

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

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

REALIZADO POR:

Departamento de Conservación y Protección de Recursos
Hídricos (DCPRH)

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

S.D.T. N° 397

SANTIAGO, MAYO 2017

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

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

**Profesionales participantes
Diego San Miguel Cornejo
Heriberto Moya Gutierrez**

**Estudiantes colaboradores
Gabriel Fernández Saavedra**

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS	v
LISTADO DE TABLAS	ix
I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	3
III. OBJETIVOS	4
III.1. OBJETIVO GENERAL	4
III.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
IV. ANTECEDENTES DEL MEDIO FÍSICO	4
IV.1. FISIOGRAFIA	4
IV.2. SUELOS	5
IV.3. HIDROLOGIA	5
IV.4. GEOLOGIA	6
IV.4.1. GENERALIDADES	6
IV.4.2. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA POR SECTOR ACUÍFERO	7
IV.4.2.1. Geología área Acuífero Los Choros	9
IV.4.2.2. Geología área Acuífero Elqui	9
IV.4.2.3. Geología área Acuífero Culebrón-Lagunillas	10
IV.4.2.4. Geología área Acuífero Limarí	11
IV.4.2.5. Geología área Acuífero Choapa	11
IV.4.2.6. Geología área Acuífero Quilimarí	12
IV.4.3. GEOLOGÍA ECONÓMICA REGIONAL	13
IV.4.3.1. Franja Metalogénica del Cretácico Inferior	17
IV.4.3.2. Franja Metalogénica del Cretácico Superior	18
IV.4.3.3. Franja Metalogénica del Neógeno	19
IV.5. HIDROGEOLOGIA	20
IV.5.1. HIDROGEOLOGÍA REGIONAL	20
IV.5.1.1. Subprovincia de Valles Transversales	21
IV.5.1.2. Subprovincia de Cuencas Costeras Exorreicas	21
IV.5.2. DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA POR ACUÍFERO	24
IV.5.2.1. Hidrogeología Acuífero Los Choros	27

IV.5.2.2.	Hidrogeología Acuífero Elqui.....	35
IV.5.2.3.	Hidrogeología Acuífero Culebrón-Lagunillas.....	40
IV.5.2.4.	Hidrogeología Acuífero Limarí.....	47
IV.5.2.5.	Hidrogeología Acuífero Choapa	56
IV.5.2.6.	Hidrogeología Acuífero Quilimarí	63
IV.6.	VULNERABILIDAD DE ACUIFEROS.....	68
IV.6.1.	VULNERABILIDAD ACUÍFERO LOS CHOROS.....	70
IV.6.2.	VULNERABILIDAD ACUÍFERO ELQUI	71
IV.6.3.	VULNERABILIDAD ACUÍFERO CULEBRÓN LAGUNILLAS.....	72
IV.6.4.	VULNERABILIDAD ACUÍFERO LIMARÍ	73
IV.6.5.	VULNERABILIDAD ACUÍFERO CHOAPA.....	74
IV.6.6.	VULNERABILIDAD ACUÍFERO QUILIMARÍ	75
IV.7.	USOS Y PRESIONES SOBRE EL AGUA - POSIBLES FUENTES CONTAMINANTES DE CARÁCTER ANTRÓPICO	76
V.	METODOLOGÍA.....	78
V.1.	SELECCIÓN DE POZOS PARA MUESTREO.....	78
V.2.	SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS.....	79
V.3.	USO DE EQUIPOS Y MATERIALES.....	80
V.4.	METODOLOGÍAS ANALÍTICAS.....	81
V.5.	SELECCIÓN DEL PERÍODO Y FRECUENCIA DE MUESTREO	82
V.6.	PREPARACIÓN DEL TRABAJO EN TERRENO	82
V.7.	ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS QUÍMICOS.....	83
V.8.	MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFERO SEGÚN ÍNDICE DE CALIDAD	84
V.8.1.	ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA.....	85
V.8.2.	CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD	87
V.8.2.1.	Índice de calidad individual	88
V.8.2.2.	Cálculo del IC general	89
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	92
VI.1.	DATOS REGISTRADOS EN TERRENO	92
VI.1.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES EN TERRENO Y LABORATORIO	92
VI.1.2.	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y PROFUNDIDADES	96
VI.1.2.1.	GENERALIDADES SOBRE DATOS DE TERRENO-	96

