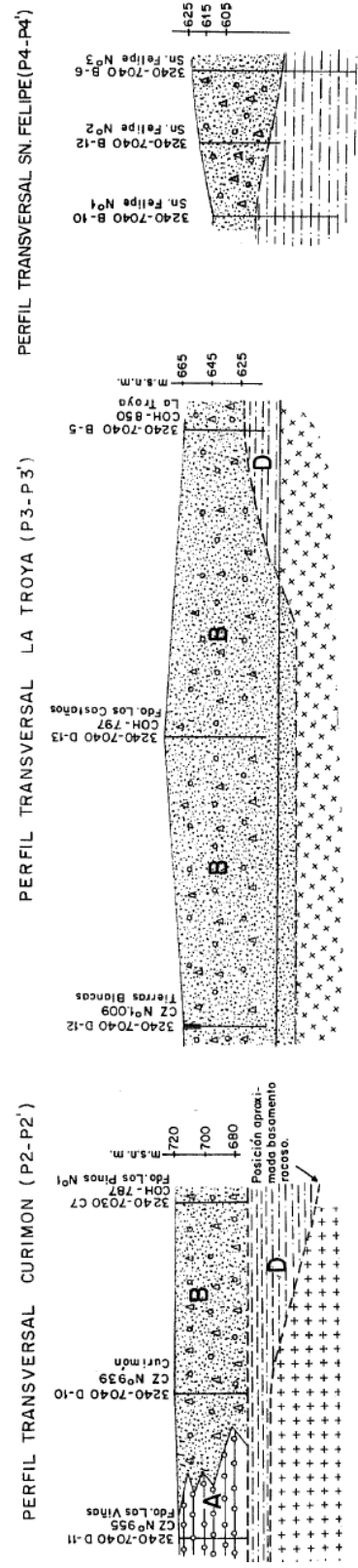
Hacia el Sur de la ciudad de San Felipe los sedimentos de la Unidad A se acuñan contra la vertiente Oeste del valle. Estos sedimentos engranan, hacia el Norte con los sedimentos gruesos de la Unidad B, sobreyaciéndolos en parte (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La potencia de la Unidad A es muy variable y no es posible caracterizar sus variaciones en forma detallada con los antecedentes disponibles.

Figura 6.8: Perfil Longitudinal Sector Los Andes San Felipe.



Fuente: (Parraguez, 1985)

Figura 6.9: Perfiles Transversales Sector San Felipe Los Andes



Fuente: (Parraguez, 1985)

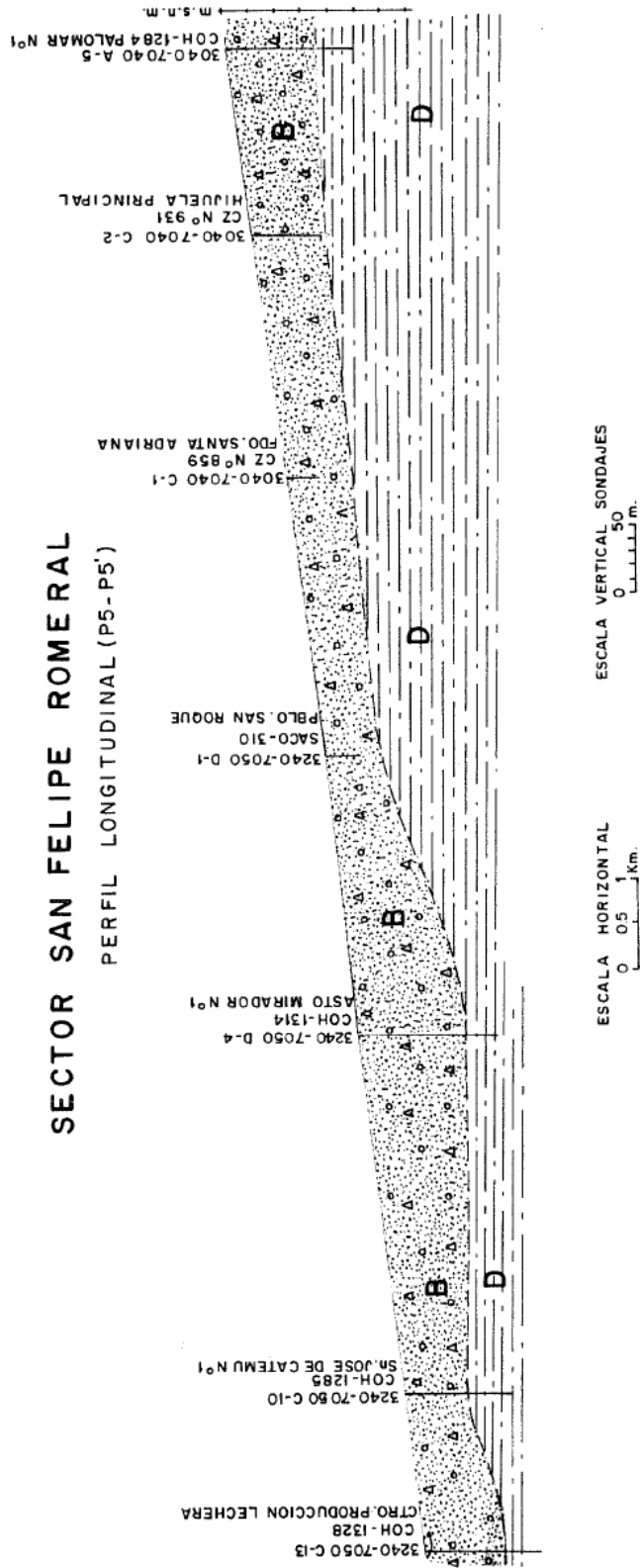
El máximo espesor detectado alcanza, aproximadamente, los 30 m y en las zonas de engrane no supera los 5 m. Con los antecedentes disponibles no resulta posible conocer cuál es la relación entre esta unidad y el conjunto definido como D, de hecho, parece que es posible que los detritos de la Unidad A sobreyasen a los materiales más antiguos de la Unidad D, en el sector comprendido entre Los Andes y Curimón, hacia el centro del valle. Aguas abajo de esta última localidad son, sin duda, los sedimentos de la Unidad D los que se ubican en profundidad, continuándose ininterrumpidamente en dicha dirección (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

6.3.4.1.2 Unidad B.

Sedimentos de granulometría gruesa a media, de ripios gravillentos. Suelen presentar una matriz arenosa, que en algunos sectores exhibe contaminaciones escasas de limos arcillosos. La fracción clástica está constituida por fragmentos de rocas volcánicas y en menor grado plutónicas y sedimentarias. El redondeamiento y esfericidad de los clastos, es variable y hacia el sector de las cabeceras suele ser relativamente bajo, para ir aumentando gradualmente, en sentido del escurrimiento.

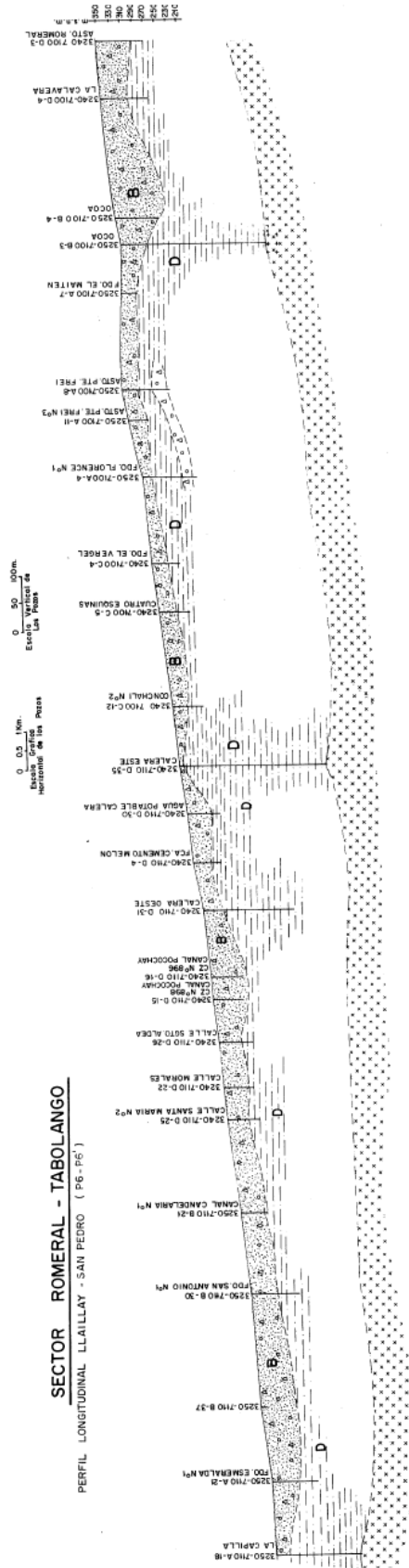
La gruesa granulometría de los sedimentos condiciona una buena permeabilidad en los mismos. Sin embargo, existen áreas donde las contaminaciones limos-arcillosas, aportadas por estructuras secundarias, empobrecen las buenas características hidrogeológicas de estos rellenos. Estas últimas dependen del volumen y granulometría de los sedimentos, que juegan un rol de matriz, que en algunos casos son abundantes y del rango limos finos arcillosos. Los sedimentos de esta Unidad constituyen, el conjunto depositacional de mayor importancia hidrogeológica en el valle, tanto por sus características de buen acuífero como por su extensión. Se despliegan en superficies abarcando el valle en todo su ancho, sin interrupción desde San Felipe a desembocadura (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Figura 6.11 y Figura 6.12) salvo áreas donde exhiben contaminaciones limoarcillosas laterales.

Figura 6.10: Perfil Longitudinal Sector San Felipe-Romerol



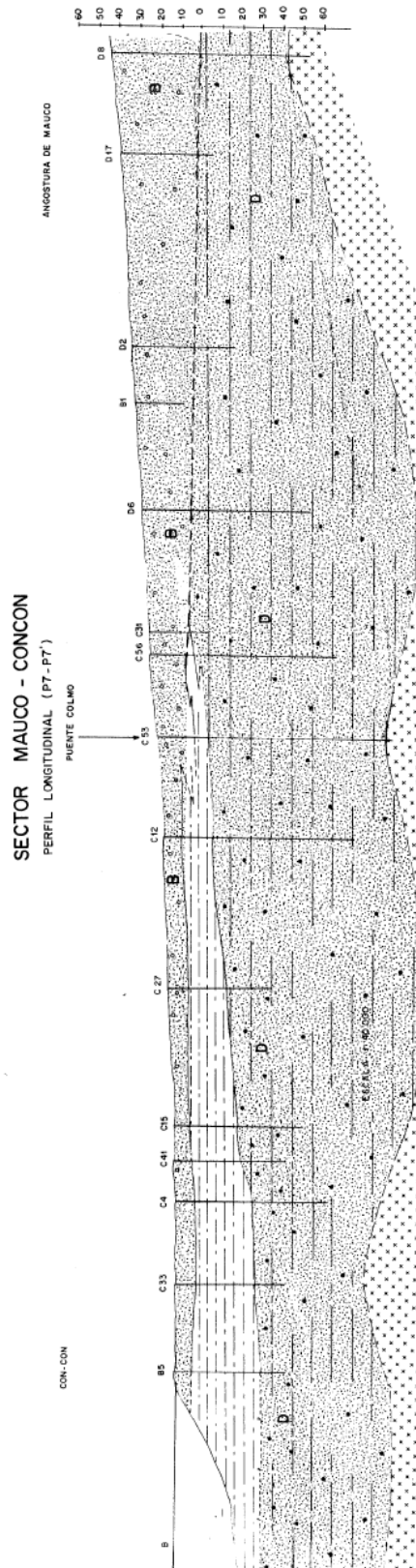
Fuente: (Parraguez, 1985)

Figura 6.11: Perfil Longitudinal Sector Romeral-Tabolango



Fuente: (Parraguez, 1985)

Figura 6.12: Perfil Longitudinal Sector Mauco-Con Con



Fuente: (Parraguez, 1985)

En el sector comprendido entre Los Andes y San Felipe, se detectan engranes importantes entre esta unidad y las otras. Hacia el Sur, se interdigita y subyace a los rellenos de la unidad A, hacia el noroeste engrana con los depósitos de la Unidad C y sobreyace a lo largo de todo el valle a los finos depósitos de la Unidad D (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). A lo largo de todo el valle se observa una contaminación de materiales finos hacia los flancos de la unidad. Este hecho se debe a los aportes de cursos torrenciales, que en el área de desembocadura al valle pierden energía y depositan las fracciones finas en suspensión. Las inundaciones laterales del río también suelen ser fuentes de sedimento fino, que contaminan los depósitos de mayor granulometría.

Las áreas donde se han detectado los mayores efectos de esta contaminación son las áreas de tributación de los valles de Putaendo, Llay Llay, Los Litres, Catemu y Jahuel. También se observa, que hacia la vertiente oriental del valle, en el tramo comprendido entre La Calera y San Pedro, existen aportes importantes de sedimentos limo-arcillosos que empobrecen, seriamente, las buenas características hidrogeológicas de los rellenos de la Unidad B (Figura 6.11)

6.3.4.1.3 Unidad C.

Sedimentos de granulometría muy heterogénea donde priman las gravas medias que alcanzan hasta el rango de arenas finas. La matriz debe ser limosa con una participación moderada de arcillas. La presencia de esta matriz, que generalmente representa un volumen importante de sedimento, imprime al mismo un carácter de baja permeabilidad. También se reconocen ripios, bolones y bloques aislados en porcentaje no superior al 15%. Estos depósitos corresponden a corrientes de barro, que tienen un origen esencialmente gravitacional. La fracción clástica de estos materiales es de origen volcánico plutónica y no exhiben redondeamiento ni esfericidad alguna.

Estos sedimentos afloran sólo en el extremo Nororiente del valle. Los rellenos se despliegan hacia el valle a modo de abanico producto de su modo de ocurrencia. Esta unidad se definió en base al análisis geomorfológico realizado por Parraguez (1985), donde se puede esperar potencias que fluctúen entre 25 y 40 m en el área de engrane con los rellenos de la Unidad B. Hacia el Noroeste de este sector es posible que los espesores aumenten para luego acuñarse contra la vertiente del valle. El engrane de los depósitos de la Unidad C con los de la Unidad B, afecta sólo

a rellenos que se ubican hacia el techo de esta última. Es posible además, que en los sedimentos gravitacionales de C estén representados varios eventos.

6.3.4.1.4 Unidad D.

Corresponde a un conjunto de sedimentos de fina granulometría del tipo arenas limosas con una abundante matriz de arcilla que representa más o menos un 50% del volumen total de los depósitos. Sedimentológicamente, este conjunto de depósitos son correlacionables con la Unidad A, sin embargo, genéticamente, no dicen relación los unos con los otros.

Es posible que, en parte, estos rellenos sean el resultado de flujos laháricos y por otra parte se deba al retrabajo de depósitos glaciares acumulados hacia las cabeceras del valle. También se puede asociar al derretimiento de los hielos, un lavado de las fracciones finas existentes en los abundantes depósitos morrénicos, retransportándolos y depositándolos aguas abajo.

Estos depósitos se reconocen a lo largo de todo el valle y corresponde a los sedimentos más antiguos que se emplazan en la estructura geomorfológica del río Aconcagua. Los sedimentos de esta unidad subyacen a lo largo del valle a los depósitos de B y posiblemente alcancen en muchos puntos la roca fundamental. (Figura 6.8, Figura 6.9, Figura 6.10, Figura 6.11 y Figura 6.12)

Existen además estratos con características hidrogeológicas importantes en los sectores de Llay Llay y Limache (Figura 6.13y Figura 6.14), los cuales no están clasificados dentro de las unidades anteriormente mencionadas, sino que se encuentran individualizados como rellenos característicos de estos sectores, razón por la cual se procede a describir brevemente el relleno de estos sectores.

- Relleno Valle Llay Llay: En el valle tributario del estero Los Loros se observa una alternancia de sedimentos arcillosos y arenosos en que se distinguen cinco niveles con características sedimentológicas distintas (Figura 6.13).

En este valle aflora un nivel de sedimentos areno-gravillentos con matriz limosa escasa, cuya potencia fluctúa entre los 0 y los 10 metros de profundidad. El segundo nivel, relleno arcillo limoso, presenta características confinantes con espesores entre los 5 y 30 metros.

El tercer, de características permeables, y el cuarto nivel, de características impermeables, tienen espesores que fluctúan entre los 5 y 20 metros. El basamento rocoso, según Parraguez (1985) y Von Igel (1999), se encontraría a unos 90 metros de profundidad.

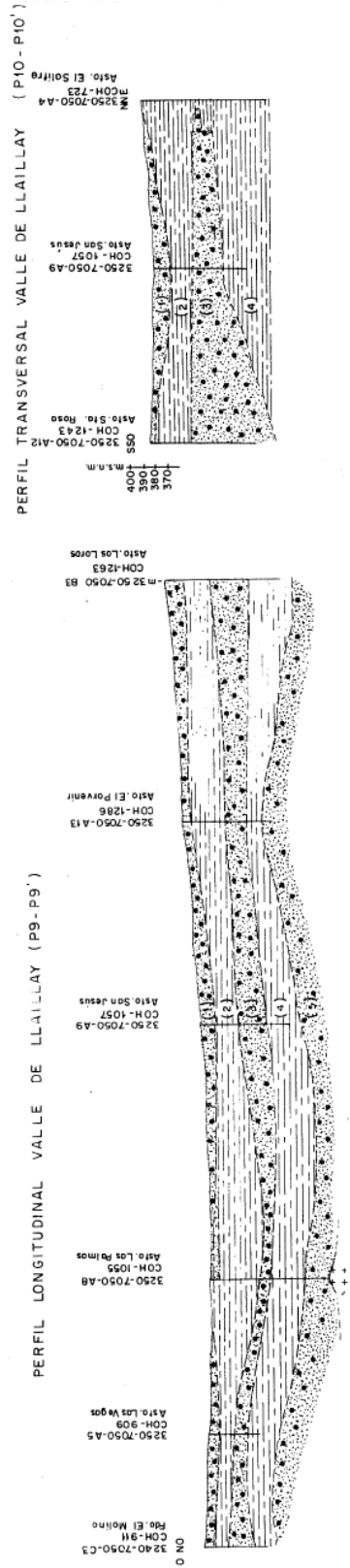
Los sedimentos de este valle fueron depositados en condiciones paleo-lacustres que se habría desarrollado en la zona producto del embalsamiento de las aguas superficiales por la existencia de una barrera de contención por acumulaciones laterales del río Aconcagua.

- Relleno Valle de Limache: Los Sondajes realizados por Parraguez (1985) en el sector del estero Pelumpen o Limache han permitido identificar cuatro niveles estratigráficos que se extienden casi en continuo a través del valle de Limache (Figura 6.14).

El nivel que aflora corresponde a sedimentos arenosos finos con abundantes limos y arcillas cuya potencia máxima estimada es de 20 metros. Los sedimentos del segundo nivel son ripiosos con matriz arenosa, y se emplaza a una profundidad de 15 a 20 metros y tienen potencias que varían entre los 25 y 40 metros. El tercer nivel se compone de sedimentos arcillosos con espesores de 15 y 30 metros. El cuarto y último nivel se compone de gravas y ripios en matriz arenosa y se ubica bajo los 70 metros, descansando sobre la roca basal (Von Igel, 1999).

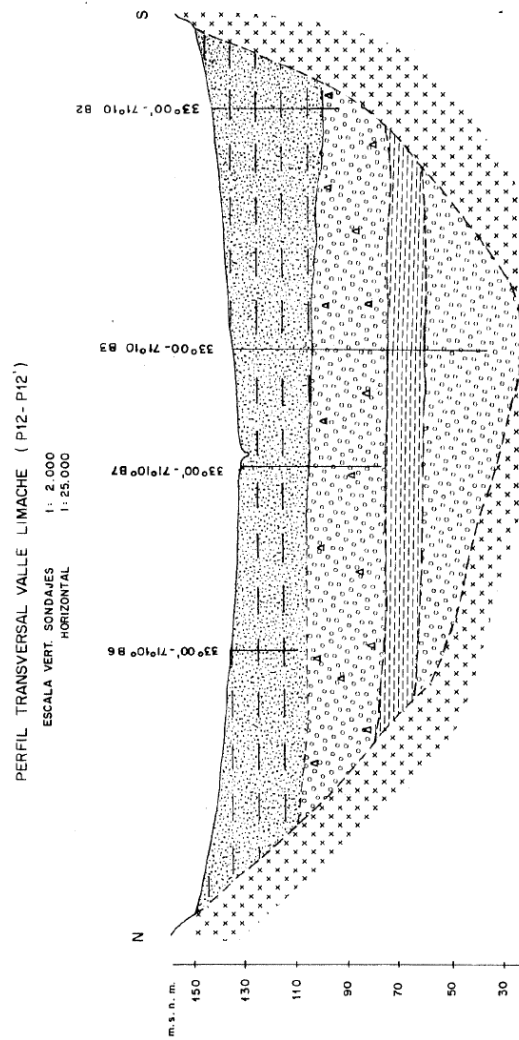
Es probable que, en parte, esta secuencia de sedimentos se haya desarrollado en condiciones lacustres, que expliquen la existencia de los estratos arcillosos descritos (Von Igel, 1999).

Figura 6.13: Perfil Longitudinal y Transversal Sector Llay Llay.



Fuente: (Parraguez, 1985)

Figura 6.14: Perfil Transversal Sector Limache.



Fuente: (Parraguez, 1985)

La leyenda de las figuras anteriormente presentadas se expone en la Figura 6.15 y Figura 6.16.

Figura 6.15: Leyenda Figuras 6.8 a 6.12.

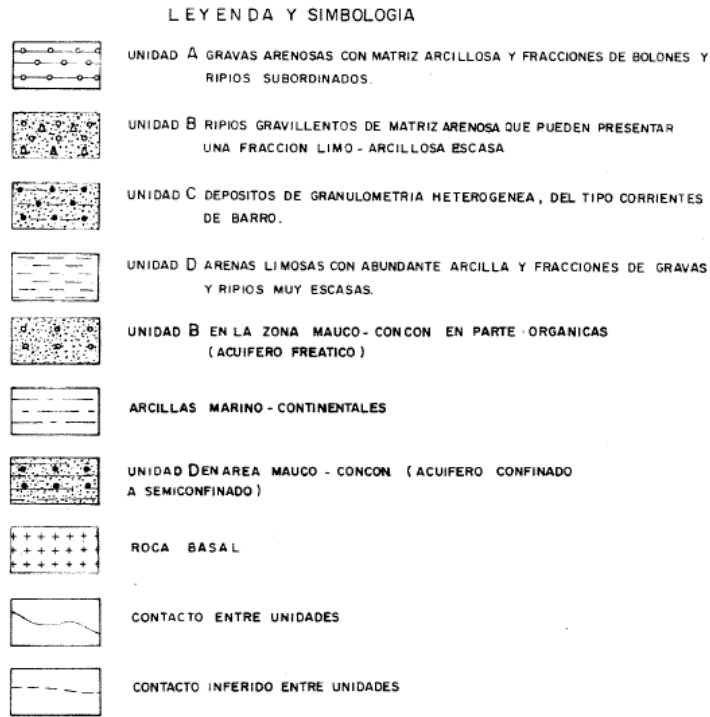
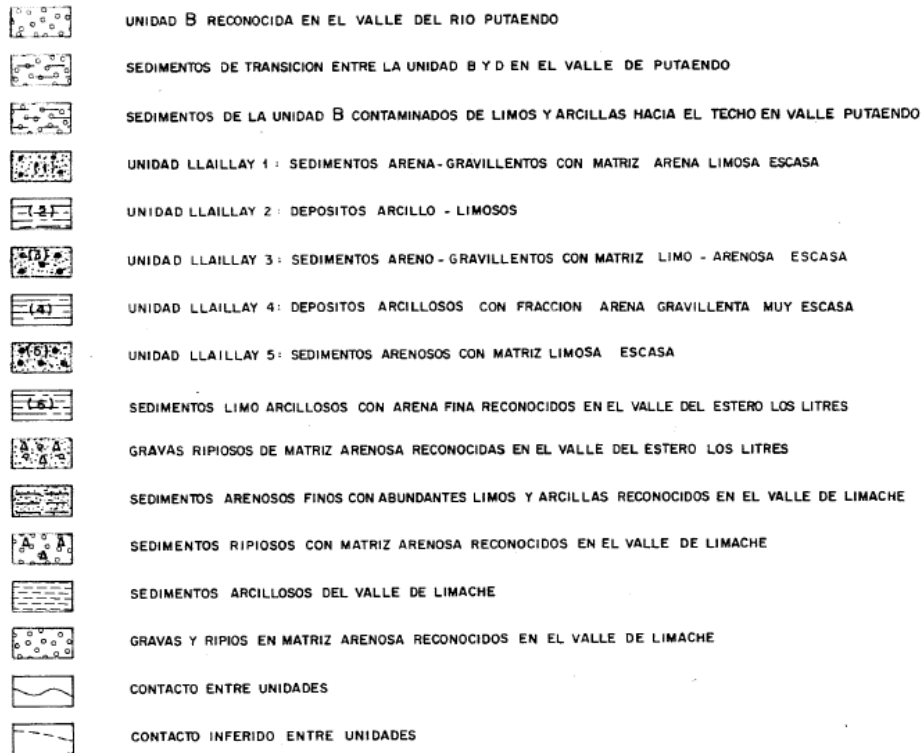


Figura 6.16: Leyenda Figuras 6.13 y 6.14.

LEYENDA PERFILES VALLES TRIBUTARIOS DEL VALLE DE ACONCAGUA



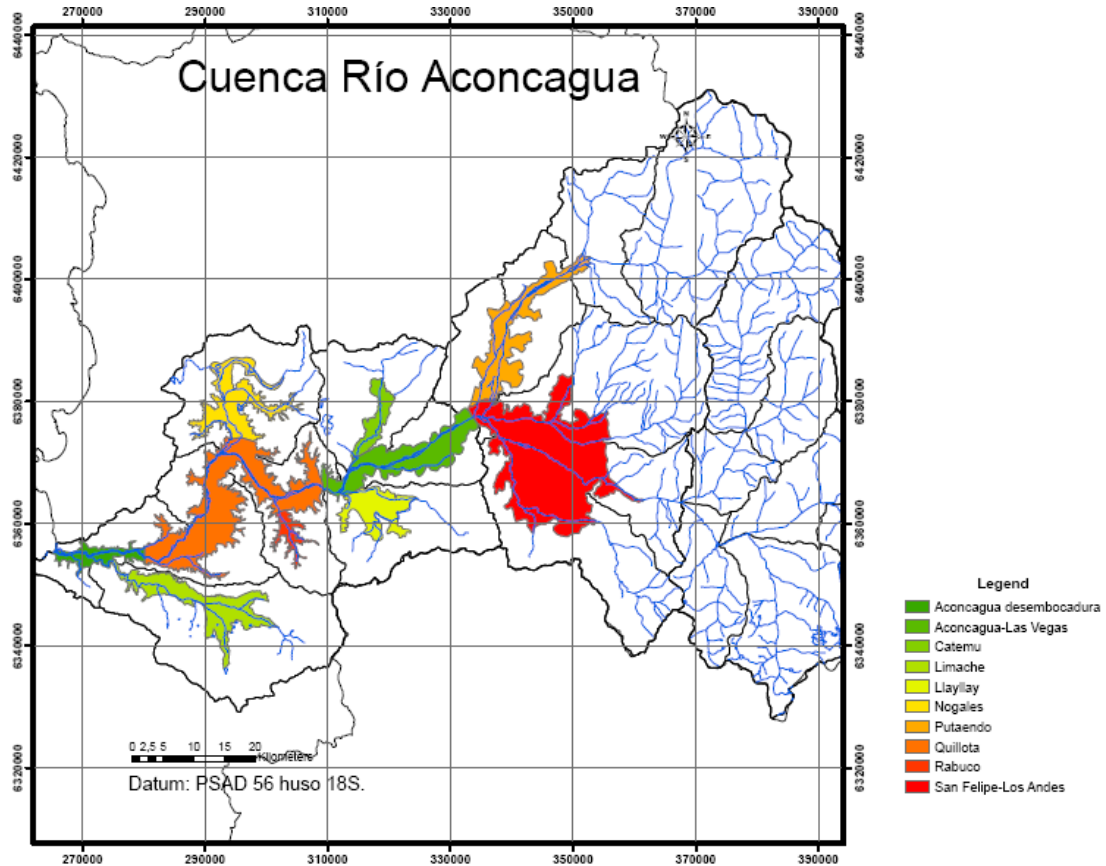
6.3.4.2 Sectores Acuíferos en la Cuenca del Río Aconcagua.

La cuenca del río Aconcagua tiene una superficie de 7.380 Km², en cambio el acuífero del río Aconcagua tiene solo 1.160 Km² y se encuentra dividido en 10 sectores, dispuestos espacialmente de este a oeste de la siguiente forma:

- Sector San Felipe Los Andes.
- Sector Putaendo.
- Sector Aconcagua Las Vegas.
- Sector Catemu.
- Sector Llay Llay.
- Sector Rabuco.
- Sector Nogales.
- Sector Aconcagua-Quillota.
- Sector Aconcagua desembocadura.
- Sector Limache.

La Figura 6.17 presenta la distribución de los sectores mencionados anteriormente:

Figura 6.17: Sectores Acuífero Aconcagua.



Fuente: Elaboración Propia

A continuación se hace una breve descripción de los sistemas acuíferos reconocidos:

- **Sector San Felipe los Andes:** se caracteriza por la presencia de un acuífero de características freáticas contenido fundamentalmente en la unidad B y cuyas potencias varían entre los 50 y 100 metros de espesor, aumentando notoriamente hacia el sector de la ciudad de San Felipe, donde se alcanzan espesores de 100 y 200 metros. El Sentido del Ecurrimiento del agua subterránea es igual al sentido de los afluentes principales, es decir, hacia el curso del río Aconcagua, y en sentido Noroeste, aproximadamente entre Los Andes y San Felipe (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998).

El gradiente del nivel estático no es uniforme, ya que disminuye hacia el Noroeste entre Los Andes y San Felipe, con un valor de 0.006, en cambio en las zonas altas, los gradientes aumentan, variando entre 0.03 y 0.04 (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998).

Esta zona presenta los mayores valores de transmisividad, con valores que rondan los 5.000 m²/día, aunque estos disminuyen hacia los límites impermeables del acuífero, disminuyendo a valores que rodean los 250 m²/día. (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998)

- **Valle del Río Putanendo:** La Unidad B, como se mencionó anteriormente, es la unidad predominante en términos hidrogeológicos, ya que el acuífero está presente, en condición libre, en esta unidad. Las potencias del sector varían entre los 120 metros y los 150 metros.

El flujo subterráneo se dirige hacia el río Aconcagua, y los gradientes son aproximadamente constantes e igual a 0.001. En relación a la transmisividad de éste sector, se tiene que, en la parte de la junta del río Putaendo y el río Aconcagua, se presentan valores que rodean los 2.500 m²/día, descendiendo hacia el interior del valle, a valores entre los 250 m²/día y 500 m²/día. (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998)

- **Sector Panquehue (San Felipe y Romeral), Llay Llay y Catemu:** Las unidades que destacan acuíferas más importantes son la Unidad B, para Panquehue (descrito en este caso como Aconcagua-Las Vegas), Catemu y Llay Llay 3 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), con características libres, y la unidad D y Llay Llay 5 (Figura 6.13) con características confinantes o semiconfinantes.

Las transmisividades presentes en éste sector bordean los 500 m²/día, en el caso del sector Panquehue, 460 m²/día para el caso del Sector Catemu y para el sector Llay Llay las transmisividades varían entre los 250 m²/día y 500 m²/día.

El flujo subterráneo, en el caso del Sector Panquehue, va de Este a Oeste, siguiendo el flujo superficial del río Aconcagua un gradiente cercano a 0.008, en cambio para los sectores Catemu y Llay Llay el flujo subterráneo tiene sentido hacia el río Aconcagua y el gradiente para ambos sectores bordean los 0.004. (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998)

- **Sector Hijuelas, La Calera, Nogales, La Cruz, Quillota y San Pedro:** Estos sectores corresponden a los sectores Nogales, Quillota y Rabuco en la Figura 6.17. Las unidades acuíferas más importantes son la unidad B,s cuyas características son libres, y la Unidad D cuyas características libres o semiconfinado.

Las Transmisividades en éste sector son relativamente más bajas que en el resto de las zonas, con valores inferiores a los $250 \text{ m}^2/\text{día}$. En relación a los gradientes, estos varían desde 0.003 en Nogales y los 0.008 en la parte del río Aconcagua. (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998)

- **Sector Limache:** La unidad acuífera más importante es la correspondiente al primer estrato del sector Limache, que corresponde a sedimentos arenosos finos con abundantes limos y arcillas que no superan los 20 metros de profundidad, y las características del acuífero son libres (Figura 6.14).

El flujo subterráneo tiene dirección Este-Oeste, con gradientes que van de 0.01 a 0.02 en la parte alta del valle y en el estero Lliu Lliu respectivamente y descendiendo a 0.005 en el sector de San Francisco de Limache. En relación a las transmisividades, estas son inferiores a los $250 \text{ m}^2/\text{día}$, aunque en zonas específicas (Estero Limache confluencia con Granizo) puede llegar a valores superiores a $250 \text{ m}^2/\text{día}$. (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998)

- **Sector Tolobago-Con Con:** Este sector corresponde al sector Aconcagua desembocadura en la figura 6-10. En esta zona se aprecian dos unidades acuíferas, la primera, de características freáticas, y ligado al flujo del río Aconcagua. Inmediatamente bajo éste estrato se encuentra una cuña de arcilla que confina estratos más permeables, los cuales se encuentran bajo el estrato de arcilla, lo que constituye un segundo acuífero de características confinadas.

Los gradientes en el estrato freático varían entre 0.004 a 0.0003, este último registrado en la desembocadura del río Aconcagua, y la transmisividad de éste acuífero varía entre 250 m²/día hasta valores de 3.500 m²/día en el centro del valle. En el estrato confinado, los gradientes varían desde 0.004 hasta 0.0003 en la desembocadura del río y las transimividades se encuentran por sobre los 250 m²/día e incluso los 500 m²/día en sectores cercanos a la costa (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998).

6.3.5 Información recopilada.

Como se establece en la metodología descrita en el capítulo anterior, para determinar la calidad natural del acuífero del Aconcagua es necesario contar no solo con la información geológica e hidrogeológica, sino que también es necesario contar con datos de calidad. Esta información se ha recopilado de las siguientes fuentes:

- **Análisis de calidad de aguas subterráneas.**
 - Red de Monitoreo de la D.G.A. la cual se compone de 2 pozos, ubicados en los sectores Nogales y Limache (Tabla 2.1) Estos registros se extienden desde el año 1999 hasta el año 2007, con una frecuencia de monitoreo de entre 3 a 4 veces por año. Los parámetros analizados por la red de monitoreo se encuentran en la Tabla 2.2.
 - Campaña monitoreo aguas subterráneas sectores Acuíferos Los Choros y Aconcagua, compuesta por 53 pozos, los cuales fueron muestreados en dos campañas realizadas en noviembre del 2008 y en febrero del 2009, repitiéndose en esta última campaña 3 puntos de la primera campaña (D.G.A., 2009). Esta campaña se realizó como parte del estudio "Diagnostico y Clasificación de Sectores Acuíferos", recientemente finalizado, cuyo mandante fue la DGA y realizado por Geohidrología Consultores y cuyo objetivo desarrollar una metodología de clasificación de sectores acuíferos en términos de la calidad química de las aguas subterráneas, teniendo en consideración la propuesta futura de un cuerpo normativo tendiente a la protección de los recursos hídricos subterráneos.
- **Análisis de calidad de aguas Superficial.**
 - Red de Monitoreo de la D.G.A. la cual se compone de 13 estaciones ubicadas en las tres secciones del río Aconcagua (alto, medio y bajo). Estos registros se

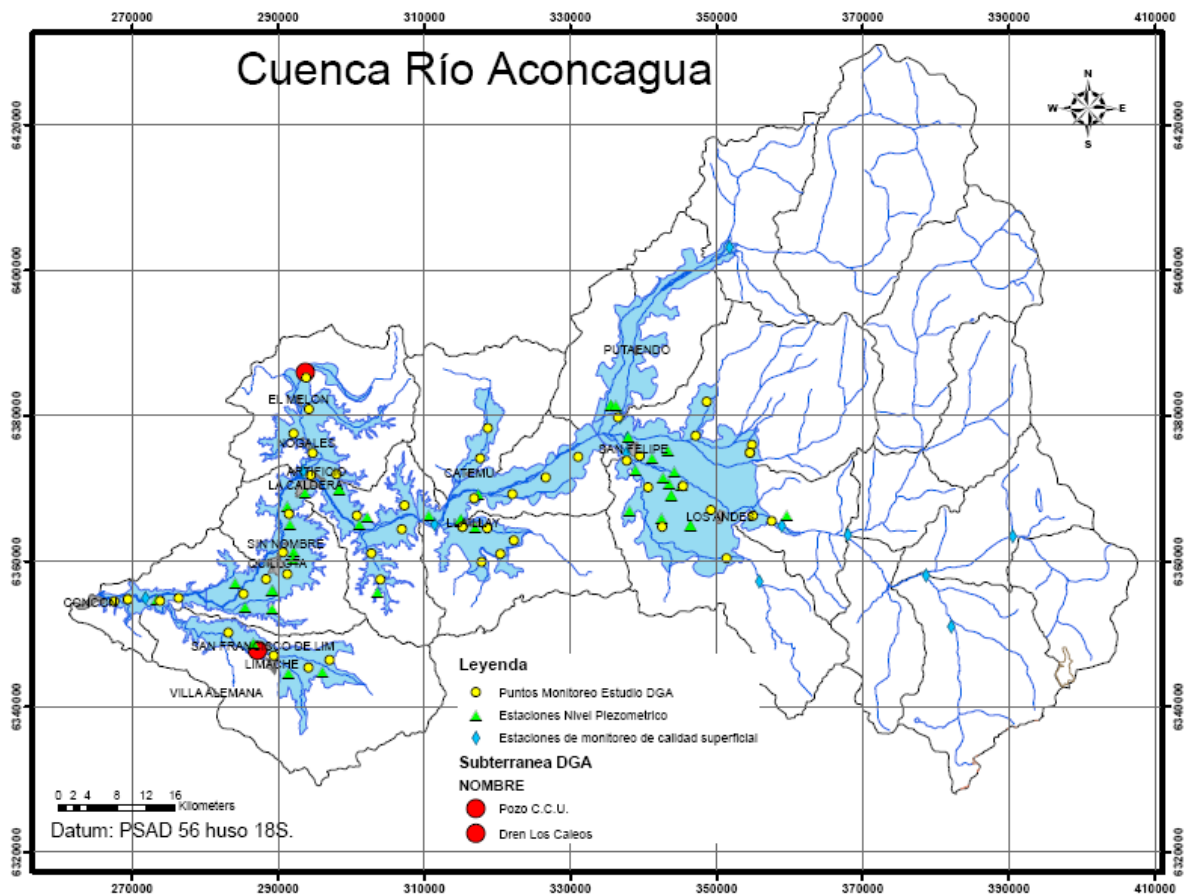
extienden desde el año 1969 las más antiguas, pero en general se extienden desde el año 1984 hasta el año 2008.

- **Niveles piezométricos.**

- Red de monitoreo de niveles de la D.G.A., la cual se compone de 88 pozos de observación, algunos de ellos sin registros. Sin embargo, de los 88 pozos, solo 35 fueron utilizados ya que los demás solo contemplaban estadística hasta la década de los 80. Los registros de estos pozos se extienden desde el año 1968, en general, hasta el 2008.

La ubicación de las estaciones anteriormente mencionadas se presenta en la siguiente figura:

Figura 6.18: Distribución espacial de las estaciones y pozos utilizados para el estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar de la Figura 6.18, la distribución espacial de los pozos de monitoreo pertenecientes a la red de monitoreo de la D.G.A. no es adecuada para la aplicación de la metodología, debido, en primer lugar, por la cantidad de pozos de la red presentes en el acuífero, y porque los pozos de la red de monitoreo de calidad no se encuentran en los mismos sectores ni permiten observar la variación de la calidad de las aguas subterráneas en función de su dirección de flujo

En función de lo anterior, se utilizarán, para la determinación de la calidad natural de las aguas subterráneas del acuífero, solo los pozos contemplados por el estudio de la D.G.A., utilizando los pozos de la red de monitoreo de calidad únicamente para corroborar que las muestras obtenidas en el mismo sector donde se ubican los pozos de la red presenten condiciones similares a las registradas históricamente. La utilización de los pozos del estudio de la D.G.A. conlleva otro problema, el cual tiene que ver con la distribución temporal de los datos, la cual es muy pobre, ya que únicamente se cuenta con 2 muestreos en épocas estacionales idénticas (Verano 2008-2009), por lo que únicamente se podrán obtener rangos máximos y mínimos para un periodo particular.

Finalmente, los elementos estudiados para este caso en particular son los siguientes:

Tabla 6.9: Parámetros a analizar en la cuenca del Aconcagua.

Parámetro	unidad
Temp.	[°C]
pH	-
Conductividad Eléctrica	[μS/cm]
HCO₃⁻	[mg/L]
Cl⁻	[mg/L]
SO₄⁻²	[mg/L]
Ca⁺²	[mg/L]
Mg⁺²	[mg/L]
K⁺	[mg/L]
Na⁺	[mg/L]
Al	[mg/L]
Cu	[mg/L]
Fe	[mg/L]
Mn	[mg/L]
Mo	[mg/L]
Hg	[mg/L]
Ni	[mg/L]
Ba	[mg/L]
NO₃⁻	[mg/L]

6.3.6 Análisis Predictivo.

En función de los datos presentados en los puntos 6.3.2, 6.3.3 y 6.3.4 se pueden establecer las siguientes condiciones generales, junto también con el apoyo del estudio realizado por Parraguez (1985).

En función de la geología presentada anteriormente (Figura 6.5) y la descripción de la geología local y considerando la descripción hidrogeológica de los principales rellenos que componen el acuífero del Aconcagua, se puede decir lo siguiente:

6.3.6.1 Geología.

Dados los tipos de roca que componen la gran mayoría de las estructuras y formaciones geológicas presentes en la cuenca del Aconcagua, se puede establecer que la presencia de rocas volcánicas del tipo **basálticas y andesíticas**, conformadas por minerales de hornblenda, plagioclasa cálcica, piroxeno, entre otros minerales (Tabla 3.2) pueden aportar con iones de Ca y Mg mayoritariamente, y de Na en menor medida, así como también los procesos de hidrólisis pueden aportar con contenidos de bicarbonato. En menor presencia pueden encontrarse elementos como el Mn y K, esto último se debe a la baja presencia de estos elementos en los minerales que conforman las rocas volcánicas basálticas, aunque la presencia de la Unidad Illapel, la cual está conformada por sienogranitos y monzodioritas, rocas cuya composición mineral presenta minerales de feldespato y plagioclasa (minerales asociados a la presencia de Mn y K en aguas subterráneas), podrían generar un aumento de potasio en las aguas de los sectores Aconcagua-Las Vegas. Es importante destacar que, dada la baja solubilidad de los minerales constituyentes de las rocas volcánicas, así como de los sienogranitos y monzodioritas (Capítulo 4.3), las concentraciones de los elementos mencionados anteriormente no deberían variar radicalmente a medida que el flujo del acuífero se acerca a la desembocadura del río. Dado lo mencionado anteriormente, los aportes superficiales, así como las fuentes antrópicas podrían generar cambios en las condiciones naturales del acuífero, incorporando a las aguas subterráneas componentes que no se presentan en forma natural en ellas.

La presencia de rocas carbonatadas como arenas y lutitas calcáreas en las formaciones Lo Prado, Cerro Calera, implican un aumento en las concentraciones de Calcio y Bicarbonato, fundamentalmente en los sectores asociados a estas formaciones, como lo son Nogales y Rabuco. El resto de las concentraciones de los demás parámetros no se vería alterada en mayor medida, al menos desde el punto de vista geológico.

La presencia de sulfato podría estar asociada a la actividad antrópica, fundamentalmente la contaminación generada por las industrias presentes en la cuenca, la actividad agrícola (fertilizantes) o la oxidación de sulfuros metálicos por drenaje ácido. Un punto importante es que el sulfato podría estar presente por efecto de la actividad antrópica en la zona, debido a la utilización de azufre en la agricultura, lo que podría indicar un origen antrópico del sulfato. Esto último se verificará posteriormente.

La presencia de elementos traza como Fe, Mo, Cu, Hg, Ni, Al, es bastante baja, aunque de los elementos mencionados, el hierro, el cobre y el aluminio tienen una presencia mayoritaria en relación al resto de los elementos, esto debido a la presencia de yacimientos de cobre, así como también la existencia de rocas basálticas que aportan con contenidos de hierro mediante la disolución de este tipo de rocas, como también de minerales aluminosilicatos que aportan con contenidos de Al en las aguas, junto también con la presencia de yacimientos de bauxitas en la parte alta de la cuenca.

A manera de resumen, la presencia de iones de Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio y Bicarbonato estarían asociados a la presencia de rocas del tipo basálticas y andesíticas, así como también de gabros y dioritas, aunque estas últimas, presentes fundamentalmente en las unidades Mincha e Illapel, no deberían afectar notoriamente la calidad de las aguas subterráneas, debido a su baja solubilidad. El contenido de Calcio y Bicarbonato podría aumentar en sectores como Nogales y Rabuco debido a la presencia de rocas tipo carbonatadas. La presencia de sulfatos podría estar asociada a las actividades antrópicas desarrolladas en la zona.

El contenido de Nitrato en las aguas subterráneas no debería ser mayor, en ningún caso, de los 10 mg/l, ya que la geología presente en la cuenca no indica presencia de nitratos, por lo que su presencia se debería exclusivamente a actividad antrópica. El contenido de Cloruro, al igual que el nitrato, no se debería a su presencia en las rocas de la cuenca, por lo que su origen problema es

la precipitación o la actividad antrópica, por lo que será necesario analizar la variación espacial del cloruro analizando su contenido en aguas superficiales.

La presencia de la Falla Pocuro, la cual atraviesa el sector Los Andes- San Felipe, y a la actividad hidrotermal podría provocar cambios en la calidad de las aguas en zonas cercanas a la falla, generando variaciones en las concentraciones de parámetros como Calcio y Bicarbonato.

La justificación a lo mencionado en los párrafos anteriores se puede encontrar en la sección ANEXOS, específicamente en el ANEXO 3.

6.3.6.2 Hidrogeología.

La disminución de las transmisividades en los sectores de Nogales, Rabuco, Quillota y Limache podrían provocar aumentos en las concentraciones de los parámetros mencionados anteriormente, fundamentalmente por el hecho de un aumento en el tiempo en el cual el agua tiene contacto con la roca, lo cual es afirmado por los análisis realizados por Parraguez (1985), mediante el análisis de las sales disueltas, las cuales aumentan en sectores que presentan menor velocidad de flujo.

La presencia de sectores confinados en el acuífero, fundamentalmente en el sector de Llay Llay y el sector Aconcagua desembocadura, aproximadamente a 4 o 6 kilómetros de la costa, podrían generar condiciones de reducción, lo que consecuentemente, podría generar aumentos en las concentraciones de hierro y manganeso, los cuales, como se analizó en el punto 4.4, aumentan en debido a la reducción de minerales que contienen estos elementos, así como también la reducción de nitrato, lo que implicaría la disminución de su concentración.

En particular, en el sector de Aconcagua desembocadura, conocido también como Tobolango-Con Con (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), podría existir intrusión salina, lo que se debe fundamentalmente a que el acuífero podría tener cierto intercambio con el agua de mar.

La influencia del río, como uno de los principales medios de recarga del acuífero, podría generar también efectos de dilución en las concentraciones, esto solo si las concentraciones son menores

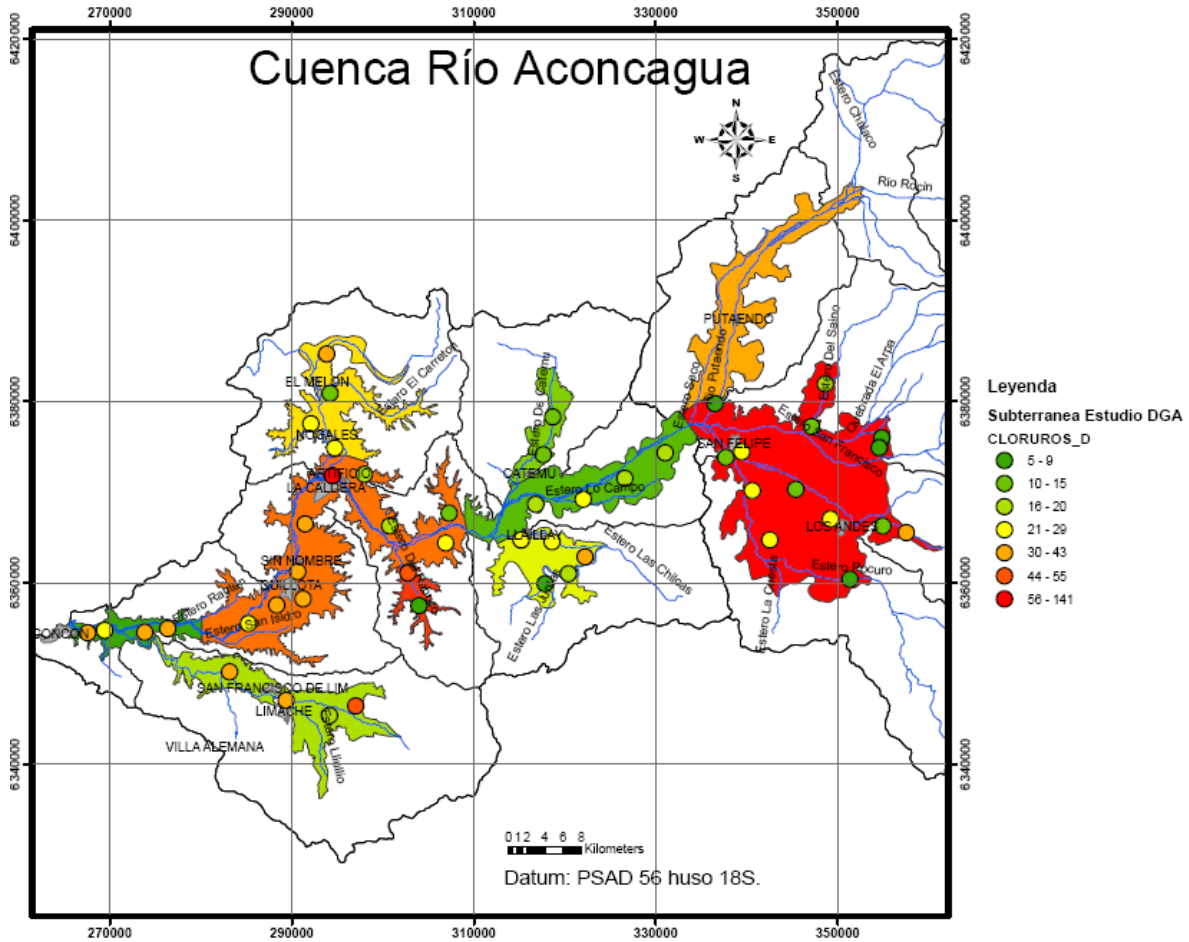
a las observadas en el acuífero. El efecto de recarga del río es mencionado tanto por Parraguez (1985) como por el estudio de INGENDESA (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998).

6.3.6.3 Actividad Antrópica.

La definición de la calidad natural, como lo señala la metodología mencionada en el Capítulo 5, considera el análisis de las fuentes existentes de contaminación en el acuífero. Como ya hemos podido observar en puntos anteriores, la presencia de cloruro y nitrato es bastante marcada en ciertos sectores. La Figura 6.19 y la Figura 6.20 presentan tanto la distribución espacial, tanto del cloruro como del nitrato.

Como se observa en ambas figuras, las zonas con mayor concentración de nitratos son consecuentemente las zonas con mayor actividad agrícola (Figura 6.20), ya que según últimos estudios (INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA., 1998), el uso agrícola del valle del río Aconcagua comprende un 12% de su superficie total, lo que equivale a 86.237 Ha de uso exclusivamente agrícola, con presencia en prácticamente todo el valle, tanto en la parte alta (Putando y estero Pocuro), media (Estero los Loros) y baja (próxima al estero Limache), destacando los sectores de Quillota San Felipe de Aconcagua y Los Andes, estos dos últimos parte del sector San Felipe-Los Andes, como los sectores las áreas más extensas dedicadas a la agricultura, 35.003 Ha, 33.589 Ha y 17.451 Ha respectivamente.

Figura 6.19: Distribución Cloruro sectores Acuífero del Aconcagua.

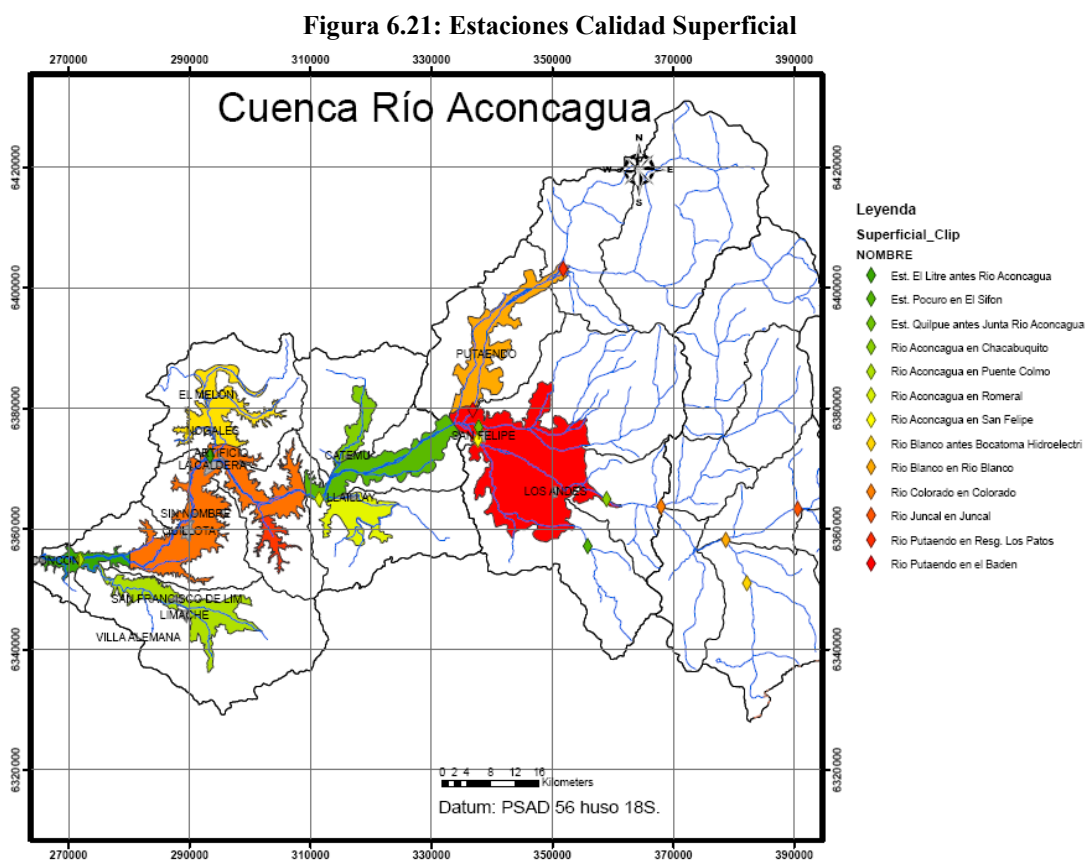


Fuente: Elaboración propia.

Concentraciones en mg/L

En los Sectores anteriormente mencionados, las mediciones realizadas arrojan valores de nitrato que superan los 7.5 mg/L y en ciertos puntos incluso superan los 10 mg/L, lo que no se condice con valores de otros sectores como Aconcagua-Las Vegas, donde las concentraciones no superan los 6 mg/L, mostrando una clara diferencia en términos del impacto de la agricultura sobre la calidad de las aguas subterráneas.

El efecto de dilución en sectores como San Felipe-Los Andes y Aconcagua Las Vegas, así como también el incremento de nitratos por disminución de trasmisividad y aumento en la actividad agrícola en sectores como Limache y Quillota queda de manifiesto si se observan las concentraciones históricas registradas en las estaciones de calidad superficial del río Aconcagua (Tabla 6.10). En esta tabla se puede observar claramente que las concentraciones de nitrato en el río son mucho menores a las registradas en los sectores mencionados, lo que indica claramente que los niveles registrados en las aguas subterráneas se debe a condiciones locales, tanto sobre el nivel de actividad agrícola como de las propiedades hidrogeológicas de cada sector y no de la geología presente en la cuenca. La ubicación de las estaciones presentadas en la Tabla 6.10 se presenta a continuación, en la siguiente figura.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.10: Concentraciones Medias, Máximas y Mínimas registradas en estaciones de monitoreo de calidad superficial.

ESTACIÓN	CÓDIGO BNA		Cloruro [mg/L]	Nitrato-N [mg/L]	Sulfato [mg/L]
RIO JUNCAL EN JUNCAL	05401003-6	Promedio	13,72	0,06	262,94
		maximo	26,60	0,95	425,00
		Minimo	4,89	0,00	73,91
		D. Estandar	5,26	0,16	83,30
RIO BLANCO EN RIO BLANCO	05402001-5	Promedio	41,42	0,15	139,84
		maximo	328,60	2,10	345,00
		Minimo	6,58	0,00	4,30
		D. Estandar	49,70	0,29	66,87
RIO COLORADO EN COLORADO	05406001-7	Promedio	18,68	0,06	61,23
		maximo	37,15	1,31	156,95
		Minimo	2,86	0,00	3,32
		D. Estandar	8,92	0,16	35,41
RIO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO	05410002-7	Promedio	16,85	0,09	110,88
		maximo	40,45	1,22	235,17
		Minimo	4,89	0,01	25,90
		D. Estandar	7,96	0,15	44,11
RIO ACONCAGUA EN SAN FELIPE	05410005-1	Promedio	16,85	0,20	101,20
		maximo	33,63	1,77	205,10
		Minimo	4,99	0,01	26,90
		D. Estandar	6,56	0,26	43,00
ESTERO POCURO EN EL SIFON	05411001-4	Promedio	6,38	0,22	51,46
		maximo	34,74	1,57	144,60
		Minimo	0,00	0,04	9,60
		D. Estandar	6,08	0,20	31,11
RIO PUTAENDO EN RESGUARDO LOS PATOS	05414001-0	Promedio	6,27	0,08	53,87
		maximo	29,10	1,39	165,00
		Minimo	1,39	0,00	4,80
		D. Estandar	4,02	0,18	28,48
RIO PUTAENDO EN EL BADEN (CA)	05414003-7	Promedio	3,76	0,12	45,68
		maximo	7,16	0,95	110,00
		Minimo	1,39	0,03	21,58
		D. Estandar	1,58	0,22	22,20
RIO BLANCO EN CENTRAL HIDROELECTRICA	05402013-9	Promedio	25,28	0,14	199,01
		maximo	254,19	1,83	381,00
		Minimo	3,11	0,02	52,09
		D. Estandar	43,87	0,30	68,69
RIO ACONCAGUA EN ROMERAL	05423003-6	Promedio	17,03	0,43	100,59
		maximo	33,32	2,88	297,80
		Minimo	5,30	0,05	27,90
		D. Estandar	5,17	0,35	34,53
ESTERO EL LITRE ANTES RIO ACONCAGUA (CA)	05424002-3	Promedio	21,21	0,61	116,19
		maximo	59,34	3,81	210,00
		Minimo	10,71	0,02	37,95
		D. Estandar	7,42	0,51	31,38
RIO ACONCAGUA EN PUENTE COLMO	05426003-2	Promedio	22,00	0,40	114,33
		maximo	47,15	3,00	264,00
		Minimo	6,98	0,00	11,50
		D. Estandar	7,07	0,47	36,15
ESTERO QUILPUE ANTES JUNTA RIO ACONCAGUA	05415001-6	Promedio	15,43	0,17	88,66
		maximo	58,85	1,39	196,30
		Minimo	2,79	0,00	13,40
		D. Estandar	7,85	0,19	42,92

En relación a las concentraciones de cloruro, cuyos niveles son más elevados que los de nitrato en aguas superficiales (Tabla 6.10), esto podría estar asociado a distintos orígenes, como la precipitación (la concentración de cloruro en la precipitación es, en promedio, de 10 mg/L (Hem, 1985), la contaminación antrópica y la geología, esta última poco probable para este caso en particular según lo descrito en el punto 6.3.6..Dentro de las fuentes antrópicas que aportan cloruro a las aguas se encuentran las plantas de tratamiento y los basurales o vertederos. Las tablas que a continuación se presentan enumeran las plantas existentes en la cuenca del Aconcagua como también los vertederos presentes en la cuenca.

Tabla 6.11: Plantas Tratamiento cuenca Aconcagua.

LOCALIDAD	NORTE	ESTE	CAUCE RECEPTOR	[l/s]	EMPRESA DE SERVICIOS SANITARIOS	COBERTURA DE TRATAMIENTO [%]
Los Andes	6366200	351700	Río Aconcagua	120	Esvál	97.2
San Felipe	6374800	337400	Río Aconcagua	95	Esvál	98.7
Hijuelas	6369800	296200	Río Aconcagua	14	Esvál	69.5
Artificio	6371300	292200	Río Aconcagua	11	Esvál	77.4
La Calera	6369500	290600	Río Aconcagua	85	Esvál	93.5
La Cruz	6365000	290400	Río Aconcagua	10	Esvál	84.3
Quillota	6358100	286800	Río Aconcagua	113	Esvál	98.8
San Pedro	6353600	281000	Río Aconcagua	-	Esvál	-
Olmué	6342700	295000	Estero Pelumpen	4	Esvál	-
Limache	6348800	285200	Río Aconcagua	60	Esvál	91.7
Nogales	-	-	Estero Los Litres		Esvál	91.6
Llay Llay	-	-	Estero Los Loros		Esvál	94.7
Con Con	-	-	Río Aconcagua		Esvál	80

Fuente: Von Igel (1999) y CADE-IDEPE (2004)

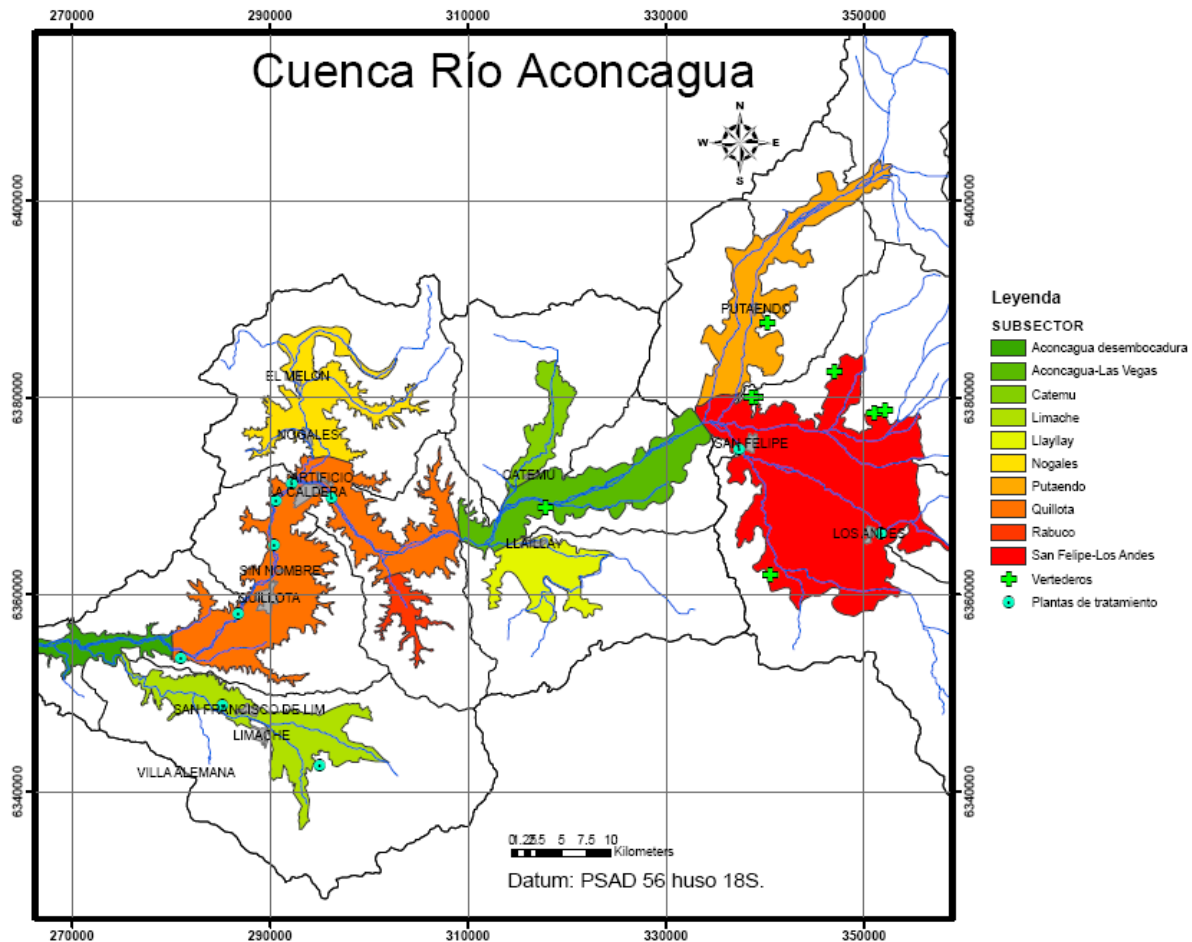
Tabla 6.12: Vertederos en la cuenca del río Aconcagua.

VERTEDERO	LOCALIDAD ATENDIDA	NORTE	ESTE
Sahonde-El Rungue	Putendo	6387600	340200
El Higueral	Rinconada de los Andes	6362000	340500
Santa María	Santa María	6382700	347000
Las Bandurrias	Los Andes, San Esteban, Calle Larga, Rinconada	6378500	351000
Cerro Las Higueras	San Felipe, Panquehue, Llay Llay	6380000	339000
Cuesta Changres	Sectores Aledaños	6368900	317800
Las Bandurrias 1	Los Andes, San Esteban, Calle Larga, Rinconada	6378800	352100
Las Hormigas	San Felipe	6380000	338600
Nogales	Nogales, La Calera, Hijuelas	-	-
Limache	Limache, La Cruz, Olmué	-	-
Con Con	Viña del Mar, Con Con	-	-
San Pedro	Quillota	-	-

Fuente: Von Igel (1999)

La ubicación de las plantas y vertederos mencionados anteriormente se presenta en la siguiente figura:

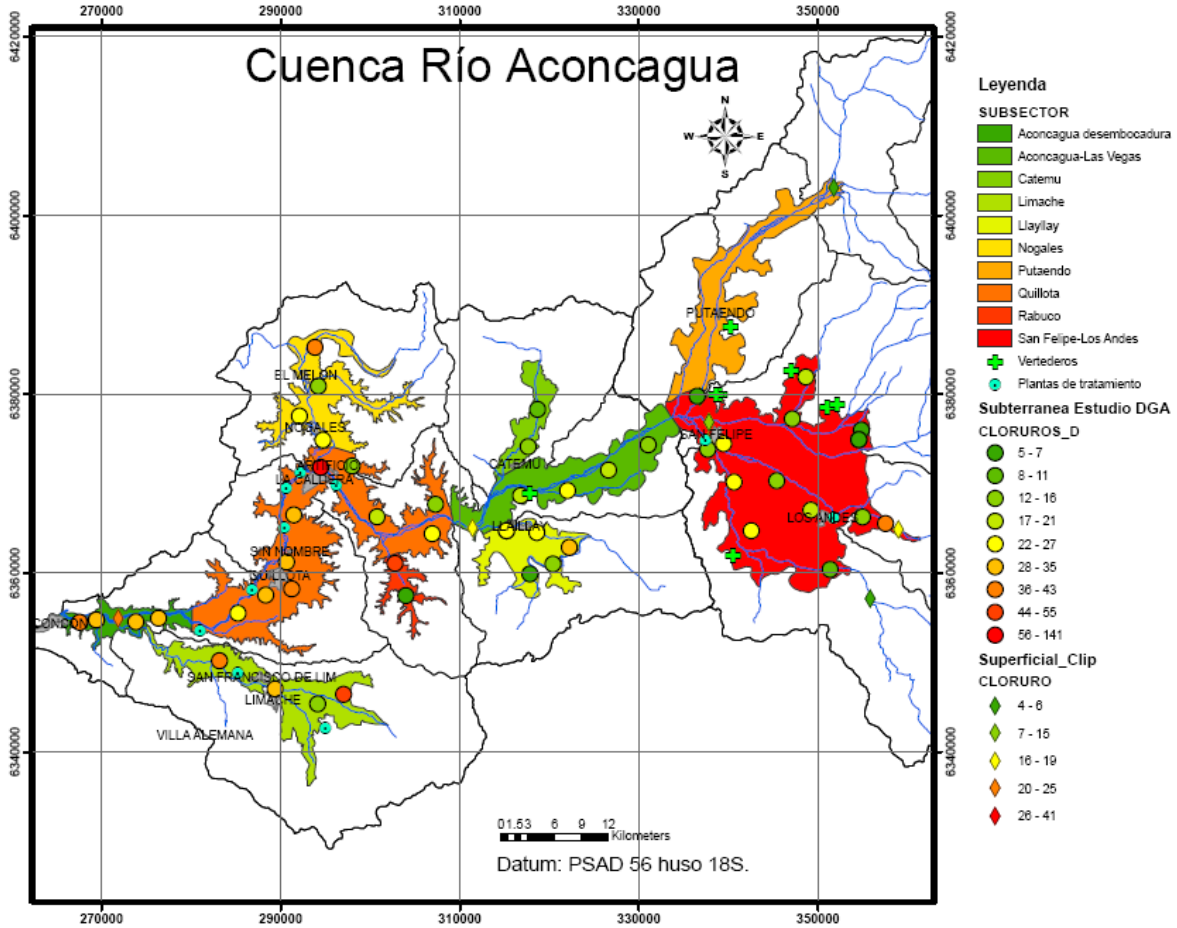
Figura 6.22: Ubicación Plantas de Tratamiento y Vertederos.



Fuente: Elaboración propia

Luego, para un mejor análisis de los efectos de la actividad antrópica sobre las aguas subterráneas es necesario utilizar toda la información presentada anteriormente, de manera de discriminar zonas donde el efecto de la actividad antrópica es mayor. Para esto último se presentan las siguientes figuras:

Figura 6.23: Variación Espacial del Cloruro.

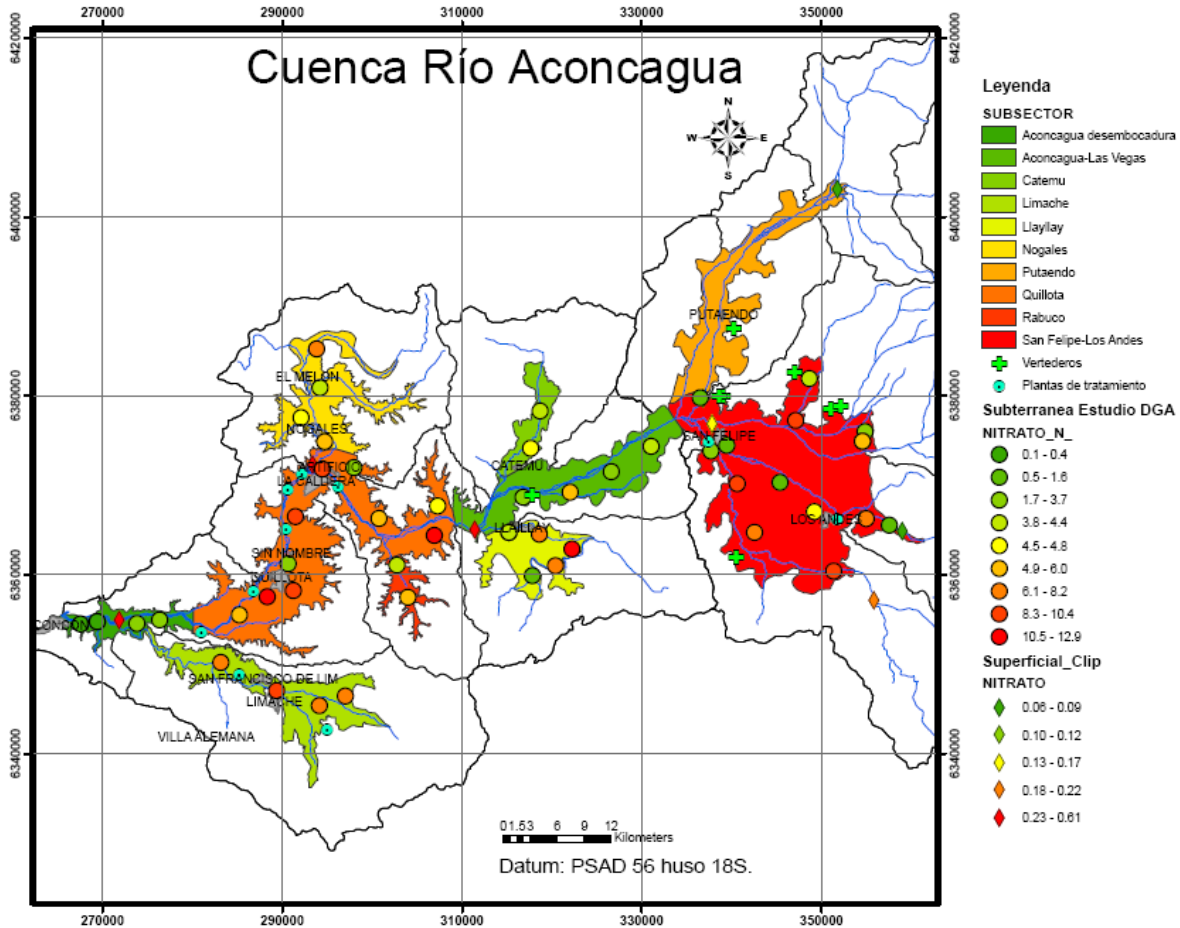


Fuente: Elaboración propia

Concentraciones en mg/L

Como se puede observar de la Figura 6.23, a pesar que las concentraciones de cloruro aumentan en sectores donde la cantidad de plantas de tratamiento es considerable, particularmente en el caso del sector de Quillota, esto no representa necesariamente el origen del contenido de cloruros en las aguas subterráneas, sino que estaría asociado a efectos puntuales de disposición de aguas servidas en sectores rurales asociados a actividad agrícola, como Quillota y Limache. A lo anterior se puede sumar el hecho de la baja en las transmisividades en estas zonas, por lo que el contenido de cloruros se podría ver aumentado debido al mayor tiempo de residencia en estas zonas, y por ende el mayor volumen de recarga de estas aguas servidas rurales.

Figura 6.24: Distribución Espacial Nitrato.



Fuente: Elaboración propia.

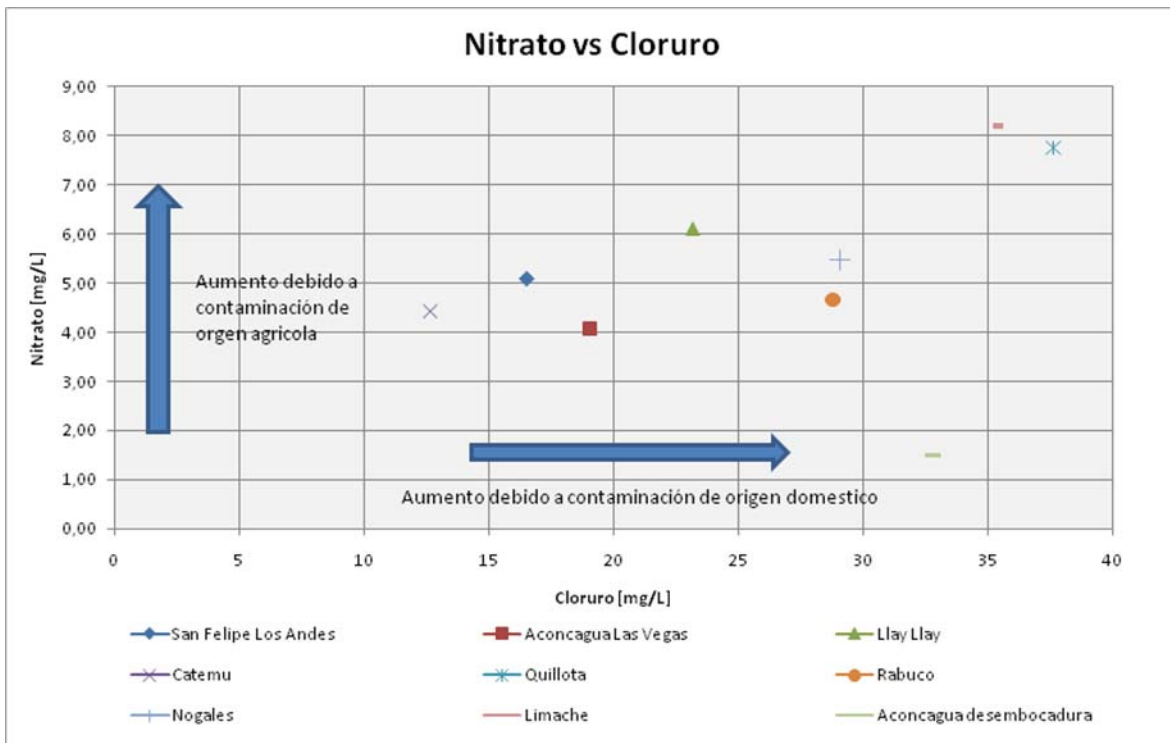
Concentraciones en mg/L-N

La presencia de los vertederos no genera efectos, al menos en las mediciones realizadas en el periodo noviembre-febrero 2008-2009 (Figura 6.23), al menos desde el punto de vista de las concentraciones de cloruro. Lo anterior no ocurre en el caso del nitrato, ya que si se observa las concentraciones de éste se observa un fenómeno particular en el sector de San Felipe-Los Andes, donde la presencia de un grupo de vertederos podría tener efectos sobre los niveles de nitrato en el pozo al este de la ciudad de San Felipe (Figura 6.24). Sin Embargo, debido a la pobre estadística con la cual se cuenta para realizar los análisis, no es posible verificar de manera concreta el fenómeno pero si mencionar los posibles orígenes de la elevada concentración.

Observando nuevamente la Figura 6.24, se puede apreciar que los valores medios de las concentraciones de nitrato en agua superficial aumentan desde el sector de Quillota hacia aguas abajo, así como también en el sector de Limache, situación que también ocurre, como se mencionó anteriormente, para el cloruro.

Luego, la información analizada anteriormente permite identificar zonas donde la actividad antrópica ha afectado notoriamente la calidad de las aguas subterráneas. El Gráfico 6.63 permite identificar aquellas zonas con mayor impacto antrópico, tanto por contaminación de origen agrícola como domestica. La elaboración del grafico se realizó utilizando valores medios de cloruro y nitratos.

Gráfico 6.63: Nitrato versus Cloruro registrado en los sectores del Acuífero del río del Aconcagua.



El Gráfico 6.63 permite identificar, junto con la Figura 6.23 y la Figura 6.24, aquellos sectores con mayor y menor impacto antrópico. Esto último permite, a su vez, determinar los criterios con los cuales se realizarán la preselección de muestras en base al contenido de nitrato y cloruro en las muestras.

Los valores límites, tanto del nitrato como del cloruro, fueron establecidos utilizando la información presentada anteriormente. Los criterios establecidos para cada parámetro se mencionan a continuación:

- **Nitrato.**

En relación al contenido de nitrato, asociado a una condición natural, se considerará un valor límite 7 mg/l, ya que valores mayores a estos se registran en zonas con gran actividad agrícola como San Felipe-Los Andes, Quillota y Limache (Gráfico 6.63). Aunque el efecto de la transmisividad puede generar aumentos en las concentraciones de estos parámetros, como se comprobó en el punto anterior, pero la pobre estadística de los datos de calidad no permite verificar este efecto.

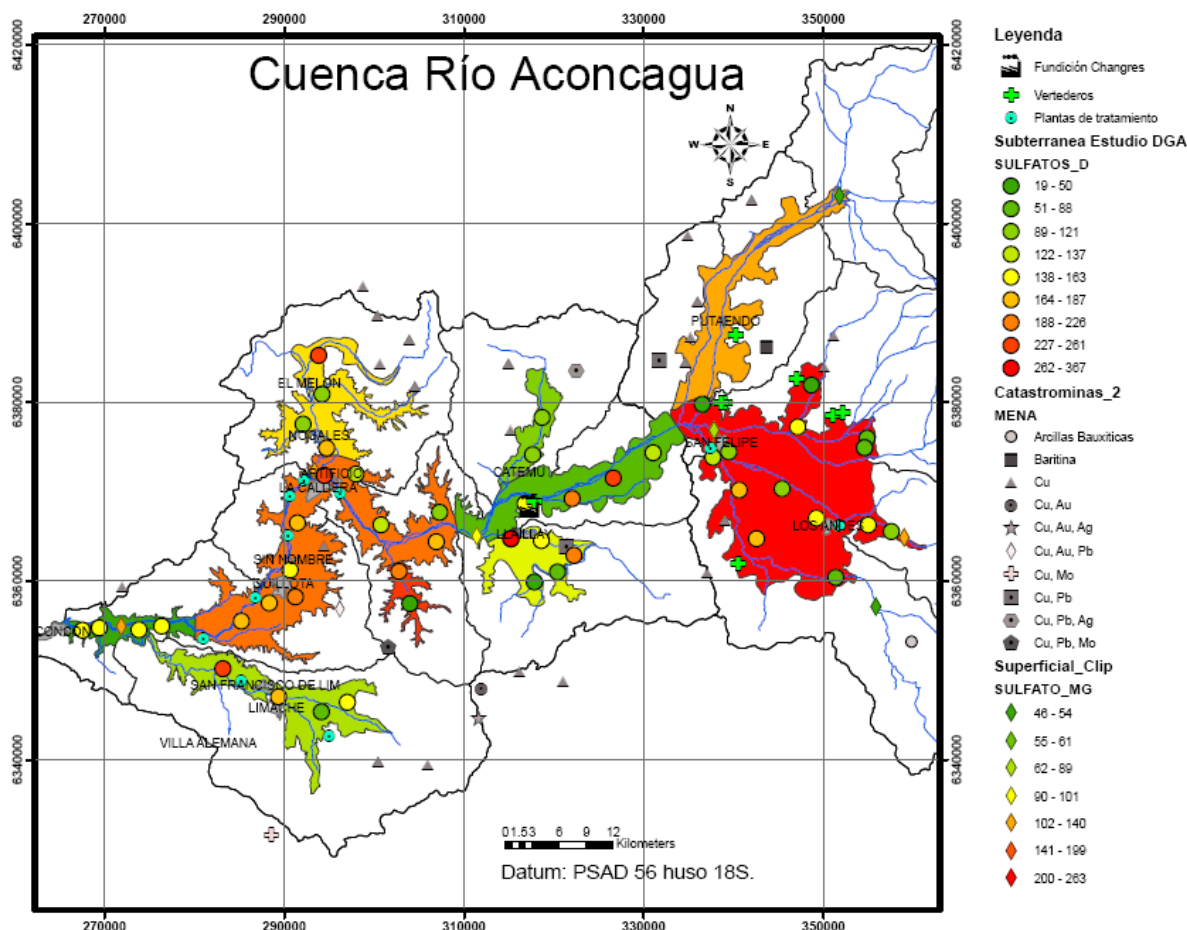
- **Cloruro.**

El contenido de cloruro, como se mencionó anteriormente, podría estar asociado a la disposición de aguas servidas de origen rural en los sectores de Quillota y Limache, sectores asociados a su vez con un gran nivel de actividad agrícola (Gráfico 6.63) lo que, acompañado de una disminución de las transmisividades en estos sectores, genera el aumento de los niveles de cloruro en las aguas subterránea. Lo anterior, junto con la información suministrada por el Gráfico 6.63, permite establecer que aquellas zonas con menor impacto antrópico poseen niveles de cloruro inferiores a 25 mg/L, valor límite que considera además que el contenido de cloruro en aguas superficiales de éstas zonas es similar al contenido de cloruro en aguas subterráneas, lo que permite afirmar que zonas con menor impacto antrópico presentan niveles menores a 25 mg/L. (Gráfico 6.63, Figura 6.23 y Figura 6.24)

- **Sulfato.**

Una vez establecidos los límites que permiten establecer cuales muestras están asociadas al contenido natural, es necesario analizar si el contenido de sulfato está asociado a la actividad antrópica, fundamentalmente a la actividad agrícola y a la minería, para esto se presenta la Figura 6.25:

Figura 6.25: Distribución del Sulfato en la Cuenca del Aconcagua.



Fuente: Elaboración propia.

Concentración en mg/L

En la Figura 6.25 se observa un incremento en los niveles de Sulfatos en zonas cercanas a la Fundición Changres, lo que implicaría un aumento en las concentraciones de Sulfato en sectores aledaños, así mismo, la presencia de otras empresas como Cemento Melón en Quillota podría aportar con niveles elevados de sulfato en relación al resto de los demás sectores. Esto tiene sentido si se considera que Hem (1985) hace mención de que en zonas con geologías de rocas ígneas, que es el caso de la cuenca del Aconcagua, las fuentes de cloruro y sulfato se deben a la contaminación atmosférica generada por las industrias del sector.

Otro posible origen del sulfato en aguas subterráneas, como también en las aguas superficiales de la cuenca, es el drenaje ácido que se produce en las instalaciones mineras. Este fenómeno fue reconocido por CODELCO en un informe realizado el año 2008, donde se establece que el

drenaje ácido sería el principal causante del aumento de sulfato en las aguas del río Blanco, tributario del Aconcagua, así como el aumento de hierro y cobre en las mismas. El fenómeno anteriormente mencionado puede verse en la siguiente tabla, donde se presentan las concentraciones históricas registradas para las estaciones

Tabla 6.13: Valores históricos registrados en las estaciones del río Blanco.

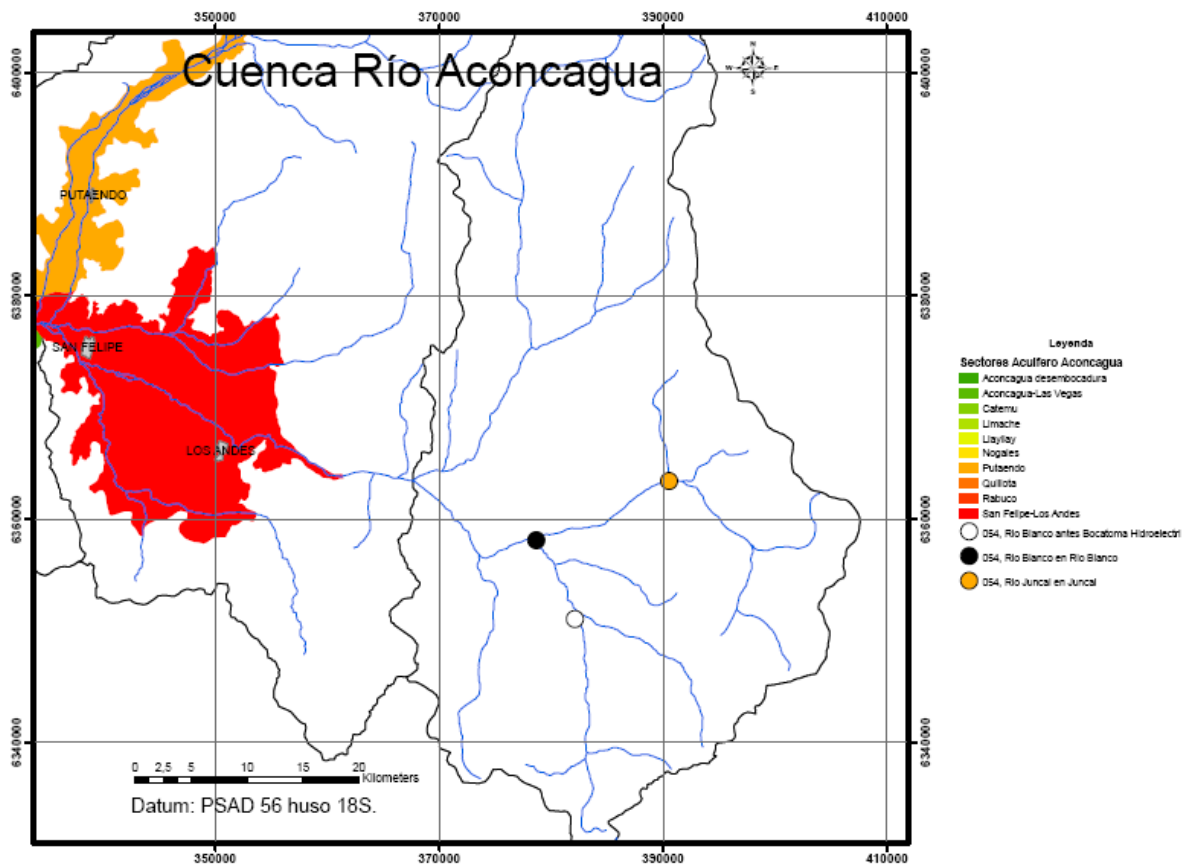
ESTACIÓN	CÓDIGO BNA		Sulfato [mg/L]	Cobre [mg/L]	Fierro total [mg/L]
RIO JUNCAL EN JUNCAL	05401003-6	Promedio	262,94	0,040	2,48
		maximo	425,00	1,010	18,10
		Minimo	73,91	0,001	0,01
		D. Estandar	83,30	0,144	3,42
RIO BLANCO EN RIO BLANCO	05402001-5	Promedio	139,84	2,443	2,15
		maximo	345,00	28,000	22,56
		Minimo	4,30	0,010	0,02
		D. Estandar	66,87	4,770	3,54
RIO BLANCO EN CENTRAL HIDROELECTRICA	05402013-9	Promedio	199,01	6,602	2,88
		maximo	381,00	28,100	9,08
		Minimo	52,09	0,010	0,01
		D. Estandar	68,69	7,262	2,53

Como se puede observar de la tabla anterior, el contenido de sulfatos, en comparación con el resto de las estaciones presentadas en la Tabla 6.10, es bastante elevado, lo que ratifica lo dicho por el estudio realizado por CODELCO división ANDINA. Actualmente se realizan trabajos para mitigar el fenómeno de drenaje ácido en las faenas de la división ANDINA, los cuales traerán consigo una baja en los niveles de sulfato en la parte alta de la cuenca y en sectores como San Felipe-Los Andes (Figura 6.25).

Estos niveles elevados de sulfato, junto con los procesos de recarga entre el río y el acuífero, generan los aumentos en el contenido de éste parámetro en las aguas subterráneas del acuífero.

La Figura 6.26 presenta la ubicación de las estaciones mencionadas en la tabla anterior.

Figura 6.26: Ubicación Estaciones de monitoreo Superficial. Tabla 6.13.

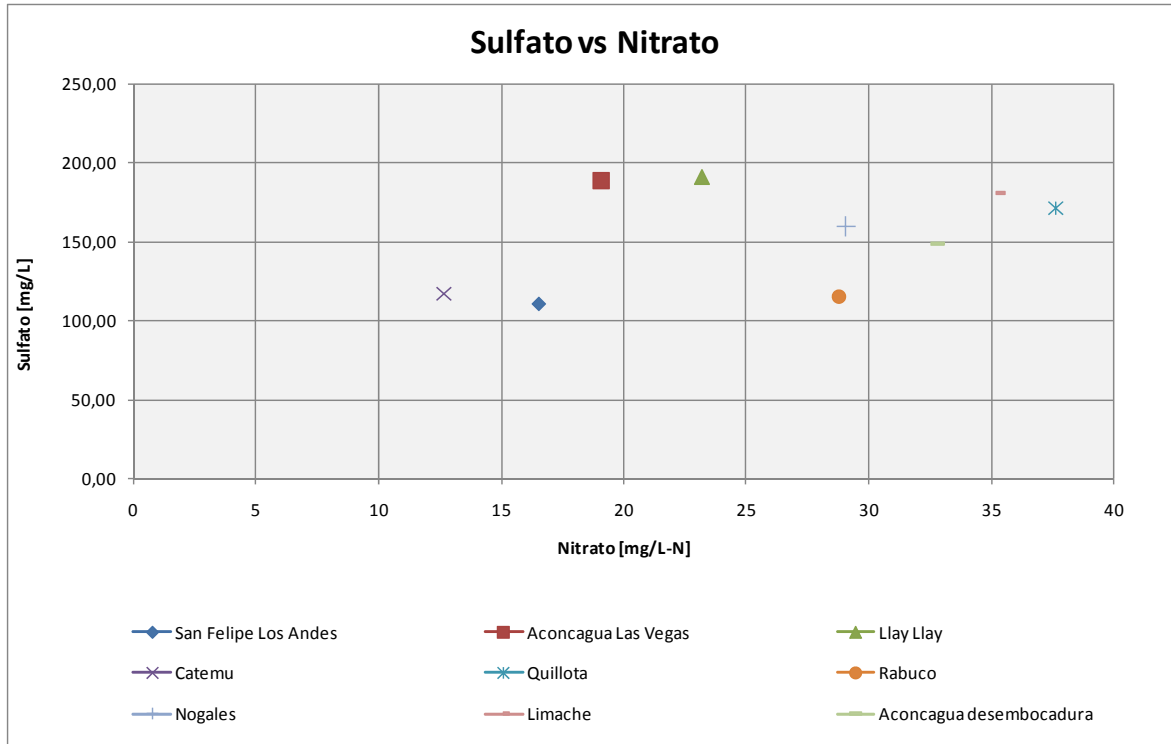


Fuente: Elaboración Propia.

La gran actividad minera existente en la zona, lo cual puede observarse en la Figura 6.7 y en la Figura 6.25, según lo afirmado por Parraguez (1985), sería otro posible origen del sulfato en las aguas superficiales, las cuales se mezclarían con las aguas subterráneas en los puntos de recarga.

La actividad agrícola sería otro factor que incrementaría la presencia de sulfato en las aguas, lo cual se puede observar en sectores como Quillota, Limache y San Felipe-Los Andes, pero el siguiente gráfico muestra que el contenido de Sulfato en relación al contenido de nitrato es bastante homogéneo en prácticamente toda la cuenca, incluso para sectores con niveles altos de nitrato como Quillota y Limache, aunque el efecto de la función se observa claramente ya que el sector Aconcagua-Las Vegas presenta niveles más elevados que el resto de los sectores que poseen similares concentraciones de nitrato.

Gráfico 6.64: Sulfato vs Nitrato medido en Sectores del Acuífero del Aconcagua.



A partir del Gráfico 6.64 y del Gráfico 6.63 se puede concluir que las concentraciones de sulfato y nitrato están correlacionadas con aquellas zonas donde la actividad minera y agrícola es importante. Otro probable origen del sulfato puede ser el aporte provocado por la disolución de yeso en la Formación Yeso en la parte alta de la cuenca (Figura 6.5)

Otro sector con elevados niveles de sulfato es el de Llay Llay, donde se puede apreciar un efecto de contaminación importante, la cual ha sido mencionada en puntos anteriores, ya que como se puede observar en la Figura 6.24 y la Figura 6.25, donde se puede apreciar los evidentes aumentos de los niveles de nitrato y sulfato en ambas zonas, los cuales podrían estar asociados a la presencia de un yacimiento de Cobre en la parte media del Sector de Llay Llay. Una situación similar se presenta en el sector de Nogales, donde la actividad minera existente en la parte alta de este sector es bastante importante, lo que generaría el incremento de sulfato debido a la mineralización de rocas en los yacimientos mineros presentes en esta zona.