VI.1.2.2.	DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO LOS CHOROS.....	100
VI.1.2.3.	DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO ELQUI.....	104
VI.1.2.4.	DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO CULEBRON – LAGUNILLAS.....	109
VI.1.2.5.	DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO LIMARÍ.....	112
VI.1.2.6.	DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO CHOAPA.....	118
VI.1.2.7.	DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO QUILIMARÍ	123
VI.1.2.8.	DATOS DE TERRENO DE POZOS SIN ACUÍFERO DEFINIDO	127
VI.3.	CALIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS	129
VI.4.	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS	130
VI.4.1.	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS ACUÍFERO LOS CHOROS	132
VI.4.2.	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS ACUÍFERO ELQUI	134
VI.4.3.	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS ACUÍFERO CULEBRON – LAGUNILLAS	136
VI.4.4.	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS DE ACUÍFERO LIMARÍ	138
VI.4.5.	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS DE ACUÍFERO CHOAPA.....	141
VI.4.6.	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS DE ACUÍFERO QUILIMARÍ	143
VI.4.7.	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS SIN ACUÍFERO DEFINIDO.....	145
VI.5.	CONCENTRACIONES QUÍMICAS ESPECÍFICAS Y COMPARACIÓN CON NORMAS	146
VI.5.1.	LIMITES DE DETECCIÓN	146
VI.5.2.	RESUMEN DE RESULTADOS POR ACUÍFERO.....	147
VI.5.3.	RESUMEN DE RESULTADOS COMPARADOS CON NORMAS NCh409 y NCh133	154
VI.5.4.	NITRATO	156
VI.5.5.	SULFATO	158
VI.5.6.	CLORURO.....	159
VI.5.7.	CALCIO.....	161
VI.5.8.	MAGNESIO.....	163
VI.5.9.	SOLIDOS DISUELTOS TOTALES.....	164
VI.5.10.	ARSENICO	¡Error! Marcador no definido.
VI.5.11.	HIERRO	167
VI.5.12.	MANGANESO.....	175
VI.5.13.	PLOMO	180
VI.5.14.	COMPARACION CON NORMA NCh 409 (AGUA POTABLE).....	185
VI.5.15.	COMPARACION CON NORMA NCh 1333 (AGUA DE RIEGO)	188

VII.	CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS.....	196
VII.1.	SELECCIÓN DE PARÁMETROS LOCALES.....	196
VII.1.1.	OCURRENCIA NATURAL CARACTERIZACIÓN DE POSIBLES CONTAMINANTES DE ORIGEN NATURAL	197
VII.1.2.	CARACTERIZACIÓN DE POSIBLES CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTRÓPICO	198
VII.1.3.	PARAMETROS LOCALES POR ACUIFERO.....	199
I.1.1.1.	HIERRO	200
I.1.1.2.	MANGANESO.....	200
I.1.1.3.	PLOMO	201
VII.2.	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD POR APR	201
VII.2.1.	ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO LOS CHOROS.....	205
VII.2.2.	ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO ELQUI.....	206
VII.2.3.	ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO CULEBRÓN-LAGUNILLAS	207
VII.2.4.	ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO LIMARÍ	207
VII.2.5.	ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO CHOAPA.....	212
VII.2.6.	ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO QUILIMARÍ	214
VII.2.7.	ÍNDICE DE CALIDAD POZOS SIN ACUÍFERO DEFINIDO.....	214
VIII.	CONCLUSIONES	215
IX.	RECOMENDACIONES	216
X.	BIBLIOGRAFIA.....	220