Otro sector con niveles importantes de sulfato es el sector de Quillota, donde se puede apreciar el claro aumento de sulfato ante el incremento del contenido de nitrato, lo que estaría asociado a la actividad agrícola que se desarrolla en el sector. Este fenómeno también se puede apreciar en el

sector de Limache, donde los niveles elevados de sulfato se acompañan con niveles elevados de nitrato. El origen del sulfato, al menos del punto de vista agrícola, estaría asociado a la utilización de fertilizantes como el sulfato de cobre.

Es importante destacar que los fenómenos mencionados tanto en este punto como en los demás corresponden a efectos particulares observados en los análisis, ya que al no contar con una estadística mayor en relación a los análisis de calidad de la cuenca, no es posible atribuir estos fenómenos a hechos puntuales o a fenómenos que se han producido a lo largo del tiempo, pero si es posible atribuir posibles orígenes a partir de la distribución de la actividad minera, industrial y agrícola que existe en la cuenca y el cruce entre ésta información y las muestras recopiladas en los estudios mencionados anteriormente.

6.3.7 Auditoria análisis de calidad de agua subterránea.

El fin de la auditoria es verificar que el trabajo será realizado con muestras que corresponden a condiciones naturales y que no tienen alteración debido a factores externos. Para realizar la auditoria se consideraron los criterios establecidos en la metodología señalada en el Capítulo 5. A continuación se presenta el resultado obtenido al realizar el Balance Iónico, cuyo criterio es aceptar aquellas muestras que no sobrepasen el 5% de error.

Tabla 6.14: Muestras de los pozos de la red de monitoreo de la D.G.A. que presentan Balance Iónico menor al 5%.

REGION	POZOS	CÓDIGO BNA	COORDENADAS		N° DE MUESTRAS	TOTAL
			N	E		
V Región de Valparaíso	Dren Los Caleos	05424013-9	6385363	294245	23	47
	C.C.U. Limache	05427017-8	6347952	287074	24	

Tabla 6.15: Cantidad de muestras de la campaña de monitoreo cuyo Balance Iónico es menor al 5%.

Estudio	Campaña	N° de Muestras	Total
Campaña monitoreo Aguas subterráneas Sectores Acuíferos los Choros y Aconcagua	1ra Campaña	35	52
	2da Campaña	17	

A partir de los resultados obtenidos del balance iónico, se presentaran los resultados de la aplicación de los diferentes indicadores de montos relativos presentados en la metodología (Tabla 5.2: Chequeos Generales.. Esto se realiza con el fin de identificar de manera preliminar muestras que presenten anomalías que puedan ser asociadas a algún origen particular, ya sea natural o antrópico.

- **Conductividad Específica/Suma Cationes**

Dos sectores presentan valores menores a 90, Llay Llay y Quillota. En el primero de estos se tiene que existe un aumento de los iones de calcio y magnesio, iones presentes de forma natural en ese sector debido a la presencia de las formaciones Veta Negra y la Unidad Illapel, compuestas por andesita, diorita, gabros y granito (monzogranito y seinogranito), por lo que un aumento de éstos puede deberse a un cambio en las condiciones naturales por actividad antrópica.

Este cambio puede estar fundamentado en la presencia de un yacimiento explotado de Cobre y Plomo (El Sauce) ubicado en las cercanías del estero Los Loros. Si consideramos que el aumento de los niveles de Ca y Mg se encuentran en pozos que están tanto aguas abajo y aguas arriba del yacimiento y en la dirección del flujo del estero, se podría decir que este efecto tendría relación con la actividad minera desarrollada en el sector, pero dado que no existen datos de calidad de años anteriores, no es posible atribuir esto a un efecto puntual o un efecto prolongado.

En el caso del sector Quillota existen aumentos locales de potasio, así como también de calcio, sodio y magnesio, lo cual no es atribuible a la geología directamente (tipo de rocas es prácticamente la misma que en casi toda la cuenca) sino que puede deberse al aporte de sectores como Nogales y Rabuco, donde las concentraciones de calcio y bicarbonato podrían aumentar, así como también una baja en la transmisividad, lo que aumentaría el nivel de concentración de los iones.

- **Sólidos Disueltos totales calculados/Conductividad Eléctrica.**

En la mayoría de las muestras analizadas, el aumento de este indicador se debe a un aumento de las concentraciones de nitrato y cloruro fundamentalmente, lo que claramente indica niveles de actividad antrópica marcada.

- **K/(K+Na)**

En los dos casos observados, Quillota y Rabuco, el indicador sobrepasa el 20%, lo que se debe fundamentalmente a un aumento de Potasio, lo que podría deberse a una baja en las trasmisividades y no a la geología.

- **Mg/(Ca+Mg)**

El caso que destaca es el sector Limache, con un aumento importante de magnesio y calcio, lo que podría deberse a un efecto de mayor tiempo de contacto con la roca debido a la baja trasmisividad que existe en el sector o debido a niveles de napa subterránea cercanos a la superficie del terreno, lo que implicaría algún grado de evaporación de las aguas, lo que

aumentaría su concentración de sales. Para corroborar esto último se analizará, posteriormente, los niveles observados en el sector con los valores históricos observados en el pozo perteneciente a la red de monitoreo de la D.G.A.

- **Ca/(Ca+SO₄⁻²)**

Limache presenta el único caso con valores del indicador por debajo del 50%, debido fundamentalmente a niveles elevados de sulfato. El origen de este fenómeno se verificará posteriormente.

- **Na/(Na+Cl)**

En la mayoría de los casos evaluados, las muestras presentaban aumentos de cloruro, lo que claramente indicaría un grado de alteración debido a la actividad antrópica, considerando la cercanía de los pozos a centros urbanos, caso sector Quillota y Rabuco.

6.3.8 Análisis Estadístico.

Debido a que no se cuenta con series históricas para generar histogramas ni menos curvas de distribución, solo será posible determinar los máximos y mínimos de una época particular, por lo que no se podrán realizar mayores análisis estadísticos, como lo señala la metodología presentada en el Capítulo 6. Luego a continuación se presentan los rangos obtenidos para cada uno de los sectores que componen el acuífero del Aconcagua.

Tabla 6.16: Máximos y Mínimos registrados en los sectores San Felipe-Los Andes, Aconcagua las Vegas y Llay Llay.

Sector		San Felipe Los Andes		Putando	Aconcagua Las Vegas		Llay Llay	
		Máximo	Mínimo		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
°C	[°C]	21.4	15.3	-	19.8	18.0	20.7	19.1
pH	-	7.86	7.22	-	7.47	7.05	7.71	7.02
Conductividad E.	[μS/cm]	947	291	-	891	617	1534	284
HCO ₃ ⁻	[mg/L]	347.44	108.33	-	250.88	168.12	516.05	143.61
Cl ⁻	[mg/L]	42.99	4.83	-	22.82	16.20	36.58	5.03
SO ₄ ⁻²	[mg/L]	183.54	39.97	-	260.82	132.04	367.34	19.17
Ca ⁺²	[mg/L]	153.0	40.0	-	145.0	91.7	206.0	34.5
Sólidos Disueltos	[mg/L]	632	217	-	660	372	1140	265
Mg ⁺²	[mg/L]	28.50	7.03	-	21.80	12.20	63.20	12.26
K ⁺	[mg/L]	2.36	0.52	-	1.96	1.31	3.61	0.40
Na ⁺	[mg/L]	41.30	3.86	-	21.30	7.81	57.68	4.13
Al	[mg/L]	0.50	0.01	-	0.05	0.01	0.38	0.01
Cu	[mg/L]	0.02	0.01	-	0.07	0.01	0.08	0.01
Fe	[mg/L]	2.86	0.03	-	0.17	0.03	1.89	0.01
Mn	[mg/L]	0.04	0.01	-	0.02	0.01	2.77	0.01
Mo	[mg/L]	0.01	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.01
Ni	[mg/L]	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.001	0.00
N(NO ₃ ⁻)	[mg/L]	10.17	1.03	-	5.13	3.27	11.72	1.23

Tabla 6.17: Máximos y Mínimos registrados en los sectores Catemu, Quillota y Rabuco.

Sector		Catemu		Quillota		Rabuco	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
°C]	[°C]	20.1	19.4	23.2	18.1	19.5	18.5
pH	-	7.55	7.40	7.44	6.81	7.30	7.25
Conductividad E.	[μS/cm]	697	679	1110	530	985	288
HCO3-	[mg/L]	283.12	274.45	343.57	68.82	290.01	116.66
Cl-	[mg/L]	14.18	11.16	140.85	13.46	51.99	5.59
SO4-2	[mg/L]	121.41	112.42	247.73	110.79	200.07	30.76
Ca+2	[mg/L]	107.0	105.0	169.3	66.3	147.0	31.4
Solidos Disueltos	[mg/L]	538	500	836	68	686	212
Mg+2	[mg/L]	16.20	13.30	31.52	14.90	28.00	12.70
K+	[mg/L]	0.66	0.28	9.41	0.26	2.24	1.23
Na+	[mg/L]	32.00	22.60	45.65	7.20	23.90	5.44
Al	[mg/L]	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01
Cu	[mg/L]	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01
Fe	[mg/L]	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03
Mn	[mg/L]	0.01	0.01	0.46	0.01	0.31	0.01
Mo	[mg/L]	0.01	0.01	0.010	0.01	0.01	0.01
Ni	[mg/L]	0.001	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00
N(NO3-)	[mg/L]	4.56	4.30	12.89	3.30	5.16	4.16

Tabla 6.18: Máximos y Mínimos registrados en sectores Nogales, Limache y Aconcagua desembocadura.

Sector		Nogales		Limache		Aconcagua desembocadura	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
°C]	[°C]	18.2	17.3	17.7	16.6	18.7	18.1
pH	-	7.59	6.55	7.66	6.65	7.56	6.92
Conductividad E.	[μS/cm]	850	577	1031	503	872	672
HCO3-	[mg/L]	260.81	159.73	294.20	148.65	336.14	208.87
Cl-	[mg/L]	39.19	14.73	54.66	16.01	40.24	29.06
SO4-2	[mg/L]	235.96	118.30	266.35	72.98	160.72	136.83
Ca+2	[mg/L]	114.0	72.9	107.9	50.7	110.7	83.7
Solidos Disueltos	[mg/L]	608	375	752	324	637	456
Mg+2	[mg/L]	36.80	20.80	37.50	22.63	29.21	17.90
K+	[mg/L]	1.76	0.24	9.24	1.15	3.78	1.45
Na+	[mg/L]	42.29	8.90	98.10	14.21	49.09	24.00
Al	[mg/L]	0.44	0.01	0.51	0.02	0.07	0.01
Cu	[mg/L]	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	-1.99
Fe	[mg/L]	0.70	0.03	0.17	0.03	1.43	0.06
Mn	[mg/L]	0.06	0.01	0.02	0.01	1.03	0.03
Mo	[mg/L]	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Ni	[mg/L]	0.001	0.00	0.001	0.00	0.001	0.00
N(NO3-)	[mg/L]	7.68	4.06	10.05	7.12	3.72	0.11

Es importante destacar el hecho de que las concentraciones de cloruro y nitrato aumentan en los sectores de Quillota, Limache lo que se debería al elevado nivel de actividad antrópica en estos sectores, fundamentalmente agricultura, situación que se repite en zonas como Llay Llay y San Felipe – Los Andes.

Sin embargo, si se observa las desviaciones calculadas de los parámetros mencionados anteriormente, datos presentados en la Tabla 6.19, se podrá observar que las desviaciones calculadas para San Felipe-Los Andes, Quillota, Llay Llay presentan valores elevados para ambos indicadores, situación que no se da en el resto de los sectores, lo que se explicaría por la presencia de concentraciones elevadas, pero dispersas en estos sectores.

Lo anterior podría indicar contaminación puntual de nitrato. En cambio los demás sectores presentan menor variabilidad en los registros, por lo que se puede considerar como sectores de comportamiento homogéneo del punto de vista del nitrato.

Un fenómeno similar ocurre con el Cloruro, donde los sectores con menor variabilidad, y por tanto mayor homogeneidad en los datos obtenidos, corresponden a los sectores San Felipe Los Andes, Aconcagua las Vegas, Aconcagua desembocadura y Catemu, por lo que las concentraciones son representativas de estos sectores.

Tabla 6.19: Desviaciones de los parámetros medidos en el estudio.

Sector		San Felipe Los Andes	Putauendo	Aconcagua Las Vegas	Llay Llay	Catemu	Quillota	Rabuco	Nogales	Limache	Aconcagua desembocadura
Temperatura	[°C]	1.82	-	0.77	1.13	0.49	1.76	0.71	0.40	0.51	0.42
pH	-	0.22	-	0.17	0.25	0.11	0.18	0.04	0.39	0.43	0.27
Conduct	[uS/cm]	176.46	-	129.91	470.56	12.73	180.92	492.85	102.81	196.56	81.69
HCO ₃ ⁻	[mg/L]	78.97	-	34.53	135.94	6.13	72.98	122.58	42.83	68.37	50.17
Cl ⁻	[mg/L]	9.90	-	2.87	11.32	2.14	37.24	32.81	9.93	13.96	4.52
SO ₄ ⁻²	[mg/L]	45.78	-	58.38	135.79	6.36	42.30	119.72	48.28	74.86	9.57
Ca ⁺²	[mg/L]	34.57	-	23.80	65.04	1.41	34.80	81.74	17.91	20.77	10.72
Mg ⁺²	[mg/L]	5.94	-	4.02	20.12	2.05	4.99	10.82	7.33	6.26	4.47
K ⁺	[mg/L]	0.53	-	0.31	1.14	0.27	2.71	0.71	0.68	3.31	0.85
Na ⁺	[mg/L]	11.60	-	6.12	17.33	6.65	12.29	13.05	13.20	32.43	10.34
Al	[mg/L]	0.12	-	0.02	0.15	0.00	0.02	0.00	0.19	0.20	0.02
Cu	[mg/L]	0.00	-	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.89
Fe	[mg/L]	0.73	-	0.07	0.76	0.00	0.01	0.00	0.29	0.06	0.61
Mn	[mg/L]	0.01	-	0.01	1.17	0.00	0.14	0.21	0.02	0.00	0.41
Mo	[mg/L]	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	[mg/L]	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
N(NO ₃ ⁻)	[mg/L]	3.20	-	0.85	3.51	0.18	3.61	0.70	1.57	1.32	1.68
Sol. Dis.	[mg/L]	123.94	-	141.21	304.14	26.87	197.06	335.17	98.13	181.63	73.25

El análisis más en detalle las diferencias anteriormente mencionadas, como también otros fenómenos, se realizará en el punto correspondiente al análisis hidrogeoquímico.

6.3.9 Determinación Calidad Natural.

Una vez definidos los límites para las concentraciones de nitrato y cloruro, y que las concentraciones de sulfato se ven acompañan, en ciertos casos, de los aumentos de nitrato y cloruro debido a las actividades desarrolladas en cada sector, se puede determinar aquellas muestras que son características de la composición natural de las aguas del acuífero del Aconcagua. A manera de resumen se vuelven a exponer los límites establecidos en el punto anterior para las concentraciones de nitrato y cloruro

- Nitrato: Se considerarán aquellas muestras que tengan valores menores a 7 mg/L, muestras con valores superiores no serán consideradas por presentar efectos de actividad antrópica importante (Punto 6.3.6, Gráfico 6.63 y Gráfico 6.64).
- Cloruro: Se considerarán aquellas muestras que tengan valores menores a 25 mg/L, muestras con valores superiores no serán consideradas por considerar que estas muestras están afectadas por la actividad antrópica (Punto 6.3.6, Gráfico 6.63 y Gráfico 6.64).

Luego, aplicando estos criterios de preselección a las muestras, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6.20: Muestras que están por debajo de los límites establecidos para nitrato y cloruro

SECTORES	Nº MUESTRAS TOTALES	Nº MUESTRAS FINALES
Aconcagua-Desembocadura	5	3
Aconcagua-Las Vegas	4	4
Catemu	2	2
Limache	4	0
Llay Llay	6	2
Nogales	4	1
Quillota	10	3
Rabuco	2	1
San Felipe-Los Andes	15	8
TOTAL	52	24

Observando la tabla anterior junto con la Figura 6.5 y la Figura 6.17, y considerando los antecedentes presentados anteriormente, se puede considerar que los sectores de San Felipe-Los Andes, Aconcagua Las Vegas y Catemu son las zonas que presentan características similares,

tanto del punto de vista geológico, Figura 6.5 y Figura 6.17, como del punto de vista del impacto de las actividades antrópicas, ya que gran parte de las muestras originales fueron seleccionadas según los criterios anteriores. En cambio sectores como Llay Llay, Quillota, Rabuco, Nogales y Limache presentan niveles de impacto antrópico importantes, ya que las muestras seleccionadas por los criterios mencionados anteriormente solo forma un pequeño conjunto de las muestras originales.

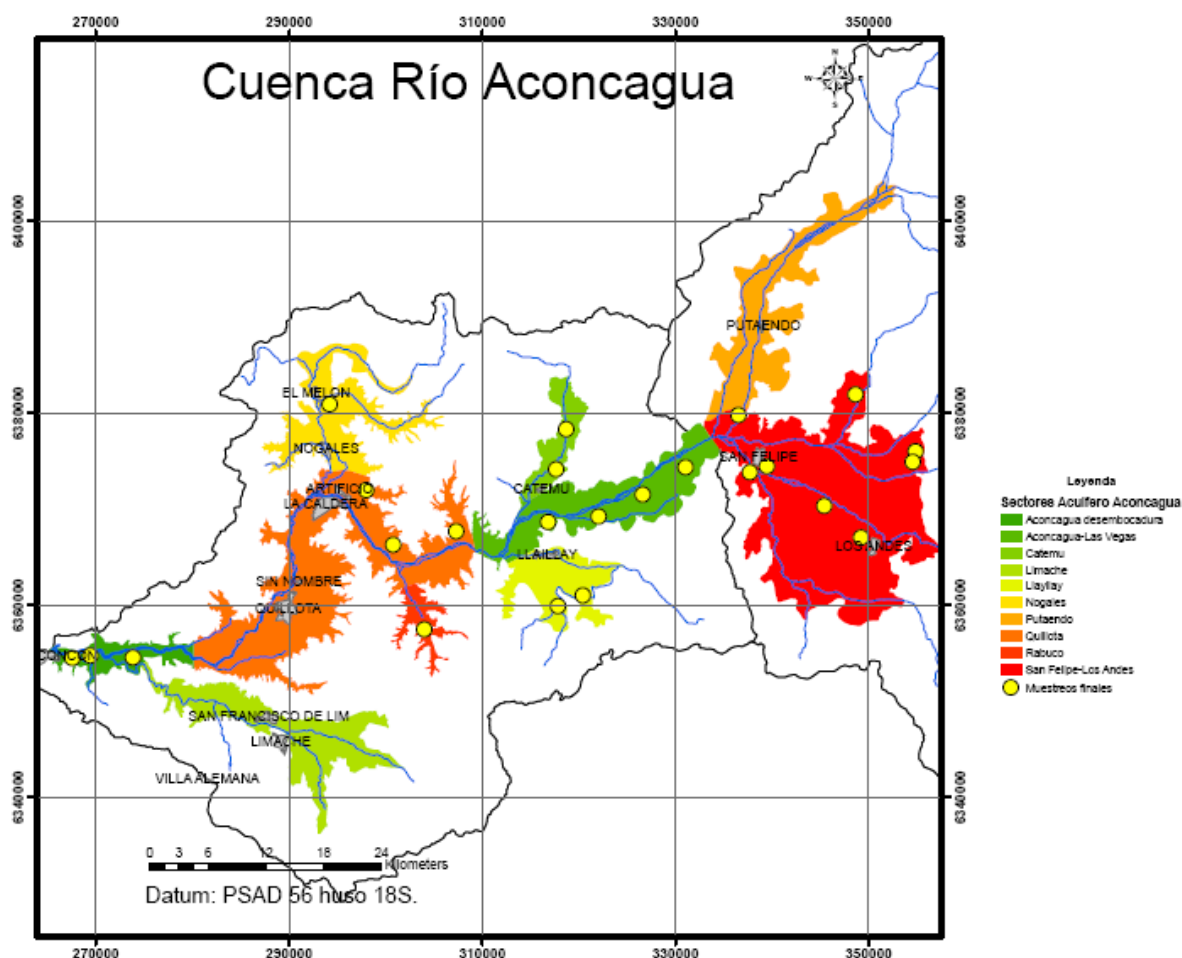
Luego, la siguiente tabla presenta los valores medios, máximos y mínimos que definen la calidad natural para la época de muestreo noviembre-febrero 2008-2009 para cada uno de los parámetros analizados.

Tabla 6.21: Valores medios y rangos de los parámetros analizados en el acuífero del río Aconcagua.

Parámetros		ACUIFERO ACONCAGUA			
		Promedio	Máx.	Mín.	D. Estándar
C.E.	[μmhos/cm]	622	891	284	170
pH	-	7,39	7,86	6,81	0,27
SDT	[mg/L]	428	660	212	121
Cloruro	[mg/L]	16,93	40,24	4,83	8,88
Nitrato	[mg/L]	3,56	7,02	0,1	1,87
Sulfato	[mg/L]	115,92	260,82	19,17	55,14
Calcio	[mg/L]	87,99	145	31,4	28,69
Sodio	[mg/L]	19,62	49,09	3,86	12,96
Magnesio	[mg/L]	16,91	29,21	7,03	5,65
Bicarbonato	[mg/L]	221	336,14	108,33	70,78
Potasio	[mg/L]	1,38	3,78	0,24	0,86
Aluminio	[mg/L]	0,04	0,5	0,01	0,10
Cobre	[mg/L]	0,02	0,08	0,01	0,02
Hierro	[mg/L]	0,08	0,87	0,01	0,17
Manganeso	[mg/L]	0,05	0,51	0,01	0,13
Molibdeno	[mg/L]	0,01	0,01	0,01	0,00
Mercurio	[mg/L]	0,001	0,001	0,001	0,00
Níquel	[mg/L]	0,001	0,001	0,001	0,00
Bario	[mg/L]	0,04	0,15	0,01	0,04

Observando los valores asociados a los macro elementos, y comparando los análisis realizados en la etapa predictiva del estudio, se comprueba que, efectivamente, la presencia de Ca, Bicarbonato y Na son los parámetros con mayor importancia, característica general de aguas cuyo origen se asocia a rocas basálticas y graníticas (Tabla 3.8). La presencia de sulfato como uno de los componentes principales estaría asociada a su vez a la presencia de niveles significativos de cobre los que tendrían origen geológico, esto debido a la gran cantidad de menas de cobre presentes en la zona, en cuyo caso el cobre y el sulfato podrían estar asociados como minerales en estos yacimientos. Así mismo, los niveles de aluminio en las aguas estarían asociados a la presencia de minerales aluminosilicatados. La distribución de las muestras seleccionadas se presenta a continuación.

Figura 6.27: Distribución de las muestras seleccionadas.



Fuente: Elaboración propia.

Si se observa la figura anterior y se compara con la Figura 6.18, y considerando los antecedentes en relación a la actividad antrópica en la zona, se puede ver que la mayoría de los pozos eliminados de la base de datos original se ubican en sectores con alta actividad agrícola (Quillota, San Felipe-Los Andes y principalmente Limache), como también minera, industrial y niveles de población considerables (Tabla 6.22)

Tabla 6.22: Población residente en los asentamientos asociados a la cuenca del Aconcagua. Censo 2002.

NOMBRE ASENTAMIENTO	POBLACIÓN TOTAL	POBLACIÓN TOTAL URBANA	CAUCE ASOCIADO A LA LOCALIDAD
	[Hab.]	[Hab.]	
Artificio	n.d.	9815	Río Aconcagua
Quillota	75916	66025	Río Aconcagua
San Felipe	64126	57760	Río Aconcagua-Est. Quilpue
Los Andes	60198	55388	Río Aconcagua
La Calera	49503	47836	Río Aconcagua
Limache	39219	34948	Estero Limache
Con Con	32273	31558	Río Aconcagua
Llay Llay	21644	16215	Estero Los Loros
Nogales	21633	18,698	Estero Los Litres
Hijuelas	16014	8196	Río Aconcagua
Putando	14649	7214	Río Putando
La Cruz	12851	10611	Río Aconcagua
Catemu	12112	6706	Estero Catemu

Fuente: CADE-IDEPE, 2004

n.d.: Sin información

6.3.10 Análisis Hidrogeoquímico.

Los Análisis hidrogeoquímicos que se realizaran tienen relación, fundamentalmente con la validación de las hipótesis mencionadas anteriormente, las que incluyen los efectos de confinamiento del acuífero, las variaciones de transmisividad, y efectos de la evaporación como también fenómenos de drenaje ácido. Lo anterior permitirá un análisis más detallado acerca del comportamiento de los parámetros a medida que las aguas pasan por diferentes condiciones hidrogeológicas y químicas.

6.3.10.1 Efecto de Confinamiento sobre el comportamiento de la química del agua en el acuífero del Aconcagua.

El primer paso del análisis es poder discriminar aquellas muestras que manifiesten un estado de reducción, lo cual se manifiesta por el contenido de Hierro en el agua, que según Wendland, y otros (2006), oxígeno disuelto, nitrato y amonio. El criterio utilizado se presenta a continuación.

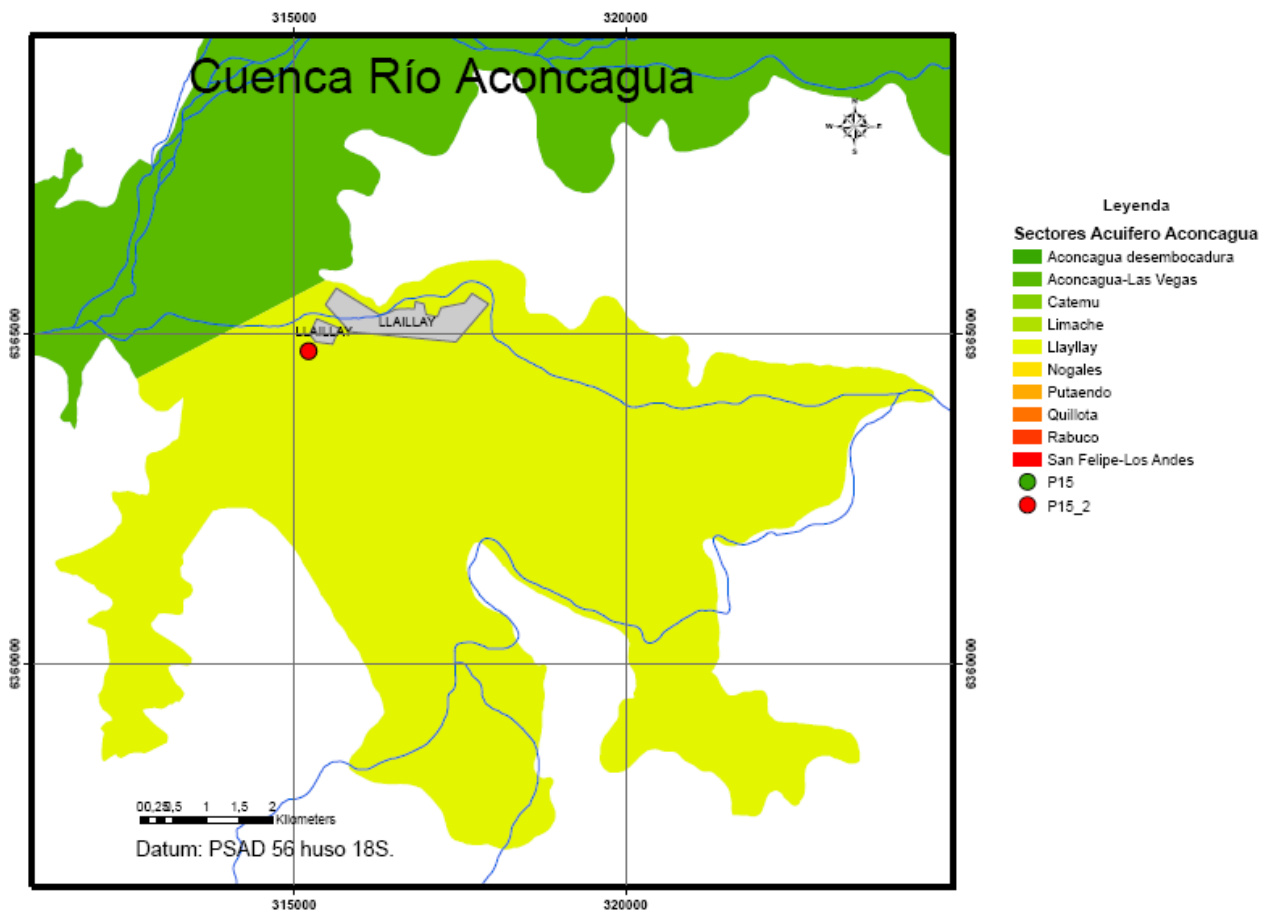
- Acuífero Reducido $Fe > 0.2 \text{ mg/L}$ y $O_2 < 2 \text{ mg/L}$
- Acuífero Oxidado $Fe < 0.2 \text{ mg/L}$ y $O_2 > 2 \text{ mg/L}$

Aunque en nuestro caso no contamos con información relacionada con el contenido de oxígeno disuelto, si se tiene conocimiento del contenido de hierro en el agua, además de saber que en condiciones reducidas, característica general de acuíferos confinados, se producen descensos en los niveles de nitrato, lo cual permitirá corroborar la característica de este tipo de condición.

Junto con lo anterior, y considerando en la etapa de descripción hidrogeológica se detalló la presencia de condiciones confinadas en Llay Llay (3er estrato, Llay Llay 3) y en los últimos 6 km del sector Aconcagua desembocadura, se identificaron las siguientes muestras con las condiciones mencionadas anteriormente:

- Sector Llay Llay, A pesar que las muestras P15 y P 15_2, que pertenecen al mismo pozo, presentan condiciones de ambiente reductor, ambas muestras no pasaron los criterios mencionados en el punto anterior, por lo que no serán analizadas, al menos en este caso, ya que los analisis se limitarán a aquellas muestras que cumplan con las condiciones mencionada en el punto 6.3.6.3. La ubicación de las muestras y el respectivo pozo del cual fueron tomadas se presenta en la Figura 6.28:

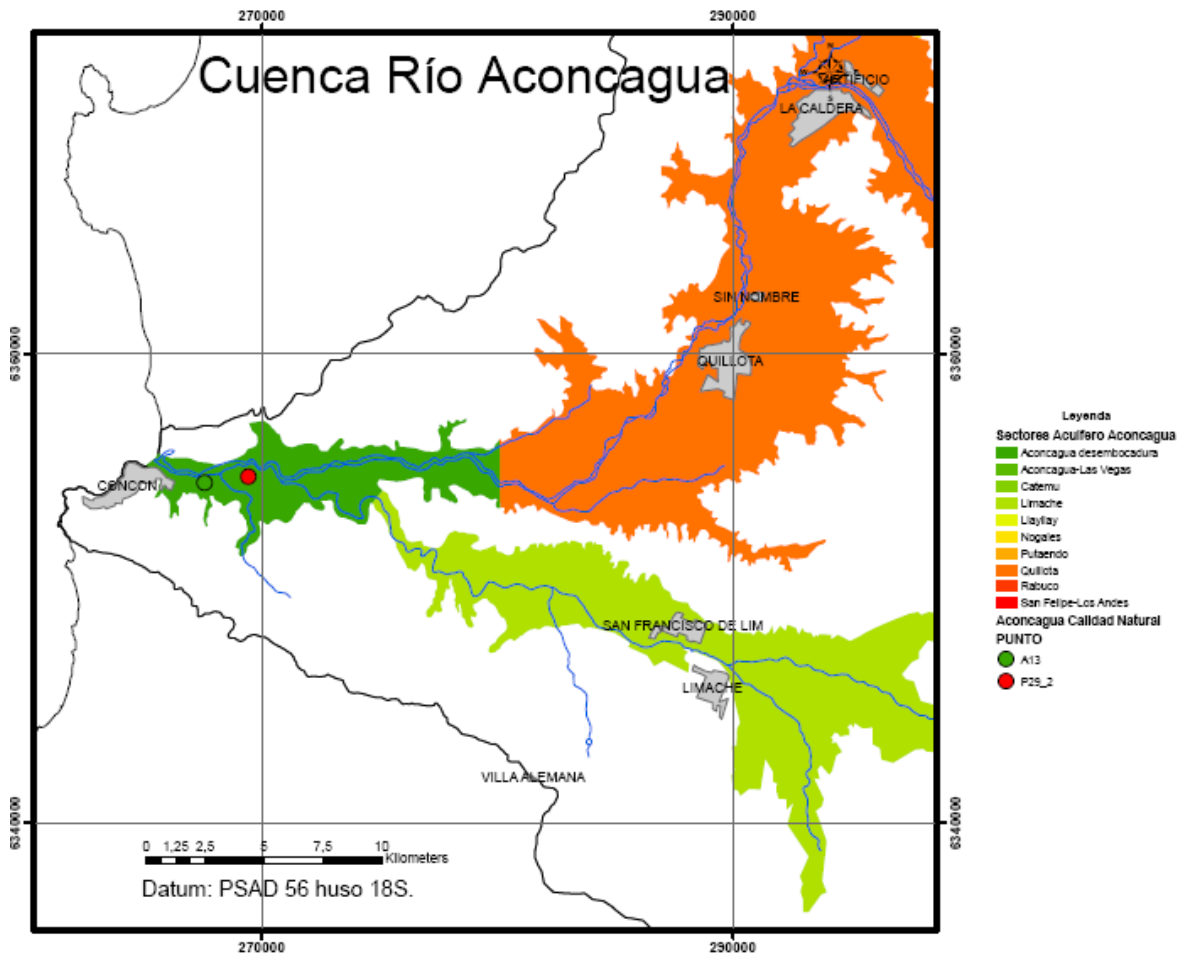
Figura 6.28: Ubicación Muestras P15 y P15_2 Sector Llay Llay.



Fuente: Elaboración Propia

- Sector Aconcagua Desembocadura, muestras A13 y P29 y P29_2, aunque de estas, solo la muestra A13 y la P29_2 cumplen con los criterios establecidos anteriormente. La ubicación de los pozos desde los cuales se obtuvieron estas muestras se presentan en la Figura 6.29.

Figura 6.29: Ubicación Pozos A13, P15 y P29.



Fuente: Elaboración Propia

Identificados los lugares con características confinadas, se procede a presentar una tabla resumen con los máximos, mínimos y el promedio registrados para cada tipo de acuífero.

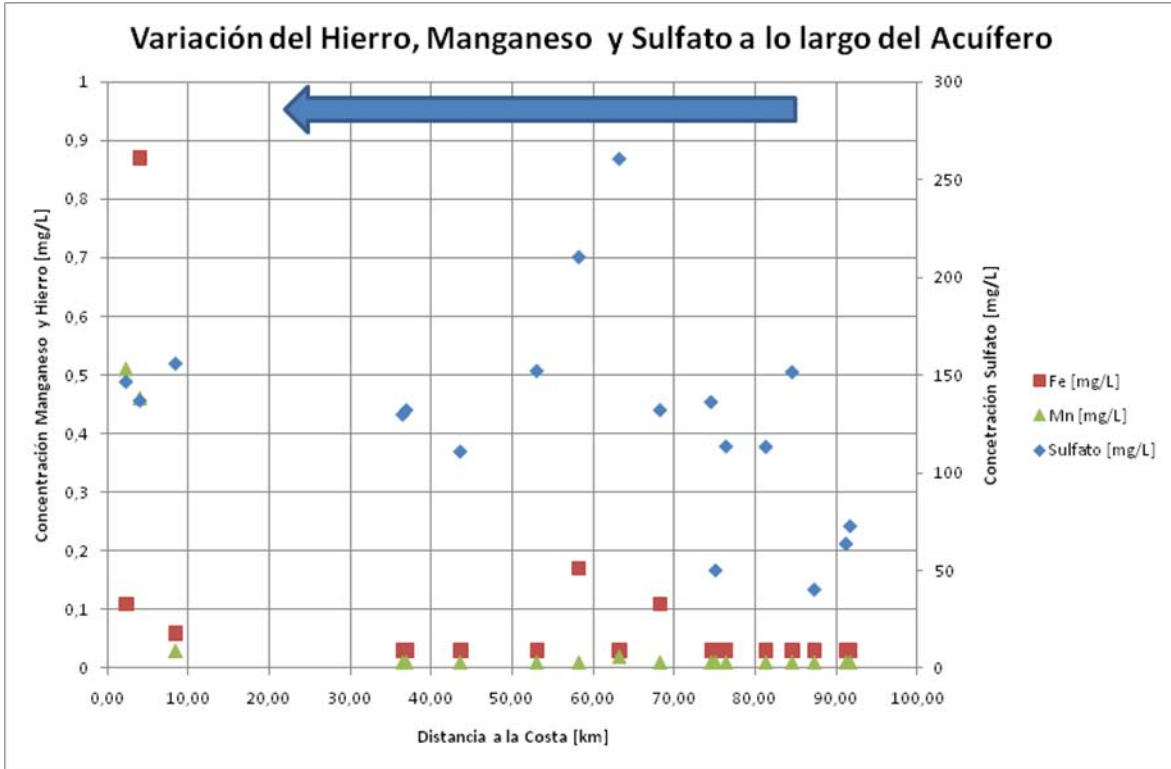
Tabla 6.23: Parámetros Acuífero Libre y Confinado.

TIPO ACUIFERO		CONFINADO				LIBRE			
		Promedio	Máx.	Mín.	D. Estandar	Promedio	Máx	Mín	D. Estandar
C.E.	[μmos/cm]	797	872	722	106	606	891	284	168
pH	-	7.315	7.33	7.3	0.02	7.40	7.86	6.81	0.28
SDT	[mg/L]	580.5	637	524	80	414	660	212	116
Cloruro	[mg/L]	35.34	40.24	30.44	6.93	15.26	33.84	4.83	6.98
Nitrato	[mg/L]	0.27	0.42	0.11	0.22	3.85	7.02	1.03	1.64
Sulfato	[mg/L]	141.67	146.51	136.83	6.84	113.58	260.82	19.17	57.08
Calcio	[mg/L]	101.54	110.74	92.34	13.01	86.75	145.00	31.40	29.57
Sodio	[mg/L]	43.345	49.09	37.6	8.12	17.47	41.30	3.86	11.07
Magnesio	[mg/L]	26.53	29.21	23.85	3.79	16.04	26.51	7.03	4.97
Bicarbonato	[mg/L]	303.94	336.14	271.75	45.53	213.26	313.34	108.33	68.34
Potasio	[mg/L]	2.72	2.84	2.6	0.17	1.26	3.78	0.24	0.79
Aluminio	[mg/L]	0.01	0.01	0.01	0.00	0.05	0.5	0.01	0.10
Cobre	[mg/L]	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.08	0.01	0.02
Hierro	[mg/L]	0.49	0.87	0.11	0.54	0.04	0.17	0.01	0.03
Manganeso	[mg/L]	0.485	0.51	0.46	0.04	0.01	0.03	0.01	0.00
Molibdeno	[mg/L]	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
Mercurio	[mg/L]	0.001	0.001	0.001	0.00	0.001	0.001	0.001	0.00
Níquel	[mg/L]	0.001	0.001	0.001	0.00	0.001	0.001	0.001	0.00
Bario	[mg/L]	0.01	0.01	0.01	0.00	0.04	0.15	0.01	0.04

Si observamos los promedios entre ambos tipos de acuífero, podemos observar un aumento en las concentraciones de hierro y manganeso, así como una disminución en el nitrato, lo que indica una condición reductora. Junto con lo anterior, se observan disminuciones de parámetros como bicarbonato y calcio, así como también de sulfato, el cual es reducido debido a la ausencia de oxígeno disuelto, por lo que su disminución sería también un indicativo de este tipo de condición, lo cual es ratificado a su vez por Freeze & Cherry (1979).

El Gráfico 6.65 ilustra el comportamiento del contenido de Hierro y Manganeso a lo largo del río Aconcagua. En este gráfico se puede observar que las condiciones a lo largo del acuífero son, en su mayoría, condiciones oxidantes, debido a que los niveles de hierro y manganeso son bastante bajos, en comparación con los niveles de Sulfato, los cuales son bastante regulares, aunque se observa un incremento de este último a medida que pasa por sectores como Aconcagua las Vegas, lo que podría estar asociado a bajas en las transmisividades o efectos de evaporación o aumentos en las recargas por parte del río.

Gráfico 6.65: Variación del contenido de Hierro y Manganeso a lo largo del Acuífero del Rio Aconcagua.



En relación a la amplitud de los rangos registrados de los parámetros, es importante destacar que en el caso del acuífero confinado, estas son menores en comparación con la amplitud de los rangos registrados de los parámetros medidos en el caso del acuífero freático. Esto último podría suponer algún nivel de independencia entre un acuífero y otro, lo que implica un bajo nivel de intercambio entre el acuífero confinado del sector Aconcagua desembocadura del acuífero freático presente en la misma zona.

Sin embargo, Parraguez (1985) hace hincapié de que existen variaciones en el sector de Aconcagua desembocadura, particularmente en el sector confinado, las cuales se manifiestan como fluctuaciones en las concentraciones de los parámetros debido a la incorporación de agua del acuífero freático, las cuales, en su paso hacia el acuífero confinado, lavan el lecho del río en el cual se encuentran sales depositadas producto de la precipitación y la presencia de una cuña salina en este sector en ciertas épocas (Parraguez, 1985), lo que implicaría que tanto el acuífero freático como el confinado se ven sometidos a este tipo de fenómeno, por lo que el confinamiento no es total en la zona.

Sin embargo, para ratificar los hechos mencionados anteriormente, es necesario realizar otros estudios de investigación, de manera de entender de mejor manera los procesos que ocurren en este sector, así como contar con una estadística mayor, por lo que lo que se propone en estas líneas es únicamente un supuesto.

Finalmente, a manera de resumen, se puede establecer que en los sectores con acuíferos confinados existe una condición reductora, registrada en ciertos puntos dentro de cada sector: Sin embargo, el desconocimiento del oxígeno disuelto no permite confirmar efectivamente la presencia de un ambiente reductor. No obstante, las características mencionadas en la etapa de descripción hidrogeológica permiten atribuir al sector de Aconcagua desembocadura y una parte del sector de Llay Llay la existencia de un acuífero confinado y otro freático, por lo que los resultados son consecuentes desde este punto de vista.

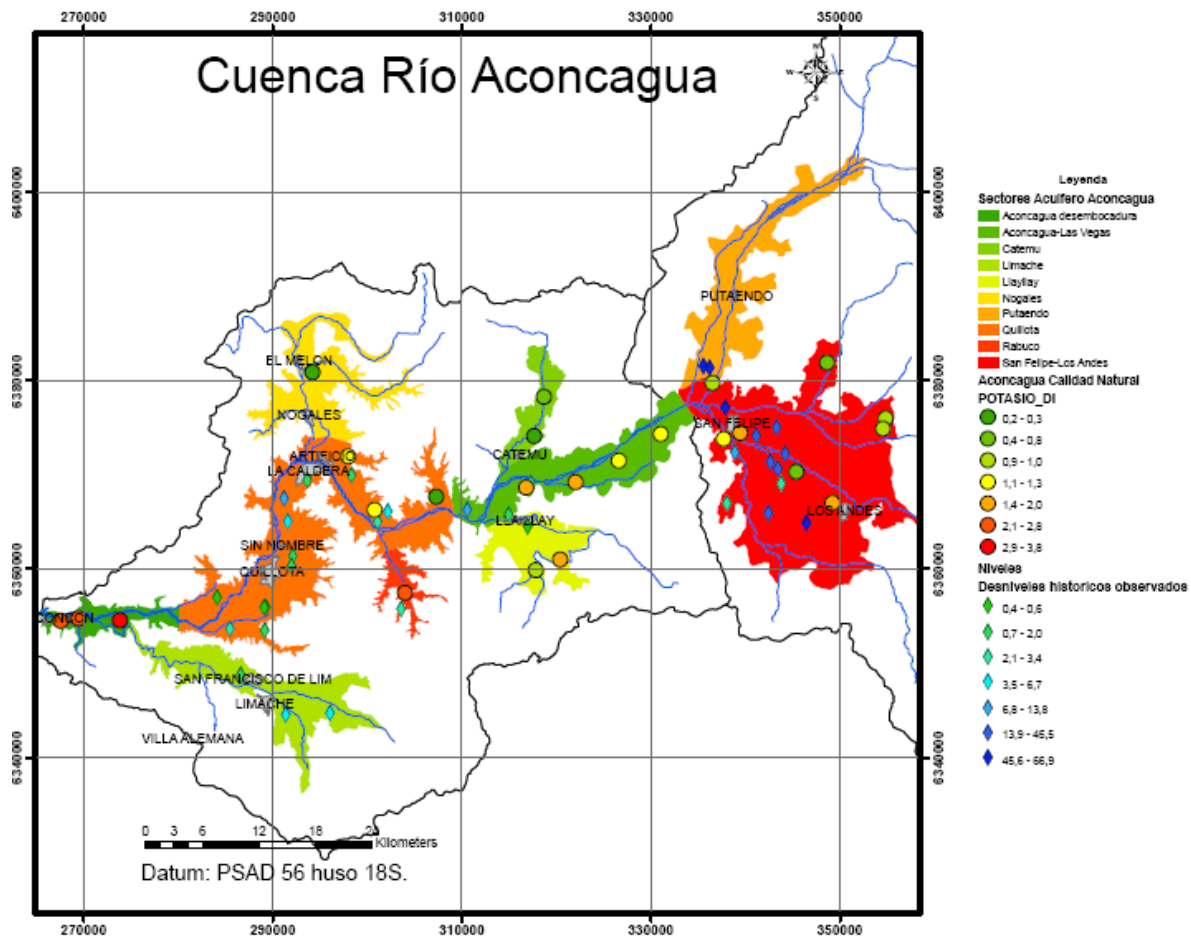
6.3.10.2 Efectos Transmisividad y Evaporación.

El objetivo de este punto es establecer si la disminución de la transmisividad se relaciona con un aumento en las concentraciones de ciertos parámetros, como también verificar si los sectores que presentan niveles freáticos más cercanos a la superficie, presentan niveles mayores de sales disueltas (Na, Cl, K, Mg)

Para analizar este efecto, se procedió a la utilización de diagramas de Stiff que permite observar la variación espacial de los macro componentes en particular del sodio, magnesio, potasio y cloruro. Estos diagramas han sido desarrollados en el Software AQUACHEM 4.0.

Luego, utilizando la Figura 6.30, la Figura 6.31 y la Figura 6.32. la información suministrada en la etapa de descripción Hidrogeológica, se comprueba un aumento en el contenido de Potasio, Magnesio, Sodio en los sectores de Quillota, Aconcagua Las Vegas y Aconcagua Desembocadura, siendo estos dos últimos los que poseen niveles de concentración más elevados que el resto de los sectores.

Figura 6.30: Variación Espacial del Potasio.

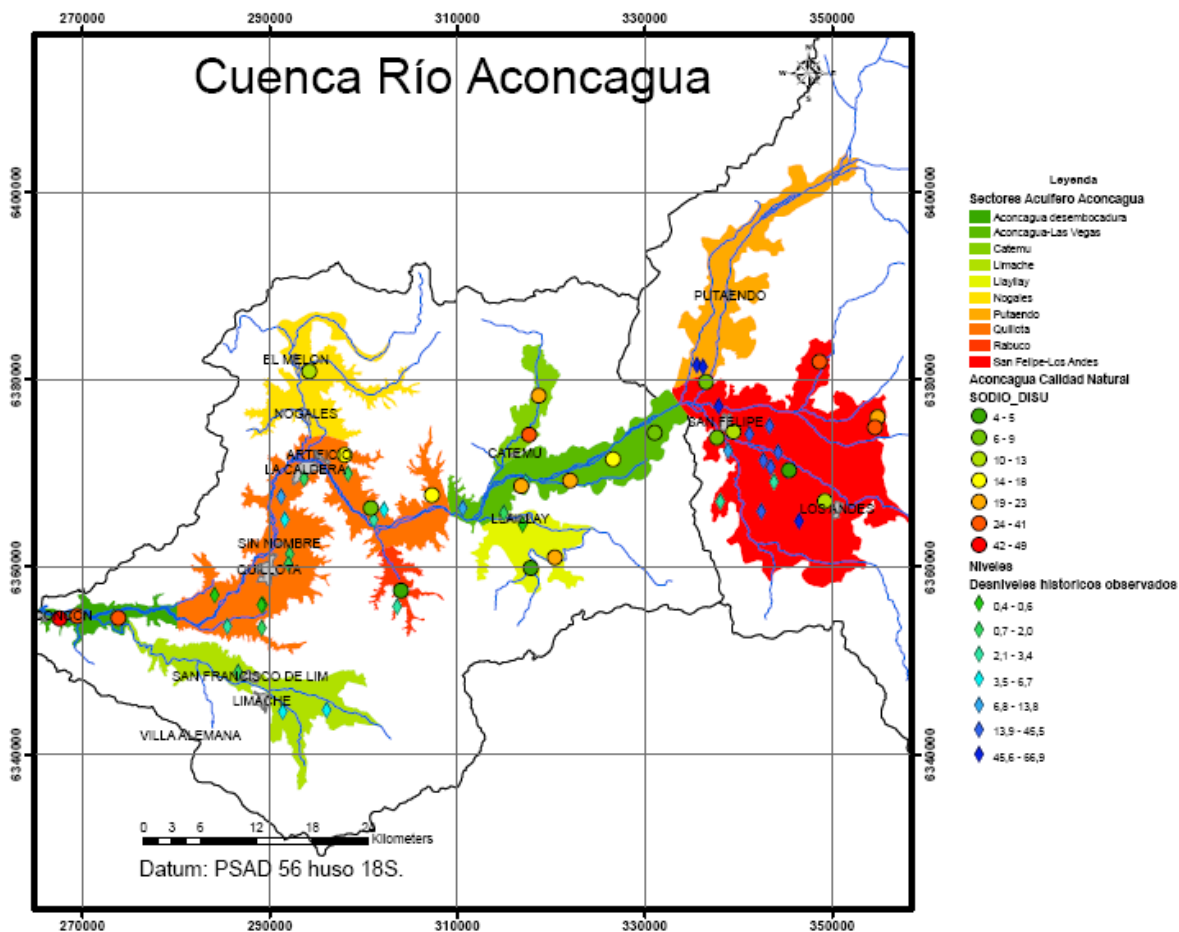


Fuente: Elaboración propia

Concentraciones en mg/L. Descensos en metros.

Si a lo anterior se le agrega el análisis de los niveles estáticos históricos registrados en el acuífero del Aconcagua, se podrá observar que, en ciertos sectores, fundamentalmente en Quillota y Los Andes-San Felipe, el aumento en la concentración de potasio estaría relacionado con que los bajos niveles estáticos registrados en la zona, niveles inferiores a los 7 metros de profundidad, lo que podría indicar que la evaporación es otro factor por el cual la concentración de estos parámetros se incrementa. Lo anterior se puede ver en la Figura 6.30.

Figura 6.31: variación Espacial Sodio.

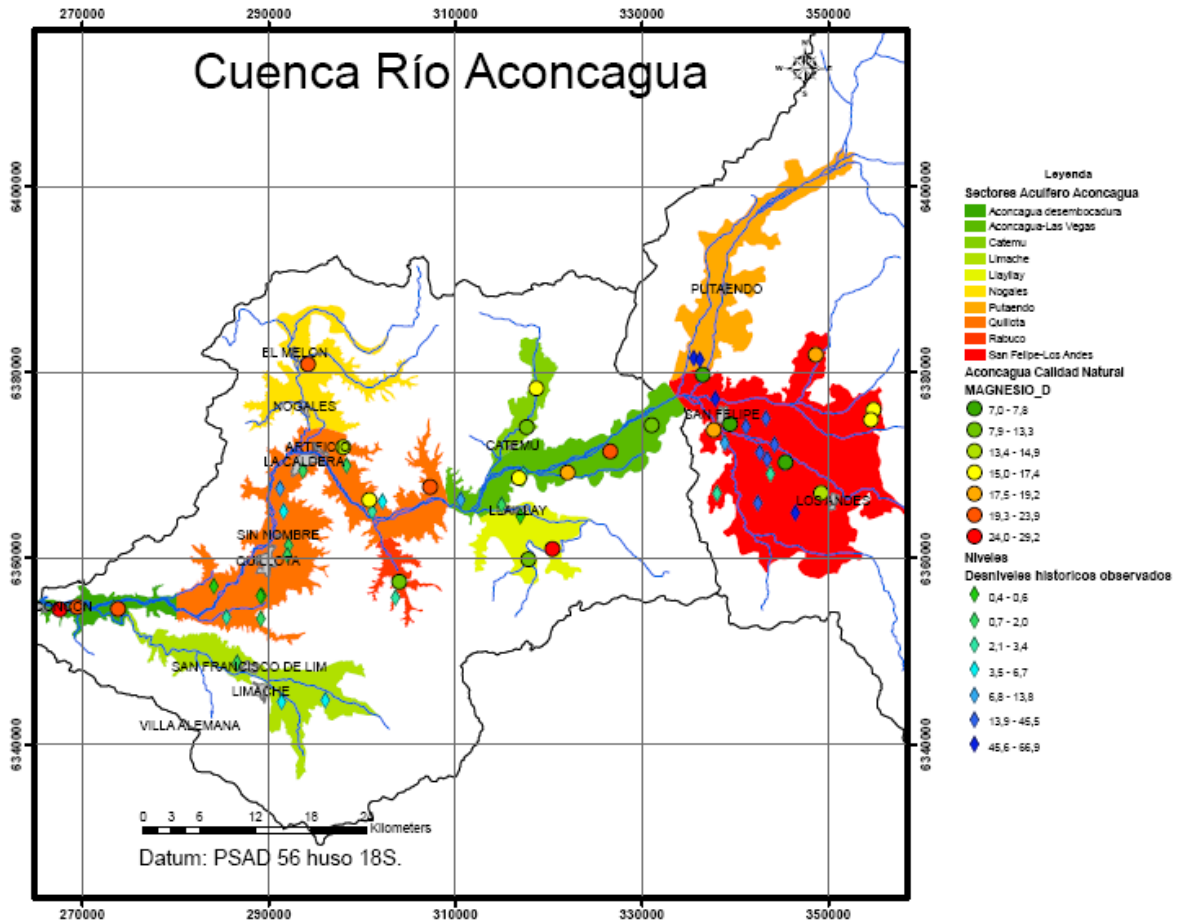


Fuente: Elaboración propia.

Concentraciones en mg/L

Sin embargo, esto no es concluyente, ya que en ciertos puntos, donde se registran aumentos en las concentraciones de potasio no se conocen los niveles piezométricos, fundamentalmente en el sector Aconcagua-Las Vegas. A lo anterior se le suma el hecho de no contar con una mayor estadística histórica en términos de análisis de calidad en los pozos utilizados, dificulta la evaluación de este fenómeno. Así mismo, a manera de complemento de lo mencionado anteriormente, en ciertas zonas, donde se registran desniveles menores a 7 metros (Figura 6.30, Figura 6.31 y Figura 6.32) no se corresponde con un aumento en las concentraciones de potasio, ni de sodio ni de magnesio por lo que no queda claro si éste efecto es concreto.

Figura 6.32: Variación Espacial Magnesio.



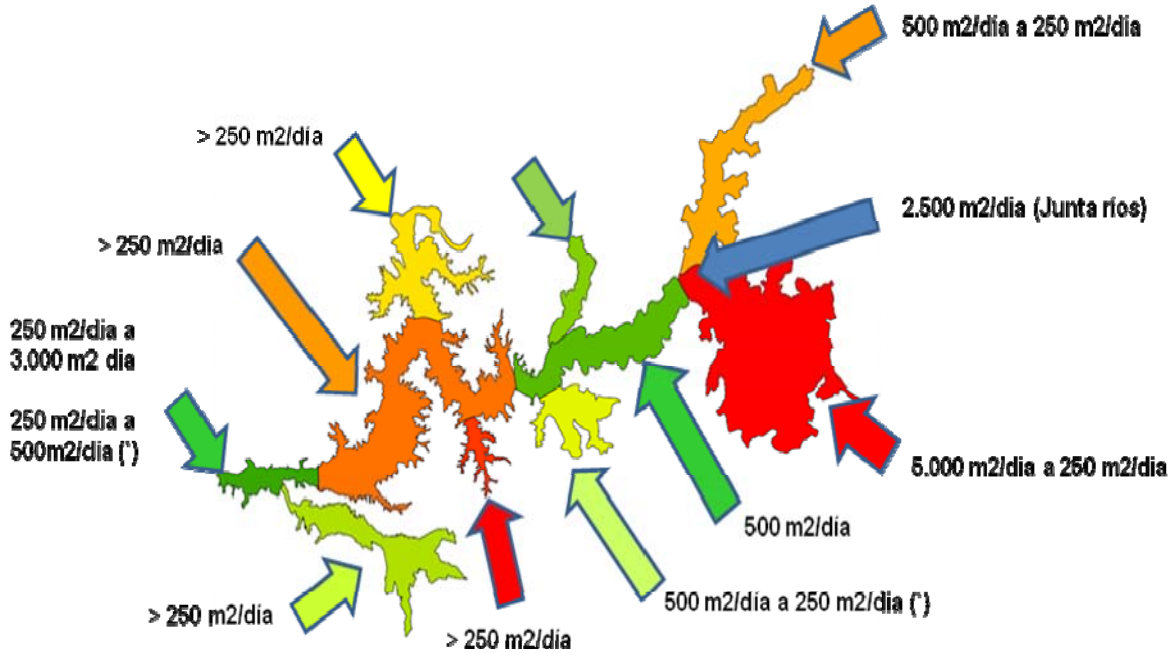
Fuente: Elaboración propia.

Concentraciones en mg/L

La mezcla de las aguas de los valles tributarios no se puede analizar en este caso, debido fundamentalmente a que no se cuenta con muestras que cumplan los parámetros de calidad natural desde la ciudad de La Calera hasta el sector Aconcagua Desembocadura, pero si se analizan la Figura 6.23, Figura 6.24 y la Figura 6.25 en la etapa de análisis de la actividad antrópica, se podrá ver que el efecto de los valles tributarios genera aumentos en ciertos parámetros como el cloruro, el sulfato y el nitrato, lo que ratifica lo descrito en la etapa predictiva.

En relación a la variación de la transmisividad, se presenta la Figura 6.33 que resume, en gran medida, lo descrito en la etapa de descripción hidrogeológica.

Figura 6.33: Transmisividades asociadas a los sectores del acuífero del río Aconcagua.



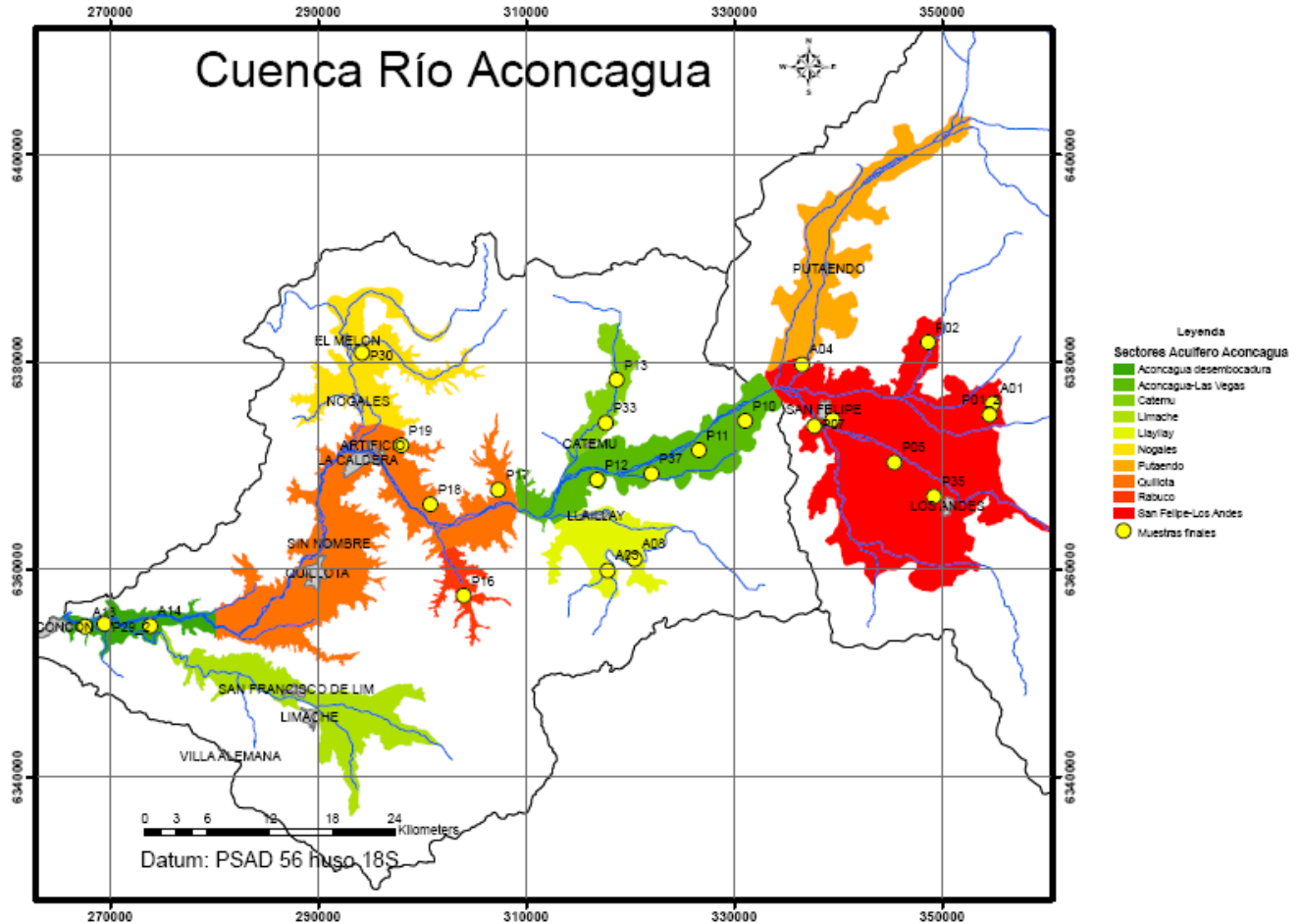
Fuente: Elaboración Propia.

(*) Transmisividades asociadas al acuífero confinado.

Como se puede observar, existe un cambio importante en las transmisividades de un sector a otro, particularmente desde el sector de San Felipe-Los Andes hacia el resto de los sectores. Esto se debe, fundamentalmente a que la matriz que compone al acuífero varía su composición de arenas a arcillas y limos con arenas finas, disminuyendo la transmisividad, así como también el espesor de la unidad B (unidad con mayor importancia hidrogeológica) disminuye a medida que se interna en el sector Aconcagua-Las Vegas, lo que podría provocar efectos de concentración en los niveles, y que junto con el cambio en las transmisividades se generen aumentos en los niveles en esta zona (Figura 6.10).

La Figura 6.34 presenta la ubicación de las muestras seleccionadas para la determinación de la calidad natural junto con su respectivo rotulo de identificación:

Figura 6.34: Ubicación pozos seleccionados monitoreados campaña 2008-2009.



Fuente: Elaboración Propia

A continuación se presentan los diagramas de Stiff para cada uno de los pozos ubicados en los sectores de San Felipe-Los Andes, Aconcagua-Las Vegas, Quillota y Aconcagua Desembocadura. Los parámetros graficados en el diagrama son Cloruro, Sulfato, Calcio, Potasio, Magnesio, Nitrato, Sodio y Bicarbonato.

Figura 6.35: Diagramas de Stiff Pozos Sector San Felipe-Los Andes A01 y A03.

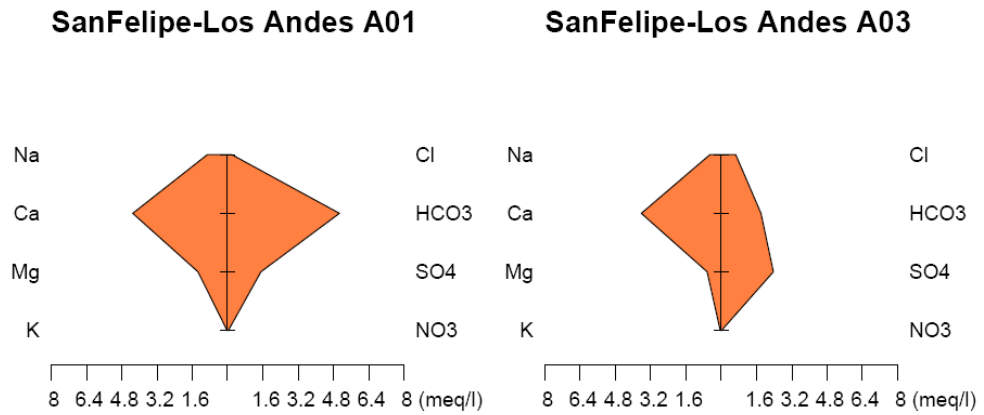


Figura 6.36: Diagramas de Stiff Pozos Sector San Felipe-Los Andes A04 y P01_2.

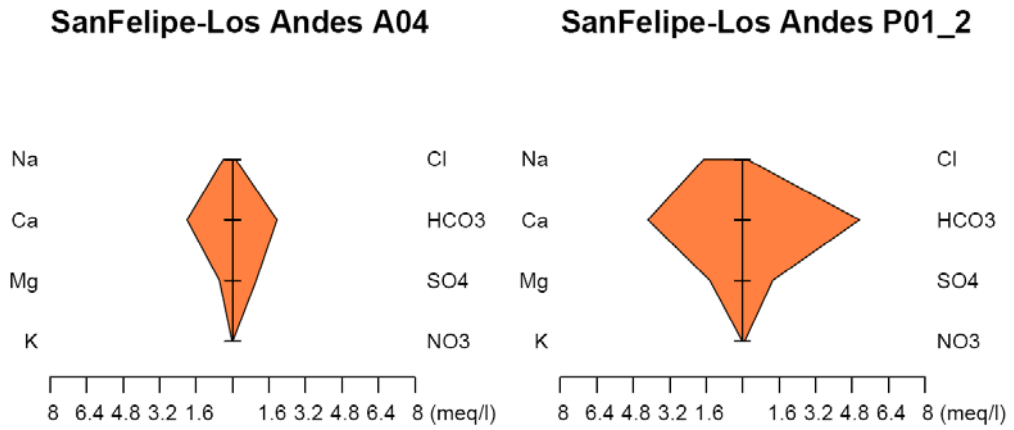


Figura 6.37: Diagramas de Stiff Pozos Sector San Felipe-Los Andes P02 y P05.

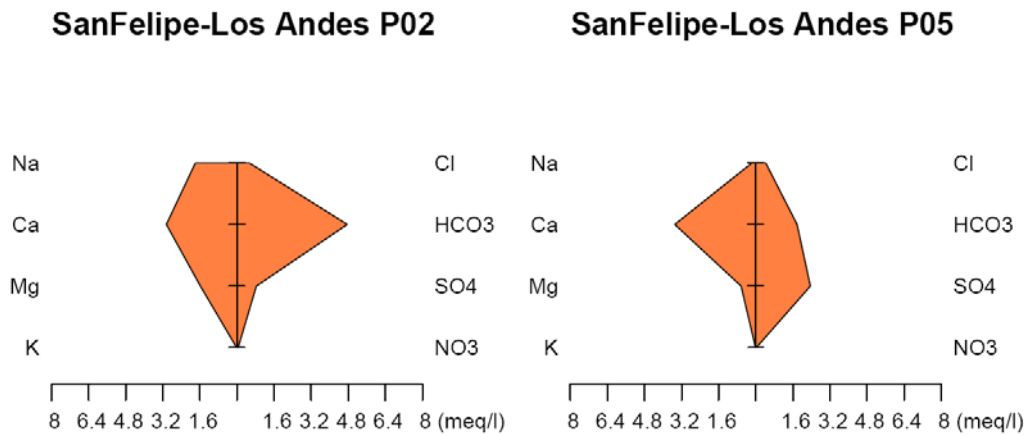


Figura 6.38: Diagramas de Stiff Pozos Sector San Felipe-Los Andes P02 y P05.

SanFelipe-Los Andes P07

SanFelipe-LosAndes P35

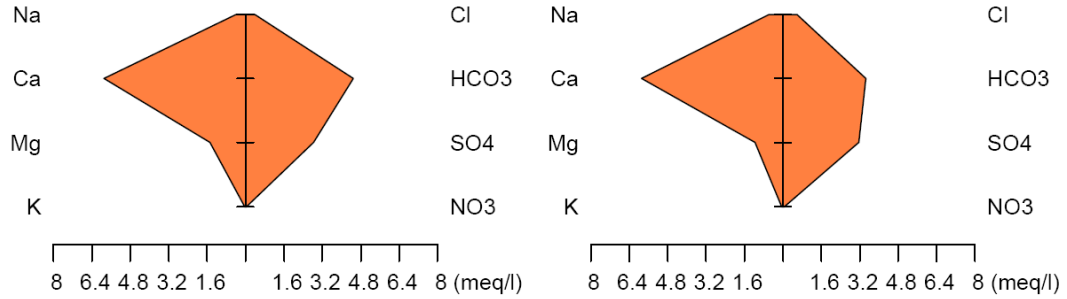


Figura 6.39: Diagramas de Stiff Pozos Sector Aconcagua Las Vegas P10 y P11.

Aconcagua-Las Vegas P10

Aconcagua-Las Vegas P11

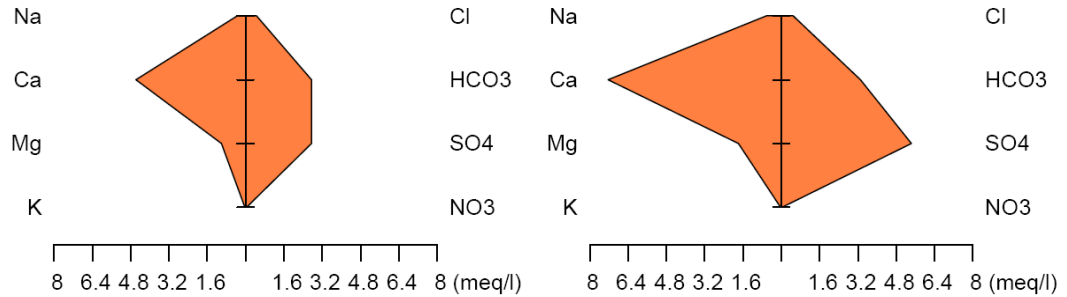


Figura 6.40: Diagramas de Stiff Pozos Sector Aconcagua Las Vegas P10 y P11.

Aconcagua-Las Vegas P12

Aconcagua-Las Vegas P37

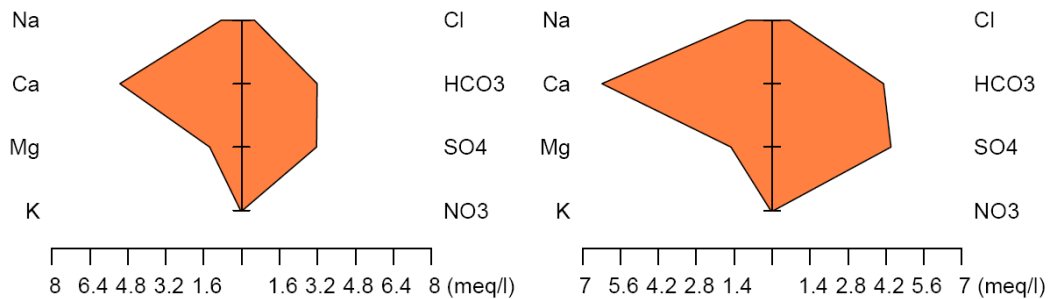


Figura 6.41: Diagramas de Stiff Pozos Sector Quillota P17 y P18.

Quillota P17

Quillota P18

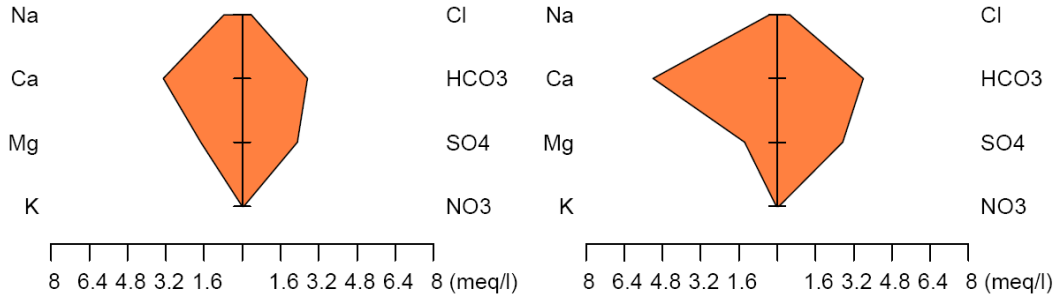


Figura 6.42: Diagramas de Stiff Sectores Quillota P19 y Aconcagua Desembocadura P29_2

Quillota P19

Aconcagua-Desembocadura P29_2

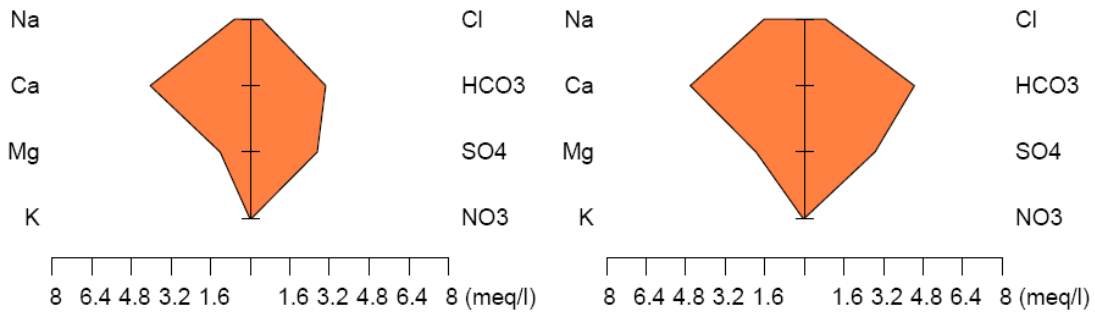
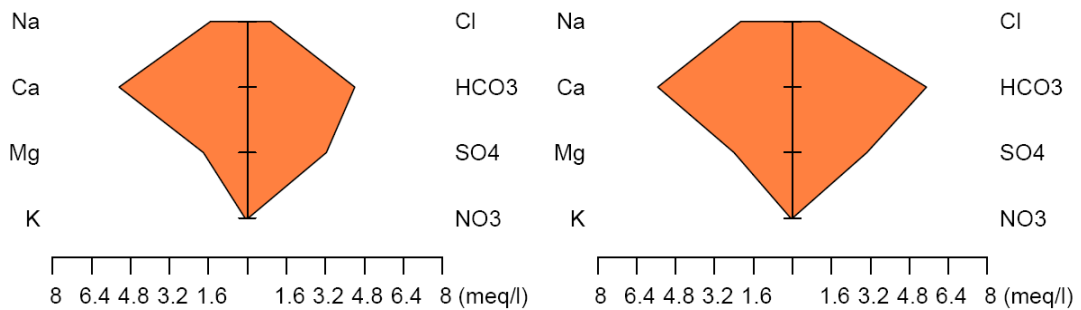


Figura 6.43: Diagramas de Stiff Pozos Sector Aconcagua Desembocadura A14 y A13.

Aconcagua-Desembocadura A14 Aconcagua-Desembocadura A13



Como se puede observar de los diagramas presentados anteriormente, existe una diferencia notable entre el contenido de prácticamente todos los parámetros, lo cual, según lo observado en la Figura 6.33, podría deberse a los descensos en las transmisividades, lo que se traduce en mayores tiempos de residencia en el medio y mayor tiempo de mezcla con la recarga de las aguas superficiales, lo que incrementaría las concentraciones de los parámetros analizados.

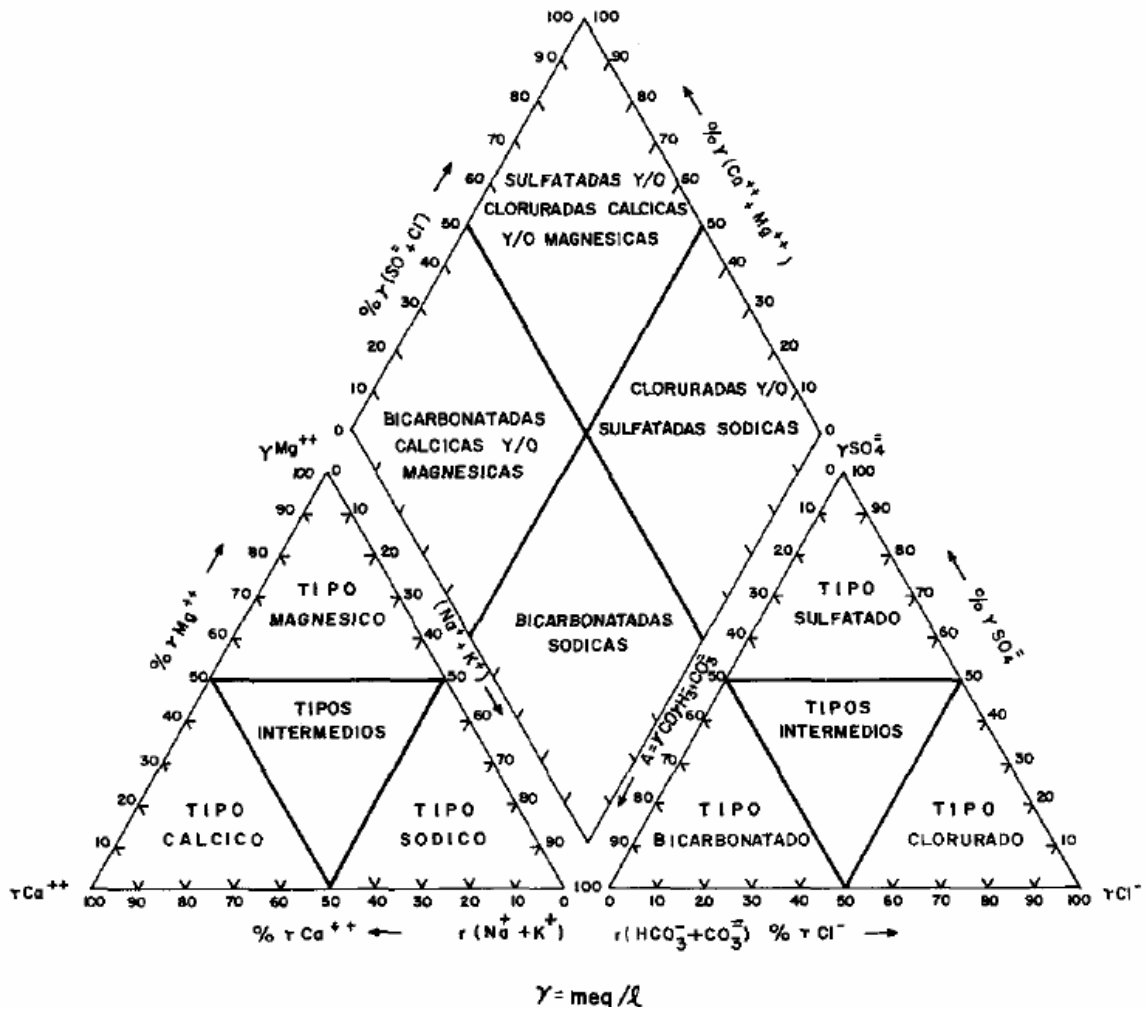
Otro punto importante a destacar es el hecho de la alta presencia de sodio y cloruro en el sector de Aconcagua Desembocadura, lo que podría estar asociado a efectos de intrusión salina, ya que según Parraguez (1985), en esta zona la cuña salina ingresa varios kilómetros por el río, decantando sales de cloruro, sodio y magnesio, la cuales, por efecto mismo de la recarga del río y las precipitaciones, aumentan la concentración de estos parámetros en ambos acuíferos, lo cual fue ratificado en el punto anterior, lo que provocaría los efectos vistos en los diagramas.

Finalmente, a manera de resumen, se puede establecer que los descensos en las transmisividades podrían estar ligados con el aumento en las concentraciones de ciertos parámetros como Sodio, Calcio, Magnesio y Cloruro, así como también de Potasio. En cambio el efecto de evaporación de las aguas subterráneas, en particular en zonas donde los niveles estáticos se encuentran cercanos a la superficie, no es clara, por lo que no es posible atribuir este factor al fenómeno de incremento en las concentraciones, ya que se debe considerar el efecto de dilución que podría tener el río en los puntos de recarga, en función de las concentraciones observadas en el río.

6.3.10.2.1 Diagrama Piper.

La utilización de estos diagramas permite identificar el tipo de agua para las distintas muestras recolectadas mediante el despliegue gráfico de los principales parámetros de cada muestra, en este caso, Ca, Na, K, HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl. La clasificación de las aguas se basa en el siguiente diagrama:

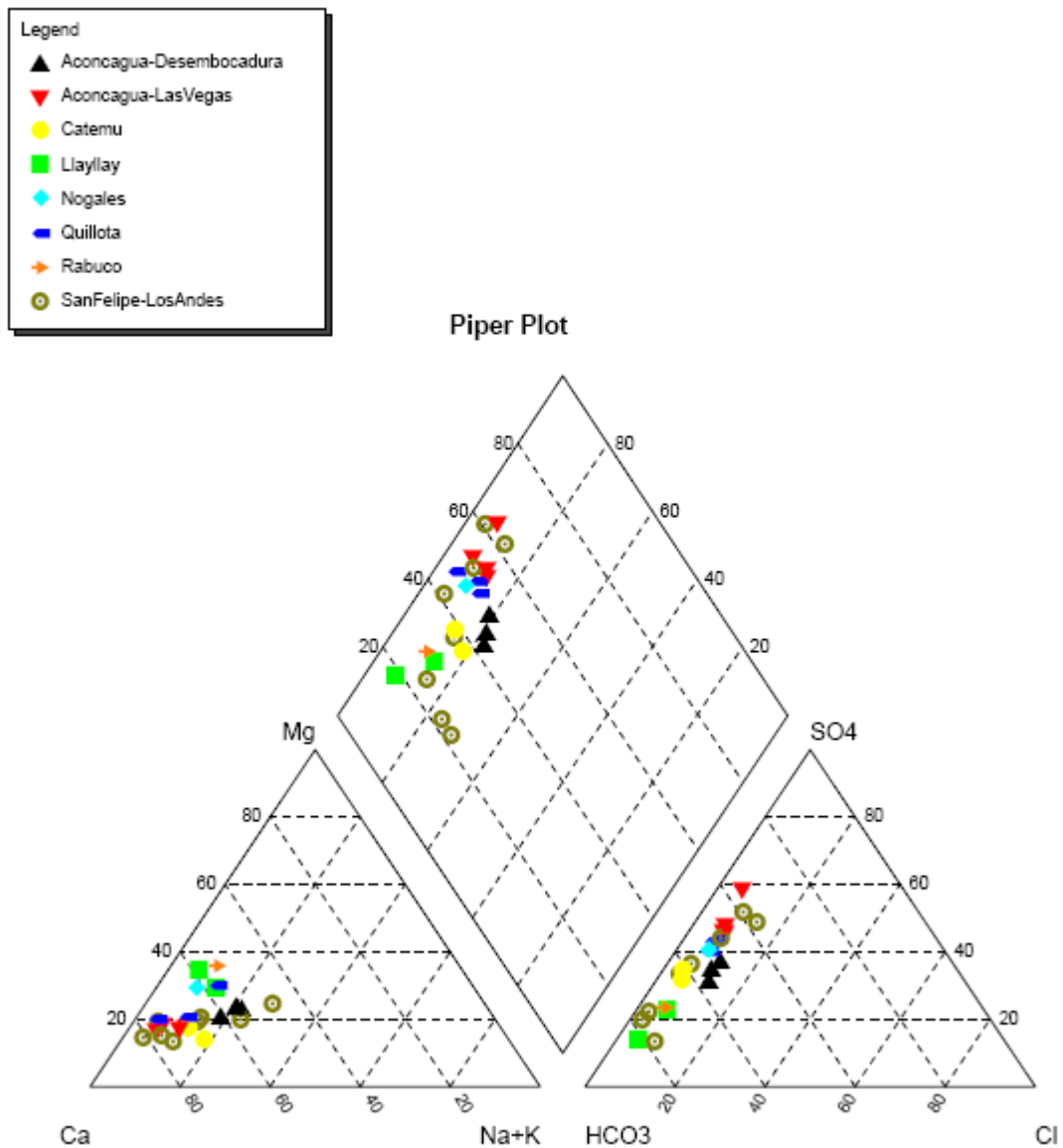
Figura 6.44: Tipos de Agua según Clasificación Diagrama Piper.



Fuente: Codina, Mayo 2009

Para la elaboración del diagrama de Piper se utilizó el Software AQUACHEM 4.0.

Figura 6.45: Diagrama de Piper Muestras Acuífero Aconcagua.



A partir del diagrama presentado anteriormente y utilizando la Figura 6.44, se puede establecer que las aguas, en su gran mayoría, son del tipo Bicarbonatadas Cálcidas o Sulfato Cálcidas. En Particular, el sector de Aconcagua Las Vegas tiene composición Sulfato-Cálcida, al igual que ciertos sectores de San Felipe Los Andes. En cambio el resto de los sectores presenta una clara tendencia a ser aguas del tipo Bicarbonatadas Cálcidas.

Lo mencionado anteriormente se condice con lo mencionado por Mazor (2004), el cual menciona que la huella litológica presente en las aguas subterráneas asociada a una geología del tipo Basáltica presenta como ión principal el Bicarbonato, seguido del Calcio y el Sodio (Tabla 3.8), lo cual puede ser ratificado de igual manera observando los valores obtenidos para cada parámetro Tabla 6.21.

6.3.11 Descripción de los procesos Involucrados en la Adquisición de la composición química de las aguas subterráneas.

En este punto se resume de manera concisa los procesos por el cual el agua subterránea del acuífero del río Aconcagua adquiere su composición química.

6.3.11.1 Oxido Reducción.

Es importante mencionar que el ambiente predominante en prácticamente todo el acuífero, excepto en sectores como Llay Llay y en el segmento final del sector Aconcagua Desembocadura, es del tipo oxidante, lo cual permite que los niveles de hierro y magnesio se mantengan bajos, Gráfico 6.65. Así mismo esta condición no permite la reducción de nitrato, por lo cual la actividad antrópica puede alterar fácilmente los niveles de este parámetro.

Dado que el ambiente predominante es oxidante, los fenómenos de precipitación por adsorción de metales pesados a arcillas no se producen, por lo que es normal encontrar valores sobre el límite de detección de Aluminio y Níquel, como también de cobre.

La presencia de ambientes reductores permite la disminución de elementos característicos de la actividad antrópica como el nitrato y el sulfuro, aunque como se analizó en puntos anteriores, la mezcla con sales genera aumentos en parámetros como sodio y cloruro.

6.3.11.2 Recarga.

Los efectos de la recarga por parte del río es un fenómeno estudiado tanto por Parraguez (1985) como por los estudios realizados por INGENDESA (1998), por lo que gran parte del aporte en los niveles de los parámetros proviene del río: lo anterior se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 6.24: Concentraciones medias, máximas y mínimas registradas en las estaciones de monitoreo de calidad superficial.

ESTACIÓN		Bicarbonato [mg/L]	Carbonato [mg/L]	Sulfato [mg/L]	Calcio [mg/L]	Magnesio [mg/L]	Potasio [mg/L]	Sodio [mg/L]
RIO JUNCAL EN JUNCAL	Promedio	85.84	0.10	262.94	125.97	9.51	1.56	9.87
	maximo	110.70	2.87	425.00	245.21	23.05	3.13	17.00
	Minimo	54.30	0.00	73.91	68.07	3.56	0.72	3.48
	D. Estandar	14.68	0.54	83.30	37.26	3.27	0.51	3.08
RIO BLANCO EN RIO BLANCO	Promedio	61.34	0.29	139.84	50.70	6.69	3.30	45.15
	maximo	227.00	11.70	345.00	115.00	21.10	12.50	320.20
	Minimo	25.45	0.00	4.30	20.40	1.20	0.80	3.68
	D. Estandar	38.60	1.73	66.87	17.93	3.07	2.33	50.26
RIO COLORADO EN COLORADO	Promedio	67.19	0.17	61.23	34.77	6.46	1.07	13.48
	maximo	108.77	4.80	156.95	79.20	16.14	4.20	25.30
	Minimo	35.78	0.00	3.32	3.00	2.20	0.10	3.50
	D. Estandar	17.40	0.84	35.41	12.04	2.35	0.56	4.60
RIO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO	Promedio	73.12	0.00	110.88	56.15	6.21	2.33	12.80
	maximo	175.10	0.00	235.17	109.10	14.30	14.00	33.48
	Minimo	36.00	0.00	25.90	27.70	1.00	0.40	1.00
	D. Estandar	19.97	0.00	44.11	17.10	2.11	1.79	5.93
RIO ACONCAGUA EN SAN FELIPE	Promedio	87.02	0.01	101.20	56.07	8.04	2.23	12.37
	maximo	215.40	0.88	205.10	118.53	21.50	7.00	27.80
	Minimo	42.72	0.00	26.90	21.04	1.00	0.39	1.00
	D. Estandar	27.79	0.08	43.00	19.67	3.66	1.14	5.04
ESTERO POCURO EN EL SIFON	Promedio	109.86	0.97	51.46	42.84	6.73	0.67	11.48
	maximo	170.00	25.50	144.60	128.40	31.85	3.90	23.00
	Minimo	58.58	0.00	9.60	17.60	3.00	0.00	3.45
	D. Estandar	22.91	3.43	31.11	16.40	3.42	0.74	3.61
RIO PUTAENDO EN RES GUARDO LOS PATOS	Promedio	74.72	0.04	53.87	32.79	5.65	0.88	9.37
	maximo	147.20	2.70	165.00	88.50	10.41	3.70	21.20
	Minimo	48.80	0.00	4.80	13.20	1.82	0.17	4.00
	D. Estandar	17.53	0.32	28.48	12.46	1.88	0.58	2.78
RIO PUTAENDO EN EL BADEN (CA)	Promedio	64.62	0.69	45.68	27.64	4.23	0.74	7.90
	maximo	87.07	8.28	110.00	45.28	8.00	1.94	11.35
	Minimo	46.82	0.00	21.58	18.50	3.00	0.20	4.80
	D. Estandar	12.31	2.39	22.20	8.28	1.38	0.43	2.04
RIO BLANCO EN CENTRAL HIDROELECTRICA	Promedio	36.57	2.36	199.01	79.42	9.00	4.41	10.01
	maximo	84.20	59.03	381.00	145.01	14.67	11.42	32.98
	Minimo	0.00	0.00	52.09	9.06	5.94	0.95	0.43
	D. Estandar	26.84	11.81	68.69	29.17	2.10	2.69	6.31
RIO ACONCAGUA EN ROMERAL	Promedio	158.75	2.41	100.59	67.66	14.76	2.17	16.21
	maximo	281.30	35.11	297.80	126.77	70.74	19.60	38.60
	Minimo	71.55	0.00	27.90	34.30	1.22	0.39	5.06
	D. Estandar	39.03	5.85	34.53	15.96	7.29	1.71	4.41
ESTERO EL LITRE ANTES RIO ACONCAGUA (CA)	Promedio	190.42	2.75	116.19	71.79	22.32	2.99	20.78
	maximo	447.90	32.41	210.00	127.50	35.61	56.70	65.70
	Minimo	72.51	0.00	37.95	29.86	8.10	0.78	1.15
	D. Estandar	43.97	6.36	31.38	14.14	5.34	6.23	6.42
RIO ACONCAGUA EN PUENTE COLMO	Promedio	170.90	2.91	114.33	72.68	16.70	2.83	21.97
	maximo	270.92	24.90	264.00	142.12	34.40	6.60	43.68
	Minimo	67.70	0.00	11.50	38.67	4.86	1.17	8.28
	D. Estandar	37.20	5.94	36.15	16.03	6.16	0.93	6.50
ESTERO QUILPUE ANTES JUNTA RIO ACONCAGUA	Promedio	76.28	0.05	88.66	49.42	7.02	3.04	11.41
	maximo	208.00	4.80	196.30	103.62	18.90	43.79	23.90
	Minimo	37.91	0.00	13.40	14.20	1.22	0.40	3.97
	D. Estandar	23.92	0.47	42.92	17.63	2.72	4.03	4.32

Las siguientes figuras permiten visualizar mejor la información entregada anteriormente. Es importante recalcar que las concentraciones presentadas en las figuras anteriores están expresadas en mg/L.

Figura 6.46: Distribución concentraciones de Sulfato en aguas subterráneas y superficiales.

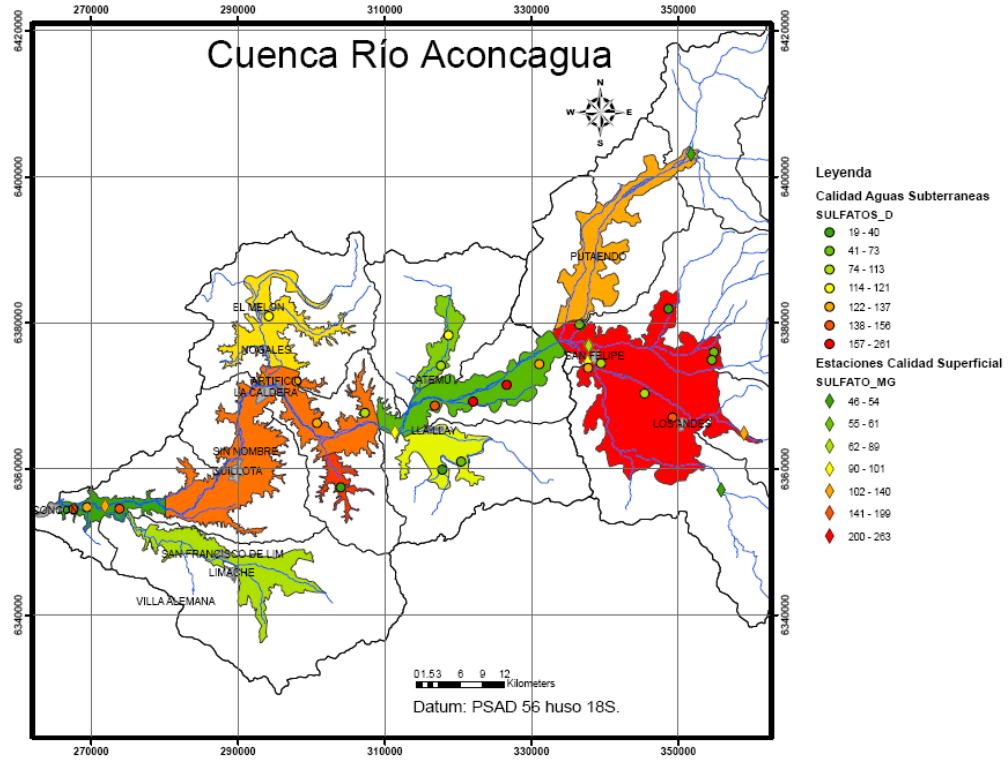


Figura 6.47: Distribución concentraciones de Bicarbonato en aguas subterráneas y superficiales.