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Fuente de Información Geológica. Todas las fuentes corresponden a publicaciones del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).	8
Figura 2: Distribución depósitos metalíferos por Recurso. (SERNAGEOMIN 2014).....	14
Figura 3: Representación de la ubicación aproximada de las diferentes épocas - franjas metalogénicas en los Andes Chilenos. Se puede observar como el arco magmático ha migrado progresivamente hacia el Este desde el Jurásico a la actualidad.....	16
Figura 4: Distribución de Yacimientos agrupados en la franja Metalogénica del Cretácico Temprano	17
Figura 5: Distribución de Yacimientos agrupados en la franja Metalogénica del Cretácico Superior.	18
Figura 6: Distribución de Yacimientos agrupados en la franja Metalogénica del Neógeno (Mioceno – Plioceno).....	19
Figura 7: Mapa Hidrogeológico de Chile. Modificado de DGA (1986a). Leyenda en Figura 8.	22
Figura 8: Leyenda Figura 7 (DGA, 1986a).....	23
Figura 9: Área total por acuífero, Región de Coquimbo (elaboración propia).....	24
Figura 10: Área total por cada sector acuífero (elaboración propia).....	25
Figura 11: Distribución de Acuíferos de región de Coquimbo y pozos APR de muestreo. Elaboración propia.	26
Figura 12: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca de Quebrada Los Choros, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo 2. Elaboración propia	27
Figura 13: Distribución de relleno acuífero de Los Choros (DGA 2004).....	29
Figura 14: Grado de afección a la calidad de las aguas según distribución espacial (DGA, 2005)....	34
Figura 15: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca de río Elqui, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo 2. Elaboración propia.	36
Figura 16: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca de Pan de Azúcar, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo 2. Elaboración propia.	41
Figura 17: Perfil transversal a modo de ilustración de unidades hidrogeológicas de acuífero culebrón-lagunillas (DGA 1998)	43
Figura 18: Curvas de Isopermeabilidad de Acuífero Culebrón - Lagunillas (DGA, 1998).	45
Figura 19: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca del río Limarí, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo 2. Elaboración propia.	48
Figura 20: Curvas equipotenciales y dirección del flujo de agua subterránea (DGA, 2008).....	50
Figura 21: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca del río Choapa, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo2. Elaboración propia.	57
Figura 22: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca del río Quilimarí , y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo2. Elaboración propia.	64

Figura 23: Vulnerabilidad acuífero Los Choros. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).....	70
Figura 24: Vulnerabilidad acuífero Elqui. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).....	71
Figura 25: Vulnerabilidad acuífero Culebrón Lagunillas. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).	72
Figura 26: Vulnerabilidad acuífero Limarí. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).....	73
Figura 27: Vulnerabilidad acuífero Choapa. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).....	74
Figura 28: Vulnerabilidad acuífero Quilimarí . Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).....	75
Figura 29: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas.....	78
Figura 30: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.....	84
Figura 31: Esquema y diagrama de flujo de metodología de calculo de Indice de Calidad de aguas subterranas (modificado de DGA, 2009).....	87
Figura 32: Cálculo de índice de calidad mediante interpolación lineal entre clases.	89
Figura 33: Pozos estudiados por provincia, Región de Coquimbo.	93
Figura 34: Pozos estudiados por Comuna, Región de Coquimbo	93
Figura 35: Pozos estudiados por acuífero, Región de Coquimbo.....	94
Figura 36: Pozos estudiados por sector acuífero, Región de Coquimbo.SA: Sin Acuífero definido..	95
Figura 37: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de la Región de Coquimbo.	97
Figura 38: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de la Región de Coquimbo	98
Figura 39: Conductividad Eléctrica de muestras de aguas extraídas de pozos APR de la Región de Coquimbo	99
Figura 40: Izquierda: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Los Choros.....	100
Figura 41: Derecha: Profundidad y Nivel Dinámico Pozos APR acuífero Los Choros.....	100
Figura 42: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Los Choros, Región de Coquimbo	101
Figura 43: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Los Choros, la Región de Coquimbo	102
Figura 44: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Los Choros. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.....	103
Figura 45: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Elqui	104
Figura 46: Profundidad y Nivel Dinámico Pozos APR acuífero Elqui	105

Figura 47: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Elqui, Región de Coquimbo	106
Figura 48: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Elqui, la Región de Coquimbo	107
Figura 49: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Elqui. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.....	108
Figura 50: Izquierda: profundidad y nivel estático pozos APR acuífero Culebrón-Lagunillas	109
Figura 51: Derecha: profundidad y nivel dinámico pozos APR acuífero Culebrón-Lagunillas	109
Figura 52: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Culebrón-Lagunilla.	110
Figura 53: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Culebrón - Lagunillas, la Región de Coquimbo	111
Figura 54: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Culebrón-Lagunillas. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.	112
Figura 55: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Limarí	113
Figura 56: Profundidad y nivel dinámico pozos APR acuífero Limarí.....	114
Figura 57: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Limarí, Región de Coquimbo.	115
Figura 58: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Limarí, la Región de Coquimbo	116
Figura 59: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Limarí. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.....	117
Figura 60: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Choapa	118
Figura 61: Profundidad y Nivel Dinámico Pozos APR acuífero Choapa.....	119
Figura 62: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Choapa, Región de Coquimbo	120
Figura 63: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Choapa, la Región de