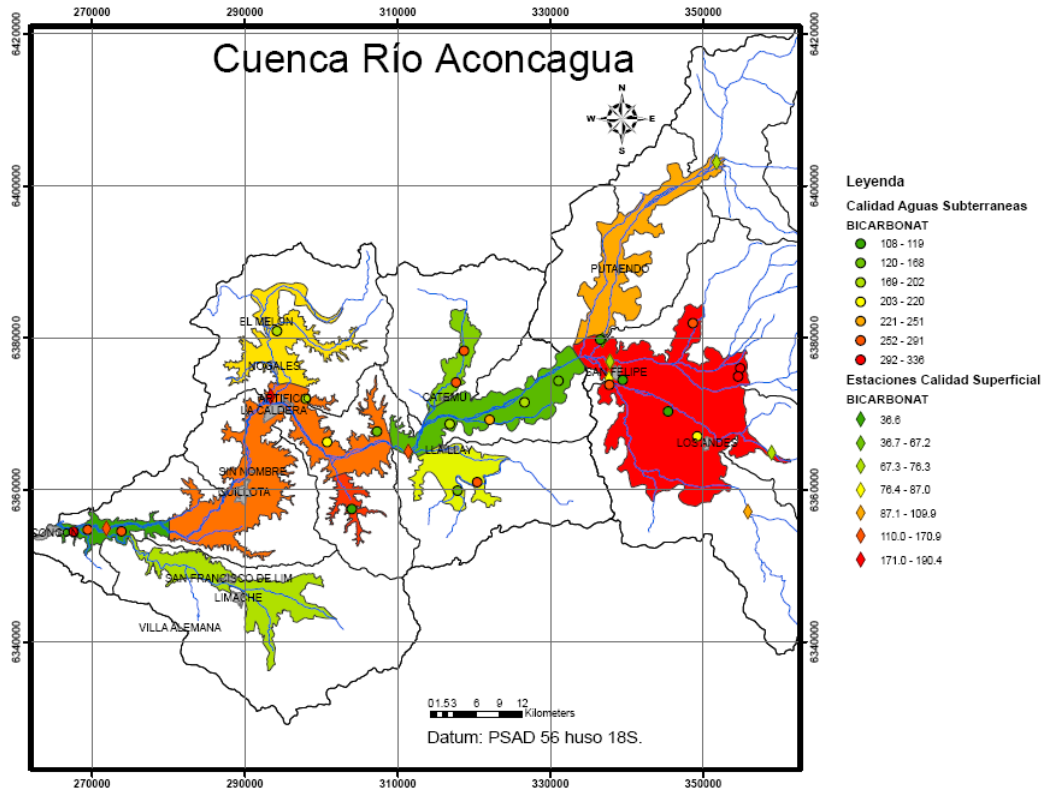


Figura 6.48: Distribución concentraciones de Calcio en aguas subterráneas y superficiales

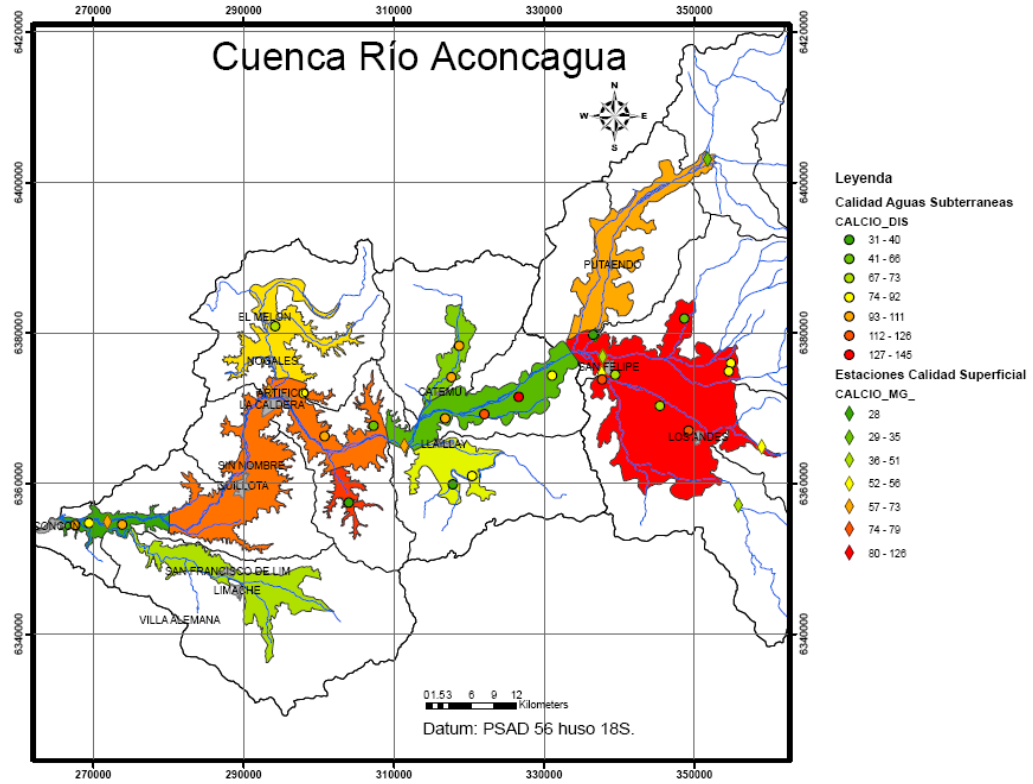


Figura 6.49: Distribución concentraciones de Sodio en aguas subterráneas y superficiales.

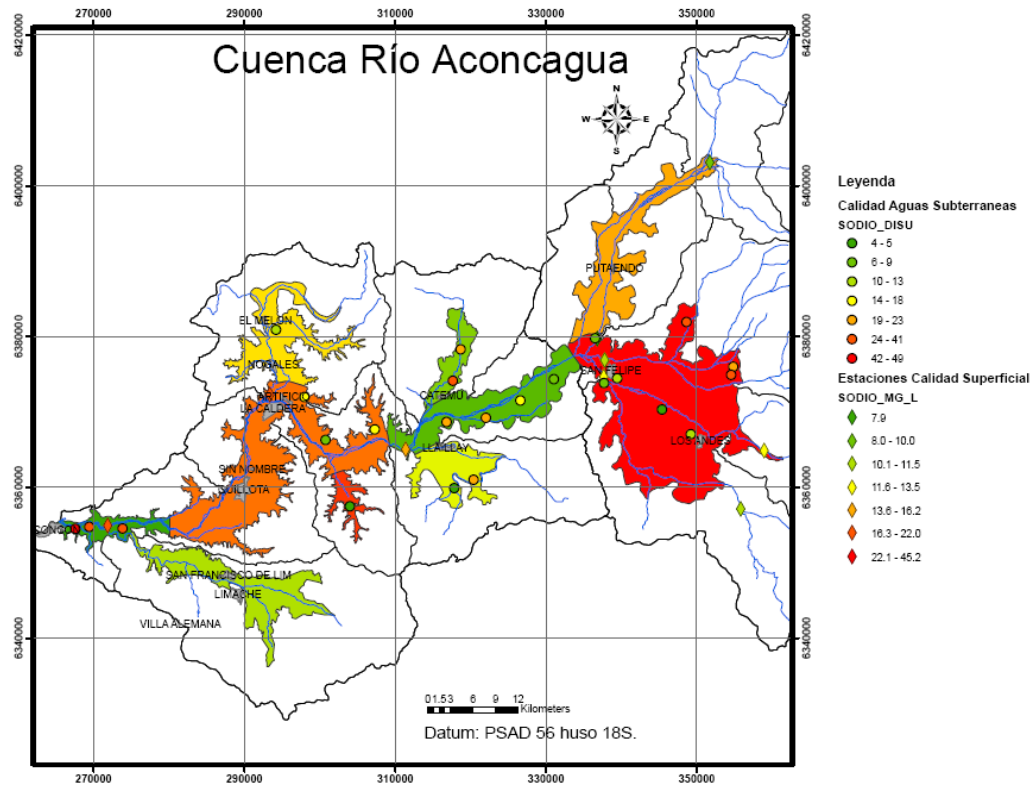


Figura 6.50: Distribución espacial concentración Magnesio en aguas subterráneas y superficiales.

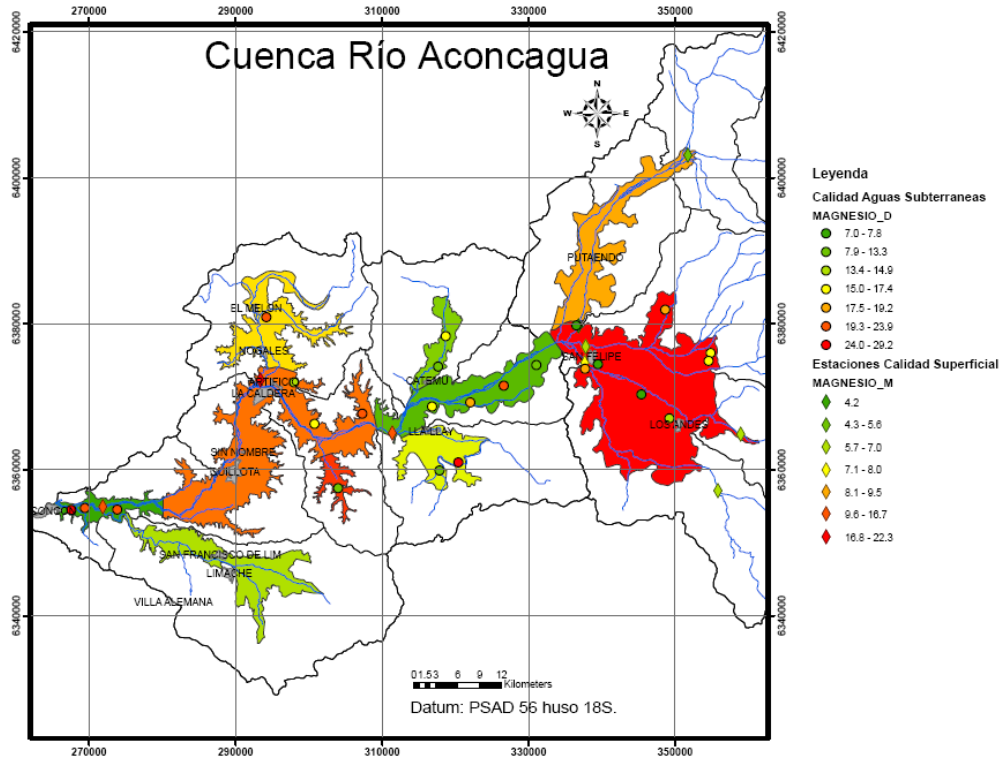
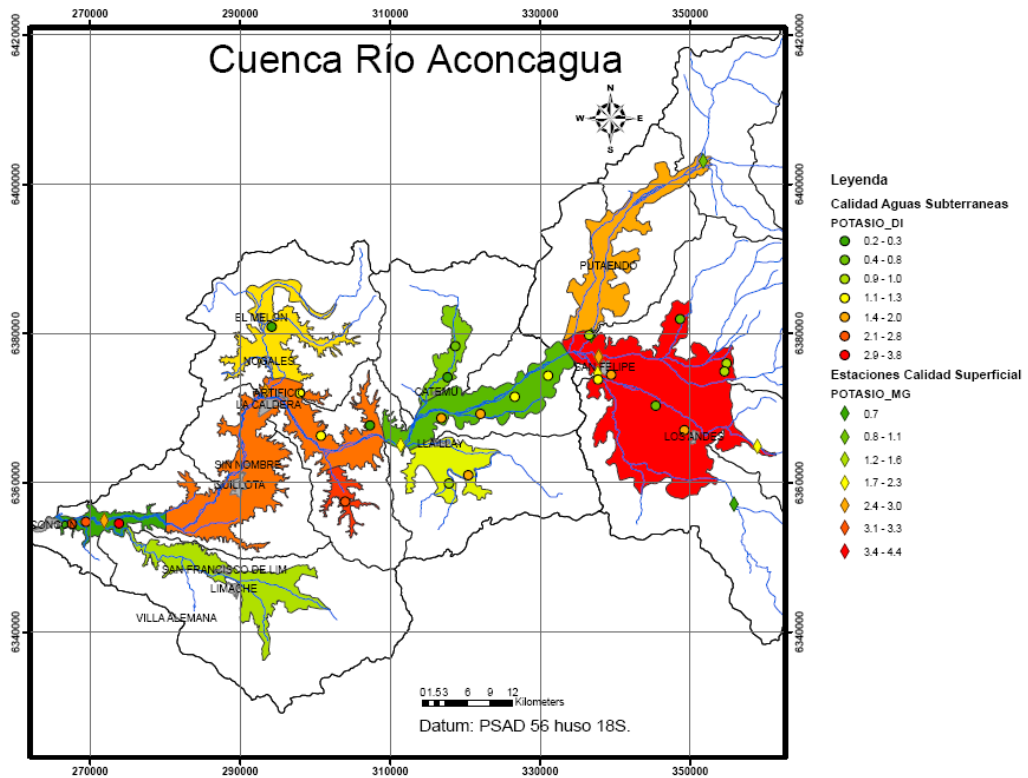


Figura 6.51: Distribución espacial concentración Potasio aguas subterráneas y superficiales.



Como se puede observar de las figuras anteriores, las concentraciones registradas en las aguas subterráneas se correlacionan con la de las aguas superficiales, lo que indica el grado de relación entre la recarga a partir del río hacia el acuífero, aportando de esta forma parte del contenido de calcio, sodio, sulfato, magnesio, potasio y bicarbonato.

Sin embargo, debido a la falta de información isotópica, no es posible cuantificar el aporte real de la recarga sobre el contenido de los elementos mencionados anteriormente en las aguas subterráneas, así como también la falta de mayor estadística no permite verificar si las concentraciones registradas son un efecto puntual o son un efecto temporal, por lo que es necesario verificar este fenómeno por medio de estudios posteriores, así como también realizar estudios isotópicos que permitan cuantificar la real magnitud del efecto.

Debido a que no se realizaron determinaciones del índice de solubilidad, no se puede determinar el proceso predominante en la zona, asimismo el desconocimiento de los tiempos de residencia ni la edad de las aguas permite cuantificar el efecto de la solubilidad de las rocas que forman parte del relleno cuaternario del acuífero.

6.3.12 Complementos a la determinación de la calidad natural: Comparación de las muestras analizadas en sectores con registros históricos: Limache y Nogales.

El objetivo de este punto es verificar si el comportamiento de las muestras se presenta dentro de los rangos históricos observados en los sectores mencionados. Para esto se graficarán los máximos y mínimos históricos registrados en los pozos pertenecientes de la D.G.A. y los máximos y mínimos registrados en los pozos monitoreados durante noviembre y febrero del 2008 y 2009 respectivamente.

Las siguientes tablas resumen los niveles máximos y mínimos registrados en los pozos pertenecientes a la red de monitoreo de la D.G.A. como también los valores medidos en los pozos de los sectores Nogales y Limache.

Tabla 6.25: Valores Máximos Y Mínimos registrados en los pozos pertenecientes a la red de monitoreo de la D.G.A.

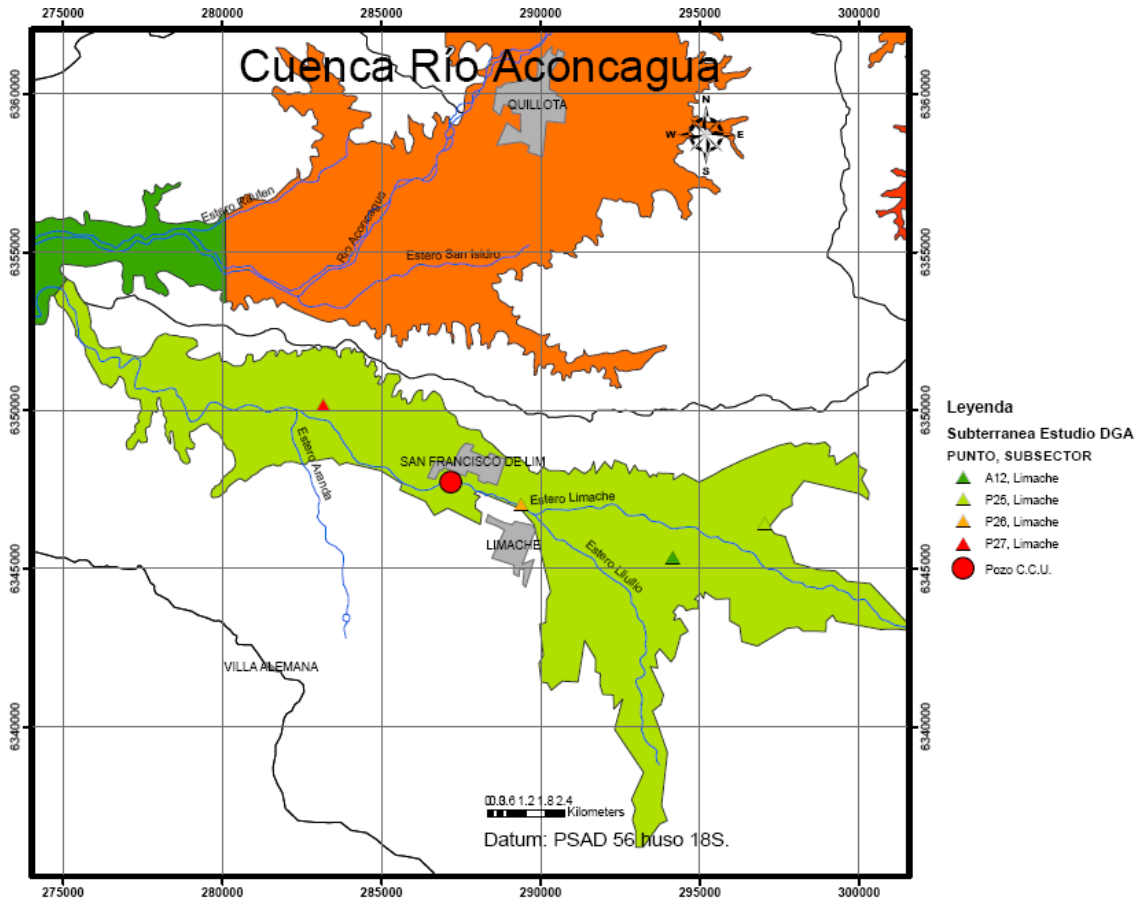
POZO	UNIDAD	POZO CCU EN LIMACHE	POZO CCU EN LIMACHE	DREN LOS CALEOS	DREN LOS CALEOS
Distancia Desembocadura	[Km]	17,5	17,5	13,7	13,7
		Maximo	Minimo	Maximo	Minimo
Temp.	[°]	19,3	15,1	24,8	10,7
pH	-	8,5	6,2	8,7	6,4
C. E.	[µmhos/cm]	934	677	1159	55
Ox. Dis.	[mg/L]	5,16	2,03	17,3	3,8
CO3-2	[mg/L]	19,34	0,00	13,1	0,0
HCO3-	[mg/L]	261,30	118,17	194,4	83,0
Cl-	[mg/L]	44,70	34,43	71,5	15,3
SO4-2	[mg/L]	195,00	119,67	445,0	105,0
Ca+2	[mg/L]	91,40	45,05	160,4	48,7
Mg+2	[mg/L]	33,51	20,82	39,2	10,4
K+	[mg/L]	2,40	1,08	1,9	0,6
Na+	[mg/L]	57,28	34,73	43,9	11,5
N(NO3-)	[mg/L]	9,29	0,02	4,3	0,3

Tabla 6.26: Valores monitoreados en parámetros característicos en Limache y Nogales.

SECTOR	UNIDAD	LIMACHE				NOGALES			
POZO		A12	P25	P26	P27	A15	P23	P24	P30
Distancia Desembocadura	[Km]	25,0	27,4	19,9	13,0	31,2	38,3	31,3	35,1
C. E.	[µmhos/cm]	503	907	809	1031	767	850	780	577
HCO3-	[mg/L]	164,01	290,26	212,81	294,20	256,27	159,73	260,81	193,86
Cl-	[mg/L]	16,01	54,66	35,35	39,06	27,44	37,76	26,27	14,73
SO4-2	[mg/L]	72,98	157,51	172,93	234,36	118,30	235,96	168,52	118,31
Ca+2	[mg/L]	50,65	72,30	80,90	70,70	81,79	103,00	114,00	72,90
Mg+2	[mg/L]	22,63	37,50	35,10	32,60	34,65	36,80	21,50	20,80
K+	[mg/L]	2,80	3,94	1,15	9,24	1,33	0,38	0,42	0,24
Na+	[mg/L]	14,21	54,80	35,50	98,10	19,97	8,90	17,20	11,70
N(NO3-)	[mg/L]	7,12	7,39	10,05	8,20	4,73	7,68	5,42	4,06

La ubicación de los pozos en cada uno de los sectores se puede observar en las siguientes figuras:

Figura 6.52: Ubicación pozos monitoreados Sector Limache.



Fuente: Elaboración propia.

- **Limache**

Gráfico 6.66: Conductividad Eléctrica y Bicarbonato registrado en pozos Sector Limache.

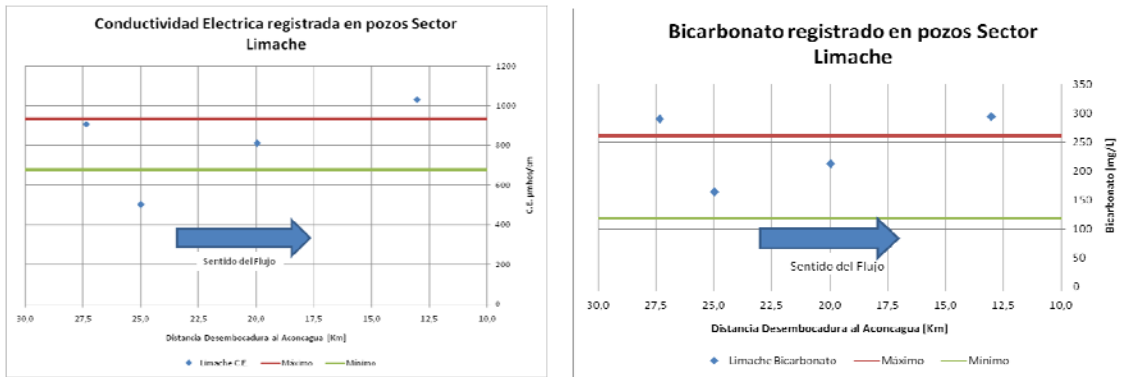


Gráfico 6.67: Cloruro y Sulfato registrado en pozos Sector Limache.

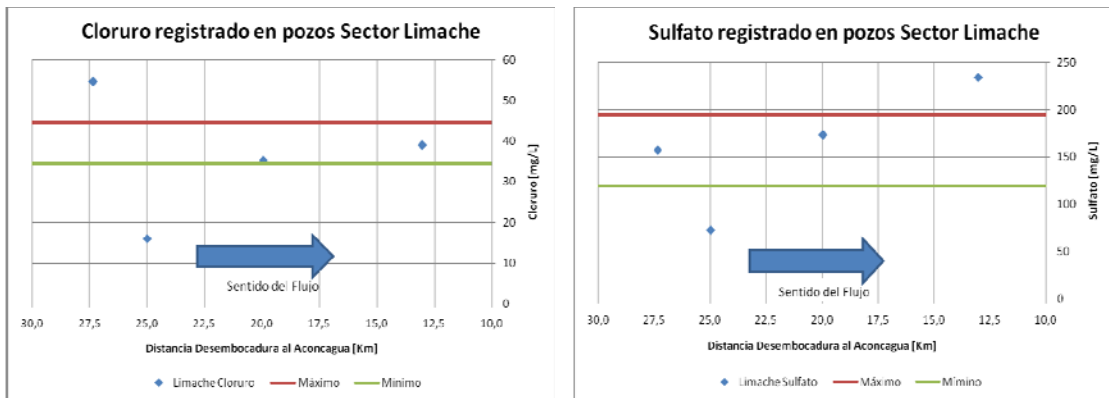


Gráfico 6.68: Calcio y Magnesio registrado en pozos Sector Limache.

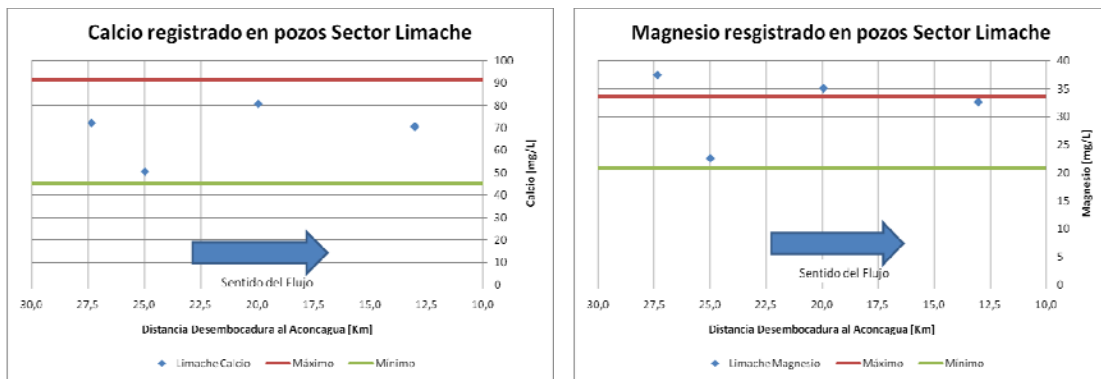


Gráfico 6.69: Potasio y Sodio registrado en pozos Sector Limache.

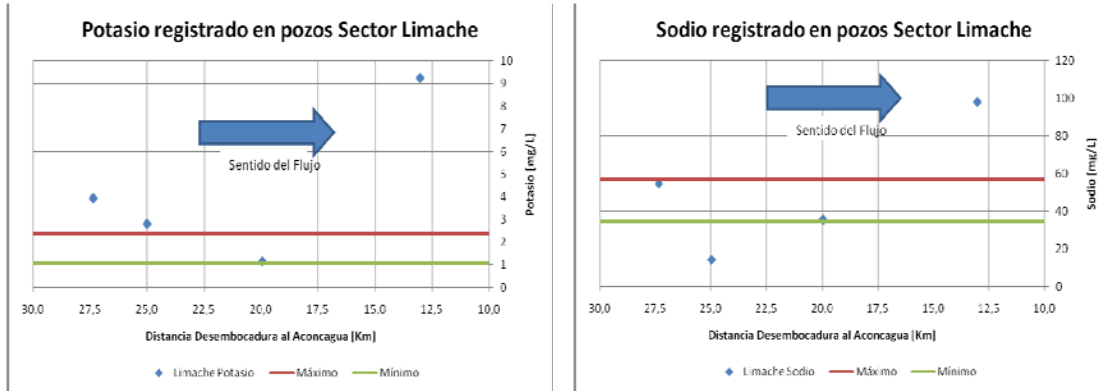
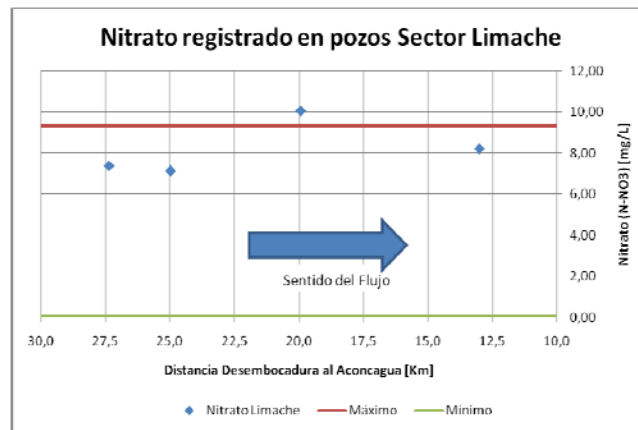


Gráfico 6.70: Nitrato registrado en pozos Sector Limache.



- **Nogales**

Gráfico 6.71: Conductividad Eléctrica y Bicarbonato registrado en pozos Sector Nogales.

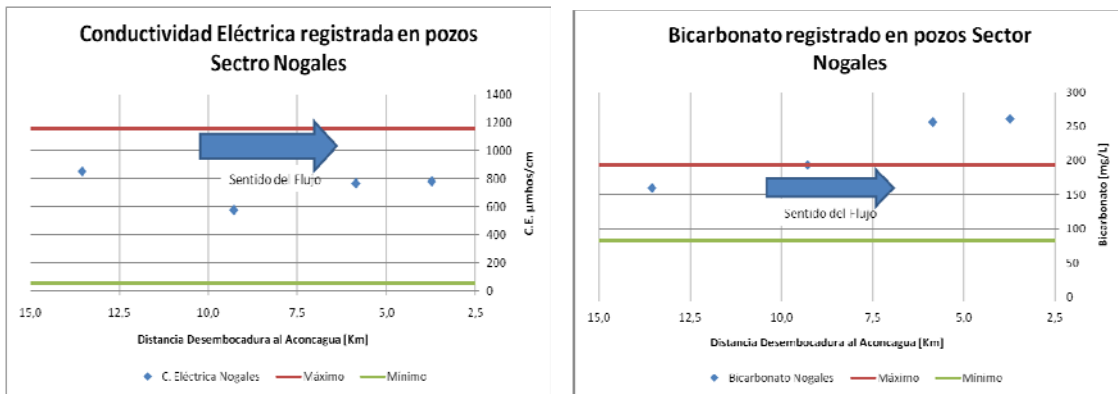


Gráfico 6.72: Cloruro y Sulfato registrado en pozos Sector Nogales.

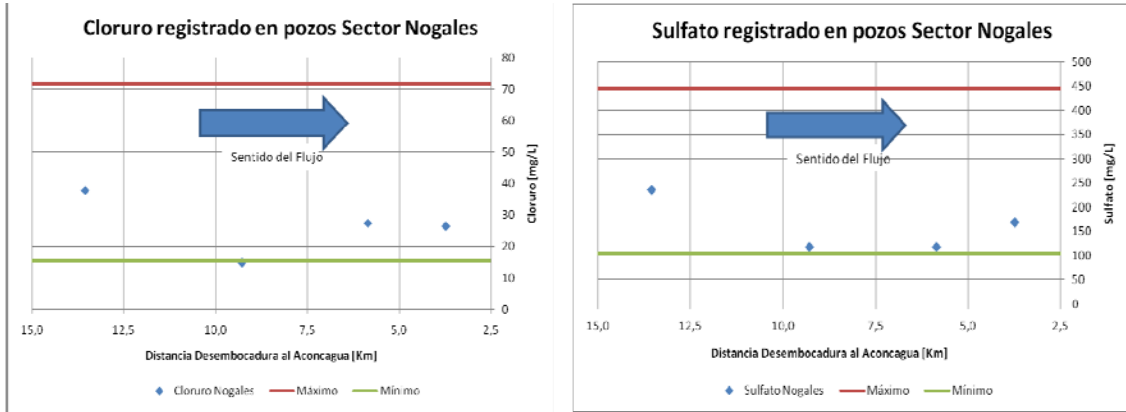


Gráfico 6.73: Calcio y Magnesio registrado en pozos Sector Nogales.

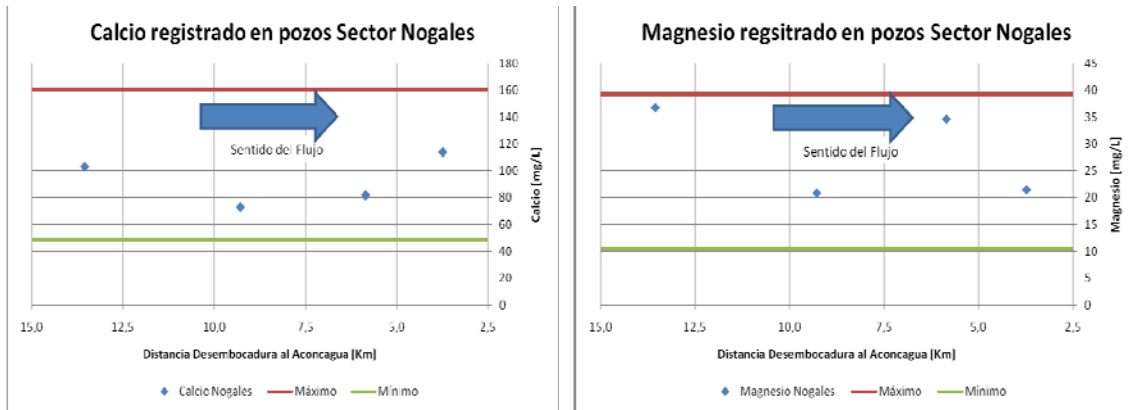


Gráfico 6.74: Potasio y Sodio registrado en pozos Sector Nogales.

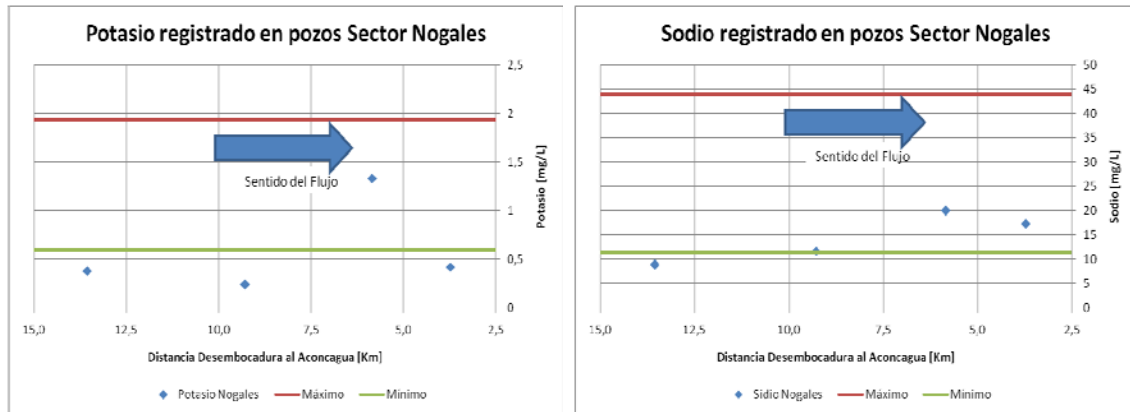
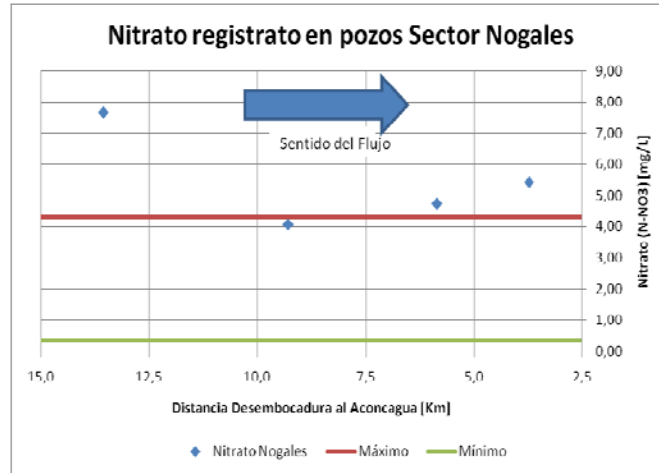


Gráfico 6.75: Nitrato registrado en pozos Sector Nogales.



Como se puede observar, el comportamiento de ambos sectores es bastante similar, destacando el fenómeno del incremento del contenido de bicarbonatos en el sector Nogales, lo cual se debe a la geología presente en el sector, por lo que el incremento podría estar asociado a la degradación de rocas cálcicas presentes. Esto último depende a su vez del índice de solubilidad, ya que la incorporación se realizará única y exclusivamente si el sistema no se encuentra en equilibrio ni saturado, por lo que conocer este índice se vuelve relevante para conocer más en detalle el o los procesos que se pueden estar llevando a cabo.

Otro fenómeno que ocurre, el cual se da en el sector Nogales, tiene relación con que la mayoría de los parámetros se encuentran dentro de los límites definidos por el máximo y el mínimo histórico por lo que el pozo presente a unos 14 kilómetros agua arriba de la desembocadura del estero El Melón (junta río Aconcagua) refleja de manera bastante fiel lo que ocurre en este sector.

Es importante destacar que en el pozo ubicado a 5 kilómetros de la desembocadura, los valores de los parámetros tienden a aumentar su concentración, lo cual se debe a que el pozo monitoreado no se encuentra cercano al estero sino que hacia el interior de un valle menor del sector, Pozo A15 (Figura 6.53), aguas arriba de la ciudad Nogales, por lo que las concentraciones elevadas podrían tener relación con el bajo grado de mezcla de las aguas presentes en ese sitio.

Caso contrario ocurre en el sector Limache, en la mayoría de los casos las concentraciones disminuyen a medida que se movilizan por el sector, pero al pasar la ciudad de Limache, las concentraciones vuelven a aumentar para ir decreciendo a medida que se acercan a la desembocadura con el Aconcagua.

Lo anterior podría asociarse a la baja en las transmisividades presentes en el sector, debido a que el relleno que compone el acuífero es de una matriz arcillosa con arenas finas, lo que disminuiría la velocidad de flujo, aumentando el tiempo de contacto con el medio, incrementando el valor de ciertos parámetros.

Ahora, si se observa las concentraciones de nitrato y cloruro, se puede ver claramente que, en el caso particular del cloruro, el valor inicial, aguas arriba de la ciudad de Limache, es bastante elevado, pero disminuye antes de la ciudad, para volver a incrementar su valor posterior a ésta, lo que indicaría un efecto importante de la actividad antropica en este sector. En el caso del Nitrato, éste incrementa su valor en zonas cercanas a la ciudad y disminuye, aunque no en gran cantidad, aguas abajo de esta, lo que corrobora lo mencionado anteriormente en relación a la actividad antrópica.

6.3.13 Síntesis de la determinación de la calidad natural acuífero Aconcagua.

De acuerdo a los análisis realizados anteriormente se puede decir lo siguiente:

- La geología presente en la cuenca del río Aconcagua, fundamentalmente compuesta por formaciones de roca basáltica y andesítica, así como también de granitos y rocas carbonatadas, aporta, por medio de procesos de meteorización, el relleno cuaternario que conforma al acuífero.
- El tipo de roca mencionado anteriormente, que conforma el relleno cuaternario, aporta con niveles mayoritarios de Calcio, Sodio y Bicarbonato, este último debido a la alteración de la roca en procesos de meteorización y disolución de estas.
- Elementos como el sulfato presentes en las aguas subterráneas provendrían de la disolución de minerales de sulfato de cobre, lo que indicaría también la presencia de cobre en las aguas subterráneas. Este efecto se debe fundamentalmente al drenaje ácido que se produce en los emplazamientos mineros, como ANDINA en la parte alta de la cuenca. En relación al origen agrícola del sulfato, este estaría ligado a la utilización de fertilizantes como el sulfato de cobre en zonas con alta actividad agrícola (Gráfico 6.64)
- Los procesos de solubilidad y precipitación no han sido cuantificados debido a que no se han determinado los índices de solubilidad, lo que no permite determinar de manera adecuada el proceso dominante ni atribuir la presencia de los contenidos de ciertos parámetros a minerales específicos, debido a que la información geológica disponible no es detallada.
- Los efectos de recarga por parte del río y las precipitaciones no se pueden cuantificar debido a la falta de información tanto estadístico por parte de los análisis de calidad de las aguas subterráneas, como también la ausencia de niveles de información más específicos como estudios isotópicos, por lo que los efectos solo pueden analizarse de manera general y no en mayor profundidad.

- Los niveles observados de los parámetros, mencionados anteriormente, se condicen con la bibliografía consultada en relación a las características que la litología imprime sobre las aguas subterráneas.
- La utilización de la red actual de monitoreo no permite la estimación de la calidad natural en el acuífero, pero si permite una comparación de los muestreos realizados con el monitoreo histórico realizado en estos sectores.

En resumen, la red de monitoreo de calidad de la D.G.A. con la que se cuenta en esta zona no es suficiente para determinar la calidad natural del acuífero, aunque los muestreos de la calidad actual permiten tener una idea aproximada de cuál sería la calidad natural, al menos, para el periodo estacional correspondiente a Verano, cumpliendo con lo estipulado tanto en la metodología como en el D.S. N° 46, por lo que la metodología es aplicable a nivel de cuenca, para lo cual se debe contar con geología local al menos a una escala igual o inferior a 1:100.000.

Así mismo, la utilización de estudios adicionales, como tesis, trabajos de investigación y modelos hidrogeológicos, permitieron analizar diferentes fenómenos como también verificar efectos observados en estudios de años anteriores al llevado a cabo recientemente.

A lo anterior se agrega el hecho de que la estadística histórica proporcionada por los pozos de la red de monitoreo de calidad no es representativa, en términos espaciales, del acuífero completo, sino que solo de algunos sectores, así como la corta ventana de muestreo con la que se cuenta para el acuífero completo, por lo que éstos estudios permiten, en cierta forma y con la adecuada interpretación de los resultados obtenidos años anteriores, complementar los datos de calidad analizados en esta oportunidad, lo que ratifica el hecho de que contar con estudios hidrogeológicos del sector se vuelva fundamental, no solo en el caso de contar con una estadística reducida en términos de análisis de calidad sino que también ante la existencia de una base de datos histórica con una estadística importante.

El sulfato generado por procesos de drenaje ácido en la parte alta de la cuenca, aumentan los niveles de éste parámetro en los cursos superficiales, y dadas las características hidrogeológicas del relleno del acuífero, que permiten la recarga del río hacia el acuífero, se genera un aumento en las concentraciones de sulfato en aguas subterráneas aguas abajo de las faenas mineras de ANDINA.

A manera de complemento a lo dicho anteriormente, a pesar de la utilización de estudios anexos como apoyo a la falta de análisis químicos históricos, la no medición de ciertos parámetros como, oxígeno disuelto, sílice, potencial redox, entre otros, no permite identificar claramente ciertos procesos, ni menos identificar el posible origen de la composición química del agua, por lo que la utilización de softwares como el PHREECQ no hubiese aportado mayor claridad a los procesos predominantes en el acuífero, ya que para la utilización de este tipo de programas de análisis, es necesario contar con una adecuada base de datos, lo que no ocurrió en este caso. Esto aumenta, de forma importante, la incertidumbre sobre los análisis realizados, pero la utilización de informes desarrollados años anteriores permite reducir la incertidumbre generada por el hecho de no contar con los parámetros mínimos solicitados por la metodología.

En resumen, la metodología es aplicable a nivel de cuenca, lo que permitiría su utilización a estas escalas y a niveles de sub cuenca o sub sub cuenca, siempre y cuando la información disponible lo permita, y que junto con la integración de la información puntual a la información disponible a escalas superiores, permitiría establecer los rangos de calidad natural del punto de interés.

7 CONSIDERACIONES FINALES.

7.1 Discusión.

7.1.1 Con Respecto a la Metodología.

Con respecto a la metodología se concluye que los factores condicionantes al momento de analizar la factibilidad de la misma son:

- Niveles de información:

A mayor nivel de información mayor es el nivel de detalle que se puede lograr en los resultados, tal y como lo muestra la Figura 5.1, lo que implica que la aplicación de la metodología queda sujeta al nivel de información con que se cuenta y, por ende, haga de su aplicación un tanto compleja para algunas zonas del país. Esto se basa, fundamentalmente, en el hecho de que el nivel de información existentes en el país no es homogéneo, es decir, para algunas zonas es más detallada que para otras.

El mejor ejemplo de lo anterior, como se pudo observar en el caso de aplicación a nivel nacional (punto 6.2), tiene relación a la disponibilidad de cartas geológicas e hidrogeológicas a nivel nacional, ya que a esta escala no existe la adecuada información para la determinación de la calidad natural, e incluso en algunos casos a escalas menores.

Lo anterior se debe a que el Servicio Nacional de Geología y Minería no posee cartas detalladas para todo Chile, 1:100.000 o inferior; por lo que de no existir esta información en la zona, la alternativa es generar esta información a escalas de al menos 1:100.000, lo que claramente entorpece los tiempos de desarrollo de la metodología.

Asimismo, al no existir una clasificación adecuada de los acuíferos del país, al menos en términos de sus estructuras litológicas, el proceso de clasificación de los orígenes de la química del agua en un determinado acuífero se vuelve muy complejo. Este hecho se debe a que, debido a que los acuíferos identificados se encuentran fundamentalmente en rellenos Cuaternarios, los cuales se componen de sedimentos de diversos orígenes y edades geológicas, de ahí la necesidad de conocer la geología local para cada cuenca, lo que permitiría conocer las rocas y minerales que posiblemente se encuentren en el relleno cuaternario. Situación similar ocurre con la información hidrogeológica disponible a estas escalas.

Si la información geológica e hidrogeológica disponible, al menos la suministrada por entidades estatales, en algunos casos no es suficiente, la información disponible a partir de la red de monitoreo corre la misma suerte, ya que la distribución espacial de los pozos no se corresponde con ningún criterio establecido de antemano. Lo anterior que implica que exista una cantidad reducida de pozos en ciertas regiones y un número adecuado en otras, pero que espacialmente no responden a ningún criterio definido.

Lo anterior representa claramente una dificultad no menor al momento de la aplicación de la metodología, en la cual se establece que se debe contar con análisis históricos de calidad, al menos en el mismo acuífero o sector, de manera de poder contrastar los resultados de las observaciones actuales con las históricas y así utilizar estas últimas para la determinación de la calidad natural, siempre y cuando las características geológicas e hidrogeológicas sean similares.

Lo anterior fue aplicado en el caso del acuífero del río Aconcagua, en particular en los sectores de Nogales y Limache, donde la presencia de dos pozos de la red de monitoreo de calidad (uno en cada sector) permitió analizar el comportamiento histórico de las muestras en comparación con un muestreo actual para una misma geología.

Los resultados obtenidos mostraron que en uno de los Sectores, Nogales, el pozo perteneciente a la red de monitoreo de calidad es representativo del comportamiento general del sector, por lo que la determinación de la calidad natural se podría realizar a partir de la información suministrada por este pozo. En cambio para el sector Limache, la situación es muy distinta, ya que los efectos de la actividad antrópica generan fluctuaciones importantes de los niveles de los parámetros a lo largo del sector, lo que implica que las observaciones históricas solo explican

parte de lo que ocurre en el sector y no en su totalidad, por lo que su utilización como pozo de referencia no sería factible.

- Aplicabilidad de la metodología.

Como se dijo anteriormente la aplicabilidad de la metodología queda sujeta a los niveles de información disponibles para los análisis, pero si esto último no fuese un problema, se deben tener ciertos cuidados al momento de utilizar la metodología.

Estos cuidados tienen relación con los supuestos con los cuales se han realizado ciertas afirmaciones en las metodologías. El hecho de que en una de las metodologías se asuma un tipo de distribución específica para los datos de origen natural, se basa en las condiciones geoquímicas del agua en el medio, por lo que si éstas no se cumplen, por ejemplo en el caso en que se tenga un sistema acuífero en ciclo superficial, la metodología no podría ser aplicada ya que en este caso, parte de las concentraciones son aportadas por la recarga de cursos superficiales, lo que no está considerado dentro del método descrito por Wendland, Hannappel, Kunkel, Schenk, Voigt, & Wolter (2003).

Asimismo, la metodología necesita de un enfoque tanto específico como general, es decir, que apunte a resultados locales pero a partir de la integración de la información generada tanto puntualmente (en el mismo sitio de la infiltración), como a nivel de cuenca o una escala menor a esta.

Lo anterior es necesario ya que de otra forma, los niveles de información requeridos a un nivel tan específico no permitirían la aplicabilidad de la metodología, tal y como lo establecen los métodos descritos, donde se hace especial mención al hecho de que estos métodos no han sido diseñados para escalas tan reducidas, por lo que la integración de los datos a nivel puntual con los datos a un nivel de escala mayor debe ser considerado una obligación dentro de la aplicación del método. Lo dicho anteriormente se basa tanto en los ejemplos desarrollados en este trabajo, como en los descritos en los ejemplos presentados en *Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français* (Chèry, 2006).

Otro punto importante a destacar, y que ha quedado en evidencia en el desarrollo del ejemplo de aplicación para el caso del acuífero del Aconcagua, es que el apoyo para realizar los análisis correspondientes puede ser hallado en estudios realizados en la cuenca en cuestión, aumentando así las probabilidades de describir de manera adecuada los procesos involucrados sin contar con una estadística importante en el sector.

7.1.2 Con Respecto a los Ejemplos de Aplicación.

7.1.2.1 Caso Nivel Nacional.

Como se mencionó anteriormente, la falta de información detallada a escalas regionales o a nivel de cuenca, como también la baja distribución espacial de los pozos de la red de monitoreo no permiten un análisis profundo, ni con menor razón la determinación de los rangos de calidad natural para las zonas descritas para éste caso.

Sin embargo, se aplicaron los criterios descritos en la metodología, los que tienen relación fundamentalmente con los límites en el contenido de nitrato. En función de esto se pudo observar que, por ejemplo, en la Región de Atacama se encontró que los contenidos de sales en pozos al interior de la región eran más elevados que en otras zonas del país, lo cual se ratificó utilizando índices de intrusión salina Tabla 6.7. Este efecto se debe a flujos subterráneos que tienen contacto con rocas sedimentarias tipo Halita, así como también el efecto de la evaporación incrementa el contenido de sales en el sector, lo que implicaría la obtención de los índices presentados en la Tabla 6.7.

Una situación similar ocurre al identificar aquellos pozos que poseen contenidos de nitratos mayor a 10 mg/L, en donde, nuevamente la región de Atacama aporta con un hecho singular, ya que uno de sus pozos presenta contenidos de nitratos sobre éste valor, niveles que podrían estar asociados a un origen geológico, pero debido a que no se cuenta con la información adecuada, no es posible determinar este origen. Otra región con niveles elevados de nitrato corresponde a la Región Metropolitana, donde se detectaron concentraciones elevadas en pozos como Cementerio Metropolitano, claro indicador de una fuente de contaminación orgánica.

Un punto que salió a la luz en el desarrollo de este ejemplo es la existencia de muestras incompletas en varias regiones del país y que, sin embargo son parte de la estadística oficial entregada por la D.G.A., lo que es claramente un problema al momento de aplicar los criterios de preselección estipulados por la metodología. Asimismo, a pesar que el muestreo se realiza aproximadamente 4 veces por año, la existencia de un único laboratorio que realice los análisis es un hecho bastante crítico, ya que la ampliación de la red de monitoreo del país debe ir de la mano con una ampliación en los laboratorios que analicen estas muestras, de manera de no incrementar la carga de trabajo actual del laboratorio ni bajar el nivel de calidad en los análisis realizados por este.

En relación a los resultados obtenidos se puede destacar el hecho de que para la mayoría de los parámetros analizados la mayor parte de las muestras analizadas se encuentran por debajo de los valores límites establecidos por la normativa chilena. Existen casos donde el comportamiento del elemento analizado, en sectores como el Norte Grande, es muy disímil a lo que ocurre en el resto de las zonas, lo que en cierta forma revela el alto impacto antrópico que se ha generado en la zona, como también las diferencias existentes en relación a la geología entre cada zona.

Sin embargo, los resultados obtenidos deben ser interpretados con sumo cuidado, ya que la distribución de los pozos en esta zona no es homogénea, ya que en la región de Antofagasta se cuenta con un único pozo, lo que es claramente poco significativo en relación a los 10 pozos que posee la región de Atacama, por lo que los resultados obtenidos son claramente más representativos de esta región. Incluso, si se observa la distribución de los pozos en la región Atacama (Figura 2.1), los resultados obtenidos son representativos de una zona específica dentro de la región de Atacama, la cual corresponde a la Pampa del Tamarugal.

En general, se puede decir que la aplicación de la metodología, al menos para escala nacional, no es factible fundamentalmente por el hecho de que la información disponible, tanto geológica como hidrogeológica, no es detallada y en algunos casos no existe, así como también la pobre distribución de la red de monitoreo de calidad no permite, actualmente, un mayor análisis a nivel global.

Dado lo anterior, los resultados obtenidos en éste ejemplo de aplicación deben ser interpretados con sumo cuidado, ya que las distribuciones presentadas en el punto 6.2.6 no representan, bajo

ningún motivo, el comportamiento de los parámetros en esas zonas, sino que constituyen una forma de presentar la variabilidad de los parámetros medidos en diferentes zonas del país. Lo anterior se fundamenta en el hecho de que las distribuciones anteriores se basan en una red con baja distribución espacial de sus pozos, y que en algunos casos, como se pudo analizar en el punto anterior, no representan a una región sino que únicamente a un sector determinado, por lo que no es posible su extrapolación a un nivel tan general.

7.1.2.2 Caso Acuífero Río Aconcagua.

La aplicación de la metodología a esta escala demostró ser factible, aunque la no disponibilidad de muestras distribuidas uniformemente en el dominio del acuífero anteriores a los años 2008 y 2009 demostró ser un impedimento importante a la hora de determinar los procesos involucrados en la composición de las aguas subterráneas de éste acuífero.

Otro punto negativo, que se vincula con lo mencionado anteriormente, tiene que ver con el hecho de que los parámetros monitoreados por la campaña desarrollada en noviembre del 2008 y febrero del 2009 (Tabla 6.9) no corresponden a los parámetros mínimos requeridos por la metodología (Tabla 5.1), lo que dificultó no solo el reconocimiento de los procesos, sino que no fue posible constatar de manera fehaciente la presencia de ambientes reducidos, ni menos determinar los índices establecidos por la metodología, los cuales permiten identificar, en cierta forma, el posible origen de la composición de las aguas subterráneas.

En este caso, la red de monitoreo pudo ser utilizada para poder comprobar el comportamiento de dos sectores específicos del acuífero, Nogales y Limache. Esta comprobación se realizó mediante al comparación de los máximos y mínimos registrados en las observaciones históricas de los pozos de la red de monitoreo ubicados en estos sectores y el valor de las observaciones realizadas en el 2008 y 2009. Los resultados obtenidos demostraron que era posible la utilización del pozo de la red de monitoreo ubicado en Nogales para describir lo que ocurre en ese sector en particular, es decir, que la determinación de la calidad natural de éste sector puede ser determinada a partir de este pozo y las muestras observadas actuales. Esta situación no ocurre de igual manera en el sector Limache, fundamentalmente por el nivel de impacto que la actividad antrópica en la calidad del agua subterránea.

En relación a los resultados obtenidos, se puede decir que la calidad natural, determinada mediante la utilización de los métodos establecidos por Chéry (2006) y Wendland, y otros (2006), concuerda con la geología presente en la cuenca, aunque la presencia de sulfato en las aguas subterráneas se debe a fenómenos de drenaje ácido, principalmente de la parte alta de la cuenca (CODELCO, 2008), disminuyendo la concentración de éste a medida que las aguas se mezclan con otros cursos superficiales ubicados aguas abajo (Tabla 6.10). Sin embargo, el comportamiento de la concentración de sulfato presenta en ciertas zonas como Quillota y Aconcagua Las Vegas, aumentos en su concentración. En el primer caso, que corresponde al aumento de sulfato en el sector de Quillota, éste fenómeno se debe a posible utilización de fertilizantes con contenidos de azufre o sulfatos; en cambio el aumento en el sector de Aconcagua Las Vegas se debe a una disminución en la transmisividad.

Se pudo establecer de igual manera que la recarga del río, dadas las características hidrogeológicas del relleno que conforma al acuífero, constituye una de las principales fuentes de las concentraciones registradas en el acuífero. Lo anterior se basa en los resultados obtenidos al analizar el sulfato (presente en gran medida en cursos superficiales por efecto del drenaje ácido), y del nitrato y el cloruro, elementos vinculados a la actividad antrópica presente en la cuenca. Sin embargo, debido a que no se contaba con información adicional a los análisis de calidad, como estudios isotópicos, no fue posible cuantificar el aporte real del río en las concentraciones observadas en las aguas subterráneas.

Un detalle final a lo descrito en estas líneas, tiene relación con la falta de estaciones de monitoreo superficial en ciertos sectores de la cuenca (Figura 6.21). Si se observa esta figura, se podrá ver que la presencia de estaciones es bastante abundante en la parte alta de la cuenca, pero las estaciones, actualmente en vigencia, no son suficientes en ciertos sectores, y tomando en cuenta que existe una interacción importante entre el río y el acuífero, es de vital importancia conocer el comportamiento del río, en términos de su calidad, porque esto permitirá conocer, en cierta forma, lo que ocurre con el acuífero.

7.2 Conclusiones Generales.

En función de lo mencionado anteriormente se puede establecer que las principales conclusiones del trabajo son:

a) En relación a la Metodología:

- Tanto el nivel de detalle como el alcance que se desee obtener de la metodología dependerá única y exclusivamente de los niveles de información que se generen o se recopilen para determinar la calidad natural.
- La integración de la información tanto a nivel puntual, como es el caso del sitio de infiltración, como a nivel de cuenca u otra escala menor a esta, es fundamental para poder conocer los mecanismos por los cuales el agua subterránea adquiere su composición natural.
- La utilización de métodos de preselección permite la aplicación de la metodología a niveles geográficos de interés para el D.S. 46, es decir, tanto a nivel local o puntual (caso del sitio de infiltración) como a nivel de Cuenca.
- El establecimiento de los límites para el método de preselección se basa fundamentalmente en las características individuales de cada sitio de estudio, es decir, tanto en el nivel de actividad antrópica como en la geología presente, por lo que el cruce de ambas informaciones es vital para determinar los límites de concentración para los parámetros asociados a la actividad antrópica
- Los parámetros mínimos requeridos para determinar la calidad natural de las aguas subterráneas son los siguientes.

Tabla 7.1: Parámetros mínimos requeridos para la determinación de la calidad natural.

PARÁMETROS				
pH	Temperatura	SiO ₂	K ⁺	Fe
Eh (pot. Redox)	NO ₂ ⁻	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻	Mn
O. Disuelto	NO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HS ⁻
TDS	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Cu	Al
C. Eléctrica	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	As	

Fuente: Elaboración propia basado en Chèry (2006).

- El análisis de los parámetros mínimos establecidos por la metodología permite identificar tanto procesos como ambientes predominantes en el acuífero, como también entregar una idea sobre el posible origen de la composición de las aguas subterráneas.
- Conocer los límites del dominio que se desea analizar es fundamental para poder definir el nivel de detalle en la información existente o que se requiera generar, ya que de esto dependerá el alcance de la metodología.
- La necesidad de contar con una estadística de análisis químicos importante, tanto espacial como temporal, es absolutamente relevante para el desarrollo de la metodología, fundamentalmente por los métodos que se utilizan para remover los efectos antrópicos de los análisis químicos.
- Si la geología lo permite, es posible utilizar información histórica para corroborar los análisis actuales, de manera de analizar el comportamiento de las muestras en relación a los máximos y mínimos históricos registrados, de manera de utilizar el pozo con mayor estadística para realizar un análisis estadístico más detallado.
- Contar con informes, estudios o trabajos relacionados con la calidad de aguas, tanto superficial, como subterránea, se vuelve relevante a la hora de realizar la determinación de la calidad natural, más aun cuando la estadística con la que se cuenta no sea suficiente.

b) En cuanto a los casos de aplicación:

- La aplicación de la metodología a nivel nacional no es factible debido a que la información geológica e hidrogeológica a esta escala no es detallada o en algunos casos inexistente.
- La red de monitoreo de calidad, al menos para el caso de la aplicación a nivel nacional, no aporta información global de una región o zona en particular, sino que de sectores restringidos de cada región. Lo anterior se debe a la pobre distribución de los pozos a lo largo del país.
- Los resultados obtenidos a nivel nacional no son representativos del comportamiento del parámetro en las zonas descritas en el ejemplo de aplicación, sino que son una forma práctica de mostrar la variación del parámetro en diferentes zonas del país. Lo anterior se fundamenta en la pobre distribución espacial de los pozos de la red.
- Los resultados en el acuífero del Aconcagua son coherentes con la geología local, pudiéndose determinar que el cloruro, nitrato y sulfato son de origen antrópico, atribuibles a las actividades desarrolladas en la cuenca, como minería, industrial y agricultura.
- El análisis de los parámetros mínimos establecidos por la metodología permite identificar tanto procesos como ambientes predominantes en el acuífero del Aconcagua, como también entregar una idea sobre el posible origen de la composición de las aguas subterráneas.
- Sin embargo el hecho de no contar con ciertos parámetros no permite realizar un mayor detalle en los procesos involucrados, ni tampoco permite la utilización de otras herramientas de análisis.
- La casi nula presencia de estaciones de monitoreo de calidad superficial en ciertos tramos del río Aconcagua, no permite verificar si los niveles en las concentraciones de los parámetros analizados en las aguas subterráneas son similares a las observadas a nivel

superficial. Lo anterior cobra vital relevancia para validar fenómenos como los aumentos de la concentración por disminuciones en la transmisividad, ya que el conocimiento de las concentraciones observadas en la superficie permitirían establecer si el cambio en las concentraciones observadas en aguas subterráneas se debe a cambios en las concentraciones superficiales o, efectivamente, a cambios en la transmisividad.

- Para el caso del sector de Nogales la calidad natural podría determinarse a partir del pozo perteneciente a la red de monitoreo de calidad de la D.G.A., ya que el dominio geológico es similar en todo el sector y las muestras actuales presentan concentraciones dentro de los rangos máximos y mínimos históricos registrados.

7.3 Recomendaciones.

Las recomendaciones que se realizan se basan fundamentalmente en lo discutido en los puntos anteriores y son las siguientes:

- Mejorar la red de monitoreo, desde el punto de vista espacial, para lograr así una mejor representatividad de las regiones y contar con una adecuada red de monitoreo.
- Utilizar estudios realizados tanto en memorias o tesis de título que establezcan reglas para la ubicación de pozos de monitoreo a nivel de cuencas.
- Ampliar la red de laboratorios a cargo de la Dirección General de Aguas, para lograr un desarrollo conjunto con la red de monitoreo, de manera de no sobrecargar la ya ajetreada labor del laboratorio.
- Medición, en cualquier estudio de calidad de aguas subterráneas que se realice, de los parámetros mínimos establecidos por la metodología, de manera de generar datos históricos de análisis de calidad natural de diversos puntos del país.
- Incentivar el estudio de calidad natural de otras cuencas, de manera de establecer los problemas en relación a las deficiencias de información de cada una, para poder así, plantear soluciones a largo plazo a estas deficiencias.
- Realizar nuevos muestreos en el acuífero del río Aconcagua, de manera de validar tanto la información entregada en este trabajo, como validar los procesos y ambientes predominantes en el acuífero.
- Mejorar red superficial de monitoreo, con la incorporación de más estaciones en el sector de Aconcagua Las Vegas y Limache, en el caso puntual del acuífero del Aconcagua, como también en otras cuencas del país.

- Lo anterior se debe realizar si se conoce la relación entre el acuífero y el río, por lo que es necesaria una visión integral de la calidad en los casos que exista recarga río-acuífero.

8 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Agüero, J., & Puyol, R. *Análisis de Vulnerabilidad a la contaminación de una Sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.*

Auge, M. (2004). *Vulnerabilidad de Acuíferos Conceptos y Metodos.* Buenos Aires.

Barra, L. (2007). *Apuntes de Clase " Gestión Operacional de Aguas Subterráneas".* Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Blum, A., Wendland, F., & Kunkel, R. (2006). *Natural Background Levels Assessment in Groundwater.* BRGM.

Blyth, F., & De Freitas, M. (1988). *A Geology for Engineers. Seventh Edition.* ELSÉVIER.

Brantley, S., Kubicki, J., & White, F. (2008). *Kinetics of Water-Rock Interaction.* Springer.

CADE-IDEPE. (2004). *Diagnostico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Aconcagua.* Ministerio de Obras Publicas. Dirección General de Aguas.

Castillo, G., Merino, R., & Sancha, A. M. (1978). *Calidad de las Aguas Subterráneas.* Universidad de Chile. Departamento de Obras Civiles.

Centro de Recursos Hidráulicos. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. (1986). *Modelo de Simulación Hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal.* Departamento de Hidrología. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Publicas.

Chèry, L. (2006). *Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français.* Éditions BRGM-Agences de l'Eau.

CODELCO. (2008). *Antecedentes Sobre Las Aguas de Contacto Mineras y su Posible Regulación en el Decreto Supremo N° 90/00*. CONAMA.

Codina, L. (Mayo 2009). *Curso Capacitación en Hidrogeología para Geo-aguas Ltda.*

Comisión Nacional de Medio Ambiente. (2006). *Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, Manual de Aplicación D.S. N° 46*.

Custodio, E., & Llamas, M. (1996). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, S.A.

Department of Natural Resources. *Chapter NR 140 Groundwater Quality Wisconsin*.

Domenico, P., & Schwartz, F. (1997). *Physical And Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, Inc.

Espinoza, C. (2006). *Curso Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Foster, S., & Caminero, D. (1989). *Monitoreo de la Calidad de las Aguas Subterráneas una Evaluación de Métodos y Costos*. CEPIS/ OPS/ OMS.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.

GW MATE Core Group. (2002-2006). *Natural Groundwater Quality Hazards. Suitable Groundwater Management*.

Harter, T. (2003). *Groundwater Quality and Groundwater Pollution. Publicación 8084*. University of California.

Hem, J. D. (1985). *Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254.

Herve, F. (2007). *Apuntes de Clases y Auxiliares Curso Geología General*. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Hídricos, D. d. (2004). *Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos Establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N° 46*. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.

Holland, H. D., & Turekian, K. K. (2005). *Tratise on Geochemistry*. ELSEVIER.

INGENDESA Y AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA. (1998). *Modelo De Simulación Hidrogeológica Valle del Río Aconcagua*. Santiago: Ministerio de Obras Publicas. Dirección de Obras Hidraulicas.

Klein, C., & Hurlbut, C. (1996). *Manual de Mineralogía. Cuarta Edición*. Editorial Reverté S.A.

Kovalevsky, V. S., Kruseman, G. P., & Rushton, K. R. (2004). *Groundwater Studies. An International guide for Hydrogeological Investigations*. UNESCO.

Lillo, J. *Técnicas Hidrogeoquímicas. Máster Oficial en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos*. Universidad Rey Juan Carlos.

Mazor, E. (2004). *Chemical Isotopic Grondwater hydrology*. Marcel Dekker.

Ministerio de Obras Públicas. (1986). *Mapa Hidrogeológico de Chile*. Ministerio de Obras Publicas. Dirección General de Aguas.

Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. (2002). *Informe de Zonificación Hidrogeológica para las Regiones Metropolitana y V S.D.T. N° 133*. Santiago: Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

Molina, M. (2006). *Programa de Estudio de Intrusión Salina en Acuíferos Costeros. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil*. Departamento de Ingenieria Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Parraguez, C. (1985). *Definición de Acuíferos y Calidad Química de las Aguas Subterráneas de los Valles de Aconcagua, La Ligua y Petorca (V región). Memoria para optar al Título de Geólogo*. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Porras, M., & Thauvin, J. P. (1978). *Aguas Subterráneas: Problemas generales de la Contaminación*. Madrid: CIFCA.

Ramírez, J. (2004). *Análisis de Metodologías para Evaluar Vulnerabilidad de Acuíferos a la Contaminación*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Salbu, B., & Steinnes, E. (1995). *Trace Elements in Natural Waters*. CRC Press.

SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile: Versión Digital*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2001). *Análisis de Presencia de Contaminantes no Controlados en Agua Potable*. Departamento Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

U. S. Department of The Interior. (1998-2001). *U. S. Geological Survey: Water-Quality Characteristics and Groundwater Quality of the Fraser River Watershed Grand County*. Colorado.

Voigt, H. J., Hannappel, S., Kundel, R., & Weandland, F. (2005). Assessment of Natural Groundwater Concentration of Hydrogeological Structures in Germany. (L. m. akademija, Ed.) *GEOLOGIJA* (50), 35-47.

Von Igel, W. (1999). *Redefinición de la Red de Monitoreo de Calidad de Agua Subterránea en el Valle del Aconcagua. Memoria para optar al Título de Geólogo*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.

Wendland, F., Berthold, G., Blum, A., Elsass, P., Fritsche, J.-G., Kunkel, R., y otros. (2006). *Derivation of Natural Background Levels and Threshold Values for Groundwater Bodies in Upper Rhine Valley (France, Switzerland and Germany)*. Estambul: 10th IWA International Specialized Conference on Diffuse Pollution and Sustainable Basin Management.

Wendland, F., Hannappel, S., Kunkel, R., Schenk, R., Voigt, H., & Wolter, R. (2003). A Procedure to Define Natural Groundwater Conditions of Groundwater Bodies in Germany. *Diffuse Pollution Conference*, (pág. 7). Dublin.

<http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/TransparenciasAH.pdf>

http://redescolar.ilce.edu.mx:2000/redescolar/publicaciones/publi_rocas/clorita.htm

http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi_rocas/serpentina.htm

http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761575801/Leucita.html

<http://www.handbookofmineralogy.org>

<http://www.galeon.com/geologiayastronomia/geo13.pdf>

<http://www.geovirtual.cl/>

<http://cig.museo.unlp.edu.ar/docencia/sed/>

<http://www.people.carleton.edu/~cdavidso/Geo110/CommonMinerals.pdf>

<http://www.kalipedia.com>

<http://www.efn.uncor.edu>

9 ANEXOS

9.1 ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

9.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

9.2.1 Introducción.

Como se mencionó en el punto anterior, la calidad natural de las aguas subterráneas depende de distintos factores físicos, geológicos, atmosféricos y biológicos, como también de la interacción del agua con los distintos medios con los cuales ésta toma contacto. En función de lo dicho anteriormente, en este capítulo se procede a definir cada uno de los distintos factores que definen la composición de las aguas subterráneas, como también de las diversas interacciones que se producen en los distintos medios y el agua. Entre las características más importantes se pueden encontrar:

Características Físicas:

Temperatura.

Turbiedad.

Color.

Olor y sabor.

Características Químicas:

Dureza.

Conductividad Específica (CE).

Concentración de ión Hidrogeno (pH).

Sólidos Disueltos Totales (SDT).

Constituyentes mayores.

Constituyentes menores.

Elementos Traza.

Cada uno de estas características permite definir la calidad de las aguas subterráneas, como también permiten analizar si la calidad de las aguas subterráneas es natural o no.

9.2.2 Características Físicas de las aguas subterráneas.

9.2.2.1 Temperatura.

La Temperatura del agua es una de sus características más utilizadas. En particular para las aguas subterráneas, la temperatura es prácticamente constante durante el año y es considerablemente más baja que la temperatura media del aire durante el verano. Esto hace al agua subterránea particularmente deseable para muchos usos, incluyendo procesos industriales que requieren agua de una temperatura relativamente constante.

La temperatura de las aguas subterráneas está determinada básicamente por tres factores:

- La temperatura media anual del área donde ocurre la percolación o la recarga. Esta temperatura varía con la elevación del área de recarga.
- El flujo de calor geotermal, ya que a mayor profundidad penetran las aguas, más elevada será su temperatura. Como regla general la temperatura de la Tierra se incrementa hacia su interior e 3°C por cada 100 m de profundidad.
- El tiempo de residencia del agua debajo de la superficie, ya que de esta manera, entre mayor tiempo permanezca bajo la superficie, mayor calor absorberá.

Dependiendo de la profundidad alcanzada por el agua y el tiempo de residencia, el factor dominante será la temperatura del aire o el flujo de calor geotermal, ya que entre mayor profundidad, la influencia del flujo geotermal es mayor en relación a la de la temperatura del aire.

Un factor que está condicionado por la temperatura es la solubilidad de los gases y minerales en el agua subterránea. En general los minerales son más fáciles de solubilizar en condiciones de altas temperaturas, en cambio los gases son menos solubles en estas condiciones. Esto explica el porqué el carbonato de calcio (CaCO_3) se precipita en aguas con altas temperaturas, en cambio en aguas con menores temperaturas tiende a solubilizarse.

9.2.2.2 Turbiedad.

La Turbiedad es una medida de la interferencia al paso de la luz debido a la presencia de materia suspendida y coloidal, tal como arcilla, sedimentos, materia orgánica y organismos microscópicos. Dadas las condiciones físicas a que se hallan sometidas las aguas subterráneas se tiene una gran reducción de materias suspendidas, por lo que no presentan turbiedad (Castillo, Merino, & Sancha, 1978). No se realiza mayor énfasis en este punto debido a la falta de información relacionado con la turbiedad en aguas subterráneas.

9.2.2.3 Color.

En aguas naturales, el color se debe a la lixiviación de restos de materia orgánica y varía desde amarillo claro hasta café oscuro y puede estar generalmente combinada con disoluciones de soluciones de cloruro de cobalto y de cloroplatinato de potasio (Hem, 1985). El color depende, de igual manera del contenido de hierro en el agua, siendo este último el origen del color en aguas subterráneas. Otro origen del color se relaciona con la presencia de vegetación antigua ño, en general de materias orgánicas que se hayan depositado dentro de las formaciones geológicas por las cuales fluye el agua. Son considerados como principales fuentes del color en aguas subterráneas:

- Taninos.
- Ácidos Húmicos.
- Humatos provenientes de la descomposición de la lignina.

El aumento del color en el agua se debe fundamentalmente en un aumento del pH.

9.2.2.4 Olor y sabor.

Olores y sabores pueden derivar de bacterias, gases disueltos, materia orgánica y fenoles. Los problemas de olor y sabor son muy complejos debido a los sentidos olfato y gusto que están íntimamente ligados y, muchas veces, hay grandes dificultades para diferenciarlos claramente (Castillo, Merino, & Sancha, 1978). No se realiza un mayor énfasis en este punto debido al bajo nivel de información existente.

9.2.3 Características químicas.

9.2.3.1 Dureza.

La dureza es la característica del agua que representa la concentración total de calcio y magnesio expresada como CaCO₃. La expresión para evaluar la dureza es la siguiente:

$$DurezaTotal = [Ca] \cdot \frac{rCaCO_3}{rCa} + [Mg] \cdot \frac{rCaCO_3}{rMg} \quad 9.1$$

Donde Ca y Mg se expresa en mg/l y rCaCO₃, rCa y rMg en meq/L. La expresión anterior se puede escribir también de la siguiente manera (Freeze & Cherry, 1979):

$$DurezaTotal = 2.5 \cdot [Ca] + 4.1 \cdot [Mg] \quad 9.2$$

La dureza total de un agua puede dividirse en dos tipos:

- Dureza carbonatada (asociada a la presencia carbonatos)
- Dureza no carbonatada (asociada a la presencia sulfatos)

La dureza carbonatada, conocida también como dureza temporal, incluye aquella porción del calcio y magnesio que se combinaría con el bicarbonato y las pequeñas cantidades de carbonato presentes. El carácter temporal de esta dureza esta dado por la remoción parcial de ésta por medio de la ebullición del agua, proceso que genera la precipitación los carbonatos de calcio y

magnesio. La dureza no carbonatada, llamada también dureza permanente, está dada por la diferencia entre la dureza total y la dureza carbonatada. Se origina por la combinación de pequeñas cantidades de Calcio y Magnesio con iones de sulfato, cloruro y nitrato, junto con el efecto combinado, aunque de menor importancia, de otros constituyentes menores.

En aguas subterráneas la dureza es fundamentalmente generada por las formaciones geológicas con las cuales el agua, tanto en movimiento desde un punto a otro como en la fuente de las aguas subterráneas, tiene contacto. La siguiente tabla clasifica las aguas según su dureza en función de la dureza total, es decir el contenido en Ca^{+2} y Mg^{+2}

Tabla 9.1: Clasificación de las aguas en función de su dureza total.

Dureza total		Clasificación
[mg/L]	[meq/L]	
150	3	Aguas Blandas
350	7	Aguas de Dureza Media
600	12	Aguas Duras
>600	>12	Aguas Muy Duras

Fuente: Barra. (2007)

9.2.3.2 Conductividad Específica.

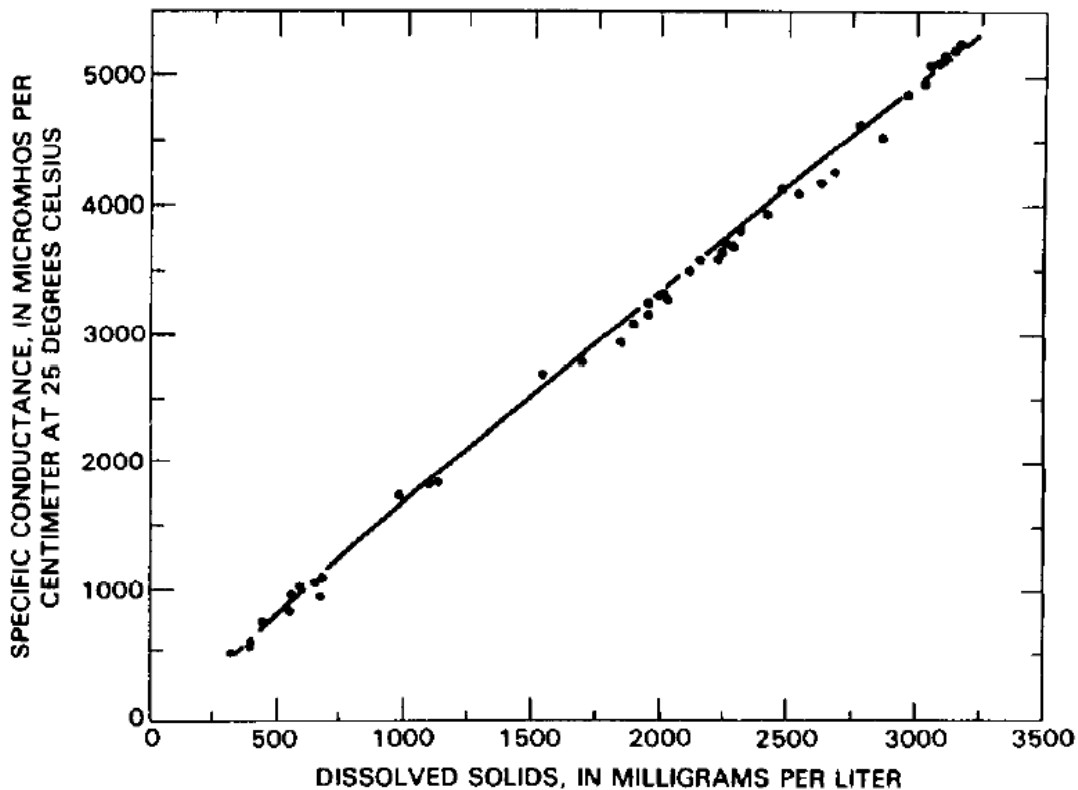
La conductividad o la conductancia específica es la capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica, es decir opuesto a la resistencia eléctrica. The American Society for Testing and Materials define la conductividad específica del agua como “El recíproco de la resistencia en ohms promediado entre fases opuestas de un centímetro cubico de una solución acuosa a una temperatura específica”

El agua químicamente pura tiene una conductividad muy baja, lo que implica que funciona muy bien como aislador. Pequeñas cantidades de material disuelto dan al agua características conductoras. Esto ocurre cuando un material disuelto se separa en iones positivos y negativos: A mayor número de iones presentes, mayor será la conductancia. La unidad de medida de la conductividad es el inverso del ohm, que es la unidad que expresa la resistencia y se escribe mho.

Los valores de la conductividad específica de las aguas subterráneas se expresa en millonésimos de mhos o micromhos/cm a 25°C o como μS o microsiemens (SI).

Es importante destacar que la conductividad en el agua subterránea se debe a la presencia de especies iónicas cargadas, entre más sean las especies iónicas presentes en el agua, o mayor sea su concentración, mayor conductividad eléctrica tendrá el agua. De ahí que la conductividad sea un indicador indirecto de la concentración de iones o, como se verá posteriormente de la concentración de sólidos disueltos totales (SDT). Esta relación entre la conductividad específica (CE) y los sólidos disueltos totales (SDT) tiene un factor que varía entre los 0,55 y 0,75, esto se observa claramente en la siguiente figura.

Figura 9.1: Variación de la conductividad eléctrica en función del contenido de sólidos disueltos.

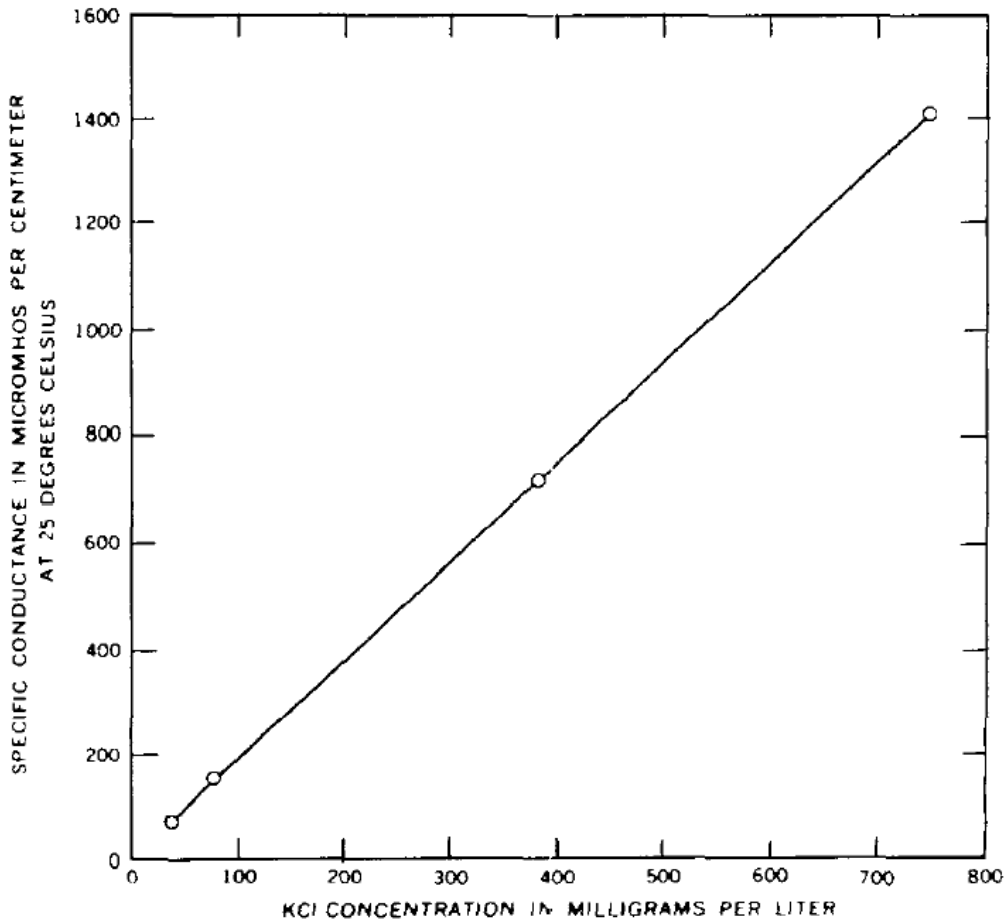


Fuente: Hem. (1985)

Dentro de los factores que afectan la medición de la conductividad específica se encuentran la temperatura. La temperatura afecta a la conductividad eléctrica dependiendo de las sales y las diferentes concentraciones que se encuentren en las aguas subterráneas, aunque en general, para la mayoría de los iones en soluciones diluidas, un incremento de 1°C en la temperatura del agua

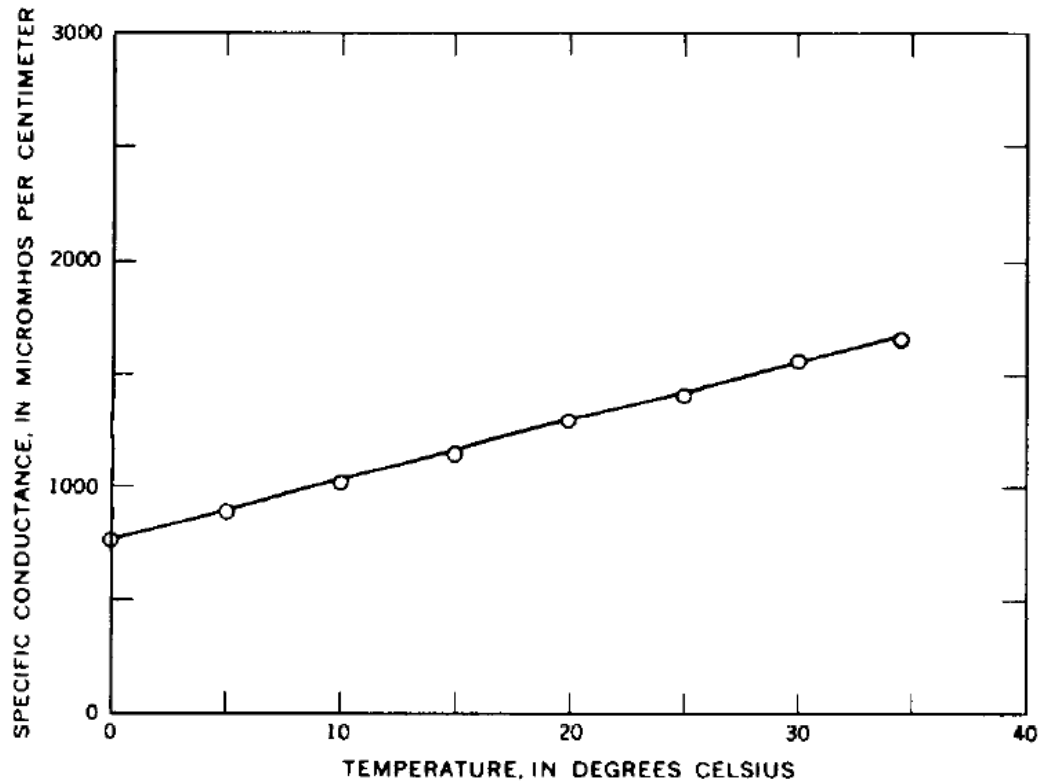
representa un incremento de la conductancia de alrededor de un 2% en relación a la conductividad obtenida en condiciones de laboratorio (25°C). Un ejemplo de lo anterior se puede observar en los siguientes gráficos:

Figura 9.2: Variación de la conductividad eléctrica en función de la concentración de Cloruro de Potasio.



Fuente: Hem. (1985)

Figura 9.3: Variación de la conductividad de una solución de Cloruro de Potasio en función de la temperatura



Fuente: Hem (1985)

En el primer caso, Figura 9.2, la conductividad específica de una solución de cloruro de potasio se incrementa a medida que se incrementa el nivel de concentración del cloruro de potasio, esto se efectúa a una temperatura cte. de 25°C. En el segundo caso,

Figura 9.3, la conductividad de una solución de cloruro de potasio aumenta a medida que se incrementa la temperatura, esto ejemplifica lo que ocurriría a otras soluciones, que a una concentración constante podría ver elevada su conductividad específica debido a aumentos en la temperatura de la solución.

Rangos típicos de conductividad específica para aguas subterráneas son muy amplios ya que dependen de las características del suelo y las condiciones geológicas del lugar, así como también de las precipitaciones existentes en la zona. Es así como por ejemplo, en zonas donde la precipitación es baja, se tiene conductividades de alrededor de 50 $\mu\text{mhos/cm}$, en cambio en otras zonas, la conductividad puede llegar a tener valores alrededor de 50.000 $\mu\text{mhos/cm}$, que es aproximadamente la conductividad eléctrica del agua de mar.

9.2.3.3 Concentración de ión Hidrógeno (pH).

Es uno de los parámetros más importantes del punto de vista hidroquímico. La concentración del ion de hidrógeno es una propiedad fundamental que describe la acidez o alcalinidad de las aguas, en particular de las aguas subterráneas, controlando la cantidad y las formas químicas de diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas en las aguas subterráneas y superficiales. La concentración del ión de hidrógeno se expresa por su valor de pH, un valor de pH de 7 indica una solución neutra, es decir, ni ácida ni alcalina. Un pH menor que 7 indica una solución ácida y un pH mayor a 7 indica una solución básica (Hem, 1985). La ecuación de equilibrio que rige la concentración de iones de hidrogeno es la siguiente:



En la mayoría de las aguas subterráneas, el pH es controlado por el anhídrido carbónico, o también conocido como dióxido de carbono (CO_2), el cual forma ácido carbónico, forma disuelta de carbono en el agua, para posteriormente disociarse en carbonatos y bicarbonatos. Las características minerales y geoquímicas de las rocas que se encuentran en contacto con el agua, ya sea en su trayecto o en el acuífero mismo, también tienen efecto sobre el incremento del pH.

Una característica importante de las soluciones acuosas, en particular de las aguas subterráneas, es su capacidad alcalina o de buffer. Barra (2007) define la alcalinidad como la capacidad del agua para aceptar iones de hidrogeno (H^+), sin un cambio significativo del pH de ésta, es decir, la capacidad para neutralizar los ácidos. Hem (1985) define alcalinidad como aquella característica de una solución para no modificar su pH ante la adición de cantidades moderadas de ácidos o bases.

La alcalinidad ocurre en sistemas que las condiciones de equilibrio del pH son controladas tanto por el hidrogeno como también por otros iones. En cambio, que tan alcalino sea el sistema depende de la naturaleza de otras especies de solutos. En aguas naturales la capacidad alcalina está dada por especies disueltas de CO_2 , siendo éste una de las principales fuentes de alcalinidad de las aguas. En particular, existen tres especies:

- Bicarbonatos (HCO_3^-)
- Carbonatos (CO_3^{2-})
- Hidroxilos (OH^-)

La primera especie se encuentra en soluciones con pH menores a 8, en cambio la segunda y tercera especie se encuentran presentes en soluciones con pH mayores a 9. De estas especies, predominan los carbonatos y los bicarbonatos, siendo estos últimos los de mayor importancia.

El sistema CO_2 - CO_3 - HCO_3 no es estable cuando la presión o temperatura varían. Por ejemplo reducciones en la presión permiten la liberación de CO_2 , lo que podría generar que las muestras de agua tomadas desde un pozo no representen verdaderamente las características químicas del agua en el acuífero. Lo anterior motiva la medición del pH tanto en terreno como en laboratorio, de manera de corroborar que la variación de dióxido de carbono no sea importante.

Otros procesos de buffering son la degradación de silicatos (pH entre 5 a 6.2), procesos de intercambio iónico (pH entre 4.2 a 5) y la disolución de metales hidróxidos (pH entre 3 a 4.2 para el aluminio; pH < 3 para el hierro, etc) (Salbu & Steinnes, 1995)

9.2.3.4 Sólidos Disueltos Totales

Las aguas subterráneas, naturalmente, contienen iones minerales, los cuales son disueltos lentamente desde partículas del suelo, sedimentos y rocas, mientras el agua viaja a través de las superficies minerales en los poros y fracturas de la zona no saturada del acuífero. Estos iones se conocen como sólidos disueltos, y pueden provenir desde las precipitaciones o desde ríos que recarguen el acuífero. Los sólidos disueltos presentes en las aguas subterráneas son diversos, pero se pueden clasificar en 3 grupos diferentes:

- Constituyentes mayores.
- Constituyentes menores.
- Elementos Traza.

La siguiente tabla expone los principales elementos que constituyen cada uno de los grupos anteriormente mencionados:

Tabla 9.2: Principales elementos presentes en aguas subterráneas

Constituyentes mayores entre 1.0 - 1000 mg/l	Constituyentes menores entre 0,01 - 10 mg/l	Trazas de elementos entre 0,0001 - 0,1 mg/l	Trazas de elementos menor a 0,001 mg/l
Cationes	Cationes	Antimonio (Sb)	Berilio (Be)
Sodio (Na)	Potasio (K)	Aluminio (Al)	Bismuto (Bi)
		Arsenico (As)	Cerio (Ce)
Calcio (Ca)	Hierro (Fe)	Bario (Ba)	Cesio (Cs)
		Bromo (Br)	Galio (Ga)
		Cadmio (Cd)	Oro (Au)
		Cromo (Cr)	Indio (In)
Magnesio (Mg)	Estroncio (Sr)	Cobalto (Co)	Lantano (La)
		Cobre (Cu)	Niobio (Nb)
		Germanio (Ge)	Platino (Pt)
Aniones	Aniones	Yodo (I)	Radio (Ra)
Bicarbonato (HCO ₃)	Carbonato (CO ₃)	Plomo (Pb)	Ruterio (Ru)
		Litio (Li)	Escandio (Sc)
		Manganeso (Mn)	Plata (Ag)
Sulfato (SO ₄)	Nitrato (NO ₃)	Molibdeno (Mo)	Talio (Tl)
		Niquel (Ni)	Torio (Th)
		Fosfato (PO ₄ ⁻³)	Estaño (Sn)
		Rubidio (Rb)	Tungsteno (W)
Cloruro (Cl ⁻)	Fluoruro (F)	Selenio (Se)	Iterbio (Yb)
		Titanio (Ti)	Itrio (Y)
		Uranio (U)	Zirconio (Zr)
Silice (SiO ₂)	Boro (B)	Vanadio (V)	
		Zinc (Zn)	

Fuente: Hem. (1985)

9.2.4 Características de los sólidos disueltos

Para un mejor enfoque de la revisión bibliográfica, solo se realizará una descripción de aquellos elementos contemplados por la red de monitoreo de la calidad de la D.G.A., Tabla 2.22 y en la Tabla 9.2, se puede decir que los principales elementos medidos por la red de monitoreo se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 9.3: Principales constituyentes monitoreados por la red de monitoreo.

Cationes	Otros elementos
Sodio (Na)	Aluminio (Al)
Calcio (Ca)	Arsenico (As)
Magnecio (Mg)	Cadmio (Cd)
Potasio (K)	Cobalto (Co)
Hierro (Fe)	Cromo (Cr)
Aniones	Cobre (Cu)
	Plata (Ag)
Carbonato (CO ₃)	Litio (Li)
Bicarbonato (HCO ₃)	Manganeso (Mn)
Sulfato (SO ₄)	Molibdeno (Mo)
Cloruro (Cl ⁻)	Niquel (Ni)
Nitrato (NO ₃)	Plomo (Pb)
Boro (B)	Selenio (Se)
	Zinc (Zn)
	Fosfato (PO ₄ -3)

9.2.4.1.1 Sílice.

El sílice es el segundo elemento de mayor abundancia en la corteza terrestre. El tetraedro SiO₄⁴⁻ es una unidad estructural fundamental de la mayoría de los minerales presentes en rocas ígneas y metamórficas, aunque también puede encontrarse en otras formas en la mayoría de las rocas y suelos, como también en aguas naturales. El termino sílice, representa al óxido SiO₂, es ampliamente usado para referirse al contenido de silicio en aguas naturales (Hem, 1985).

El sílice cristalino SiO₂ como el cuarzo es el constituyente principal de prácticamente la totalidad de las rocas ígneas como también constituye la mayor parte de los granos de la mayoría de las areniscas. El cuarzo es uno de las más resistentes minerales formadores de roca ante el ataque del agua, aunque el sílice criptocristalino y amorfo como el Chert y el ópalo son más solubles. Sin embargo, la mayoría del sílice disuelto observado en aguas naturales es resultado de rompimiento

químico de los minerales de sílice en proceso de desgaste, proceso irreversible. El sílice retenido en solución es controlado, probablemente, tanto por factores cinéticos en los procesos de disolución, la absorción en minerales u otras superficies o por la precipitación de especies minerales secundarias como una forma menos organizada de sílice (Hem, 1985)

Las concentraciones típicas registradas del sílice en agua de mar es bastante baja, menos de 1 mg/L, debido fundamentalmente a procesos de adsorción por medio de organismos marinos que extraen el sílice y lo utilizan en sus esqueletos y conchas. Los rangos naturales observados en aguas naturales varían entre los 1 mg/L hasta los 30 mg/L. Sin embargo, concentraciones de más de 100 mg/L son frecuentes en ciertas aguas subterráneas de determinados sitios (Hem, 1985).

9.2.4.1.2 Sodio.

El sodio es el principal elemento presente en rocas ígneas, en particular en rocas como los feldespatos y en rocas sedimentarias como la halita. Las altas concentraciones de sodio provienen diferentes tipos de roca, fundamentalmente las rocas evaporíticas, como la *Halita* (NaCl), en cuyo caso, las contracciones de sodio se acompañan de elevadas concentraciones de cloruros. Un agua saturada en Cloruro Sódico contiene unos 150 mg/l de sodio y 230 mg/l de cloruro, lo cual difiere de manera importante con aguas como las de mar, que contienen aproximadamente 10,5 mg/l de Sodio y 19 mg/l de Cloruro. Un agua subterránea en contacto con un diapiro (estructuras geológicas producidas a partir del desplazamiento de rocas salinas) y que están asociados a procesos de disolución de sales y yesos, puede llegar a decenas de gramos por litro. Es importante señalar que en el caso de disolución de rocas evaporíticas, puede aparecer también la presencia de concentraciones relativamente pequeña de *bicarbonatos de sodio* (NaHCO₃), a pesar de que éste es una sal poco soluble. Aguas saturadas en bicarbonato de sodio puede contener unos 15 gr/l o, de manera equivalente, unos 15.000 mg/l (Hem. 1985).

Otra fuente importante de sodio en las aguas subterráneas son los feldespatos de tipo albita o *feldespatos sódicos* (NaAlSi₃O₈), como también las ortoclasas y *microclinas* (KAlSi₃O₈), aunque esta última es más resistente al ataque químico que las otras especies, y todas las arcillas más o menos derivadas de ellos (Hem, 1985). A estos se añade el gran poder de absorción de las arcillas y su propiedad de “cambio de base” lo que también se conoce como intercambio iónico,

es decir, el cambio de un ion como el Mg^{+} y Ca^{+} por Sodio, lo que induce a un aumento de este ultimo en el agua, lo que constituye en el más importante origen del sodio en las aguas subterráneas, no tanto respecto a altas concentraciones, sino más bien a una gran distribución espacial. Otra característica importante que el Sodio genera en las aguas subterráneas, es que, dado que el sodio disuelto a partir de estructuras feldespáticas puede presentarse como carbonatos o bicarbonatos de sodio, una alta concentración de estos genera aguas alcalinas con pH igual o superior a 9. Otra fuente de sodio resultan ser las aguas que drenan de rocas volcánicas y en formaciones riolíticas, lo cual se traduce en la disolución de albita.

En Chile, los yacimientos de sulfato de sodio se ubican en los salares y lagos andinos, en salares de la Depresión Central y como mantos asociados a los yacimientos de nitratos de la Depresión Central. Se desarrollan en la parte superior del primer metro del salar y sobre el nivel de agua subterránea somero.

En la I región los salares de interés son el Salar de Surire y la Laguna Huasco. En la Depresión Central el único salar más importante es el Salar de Pintados-Bellavista. En esta última zona también existen depósitos en yacimientos de nitratos, aquí los horizontes de sulfatos se distribuyen en su parte superior, y son recuperados como subproducto de la industria del salitre. Sin embargo los yacimientos más importantes son los que se distribuyen profusamente en la Depresión Central al sur de Antofagasta, especialmente en Aguas Blancas, ex Oficina Morena y Aguas Verdes. En Aguas Blancas ubicado a 100 km al sur de Antofagasta, se registra una de las principales actividades en torno al sulfato de sodio natural en la región de Antofagasta en particular y en el Norte Grande en general, excepto la efectuada en la región de Tarapacá. En dicho sector existen al menos 3 empresas mineras dedicadas a la producción de sulfato de sodio natural desde yacimientos pertenecientes a las Ex Oficinas Petronila, Eugenia y Rosario principalmente.

Los salitres son depósitos de nitratos naturales ubicados en el norte del país, y distribuidos a lo largo de una franja de unos 700 km con un ancho variable entre 30 y 50 km. Se presentan en 2 formas principales, como *nitrato de sodio* ($NaNO_3$) y *nitrato de potasio* (KNO_3). A nivel mundial los únicos depósitos de este tipo, que por su volumen y leyes tienen un interés comercial, son los del norte de Chile.

Los yacimientos de salitre corresponden a un complejo de sales, entre los cuales los principales son sulfatos, cloruros, nitratos, boratos y carbonatos de sodio, calcio, magnesio y potasio, asociados a otros de menor ocurrencia como yodatos, cromatos y percloratos.

9.2.4.1.3 Calcio.

Es el catión preponderante en gran parte de las aguas subterráneas, como también de las rocas sedimentarias carbonatadas como también de las rocas ígneas. En el caso de rocas sedimentarias carbonatadas, el calcio predomina en minerales como la *calcitas* (CaCO_3) y *dolomitas* ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) principalmente, aunque también se puede encontrar en minerales de *sulfato de calcio* (Yeso) ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), *anhidrita* (CaSO_4) y la *fluorita* (CaF_2), o de areniscas con cemento calcáreo (Hem, 1985). Es por esta razón que el calcio se encuentra acompañado por carbonatos y bicarbonatos, y a menudo de magnesio en menor o mayor proporción. No es frecuente que la concentración en calcio pase de unos 200 a 300 mg/l, lo más común es que su concentración sea del orden de los 100 mg/l. También puede proceder de lixiviación de terrenos yesíferos, en cuyo caso se acompaña siempre de sulfatos (Sulfato de calcio y anhidrita), llegando a concentraciones muy altas de calcio, que pueden alcanzar varios centenares de mg/l. Otra fuente importante de calcio corresponde a la lixiviación de feldspatos cálcicos, como la *albita* ($\text{CaAlSi}_3\text{O}_8$) y la *anortita* ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) que corresponde a unos de los principales componentes de las rocas ígneas (Hem. 1985):

La concentración de calcio en las aguas subterráneas está controlada por la solubilidad de ciertos minerales como los minerales carbonatados (*Calcita*, *Dolomita*), el Yeso, los Aluminio-Silicatos y los Silicatos, siendo predominante el ión Ca^{+2} en aguas naturales. El calcio no está presente en la mayoría de los tipos de litología, pero es predominante en los acuíferos carbonatados. En este contexto, la concentración de calcio es de un centenar de mg/l. El calcio es igualmente abundante en acuíferos yesíferos, donde la concentración puede alcanzar fácilmente algunos centenares de mg/l. Al igual que en el caso del Sodio, el Calcio se ve influenciado por el intercambio iónico, pero a diferencia del Sodio, el Calcio disminuye ante la presencia de Sodio en el Agua (Hem, 1985).

9.2.4.1.4 Magnesio.

Puede ser, a veces, el catión principal, pero esto ocurre en muy pocas oportunidades. Sin embargo, suele existir en gran parte de las aguas, en concentraciones no despreciables. El magnesio es un metal alcalino que posee un único estado de oxidación con importancia significativa en la química de las aguas y corresponde al ion Mg^{+2} .

Lo más corriente es que provenga de la disolución de rocas sedimentarias como *dolomía* o *calizas dolomíticas* ((Ca,Mg)CaCO₃) o *magnesita* (MgCO₃). En este caso, el magnesio se encuentra presente junto al calcio, cuya concentración es mayor a la del magnesio, y bicarbonatos, esto debido fundamentalmente a que los minerales que contienen magnesio son menos solubles.. En estos casos la concentración de Magnesio no suele sobrepasar los 100 o 150 mg/l y no suele ser inferior a los 50 mg/l.

Otra fuente importante de magnesio corresponde a la disolución de rocas ígneas, fundamentalmente rocas ferro-magnéticas oscuras, como piroxenos, olivinos (*forsterita* (5Mg₂SiO₄)), anfíboles y micas, o de rocas metamórficas, o de sus arcillas en descomposición, que contengan *serpentina* ((Mg,Fe)₃Si₂O₅(OH)₄) (roca sedimentaria con contenido de silicatos de magnesio), *clorita* ((Mg₅Al)(Si₃Al)O₁₀(OH)₈) (roca metamórfica, con contenido de minerales de Mg, Fe y Al), etc. En este caso la concentración de magnesio puede alcanzar valores entre los 200 mg/l y los 300 mg/l (Hem. 1985). Como el calcio y sodio, la concentración de magnesio en las aguas subterráneas también se ve influenciado por el intercambio iónico, ya que el magnesio es adsorbido por minerales de plata.

9.2.4.1.5 Potasio.

Por lo general, el potasio es de menor importancia que el sodio, debido a que su presencia en rocas de la corteza terrestre es menor a la del Sodio (Hem, 1985). La presencia de potasio en rocas ígneas es relativamente baja en comparación con el sodio, pero en rocas sedimentarias es mucho más sustancial. Las fuentes del potasio son similares a las del sodio, principalmente minerales o rocas de silicato como los feldespatos ortoclasicos, microclinas (KAlSi_3O_8), (roca ígnea del grupo de los feldespatos) y micas y feldespatoideas como la *leucita* (KAlSi_2O_6) (roca ígnea compuesta por minerales de silicato de aluminio y potasio) (Hem, 1985). En sedimentos es común que esté presente en feldespatos inalterados o partículas de mica o illita.

Las concentraciones de potasio en las aguas subterráneas suelen ser bajas, desde algunos mg/l hasta algunas decenas de mg/l, debido al alto grado de estabilidad de los minerales de la relación potasio-aluminio silicatos, pero en algunos casos pueden sobrepasar los 150 mg/l, aunque por lo general no sobrepasa los 10 mg/l, esto se debe fundamentalmente a la baja movilización del ión de potasio. Concentraciones mayores se pueden observar en aguas que han lixiviado bancos de sales de potasio dentro de un conjunto evaporítico, como la *silvita* (KCl).

9.2.4.1.6 Carbonato y Bicarbonato.

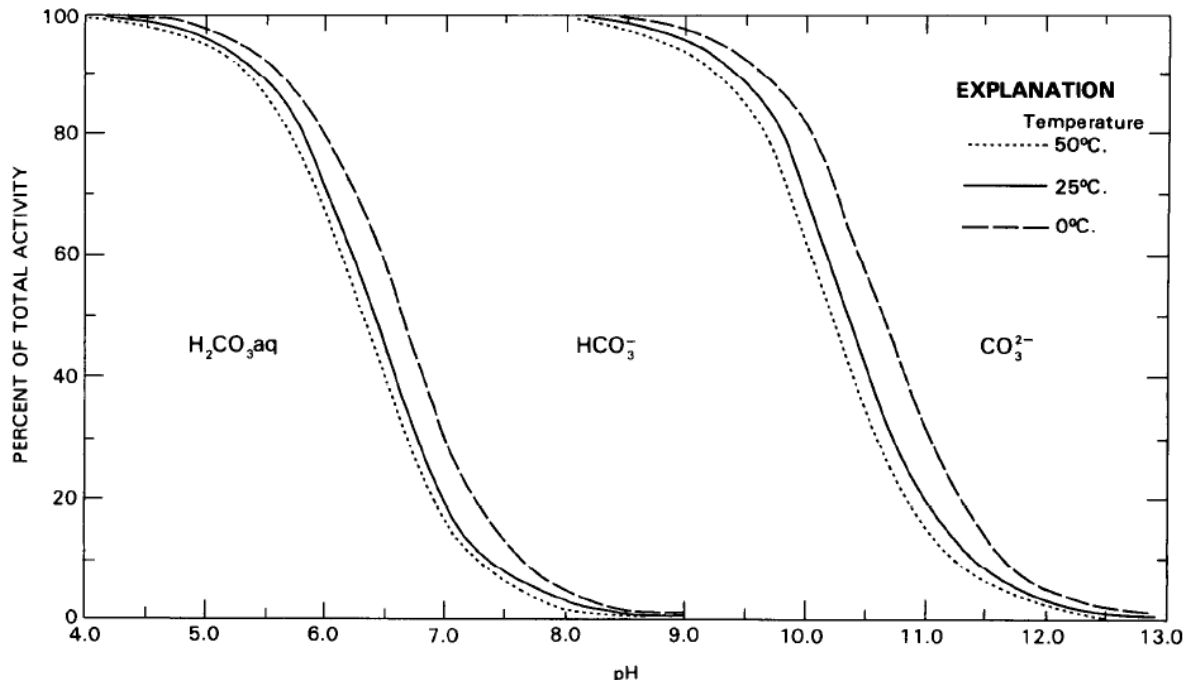
El anhídrido carbónico, más conocido como dióxido de carbono ó CO_2 , procede fundamentalmente de la zona edáfica, donde existe una alta concentración de dióxido de carbono debido a la respiración de diferentes organismos y la descomposición de materia orgánica. El dióxido de carbono se disuelve, en función de la presión parcial del gas, para permanecer en forma disuelta como Ácido Carbónico (H_2CO_3), el cual se disocia parcialmente, formando Carbonato (CO_3^{2-}) y Bicarbonato (HCO_3^-) (Lillo,-).

La disolución de calizas y dolomías, facilitada por el aporte de CO_2 y/o ácidos orgánicos o inorgánicos, son otra fuente de carbonato y bicarbonato. La hidrólisis de silicatos, aunque en menor medida, es otra fuente importante de carbonato y bicarbonato. La presencia de los iones de carbonato y bicarbonato confieren al agua su característica alcalina, lo que implica que pueden consumir ácidos al producir el tamponamiento del agua.

En aguas con pH mayores a 8.3, pH común en aguas subterráneas naturales, la especie carbonatada predominante es el ión de bicarbonato, Figura 9.4, y las concentraciones de éste ión pueden variar entre 50 a 400 mg/L, aunque puede llegar a alcanzar 800 mg/L. En aguas cuyos contenidos de magnesio y calcio es bajo, las concentraciones de bicarbonato pueden alcanzar valores de hasta 1000 mg/L; ésta situación también puede darse en ambientes liberadores de CO₂, como la reducción de sulfatos.

Conviene señalar que el bicarbonato es mucho más corriente que el carbonato, ya que este último no aparece de forma sensible hasta un pH aproximado de 8.3. El carbonato llega a ser tan importante como el bicarbonato (a una temperatura de 25°C y una presión de 1 atmósfera) a un pH de 10.3, ya que deja de ser corriente. Lo anterior se puede observar en la siguiente figura:

Figura 9.4 Porcentaje de actividad de las especies disueltas de dióxido de carbono a 1 atm.



Fuente: Hem. (1985)

En las aguas subterráneas, el bicarbonato adquiere una importancia relevante, ya que la capacidad buffer o alcalinidad de estas se basa principalmente en el contenido de bicarbonato de éstas.

9.2.4.1.7 Sulfato:

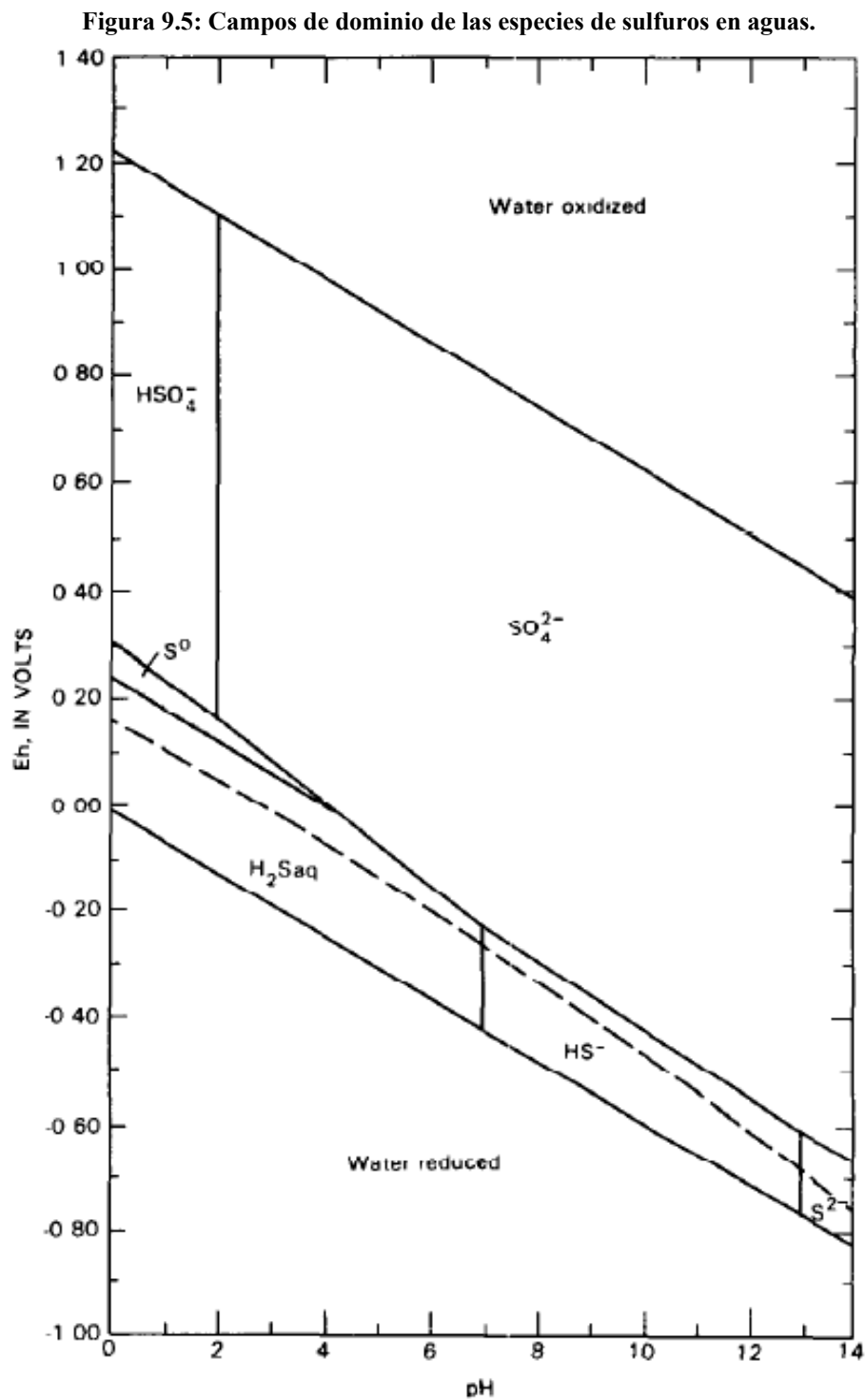
El sulfato se encuentra de manea más abundante en rocas sedimentarias que en rocas ígneas en forma de sulfuros metálicos. El ión de sulfuro (SO_4^{-2}) es la forma predominante en las aguas subterráneas, y está ligado a la oxidación de minerales ricos en sulfuro como por ejemplo de las *piritas* (FeS_2), roca asociada comúnmente con depósitos biológicos como el carbón. En particular, la *pirita* también es fuente de hierro en las aguas, debido fundamentalmente a la característica del sulfuro de estabilizarse como Sulfato, dejando libre el ión de Hierro (Hem. 1985).

Sin embargo, el origen más importante de los sulfatos, y que da lugar a las mayores concentraciones, son las rocas evaporíticas, como el *sulfato de calcio (Yeso)* ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), en este caso, los sulfatos se acompañan de calcio. En un agua sin cloruro sódico, la concentración en sulfatos puede alcanzar, teóricamente, hasta cerca de 1.5 g/l o 1500 mg/l, y cerca de 2 g/l (2000 mg/l) si el agua lleva unos 3000 mg/l de cloruro sódico. Puede estar presente también como la forma reducida del azufre (H_2S).

Es importante destacar que el contenido de Sulfato en las aguas subterráneas no está ligado a propiedades de oxidación sino que, como se mencionó anteriormente, está ligado a la oxidación de minerales ricos en sulfuro primarios o secundarios, los cuales están presentes en litologías calcáreas (kársticas), arenas y zócalos, y las concentraciones observadas en estos casos son de algunos mg/l hasta algunas decenas de mg/l. Otra fuente es la oxidación de sulfuros de las precipitaciones atmosféricas.

El origen antrópico del sulfato en aguas subterráneas pueden ser muy diversos, pero los más importantes son la actividad agrícola y la actividad minera. La primera, se destaca por el uso de fertilizantes como sulfato de cobre, azufre, etc., los que percolan a las aguas subterráneas. El segundo se destaca por generar drenaje ácido, el cual básicamente consiste en la alteración de las condiciones químicas naturales de los yacimientos de sulfuros metálicos. La lixiviación de estos yacimientos genera aumentos en la concentración de sulfuros, los cuales, al aumentar el pH, pasan a convertirse en sulfatos, lo que implica el aumento de estos en aguas naturales.

El siguiente grafico ilustra las diferentes especies de sulfuro en equilibrio a 25°C y 1 atm. de presión. La concentración utilizada para desarrollar el diagrama es de 96 mg/l de SO_4^{2-} :



Fuente: Hem. (1985)

9.2.4.1.8 Cloruros.

Pueden proceder de las rocas ígneas, principalmente *sodalita* ($\text{Na}_8[\text{Cl}(\text{AlSiO}_4)_6]$) y el mineral de fosfato *clorapatito* ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$), pero en este caso las concentraciones son bajas. Generalmente proceden de la lixiviación de rocas sedimentarias evaporíticas, como la *halita* (NaCl) o la *silvita* (KCl) (salvo las silíceas y las calizas que suelen tener pocos cloruros), siendo rocas muy solubles por lo cual representan una fuente importante de Cloruro. Por su característica soluble, y existiendo en gran parte de las formaciones, tanto continentales como marinas, se lixivian con gran facilidad y puede existir, en formaciones más o menos arcillosas con concentraciones superiores a 1.000 mg/l. Un caso aparte es el de las aguas en contacto con formaciones evaporíticas, cuya concentración en cloruros puede llegar a varias decenas de gramos/litro, e incluso a más de 200.000 mg/l. Por otra parte, suelen aparecer también fuertes concentraciones en aguas termales, al aumentar más aún la solubilidad de los cloruros con la temperatura. Otra fuente importante de Cloruro la constituyen el aporte atmosférico, principalmente las aguas lluvias, donde se encuentran concentraciones de alrededor de 10 mg/l.

El ión predominante en las aguas subterráneas es el ión Cl^- , aunque raramente participa de las reacciones químicas, a pesar de cualquier tipo de litología, la presencia de Cloruro en forma natural en aguas subterráneas es bastante baja, lo cual se ratifica en el hecho de que su movilidad le impide tener mayor interacción agua roca. En presencia de acuíferos libres, el contenido de Cloruro en el agua subterránea está directamente ligada al contenido de Cloruro en las aguas lluvias.

9.2.4.1.9 Nitrato.

El nitrato, al igual que el nitrito, es la principal forma en que se presenta el nitrógeno en el agua, como también puede presentarse en forma de amonio, aunque el ión de amonio aumenta su concentración cuando el medio es fuertemente reductor. La presencia de amonio en cantidades significativas en el agua se considera como un indicador de probable contaminación reciente o generada con anterioridad (Hem. 1985). El origen geológico del nitrato se explica por la presencia de *nitratina* (NaNO_3) y Salitre (KNO_3).

En condiciones naturales, el nitrato presenta concentraciones que varían entre los 0.1 mg/L y los 10 mg/L, aunque el agua de mar puede llegar a tener concentraciones cercanas a los 1 mg/L (Lillo). En algunas zonas rurales es común detectar niveles de nitrato que rondan en los 40 mg/l, debido fundamentalmente al drenaje de tanques sépticos, aunque también en zonas con un alto nivel de cultivos pueden registrarse niveles que rodean los 80 mg/l. Las fuentes naturales de nitrato son la precipitación y la interacción entre el suelo y la vegetación (cultivos), y en ciertos desiertos, como es el caso del desierto de Atacama, el nitrato se acumula en sucesivas capas de suelo en cuencas como rocas detríticas si la precipitación no es suficiente para mantener el suelo libre de sales solubles, formando depósitos de nitrato (Hem. 1985). Las fuentes antrópicas de nitrato están ligadas esencialmente a aguas residuales domésticas e industriales (Riles), y se considera que un contenido de 10 mg/l de nitrato es un indicativo de actividad antrópica.

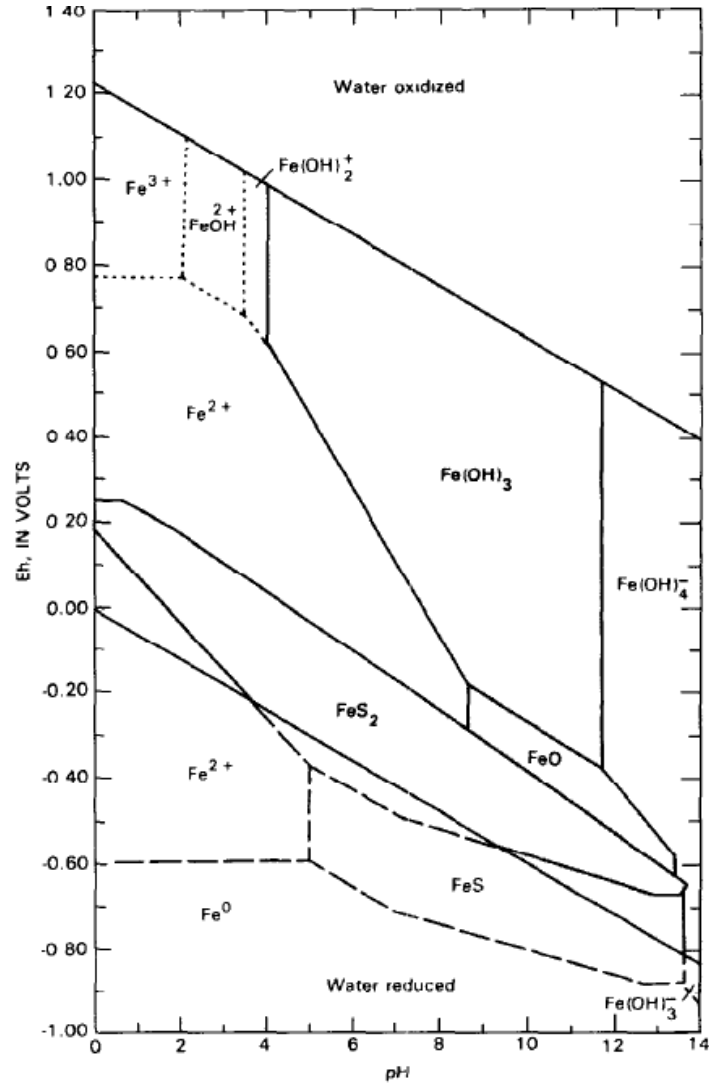
9.2.4.1.10 Hierro.

El hierro es el segundo metal más abundante en el planeta, pero cuyas concentraciones en el agua son, generalmente, poco significativas. El comportamiento de este componente en el agua y su solubilidad dependen fundamentalmente de la intensidad de oxidación que tenga el sistema en el cual el agua este en contacto con el hierro (Hem. 1985).

Las principales fuentes de hierro son rocas ígneas, fundamentalmente piroxenos, anfíboles, biotita, *magnetita* (Fe_3O_4) y principalmente *olivino* ($(\text{Fe})_2\text{SiO}_4$), así como también de rocas sedimentarias como sulfuros (*piritas* (FeS_2)), óxidos (*hematita* (Fe_2O_3), *magnetita* (Fe_3O_4)), e hidróxidos. De los minerales mencionados anteriormente, la magnetita es resistente a la solubilidad en agua, por lo que suele ser un residuo resistente.

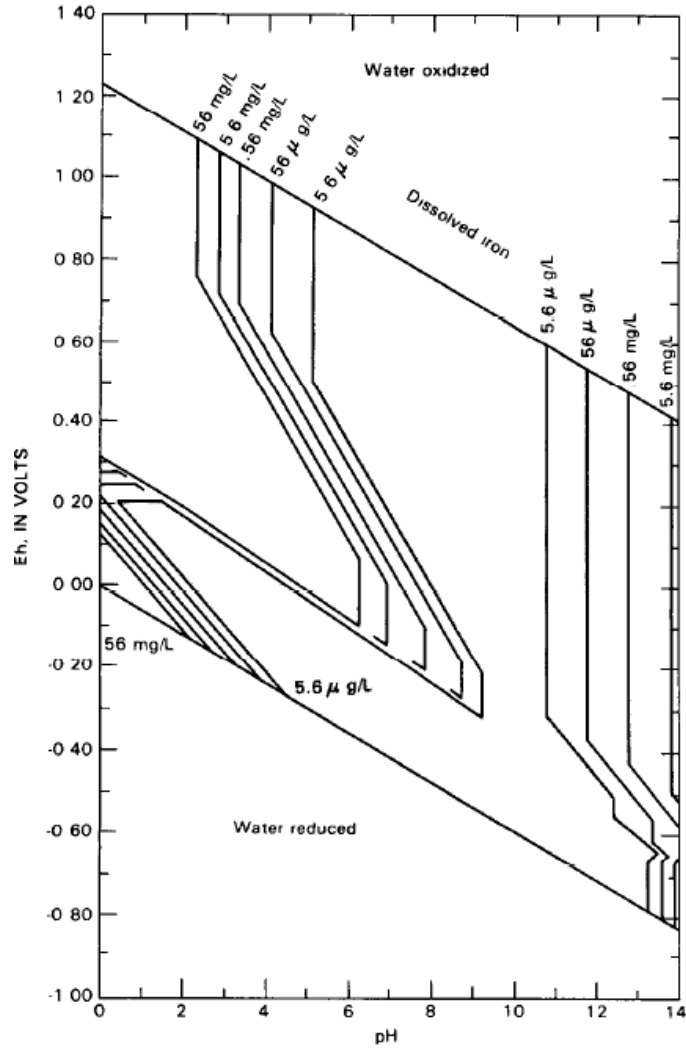
La especie más común presente en las aguas subterráneas naturales es el ión Fe^{+2} . Otras formas en que el hierro se presenta dependen fundamentalmente del pH que el agua del sistema posea, así como también las condiciones de oxidación-reducción, de esta manera el complejo monohidroxido FeOH^- , predomina en pH superiores a 9.5, en cambio el anión de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ presenta concentraciones apreciables en pH superiores a 11. En aguas ácidas, el hierro puede presentarse como Fe^{+3} , FeOH^{+2} , $\text{Fe}(\text{OH})^{+2}$. Las siguientes figuras ilustran la presencia de las diferentes especies de hierro en el agua subterránea.

Figura 9.6: Dominios de las diferentes especies de Hierro.



Fuente: Hem. (1985).

Figura 9.7: Equilibrios de actividad de hierro disuelto en función del Eh y el pH a 25°C y 1 atm.



Fuente: Hem. (1985). Para la confección de las figuras anteriores se utilizó un agua con las siguientes concentraciones: Sulfuro 96 mg/l, Bicarbonato: 61 mg/l, Hierro: 56 µg/l.

En aguas subterráneas, con pH cercanos al neutro, la ocurrencia del ión de hierro en el agua puede ser cualitativamente explicada mediante las reacciones químicas que han sido analizadas en los diagramas pH-Eh o potencial redox- pH. Para pH entre 6 y 8 es común tener concentraciones del orden de 50 mg/l de hierro en equilibrio químico, esto si el contenido de bicarbonato no es superior a 61 mg/l. En general, concentraciones del orden de 1.0 mg/l a 10 mg/l son comúnmente encontradas en aguas subterráneas.

9.2.4.1.11 Aluminio.

El Aluminio es el tercer elemento más abundante en la Tierra, aunque raramente presente en aguas naturales en concentraciones mayores a 10 o 100 mg/l, sin embargo, aguas con pH bajos pueden presentar valores más elevados (Hem 1985). La baja concentración en aguas con pH neutros es resultado de la química del elemento, además del bajo tiempo de residencia en aguas oceánicas. El aluminio se encuentra presente principalmente en rocas ígneas como los feldespatos, feldespatoides, micas y anfíboles. En procesos de solubilidad, el aluminio tiende a ser retenido en nuevas especies sólidas, las cuales pueden llegar a estar muy enriquecidas en aluminio. El Aluminio se encuentra, en forma mineral, en el hidróxido *gibbsita* ($\text{Al}(\text{OH})_3$), *nordstradita* y *bayerita*. En pH bajos, el aluminio tiende a precipitar en hidróxido-sulfato *aluminicos*, siendo las arcillas los sedimentos más enriquecidos en éstos minerales, como la *bauxita*. Las arcillas bauxíticas son materiales arcillosos compuestos principalmente por el mineral bauxita que corresponde a óxidos de aluminio hidratados (Al_2O_3). Estas arcillas son las de más alto contenido de alúminas en el país (hasta 50% de Al_2O_3), seguidas por las del grupo del caolín (entre 30 y 40%).

El catión Al^{3+} es predominante en aguas con pH menores a 4, pero en pH sobre el neutro, la forma disuelta predominante es el anión $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. En presencia de Fluorita, se puede presentar complejos como el AlF_2^{2+} y AlF_2^+ , cuyas concentraciones pueden ser de hasta unos cuantos miligramos por litro. El complejo AlSO_4^+ se puede formar ante la presencia de pH bajos y niveles elevados de sulfato. En niveles de pH neutro, los niveles de Aluminio en el agua pueden llegar a 1.0 mg/l en condiciones naturales.

Los principales yacimientos en explotación de arcillas comunes se localizan en la depresión central de las regiones Metropolitana a la de la Araucanía (Yacimientos Guanaco I, Guanaco II y Alfamatic), no obstante de existir en la región de Tarapacá, Atacama, y De los Lagos. En la región de Atacama los yacimientos principales se localizan en la Quebrada de Azapa (Yacimiento Casas Grandes) y en el sector de Pozo Almonte (Norte Pozo Almonte, Sur Pozo Almonte, Quebrada de Pasos).

Los únicos yacimientos que existen en el país son los ubicados en el sector de Montenegro, a unos 65 km al norte de Santiago, estos son: El Yal, La Paloma, Colitas, Andacollo, Tricolor y El Guindo.

Los Yacimientos de Caolín, corresponden a yacimientos primarios relacionados genéticamente con procesos hidrotermales y a procesos de meteorización o concentración residual. El caolín hidrotermal (el más ampliamente distribuido en el país) se concentra principalmente en las regiones de Atacama a la del Maule, tanto en la cordillera andina como la de la costa, relacionadas con zonas de alteración argílica intermedia a avanzada en rocas principalmente volcánicas intruídas por plutones graníticos. Se distribuyen en forma de una franja discontinua de afloramientos de dirección N-S. El Caolín producto de meteorización se distribuye de la región del Libertador Bernardo O'Higgins a la de la Araucanía y afecta a las rocas graníticas y metamórficas de la Cordillera de la Costa principalmente. En la región del Libertador Bernardo O'Higgins: sector Litueche-La Estrella, 140 km al SE de Santiago; en la región del Maule: entre Huelqui y Santa Juana (al menos dos yacimientos) y entre Nacimiento y Río Claro; en la región de la Araucanía: sector Lastarria. Existen también yacimientos de caolín de origen sedimentario y de menor interés económico, ubicados en el interior de la región de Tarapaca y Antofagasta, y en el litoral de la región de Antofagasta, Atacama y Coquimbo.

En general se registra producción desde la región de Atacama a la de la Araucanía para abastecer a Santiago, Concepción-Talcahuano y Valparaíso-Viña. Otra fuente importante de aluminio se encuentra en los alumbres, que consisten en una variedad de minerales de sulfatos dobles de aluminio, hierro, potasio, sodio, magnesio y otros, provenientes de la meteorización de alunitas. Los yacimientos se ubican prioritariamente en regiones áridas del norte, de la I a la III, y están compuestos por sulfato de aluminio hidratado (alunógeno) acompañado de sulfatos de hierro, magnesio y sodio.

9.2.4.1.12 Arsénico.

El arsénico se presenta principalmente en forma inorgánica, presentándose como *arsenato* (As^{5+}) o *arsenita* (As^{3+}). En aguas con pH entre 3 y 7 es común que predomine anión monovalente de arsénico H_2AsO_4^- , en cambio la forma divalente HAsO_4^{2-} es predominante en aguas con pH entre 7 y 11. En general la forma predominante de arsénico en aguas depende del diagrama pH-Eh. La adsorción por Hidróxidos de Hierro o la co-precipitación o combinación con sulfuros aparecen como los factores inorgánicos preponderantes para mantener la concentración de arsénico en niveles bajos en el agua.

La presencia natural de arsénico en aguas puede deberse a la presencia de aguas geotermales, en donde pueden presentarse valores de hasta 40 mg/l, o por la presencia de *Arsenopirita* (FeAsS), que está presente en rocas asociadas con oro, ya que la oxidación de este mineral en contacto con el aire puede liberar arsénico. La actividad antrópica es otro origen del arsénico en aguas subterráneas, ya que es un componente de pesticidas, que pueden drenar de depósitos de residuos o de terrenos agrícolas. Hem (1985) detalla que la concentración promedio de arsénico en aguas subterráneas bordea los 10 $\mu\text{g/l}$, en cambio B. Salbu & Steinnes (1995) establecen un promedio de 0.5 y 0.9 $\mu\text{g/l}$.

9.2.4.1.13 Cadmio.

En general el Zinc y el Cadmio presentan varias similitudes desde el punto de vista químico, aunque el cadmio es más abundante que el Zinc. El cadmio está presente en minerales de oro y zinc como la *esfalerita* (ZnS) (Hem, 1985). También puede presentarse como *Sulfuro de Zinc* (ZnS), mineral asociado a fuentes hidrotermales. También se asocia a rocas como la *pirita* (FeS_2) y la *Galena* (PbS)

En soluciones acuosas, el cadmio se presenta en forma disuelta divalente y forma complejos débiles con oxígeno y complejos fuertes con cloro y (sulfuro), siendo el ión Cd^{2+} la forma predominante en aguas con pH normales. El siguiente gráfico muestra el porcentaje de distribución de las especies de cadmio en función del pH del agua. Salbu & Steinnes (1995) establecen valores medios de concentración entre 0.03 y 0.1 $\mu\text{g/l}$, aunque lo anterior depende fundamentalmente de la especie predominante según las condiciones de pH, aunque también

establecen una relación entre el contenido de Zinc y el contenido de cadmio tal que por 1 µg/l. de zinc, el contenido de cadmio debe estar entre los 0.1 % y 5 % del contenido de zinc.

9.2.4.1.14 Cobalto.

La concentración de cobalto en la corteza terrestre es similar a la del litio. El ión de cobalto puede sustituir parte del ión de hierro en minerales de roca ferromagnética, y como el hierro, el cobalto también presenta dos estados de oxidación: 2+ y 3+. La coprecipitación o adsorción de cobalto por óxidos de magnesio y hierro son el principal factor de control sobre la concentración de cobalto en aguas naturales. En asociación con óxido de manganeso, el estado de oxidación del cobalto suele ser Co^{3+} , aunque la solubilidad de éste último es 10 o 100 veces menor que la actividad de disolución del óxido de manganeso, lo cual lo hace muy estable en aguas naturales, por lo que es razonable que en este tipo de aguas se encuentren no más de unos cuantos µg por litro (Chèry, 2006).

9.2.4.1.15 Cromo.

El Cromo presenta dos estados de oxidación, en rocas minerales el estado predominante de cromo es Cr^{3+} , aunque en forma disuelta, el estado de oxidación es de Cr^{6+} . En aguas oxidantes alcalinas los aniones de Cromo son estables. La fuente natural de cromo son las rocas ígneas ultramáficas como la *Cromita* (FeCr_2O_4), aunque su solubilidad es muy reducida.

El cromo se puede presentar en 6 especies estables en aguas, las formas reducidas: Cr^{3+} , CrOH^{2+} , $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ y $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$, en condiciones oxidantes las especies de cromo predominante son: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ y el cromato CrO_4^{2-} . En forma disuelta en sistemas reductores con pH entre 5 y 9 es probable encontrar las formas de CrOH^{2+} y $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$, siendo este último el dominante en aguas subterráneas (Salbu & Steinnes, 1995).

Las actividades antrópicas también constituyen una fuente de cromo, ya que desperdicios con contenido de aniones de cromo, como desechos de la industria textil, pueden contaminar el agua subterránea hasta valores de 14 mg/l (Long Island, N.Y., Hem. 1985), aunque el contenido de cromo en aguas naturales no supera los 10 µg/l (Hem, 1985), aunque Salbu & Steinnes (1995) establecen valores medios de concentración entre 0.2 y 1 µg/l.

9.2.4.1.16 Cobre.

El cobre puede encontrarse en dos niveles de oxidación en soluciones, Cu^{2+} o Cu^{1+} , aunque las condiciones redox en agua suficientemente oxigenadas favorecen las condiciones para la forma más oxidada (Cu^{2+}) (Hem, 1985). Complejos ligandos orgánicos naturales pueden formarse con el oxígeno, aunque dependiendo del pH (Salbu & Steinnes, 1995) se apreciarán diferentes especies en sistemas acuáticos, en particular la forma $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$ puede encontrarse en aguas con pH mayores a 6,5 en cambio en aguas con especies disueltas de CO_2 y condiciones aireadas, la especie predominante es CuCO_3 (pH mayores a 6,5), aunque para pH bajos, la forma predominante es la del ión Cu^{2+} aunque los aportes de cloruros y sulfatos es menor excepto en concentraciones elevadas de sulfatos (Salbu & Steinnes, 1995)

El origen geológico del cobre está asociado a minerales como los óxidos, *Cuprita* (Cu_2O), y los sulfuros, *Covelita* (CuS) y *Chalcosita* (Cu_2S). Además es posible encontrar otros sulfuros y óxidos de cobre asociados con hierro como la *Calcopirita* (CuFeS_2) y la *Bornita* (CuFeS_4), pero también es posible encontrar carbonatos como la *Azurita* ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) y la *Malaquita* ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$). El Origen antrópico del cobre se debe a la presencia de tuberías de cobre en condiciones de pH menores a 7, como también compuestos orgánicos e inorgánicos han sido utilizados en la agricultura como pesticidas, los cuales se infiltran a las aguas subterráneas.

Las concentraciones de cobre en aguas pueden variar desde unos cuantos $\mu\text{g/L}$ en aguas naturales, hasta unos cientos de mg/L en drenajes ácidos provenientes de minas de cobre (Salbu & Steinnes, 1995). En general la concentración de cobre en ríos y aguas subterráneas puede ser determinada a partir de los diagramas pH-Eh (Hem, 1985)

9.2.4.1.17 Plata.

Este es uno de los elementos menos presentes en rocas, como también en aguas naturales. La principal forma disuelta de plata es AgCl y puede co-precipitar con hidróxidos férricos, y según los diagramas pH-Eh, esta forma de plata limita la solubilidad de la plata a niveles no mayores de $10 \mu\text{g/l}$ en aguas naturales (Hem, 1985).

El origen geológico de este elemento puede estar en minerales como la *Argentita* (Ag₂S) y la *plata dulce* (AgCl), como también menas asociadas a minerales de Plomo, Plomo-Zinc, Cobre, Oro, Cobre Niquel. El origen antrópico de la plata se debe a su uso como desinfectante en aguas residuales y como yoduro de plata para “sembrar” las nubes.

En Chile existen un número importante de yacimientos de plata, destacando entre ellos Chañarillo, y se distribuyen en una franja angosta de 350 km de extensión, entre las latitudes 26°50'S (Yacimiento Tres Puntas) y 29°50'S (Distrito Arqueros), y dirección NNE. A 35 km al SE de Copiapó hay un área elíptica orientada al noroeste que contiene un grupo de yacimientos pequeños de plata entre ellos Elisa de Bordos y Lomas Bayas. Finalmente existen otros dos distritos argentíferos aislados: Caracoles en Antofagasta, que comprende varios yacimientos dentro de un área circular, y los distritos de Huantajaya y Santa Rosa de Iquique.

Existen también yacimientos con mezclas en proporciones variables de oro y plata, y subprovincias con ocurrencias de yacimientos de oro y de plata. Este último caso lo constituye una subprovincia de forma elíptica, elongada en dirección N-S, ubicada entre los 25°15'S y 26°S, y que contiene yacimientos de plata de cierta importancia como Cachiñal de la Sierra, Vaquillas y Juncal y el importante distrito aurífero Guanaco. A 120 km al este de Copiapó, a alturas superiores a 4000 m.s.n.m. existe un área prospectiva aurífera y argentífera, objeto de intensa exploración. Esta área es elongada de dirección N-S y abarca desde el Salar de Pedernales hasta la Laguna del Negro Francisco. Comprende los prospectos Esperanza, La Coipa, Marte, entre otros.

En el extremo sur del país existen yacimientos de importancia de plomo, zinc, plata y oro, destacándose El Toqui (70 km al NW de Puerto Aysén). Aproximadamente el 70 % de la producción de plata se obtiene como subproducto de la minería del cobre. Uno de los principales proyectos es el yacimiento La Coipa, destacándose también los proyectos es Marte y Faride.

9.2.4.1.18 Litio.

Litio es uno de los metales más raros en las aguas subterráneas, ya que su presencia no es producto de una meteorización o disolución de algún mineral. El origen geológico del litio es en minerales de rocas ígneas como la pegmatita. Entre estos minerales se encuentran el *espodumeno*

($\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$), *ambligonita* ($(\text{Li,Na})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{F,OH})$) y la *lepidolita* ($(\text{K}_2\text{Li}_3\text{Al}_3(\text{F,OH})_4(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}))$), pero de igual manera es posible encontrar litio en evaporitas y sales naturales, en particular para el caso de Chile.

En general se encuentra presente en las salmueras cloruradas de los depósitos salinos entre la región de Atacama y la de Tarapacá, siendo el Salar de Atacama el que posee la concentración más alta. El Salar de Pedernales y Salar de Maricunga poseen concentraciones considerables de Li para la explotación futura. Actualmente la Sociedad Chilena del Litio (SCL) se concentra en el Salar de Atacama en la producción de carbonato de litio y SOQUIMICH aumentará esta producción. En las fuentes termales las más altas concentraciones se registran en El Tatio (región de Antofagasta), Baños Laguna Santa Rosa (región Atacama) y Termas San Pedro o Teno (región del Maule). Las concentraciones asociadas a este elemento no supera el 1 $\mu\text{g/L}$

9.2.4.1.19 Manganeseo.

Aunque el manganeso es uno de los más abundantes elementos metálicos, solo existe un 15% como manganeso en la corteza terrestre. El manganeso, a diferencia de otros elementos, no es un elemento estructural esencial de ninguna roca de mineral de silicato, pero puede substituir al hierro, magnesio o al calcio en estructuras de silicato. La química del manganeso es similar a la del hierro, debido a que en ambientes propicios para la disolución, ambos metales participan en procesos redox. El manganeso tiene tres estados de oxidación: Mn^{2+} , Mn^{3+} y Mn^{4+} , siendo la forma menos oxidada la más estable de las tres.

El origen geológico del manganeso se da principalmente en rocas ígneas y metamórficas, en cuyos minerales el contenido de manganeso divalente es un constituyente menor. El manganeso es un constituyente significativo de rocas como el basalto y varios olivinos (*tephroita* (Mn_2SiO_4)), piroxenos y anfibolas. Una pequeña cantidad está presente en dolomita y la caliza sustituyendo al calcio. El silicato rodonita (MnCO_3) y rodocrosita (MnCO_3) son frecuentemente utilizados como gema en joyería. Generalmente el manganeso, posterior a un proceso de disolución, permanece en estable, aunque si se está en contacto con la atmósfera, precipitará si el pH es suficientemente alto, como óxido de manganeso 4+.

Bajo condiciones esperadas en aguas naturales el estado de manganeso disuelto más frecuente corresponderá al Mn^{2+} . El complejo hidróxido $MnOH^+$ será la principal forma del manganeso en aguas con pH superiores a 10.5, en cambio la forma aniónica será significativa si el pH es superior a 12. En presencia de concentraciones de bicarbonato superiores a 1000 mg/l la forma predominante de manganeso es $MnHCO_3$, en cambio en soluciones donde la actividad del sulfato es mayor a unos cientos de Mg/L, la forma predominante será $MnSO_4$. Ciertas especies de Mn^{3+} pueden ser estables en soluciones acidas, en cambio especies de Mn^{4+} ocurren de forma teórica en elevados pH.

En aguas subterráneas es posible encontrar concentraciones mayores a 1 mg/L bajo ciertas circunstancias, basadas fundamentalmente en los diagramas pH-Eh, altas concentraciones de hierro suelen acompañar a las de manganeso.

9.2.4.1.20 Molibdeno.

El molibdeno es un elemento más bien raro. Los estados de oxidación del molibdeno varían desde el estado Mo^{3+} a Mo^{6+} , siendo los más comunes en aguas los estados Mo^{4+} o Mo^{6+} . En condiciones oxidadas, el estado predominante es Mo^{6+} , bajo un pH 2, predomina las formas H_2MoO_4 . El ión $HMoO_4^-$ predomina en ambientes con pH entre 2 y 5, en cambio en ambientes con pH sobre 5 predomina la especie MoO_4^{2-} . Muchos de los elementos metálicos tienen molibdatos de baja solubilidad, ya que tienden a polimerizar, por lo que las concentraciones de molibdeno no superan los 10 $\mu g/L$. La solubilidad del molibdeno está controlada por diferentes mecanismos, destacando entre ellos la precipitación con metales comunes como metal molibdato.

Existen en el país diversos yacimientos que contienen este elemento contenido en el mineral de *molibdenita* (MoS_2), sin embargo la única fuente de importancia y en actual producción, son hasta ahora los pórfidos cupríferos, donde la molibdenita aparece como acompañante constante y característica de la mineralización de cobre. La producción de molibdeno ha cobrado gran importancia desde que se comenzó la explotación de molibdenita en la mina El Teniente (1939), y a partir de 1958 cuando se inició su obtención en Chuquicamata, yacimiento que contiene las mayores reservas y las de más alta ley en el país. Posteriormente se han incorporado otros pórfidos de cobre como son El Salvador y Andina, lo que ha derivado en un gran incremento en la producción (Chile es el segundo mayor productor mundial de molibdeno).

Los principales yacimientos de pórfidos cupríferos, fuente de la molibdenita en Chile, se distribuyen en una franja longitudinal, de dirección media norte-sur, algo sinuosa, que se extiende desde el límite con el Perú hasta los 38°45' latitud sur y que se desarrolla principalmente en la Cordillera de los Andes. Dentro del grupo de los pórfidos cupríferos chilenos, se destacan los dos yacimientos cupríferos mayores del mundo, Chuquicamata y El Teniente.

Aparte de los yacimientos de pórfidos cupríferos, pero dentro de la misma área donde éstos se ubican, existen otros yacimientos pequeños que contienen molibdenita: yacimiento Dos hermanos (interior de Arica), Copaquire (cercanías de Quebrada Blanca), El Bolsico (al sur de El Teniente), Mina Carrizo (noroeste de Santiago), Pupio de Caimanes (150 km al norte de Santiago). En el extremo sur del país, especialmente en la XI región, existen numerosas indicaciones de molibdenita.

9.2.4.1.21 Níquel.

El níquel es, en cierta forma, más abundante que el cadmio. En términos químicos, ambos elementos tienen similares características en el sentido de que ambos pueden substituir el hierro en rocas ígneas ferro magnesianas y tienden a co-precipitar con óxidos de hierro y especialmente con óxidos de magnesio. La especie química predominante en ambientes acuáticos es la especie divalente Ni^{2+} , aunque las especies presentes en el agua pueden variar en función del nivel de pH de la misma, ya que en ambientes con pH entre 6 y 7, la forma predominante es $NiSO_4$ (puede formar fuertes uniones con sulfuros), independiente del nivel de sulfuro en el agua, en cambio, en ambientes con pH mayores a 8, predomina la especie $NiCO_3$

El origen geológico del níquel en aguas subterráneas se debe a la disolución de óxidos, como la laterita (suelo oxidado con gran contenido de hierro y alúmina) y sulfuros, como la *pentlandita* ($(Fe,Ni)_9S_8$) y la *pirita* ($(Fe,Ni)_9S_8$) y rocas básicas y ultrabásicas como la serpentinita. Específicamente los minerales tipo laterítico, relacionados con el intemperismo (largo proceso químico desarrollado principalmente por medio de circulación de aguas) de estas rocas, son el potencial más grande de Ni conocido en el mundo, en comparación con otros tipos de menas

niquelíferas. Esto es porque las rocas ultrabásicas son muy inestables a las condiciones de intemperismo.

Diversos estudios realizados en sectores donde existen cuerpos de rocas ultrabásicos, indican efectivamente que la presencia de estas rocas, sumado al intemperismo característico en zonas lluviosas, como lo son las regiones del sur de Chile, concentran valores anómalos de níquel, cromo y cobalto principalmente.

La concentración de níquel en un grado importante del pH y de la presencia de óxidos de hierro y magnesio, en los cuales como se ha mencionado anteriormente, el níquel tiende a precipitar intercambiando el níquel por el hierro y el magnesio. En condiciones naturales, la especie $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (pH entre 8 y 9), es la especie más estable (Hem, 1985), por lo que en estas condiciones, las concentraciones de níquel no deben superar los 100 $\mu\text{g/L}$, aunque Salbu & Steinnes (1995) establecen valores medios de concentración entre 0.5 y 3 $\mu\text{g/l}$.

9.2.4.1.22 Plomo.

El Plomo es comparable, en términos de abundancia, con el cobalto, además de estar disperso ampliamente en la corteza terrestre, principalmente en rocas sedimentarias. Su baja movilidad natural se debe en parte a la baja solubilidad de hidróxidos carbonatados y fosfatados de plomo. El principal control de la concentración de plomo en aguas subterráneas es la co-precipitación de plomo con óxidos de magnesio.

La principal forma disuelta inorgánica presente en aguas subterráneas es el ión Pb^{2+} , complejos hidróxidos o complejos con iones de carbono, sulfato o fosfato. El origen geológico del plomo en aguas subterráneas se debe a la presencia de los siguientes minerales: Sulfuros, como la *galena* (PbS), Sulfatos, como *anglesita* (PbSO_4), carbonatos, como la *cerucita* (PbCO_3), ortofeldespatos en los cuales el plomo suele intercambiarse con otros cationes, y óxidos, como la *platnerita* (PbO_2).

En relación a las especies predominantes en aguas subterráneas, la presencia de cada especie dependerá de ciertos factores como la capacidad de solubilidad de los complejos que se formen entre los elementos, en particular los carbonatos PbCO_3 , los hidróxidos de carbonato

($\text{Pb}_3(\text{HO})_2(\text{CO}_3)_2$) y los sulfatos PbSO_4 limitan la solubilidad del plomo en el agua subterránea., así como también la posibilidad de que el plomo sea absorbido por diversas superficies o se co-precipite con los óxidos de magnesio.

Las concentraciones de plomo pueden variar desde 50 $\mu\text{g/L}$ en aguas con pH entre 7.5 y 8.5 con concentraciones de bicarbonato cercanas a 61mg/L (Hem, 1985), en cambio, Salbu & Steinnes (1995) establecen valores medios de concentración entre 0.08 y 0.5 $\mu\text{g/l}$.

9.2.4.1.23 Selenio.

La química del selenio es similar, en ciertos aspectos, a la del azufre, aunque el selenio es un elemento mucho menos común. El selenio presenta 4 estados de oxidación: Selenato (Se^{6+}), Selenita (Se^{4+}), selenio nativo (Se^0), seleniuro (Se^{2-}). En presencia de hierro puede co-precipitar con *pirita* o puede formar el mineral *ferroselita* (FeSe_2), las formas más oxidadas pueden ser absorbidas por oxihidróxidos férricos.

El origen geológico del selenio es debido a minerales poco comunes como la *ferroselita* (FeSe_2), la *claustalita* (PbSe), la *naumanita* (Ag_2Se) y la *berzelianita* (Cu_2Se). Así mismo, este mineral está asociado con menas de uranio. Al ser un elemento relativamente raro, las concentraciones de selenio en aguas naturales deberían ser bajas, Hem (1985) establece, en función de lo anterior, que las concentraciones de selenio en aguas subterráneas no deberían superar los 1 $\mu\text{g/L}$

9.2.4.1.24 Zinc.

Al igual que el cobre y el níquel, el zinc es igualmente abundante en la corteza terrestre, aunque la principal diferencia radica en el hecho de que el zinc posee un único estado de oxidación: Zn^{2+} , y tiende a ser substancialmente más soluble que los otros dos elementos.

Las especies predominantes en aguas subterráneas dependen del nivel de pH en las mismas, es por eso que a pH menores a 8, la especie predominante es el ión Zn^{2+} , en cambio a pH elevados, la especie predominante es ZnCO_3 , así como también, bajo ciertas circunstancias, la especie $\text{Zn}(\text{OH})^+$ y $\text{Zn}(\text{OH})_2$ si es que la presencia de carbonato es baja en aguas subterráneas, la especie ZnSO_4 es significativa para pH bajos.

Entre los factores que afectan la solubilidad del zinc en aguas subterráneas se encuentra el hecho de que en condiciones de pH entre 8 y 11, existe un equilibrio con la *willenita* (Zn_2SiO_4) (silicato de zinc), que mantendría niveles de concentración de zinc no mayores a 10 $\mu\text{g/L}$, como también la interacción con otras superficies minerales, en las cuales se producirían procesos de adsorción, intercambio iónico o co-precipitación, que limitarían la concentración de Zinc.

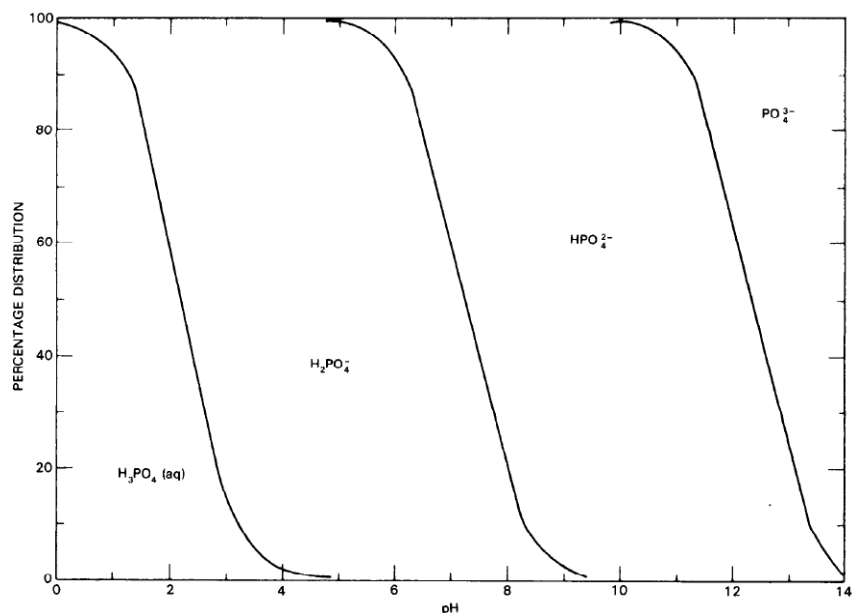
El origen geológico del zinc se debe a la existencia de minerales como el sulfuro *esfalerita* ((Zn,Fe)S), el óxido *zincita* o *cincita* (ZnO) y el carbonato *smithsonita* ($ZnCO_3$).

9.2.4.1.25 Fosfato.

El fósforo es un mineral común en rocas ígneas, como también en sedimentos. Los estados de oxidación del fósforo son P^{3+} , P^{4+} y P^{5+} , siendo este último (fosfato) la más significativa en aguas naturales. El origen geológico del fosfato se asocia al mineral de *apatita* ($Ca_5(PO_4)_3(Cl,F,OH)$), aunque también existen otros minerales fosfatados que contienen aluminio y hierro. Su uso como fertilizante puede aumentar la presencia de fosfato en las aguas que drenan desde terrenos agrícolas, aunque la baja movilidad del fosfato en suelos y sedimentos puede generar un efecto contrario.

El ión ortofosfato (PO_4^{3-}) es el producto final de la disociación del ácido fosfórico H_3PO_4 , la cual ocurre por pasos, pudiendo presentarse cuatro especies distintas como producto de la disociación: H_3PO_4 , $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} y PO_4^{3-} . La presencia de estas especies depende fundamentalmente del pH presente en el ambiente en el cual se desarrolle el proceso de disociación del ácido fosfórico, como lo muestra el siguiente gráfico:

Figura 9.8: Porcentaje de la actividad de las especies disueltas de fosfato como función del pH a 25°C y 1 Atm.



Fuente: Hem. (1985)

Los controles de solubilidad del fosfato más importantes están relacionados con la co-precipitación y la adsorción. Las concentraciones esperadas de fosfato en aguas subterráneas dependerán del tipo de sedimento que componen el acuífero, siendo los acuíferos calcáreos los de mayor concentración, 100 $\mu\text{g/L}$.

9.2.4.1.26 Boro.

El boro está presente en rocas ígneas, como la magmáticas y las metamórficas, principalmente en el mineral de *turmalina* $((\text{Na,Ca})(\text{Li,Mg,Al})-(\text{Al,Fe,Mn})_6(\text{BO}_3)_3-(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4)$, un mineral muy resistente a la degradación química y puede aparecer en sedimentos como también en rocas ígneas. Este mineral es un constituyente típico de rocas graníticas y pegmatitas, como también está presente en la biotita y en anfíboles. Otro origen del boro en aguas subterráneas tiene que ver con la presencia de depósitos evaporíticos, principalmente minerales como *colemanita* $(\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ y la *kernita* $(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$

El boro puede ser liberado en forma de gas bajo actividad volcánica en forma de ácido bórico $(\text{B}(\text{OH})_3)$ o como halogenido BF_3 , aunque dado que estas especies son aniónicas o sin carga, es poco probable que sean adsorbidos por alguna superficie mineral. El boro tiene la capacidad de formar una gran variedad de complejos e iones poliméricos, entre las especies hidróxido

monoméricas se incluye el ácido bórico, que es un ácido débil por lo que no se disocia, lo que implica que es la principal especie presente en aguas naturales. El complejo fluoborato ocurre cuando todo o parte del hidróxido presente en la especie $B(OH)_4^-$ es reemplazado por F^- . La concentración esperada en aguas subterráneas naturales no debe sobrepasar los 1 mg/l.

Los salares de la I y III región, presentan elevadas concentraciones de boratos que forman parte de la costra salina de éstos. Este elemento es posible encontrarlo en menor grado en algunas fuentes termales, particularmente Baños de Puchuldiza (I región), El Tatio (II región), Baños El Toro (IV región) y Baños de Puritama (II región).

Los salares actualmente explotados o paralizados son:

I: Salar Colpitas (explotado en el siglo pasado, actualmente paralizado), Salar Laguna Blanca (posible prospecto, discretas concentraciones de boratos) y Salar de Surire (el más importante y único en explotación por QUIBORAX principalmente).

II: Salar de Atacama (actualmente con plantas de SOQUIMICH y MINSAL), Salar de Ascotán, Salar de Carcote, Salar de Quisquiro (sin producción), Salar de Aguas Calientes (explotación esporádica), Salar de Punta Negra (paralizado).

III: Salar de Pedernales, Salar de Maricunga (paralizados).

Es importante destacar que en depósitos de nitratos ubicados en la I y II región existen concentraciones de boro de interés.

9.2.4.2 Síntesis Sólidos Disueltos.

Finalmente, y como un resumen de la información entregada anteriormente para cada uno de los elementos mencionados en la Tabla 9.4, se presenta un resumen con los rangos esperados en sistemas de aguas subterráneas:

Tabla 9.4: Rangos de concentración esperados en aguas subterráneas para los elementos mencionados

Rangos de Concentración	
µg/L	Elemento
> 1000	Ca, Cl, K, Mg, Na, S
1000-100	Al, Fe
100-10	B, N, P, Zn
10-1	Cu, Li, Mn
1-0,1	Ag, As, Co, Cr, Mo, Ni, Pb, Se,
0,1-0,01	Cd

Fuente: Salbu & Steinnes. (1995)

9.2.4.3 Valores Límite para Sólidos Disueltos Según Normativas Chilenas.

En Chile existen diversas normativas que regulan el contenido de los sólidos disueltos, así como también de otros parámetros físicos-químicos mencionados anteriormente, en el agua, dependiendo principalmente del uso que de ella se haga. Entre las normativas asociadas a la calidad del agua en Chile son las siguientes:

Nch. 1333/78: Norma de Calidad del agua para diferentes usos: Riego, Vida Acuática, Agua como Bebida Animal, Uso Recreativo y Estética

NCh. 409/2004: Norma de calidad de agua Potable

D.S. N° 46: Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas.

Las siguientes tablas detallan los valores límites establecidos por las diferentes normas para cada uno de los parámetros descritos en los puntos anteriores:

Tabla 9.5: Valores Límites de concentración para diferentes elementos considerados por Normas Chilenas e Internacionales.

NORMA		CHILE							INTERNACIONALES		
		Nch 409/1 2004	Nch 1333			D.S. N° 46		UE 98/83/CE 1998	USA EPA 2001	OMS	
			Bebida Humanos	Bebida animal	Riego	V. Baja	V. Media				
PARAMETRO	UNIDAD	LIMITE									
Parametros Fisicos	Color Verdadero	Pt-Co	20	20	20	-	-	-	APC + SCA	15	-
	Olor	-	Inodora	Inodora	Inodora	-	-	-	APC + SCA	-	acceptable
	Sabor	-	Insipida	Insipida	Insipida	-	-	-	APC + SCA	-	acceptable
Inorganicos	Amoniaco	mg/L	1,5	1,5	1,5	-	-	-	-	-	-
	Amónio	mg/L	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-
	Cloruro	mg/L	400	400	400	200	250	250	250	250	400
	pH	-	[6,5-85]	[6,5-85]	[6,5-85]	[5,5-9,0]	[6,5-8,5]	[6,0-8,5]	[6,5-9,5]	[6,5-85]	[6,0-8,0]
	Sulfato	mg/L	500	500	500	250	500	250	250	250	500
	SDT	mg/L	1500	1500	1500	-	-	-	-	500	1000
Orgánicos	Compuestos fenolicos	µg/L	2	2	2	-	-	-	-	-	-
	Turbiedad Maxima	UNT	20	20	20	-	-	-	-	5	5
	Aceites y Grasas	mg/L	-	-	-	-	10	10	-	-	-
	Benceno	mg/L	-	-	-	-	0,01	0,01	-	-	-
	Pentaclorofenol	mg/L	-	-	-	-	0,0009	0,0009	-	-	-
	Tetraclorofenol	mg/L	-	-	-	-	0,04	0,04	-	-	-
	Tolueno	mg/L	-	-	-	-	0,7	0,7	-	-	-
	Triclorometano	mg/L	-	-	-	-	0,2	0,2	-	-	-
Xileno	mg/L	-	-	-	-	0,5	0,5	-	-	-	
Elementos Quimicos Inorgánicos	Aluminio	mg/L	-	-	-	5	20	5	-	-	-
	Antimonio	mg/L	-	-	-	-	-	-	5	-	-
	Arsénico	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01 - 0,05
	Bario	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-
	Berilio	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-
	Boro	mg/L	-	-	-	0,75	3	0,75	-	-	-
	Cadmio	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	0,002	0,002	0,005	0,005	0,01
	Cianuro	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,2	0,2	0,2	0,05	0,2	-
	Cloruro	mg/L	-	-	-	-	250	250	-	-	-
	Cobalto	-	-	-	-	0,05	-	-	-	-	-
	Cobre	mg/L	2	2	2	0,2	3	1	2	1	-
	Cromo Total	mg/L	0,05	0,05	0,05	1	-	-	0,05	0,1	-
	Cromo Hexavalente	mg/L	-	-	-	-	0,2	0,05	-	-	-
	Fluoruro	mg/L	1,5	1,5	1,5	1	5	1,5	1,5	2	1,5
	Hierro	mg/L	0,3	0,3	0,3	5	10	5	0,2	0,3	0,4
	Litio	-	-	-	-	2,5	-	-	-	-	-
	Magnesio	mg/L	125	125	125	-	-	-	-	-	-
	Manganeso	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,2	2	0,3	0,05	0,05	0,5
	Mercurio	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001	0,001	0,001	0,002	-
	Molibdeno	mg/L	-	-	-	0,01	2,5	1	-	-	-
	Niquel	mg/L	-	-	-	0,2	0,5	0,2	-	-	-
	Nitrato	mg/L	50	50	50	-	-	-	50	10(**)	50
	Nitrito	mg/L	3	3	3	-	15(*)	10(*)	0,5	1(**)	3
Plata	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-	
Plomo	mg/L	0,05	0,05	0,05	5	0,05	0,05	0,01	0,015	0,01	
Selenio	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,05	-	
Sulfatos	mg/L	500	500	500	250	500	250	250	250	500	
Sulfuros	mg/L	-	-	-	-	5	1	-	-	-	
Vanadio	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	
Zinc	mg/L	3	3	3	2	20	10	-	5	-	
Nutrientes	Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/L	-	-	-	-	15	10	-	-	-

Fuente: Elaboración propia, Nch 409/1 2004, Nch 1333, D.S. N° 46, L. Codina (2008).

(*): Nitrato + Nitrito; (**) medido como Nitrógeno; APC: Aceptable para el consumidor; SCA: Sin Cambios Aparentes; “-“ Sin Registro Establecido.

9.3 ANEXO 2: TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE INTRUSIÓN SALINA

9.4 TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE INTRUSIÓN SALINA

Las técnicas de detección de la contaminación por intrusión salina se pueden clasificar en convencionales y no convencionales (Molina, 2006). Las primeras, se caracterizan por ser utilizadas frecuentemente en el estudio de aguas subterráneas, y corresponden a métodos físicos e hidroquímicos. Las técnicas no convencionales, en cambio, presentan un mayor desarrollo tecnológico que las técnicas convencionales, contribuyendo de manera eficaz en el estudio de la salinización de acuíferos en casos en que no se cuenta con captaciones o puntos de control construidos. Dichas técnicas corresponden a métodos de prospección geofísica y análisis isotópico (En éste último caso se requiere de pozos para realizar el análisis) (Molina, 2006).

Las metodologías utilizadas para detectar, definir y conocer la evolución de la intrusión salina en acuíferos costeros se dividen en dos áreas principales:

Detección de fenómenos de invasión de agua salina en los acuíferos salinos costeros.

Definición de la situación de la interfaz salina en sus tres dimensiones: Profundidad, Longitud y Ancho.

A continuación se detallan las técnicas de detección del problema de intrusión salina.

9.4.1 Técnicas Convencionales.

9.4.1.1 Métodos Físicos.

Entre los métodos físicos para detectar intrusión salina se encuentra el análisis de los niveles piezométricos del acuífero en cuestión. El análisis de los niveles piezométricos permiten caracterizar las líneas de flujo por medio de la identificación de las líneas equipotenciales de flujo, con lo cual se puede tener una idea del sentido del flujo subterráneo (Gradiente Hidráulico del Flujo), con lo cual se puede determinar los mecanismos de recarga del acuífero. Si el gradiente hidráulico es positivo en dirección al mar, implica que el problema de intrusión salina se encuentra controlado, ya que el flujo tiene a ir hacia el mar. En caso que el gradiente sea

negativo, es decir que los flujos sean desde el mar hacia el interior, el problema de la intrusión salina se podría estar intensificando. (Molina, 2006).

9.4.1.2 Métodos Hidrogeoquímicos.

La intrusión salina en acuíferos costeros genera modificaciones en las características físico-químicas de las aguas subterráneas, que se traducen en procesos de intercambio iónicos; que a su vez están fuertemente ligados a las características litológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio, ya que condicionan el comportamiento del acuífero al estar sometido al contacto con el frente de agua salada.

Los indicadores clásicos para detectar intrusión salina son los siguientes:

- Contenido ión Cloruro:

No se recomienda considerar exclusivamente este parámetro en la identificación del problema de intrusión salina, ya que los contenidos de sales disueltas en el agua subterránea pueden deberse a procesos diferentes, como lo son la infiltración desde la superficie por efectos de riego o precipitación, sales que son aportadas por los diferentes tipos de rocas dependiendo de su composición, condiciones climáticas, composición del agua de recarga, tiempo de contacto, longitud de recorrido, y permeabilidad, entre otros, influyen de forma importante y a veces dominante en las características de salinidad del acuífero.

- Relación Cloruro/Bicarbonato

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\frac{rCl^{-}}{rHCO_3^{-}} \quad 9.4$$

Donde rCl y $rHCO_3^{-}$ corresponde al contenido de Cloruro y bicarbonato en meq/L, y su valor en aguas continentales varía entre 0.1 y 5, en cambio en aguas de mar, este valor varía entre 20 y 50.

Este parámetro es ampliamente utilizado, ya que un incremento de las aguas salinas en la mezcla de aguas subterráneas implica un incremento del ión cloruro en la mezcla resultante. (Custodio & Llamas, 1996)

- Contenido de Bromuro:

En aguas dulces, el contenido de bromuro se encuentra por debajo de los 1 ppm, en cambio en agua de mar se encuentran niveles que bordean los 65 ppm. (Custodio & Llamas, 1996), lo que indica que, concentraciones mayores a las relacionadas con aguas dulces implican mezcla del aguas del acuífero con aguas salinas.

- Relación Cloruro Bromuro:

A pesar de ser un indicador de gran utilidad, el contenido de sales en las aguas debe ser considerable para que los contenidos de bromuro sean medibles con la adecuada precisión, y por lo tanto el indicador pueda entregar información relevante.

- Relación Magnesio Calcio.

Definida por la expresión:

$$\frac{rMg^{+2}}{rCa^{+2}} \qquad 9.5$$

Donde rMg y rCa representan las concentraciones en meq/L de ambos elementos. El valor de esta relación varía entre 0.2 y 1 para aguas continentales y en agua de mar presenta valores cercanos a 5. Éste indicador debe ser utilizado en conjunto con la relación cloruro/bicarbonato; ya que un incremento de la relación magnesio/calcio, acompañada de un incremento de la relación cloruro/bicarbonato son claros indicios de contaminación por intrusión salina (Custodio & Llamas, 1996).

- Otras Relaciones y Métodos Gráficos de Análisis.

Una relación que refleja el intercambio iónico que se da entre la fase de agua salina y la de agua dulce, y que está asociada al equilibrio entre los iones alcalinos y alcalinotérreos, la siguiente expresión permite analizar el equilibrio entre estos iones

$$\frac{r(Na + K)}{r(Ca + Mg)} \quad 9.6$$

Al producirse intrusión salina en un acuífero, el agua salina encuentra sedimentos en equilibrio con un agua de relación anterior en general menor; el agua salina cede iones alcalinos al terreno y acepta iones alcalinotérreos para tender a acercarse a la relación del aguadulce (Custodio & Llamas, 1996)

Métodos gráficos utilizados comúnmente son los Diagramas de Piper, Scatter, Stiff, así como también mapas de isocontenido. (Molina, 2006)

9.4.2 Técnicas no Convencionales.

9.4.2.1 Técnicas Geofísicas.

Estas técnicas tienen relación con la exploración o prospección de estructuras geológicas y de depósitos minerales realizada por medio de la medición de ciertas cantidades físicas, verificadas en la superficie del terreno como fenómenos que pueden ser interpretados por las leyes fundamentales de la física y el empleo de instrumentos adecuados. Dentro de éstas técnicas aplicables a detectar el problema de intrusión salina, se destacan los métodos de resistividad eléctrica y electromagnética en superficie.

La clasificación de los métodos geofísicos aplicables al problema de intrusión salina se puede realizar en función de la profundidad a la cual se desea investigar. De esto se desprende el hecho que para la prospección de no más de 50 a 60 metros, los métodos que presentan una buena respuesta ante una pequeña variación de la conductividad en el subsuelo corresponden a los

métodos electromagnéticos operando en el dominio de frecuencias. En cambio, los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) o perfiles de resistividad eléctrica son útiles para rangos de prospección mayores, aunque su limitada focalización a profundidades mayores limita su utilización a pequeñas distancias (Molina, 2006).

9.4.2.2 Métodos Isotópicos.

La utilización de las técnicas isotópicas permite identificar el mecanismo por el cual se produce el proceso de salinización, en particular para aquellos casos en que es necesario discriminar sobre el origen de la salinización, ya sea por procesos de intrusión salina, la existencia de aguas saladas congénitas o la infiltración y transporte desde la superficie en zonas de riego. La ventaja de los isótopos estables presentes en el agua es que por lo general no están sujetos a fenómenos modificadores en el flujo de agua subterránea, por lo que su composición química no varía y posibilitan una detección más directa del origen de la salinización del agua (Molina, 2006).

**9.5 ANEXO 3: GEOLOGÍA ZONA CUENCA DEL ACONCAGUA
BASADA EN Von Igel (1999)**

Edad Geológica	Formación	Rocas	Mineralogía	Formula Química	Catión/anión que se libera	
PALEOZOICO	Areniscas	Calizas	Cuarzo	SiO ₂	Si	
			Caolinita, Illita, Esmectita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (*)	Al, Si	
			Calcita	CaCO ₃	Ca, HCO ₃	
			Hematites	Fe ₂ O ₃	Fe	
			Cuarzo	SiO ₂	Si	
	JURÁSICO	Añjal	Rocas volcánicas basálticas alteradas ricas en sodio	Mineralogía	Formula Química	Catión/anión que se libera
				Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg, Fe, Al, Si
				Albita	NaAlSi ₃ O ₈	Na, Al, Si
				Plagioclasa	NaAlSi ₃ O ₈ / CaAlSi ₂ O ₈	Na, Ca, Al, Si
				Augita	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)
Olivino				(Mg,Fe)SiO ₄	Mg, Fe, Si	
Composición similar a las lavas querotofricas				-	-	
Composición similar a las lavas querotofricas				-	-	
Cuarzo				SiO ₂	Si	
Caolinita, Illita, Esmectita				Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (*)	Al, Si	
Cuarzo				SiO ₂	Si	
Caolinita, Illita, Esmectita				Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (*)	Al, Si	
Calcita				CaCO ₃	Ca, HCO ₃	
Cuarzo				SiO ₂	Si	
Cerro Calera				Lutitas	Calizas	Calcita
	Hematites	Fe ₂ O ₃	Fe			
	Cuarzo	SiO ₂	Si			
	Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anortita)	(90- 70) NaAlSi ₃ O ₈ + (10-30) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si			
	Andesina (70-50 Albita + 30 -50 Anortita)	(70- 50) NaAlSi ₃ O ₈ + (30-50) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si			
	Hornblenda	(Ca,Na) ₂ (Mg,Fe,Al) ₂ Si ₂ (Si,Al) ₂ O ₂₂ OH ₂	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)			
	Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg, Fe, Al, Si			
	Augita	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)			
	Labradorita (50-30 Albita + 50 -70 Anortita)	(50- 30) NaAlSi ₃ O ₈ + (50-70) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si			
	Plagioclasa	NaAlSi ₃ O ₈ / CaAlSi ₂ O ₈	Na, Ca, Al, Si			
	Augita	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)			
	Olivino	(Mg,Fe)SiO ₄	Mg, Fe, Si			
	Feldespato Alcalino	KAlSi ₃ O ₈ /NaAlSi ₃ O ₈	K, Na, Al, Si			
	Plagioclasa	NaAlSi ₃ O ₈ / CaAlSi ₂ O ₈	Na, Ca, Al, Si			
	Yeso Principal	-	Yeso			Cuarzo
Yeso				CaSO ₄ *2H ₂ O	Ca, SO ₄	

Edad Geológica	Formación	Rocas	Mineralogía	Formula Química	Catión/anión que se libera
Lo Prado	Calcilitas Negras	Caolinita, Illita, Esmectita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (*)	Al, Si	
		Cuarzo	SiO_2	Si	
		Calcita	$CaCO_3$	Ca, HCO ₃	
		Cuarzo	SiO_2	Si	
	Calcarenitas Grises	Caolinita, Illita, Esmectita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (*)	Al, Si	
		Calcita	$CaCO_3$	Ca, HCO ₃	
	Lavas Andesíticas	Oligoclasa (90-70 Albíta + 10-30 Anortita)	$(90-70) NaAlSi_3O_8 + (10-30) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si	
		Andesina (70-50 Albíta + 30-50 Anortita)	$(70-50) NaAlSi_3O_8 + (30-50) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si	
		Hornblenda	$(Ca, Na)_2(Mg, Fe, Al)_5Si_6(Si, Al)_2O_{22}OH_2$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)	
		Biotita	$K(Mg, Fe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$	K, Mg, Fe, Al, Si	
		Augita	$(Ca, Na)(Mg, Fe, Al)(Si, Al)_2O_6$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)	
		Augita	$(90-70) NaAlSi_3O_8 + (10-30) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si	
	Rocas volcánicas Lavas Andesíticas	Andesina (70-50 Albíta + 30-50 Anortita)	$(70-50) NaAlSi_3O_8 + (30-50) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si	
		Hornblenda	$(Ca, Na)_2(Mg, Fe, Al)_5Si_6(Si, Al)_2O_{22}OH_2$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)	
Biotita		$K(Mg, Fe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$	K, Mg, Fe, Al, Si		
Augita		$(Ca, Na)(Mg, Fe, Al)(Si, Al)_2O_6$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)		
Dacitas	Cuarzo	SiO_2	Si		
	Plagioclasa	$NaAlSi_3O_8 / CaAl_2Si_2O_8$	Na, Ca, Al, Si		
	Biotita	$K(Mg, Fe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$	K, Mg, Fe, Al, Si		
	Hornblenda	$(Ca, Na)_2(Mg, Fe, Al)_5Si_6(Si, Al)_2O_{22}OH_2$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)		
Veta Negra, Miembro Inferior Pure hue	Rocas Sedimentarias (*)	Composición similar a las lavas andesíticas y dacitas Plagioclasa Cálcica-Sódica	-	Na, Ca, Al, Si	
	Ocoitas	Piroxeno	$Ca(Mg, Fe)Si_2O_6$ $(Mg, Fe)_2Si_2O_6$	Ca, Mg, Fe, Si	
		Hornblenda	$(Ca, Na)_2(Mg, Fe, Al)_5Si_6(Si, Al)_2O_{22}OH_2$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)	
	Andesitas	Oligoclasa (90-70 Albíta + 10-30 Anortita)	$(90-70) NaAlSi_3O_8 + (10-30) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si	
		Andesina (70-50 Albíta + 30-50 Anortita)	$(70-50) NaAlSi_3O_8 + (30-50) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si	
		Hornblenda	$(Ca, Na)_2(Mg, Fe, Al)_5Si_6(Si, Al)_2O_{22}OH_2$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)	
		Biotita	$K(Mg, Fe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$	K, Mg, Fe, Al, Si	
	Areniscas	Augita	$(Ca, Na)(Mg, Fe, Al)(Si, Al)_2O_6$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)	
		Cuarzo	SiO_2	Si	
	Tobas (I)	Caolinita, Illita, Esmectita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (*)	Al, Si	
		Composición similar a las lavas andesíticas	-	-	
	Brechas (I)	Composición similar a las lavas andesíticas	-	-	
		Composición similar a las lavas andesíticas	-	-	

CRETÁCICO

Edad Geológica	Formación	Rocas	Mineralogía	Formula Química	Catión/anión que se libera
CRETÁCICO	Las Chilicas	Lavas Andesíticas	Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anorita)	(90-70) NaAlSi ₃ O ₈ + (10-30) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si
			Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anorita)	(70-50) NaAlSi ₃ O ₈ + (30-50) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si
		Lavas Basálticas	Hornblenda	(Ca,Na) ₂ (Mg,Fe,Al) ₂ Si ₆ (Si,Al) ₂ O ₇ (OH) ₂	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)
			Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg, Fe, Al, Si
			Augita	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)
		Brecchas Claras y Oscuras Tobas Rofizas	Labradorita (50-30 Albita + 50-70 Anorita)	(50-30) NaAlSi ₃ O ₈ + (50-70) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si
			Plagioclasa	NaAlSi ₃ O ₈ / CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Na, Ca, Al, Si
			Augita	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)
		Areniscas tobáceas	Olivino	(Mg,Fe)SiO ₄	Mg, Fe, Si
			Composición similar a las lavas andesíticas y Basálticas	-	-
	Lutitas Rojas	Composición similar a las lavas andesíticas y Basálticas	-	-	
		Quarzo	SiO ₂	Si	
	Calclutitas	Caolinita, Illita, Esmectita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (*)	Al, Si	
		Caolinita, Illita, Esmectita	SiO ₂	Si	
	Areniscas Calcareas	Quarzo	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (*)	Al, Si	
		Quarzo	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (*)	Al, Si	
	Introbrecchas Calcareas	Calcita	CaCO ₃	Ca, HCO ₃	
		Calcita	CaCO ₃	Ca, HCO ₃	
	Yeso	Restos de rocas volcánicas	-	-	
		Yeso	CaSO ₄ *2H ₂ O	Ca, SO ₄	
	Lavas Andesíticas	Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anorita)	(90-70) NaAlSi ₃ O ₈ + (10-30) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si	
		Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anorita)	(70-50) NaAlSi ₃ O ₈ + (30-50) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si	
	Brecchas Andesíticas	Hornblenda	(Ca,Na) ₂ (Mg,Fe,Al) ₂ Si ₆ (Si,Al) ₂ O ₇ (OH) ₂	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)	
Biotita		K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg, Fe, Al, Si		
Conglomerados Andesíticos	Augita	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)		
	Roca Volcano-Sedimentaria de composición similar a la lava andesítica	-	-		
	Roca Volcano-Sedimentaria de composición similar a la lava andesítica	-	-		

Edad Geológica	Formación	Rocas	Mineralogía	Formula Química	Catión/anión que se libera																																
Salamanca	Lavas Andesíticas	Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anorita)	Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anorita)	$NaAlSi_3O_8 + (10-30) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si																																
						Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anorita)	Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anorita)	$NaAlSi_3O_8 + (30-50) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si																												
										Hornblenda	Hornblenda	$(Ca,Na)_2(Mg,Fe,Al)_2Si_2O_7 \cdot 2OH_2$	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)																								
														Biotita	Biotita	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$	K, Mg, Fe, Al, Si																				
																		Augita	Augita	$(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al)_2O_6$	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)																
																						Roca Volcano-Sedimentaria de composición similar a la lava andesítica	Roca Volcano-Sedimentaria de composición similar a la lava andesítica	-	-												
																										Conglomerados Andesíticos	Felspatos Alcalinos	$KAlSi_3O_8 / NaAlSi_3O_8$	K, Na, Al, Si								
																														Tobacea-ignimbrita Riolla	Cuarzo	SiO ₂	Si				
																																		Dacitas	Plagioclasa	$NaAlSi_3O_8 / CaAlSi_3O_8$	Na, Ca, Al, Si
Plagioclasa	Plagioclasa	$NaAlSi_3O_8 / CaAlSi_3O_8$	Na, Ca, Al, Si																																		
				Biotita	Biotita	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$	K, Mg, Fe, Al, Si																														
								Hornblenda	Hornblenda	$(Ca,Na)_2(Mg,Fe,Al)_2Si_2O_7 \cdot 2OH_2$	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)																										
												Lavas Andesíticas	Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anorita)	$NaAlSi_3O_8 + (10-30) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si																						
																Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anorita)	Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anorita)	$NaAlSi_3O_8 + (30-50) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si																		
																				Hornblenda	Hornblenda	$(Ca,Na)_2(Mg,Fe,Al)_2Si_2O_7 \cdot 2OH_2$	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)														
																								Biotita	Biotita	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$	K, Mg, Fe, Al, Si										
																												Augita	Augita	$(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al)_2O_6$	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)						
																																Lavas Basálticas	Labradorita (50-30 Albita + 50-70 Anorita)	$NaAlSi_3O_8 + (50-70) CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na, Al, Si		
																																				Plagioclasa	Plagioclasa
Augita	Augita	$(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al)_2O_6$	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si, Al)																																		
				Olivino	Olivino	$(Mg,Fe)SiO_4$	Mg, Fe, Si																														
								Gravas	Gravas	-	-																										
												Ripios	Ripios	-	-																						
																Arena	Arena	-	-																		

CRETÁCICO

Edad Geológica	Formación	Rocas	Mineralogía	Formula Química	Catión/anión que se libera	
Rocas Intrusivas, edad Paleozoica	Cochoa	Granodioritas	Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anortita)	(70-50) NaAlSi ₃ O ₈ + (30-50) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si	
			Feldespato Potásico	NaAlSi ₃ O ₈	Na, Al, Si	
			Cuarzo	SiO ₂	Si	
			Hornblenda	(Ca,Na) ₂ (Mg,Fe,Al) ₂ Si ₄ (Si,Al) ₂ O ₇ ·OH ₂	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si,Al)	
			Biotita	K(Mg,Fe) ₂ AlSi ₂ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg, Fe, Al, Si	
			Esfena	CaTiO(SiO ₄)	Ca, Ti, Si	
			Apatito	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	Ca, PO ₄ , Fe, Cl	
			Magnetita	Fe ₃ O ₄	Fe	
			Feldespato Potásico	KAlSi ₃ O ₈	K, Al, Si	
			Cuarzo	SiO ₂	Si	
			Plagioclasa	NaAlSi ₃ O ₈ / CaAlSi ₃ O ₈	Na, Ca, Al, Si	
			Filones maficos	Menas con alto contenido de Hierro y bajo contenido de Sílice	Fe, Si	
			Diorita	Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anortita)	(90-70) NaAlSi ₃ O ₈ + (10-30) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si
				Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anortita)	(70-50) NaAlSi ₃ O ₈ + (30-50) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si
Hornblenda	(Ca,Na) ₂ (Mg,Fe,Al) ₂ Si ₄ (Si,Al) ₂ O ₇ ·OH ₂	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si,Al)				
Piroxeno	Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆	Ca, Mg, Fe, Si				
Biotita	K(Mg,Fe) ₂ AlSi ₂ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg, Fe, Al, Si				
Piroxeno	Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆	Ca, Mg, Fe, Si				
Cuarziferas de Piroxeno y/o Anfibola	Ca ₂ (Mg,Fe)Al ₂ AlSi ₂ O ₂₂ [OH] ₂	Ca, Mg, Fe, Al, Si				
Anfibol (Hornblenda)	(70-50) NaAlSi ₃ O ₈ + (30-50) CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca, Na, Al, Si				
Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anortita)	NaAlSi ₃ O ₈	Na, Al, Si				
Feldespato Potásico	SiO ₂	Si				
Cuarzo	(Ca,Na) ₂ (Mg,Fe,Al) ₂ Si ₄ (Si,Al) ₂ O ₇ ·OH ₂	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si,Al)				
Biotita	K(Mg,Fe) ₂ AlSi ₂ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg, Fe, Al, Si				
Esfena	CaTiO(SiO ₄)	Ca, Ti, Si				
Apatito	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	Ca, PO ₄ , Fe, Cl				
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Fe				
Super Unidad Muncha	Monzodiorita de hiperstena y biotita	Granodioritas	KAlSi ₃ O ₈	K, Al, Si		
		Feldespato Potásico	Ca, Na, Al, Si			
		Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anortita)	K, Mg, Fe, Al, Si			
		Biotita	Mg, Fe, Si			
		Hiperstena	Na, Ca, Al, Si			
		Plagioclasa	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al) ₂ (Si,Al) ₂ O ₆	(Ca,Na), (Mg,Fe,Al), (Si,Al)		
		Augita	Mg, Fe, Si			
		Hiperstena	Mg, Fe, Si			
		Olivino	Mg, Fe, Si			
		Piroxeno	Ca, Mg, Fe, Si			
		Feldespato Potásico	KAlSi ₃ O ₈	K, Al, Si		
		Albita	Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	Na, Al, Si		
		Cuarzo	SiO ₂	Si		
		Feldespato Potásico	KAlSi ₃ O ₈	K, Al, Si		
Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anortita)	Ca, Na, Al, Si					
Albita	Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	Na, Al, Si				
Biotita	K(Mg,Fe) ₂ AlSi ₂ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg, Fe, Al, Si				
Piroxeno	Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆	Ca, Mg, Fe, Si				
Feldespato Potásico	(Mg,Fe) ₂ Si ₂ O ₆	Ca, Mg, Fe, Si				
Albita	KAlSi ₃ O ₈	K, Al, Si				
Cuarzo	SiO ₂	Si				
Plagioclasa	NaAlSi ₃ O ₈ / CaAlSi ₃ O ₈	Na, Ca, Al, Si				
Jurásico	Tonallias	Granodioritas	NaAlSi ₃ O ₈	Na, Ca, Al, Si		
		Biotita	Si			
		Esfena	Ca, Al, Si			
		Apatito	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
		Magnetita	K, Mg, Fe, Al, Si			
		Feldespato Potásico	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
		Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anortita)	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
		Biotita	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
		Hiperstena	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
		Olivino	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
		Piroxeno	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
		Feldespato Potásico	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
		Albita	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
		Cuarzo	Ca, Mg, Fe, Al, Si			
Plagioclasa	Ca, Mg, Fe, Al, Si					

Edad Geológica	Formación	Rocas	Mineralogía	Formula Química	Catión/anión que se libera		
Cretaceo	Super Unidad Illapel	Gabbros	Plagioclasa	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 / \text{CaAlSi}_2\text{O}_8$	Na, Ca, Al, Si		
			Augita	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)		
			Hiperstena	$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$	Mg, Fe, Si		
		Diorita	Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anortita)	$(90-70) \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + (10-30) \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Ca, Na, Al, Si		
			Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anortita)	$(70-50) \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + (30-50) \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Ca, Na, Al, Si		
			Hornblenda	$(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_2\text{Si}_4(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_{10} \cdot \text{OH}_2$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)		
			Proxeno	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$	Ca, Mg, Fe, Si		
			Biotita	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Ca, Mg, Fe, Si		
		Senogranitos	Feldespato Potásico	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	K, Mg, Fe, Al, Si		
			Albita	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	K, Al, Si		
			Cuarzo	SiO_2	Na, Al, Si		
		Monzonita	Plagioclasa	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 / \text{CaAlSi}_2\text{O}_8$	Na, Ca, Al, Si		
			Feldespato Potásico	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Na, Al, Si		
		Cretaceo-paleogena	Unidad Fyedes	filones andesíticos	Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anortita)	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)
					Plagioclasa	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 / \text{CaAlSi}_2\text{O}_8$	Na, Ca, Al, Si
Augita	$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$				Mg, Fe, Si		
Gabbros de Anfibola	Hiperstena			$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$	Mg, Fe, Si		
	Andesina (70-50 Albita + 30-50 Anortita)			$(70-50) \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + (30-50) \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Ca, Na, Al, Si		
Granodioritas	Feldespato Potásico			$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Na, Al, Si		
	Cuarzo			SiO_2	Si		
	Hornblenda			$(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_2\text{Si}_4(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_{10} \cdot \text{OH}_2$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)		
	Biotita			$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	K, Mg, Fe, Al, Si		
	Esfena			$\text{CaTiO}(\text{SO}_4)$	Ca, Ti, Si		
Tonalitas	Apaito			$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2(\text{Fe}, \text{Cl}, \text{OH})$	Ca, PO ₄ , Fe, Cl		
	Magnetita			Fe_3O_4	Fe		
	Cuarzo			SiO_2	Si		
Monzodiorita	Plagioclasa			$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 / \text{CaAlSi}_2\text{O}_8$	Na, Ca, Al, Si		
	Feldespato Potásico			KAlSi_3O_8	K, Al, Si		
	Oligoclasa (90-70 Albita + 10-30 Anortita)	$(90-70) \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + (10-30) \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Ca, Na, Al, Si				
Monzogramitos de hornblenda	Feldespato Potásico	KAlSi_3O_8	K, Al, Si				
	Albita	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	Na, Al, Si				
	Cuarzo	SiO_2	Si				
Monzogramitos de biotita	Hornblenda	$(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_2\text{Si}_4(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_{10} \cdot \text{OH}_2$	(Ca, Na), (Mg, Fe, Al), (Si, Al)				
	Feldespato Potásico	KAlSi_3O_8	K, Al, Si				
	Albita	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	Na, Al, Si				
Monzogramitos de biotita	Cuarzo	SiO_2	Si				
	Biotita	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	K, Mg, Fe, Al, Si				

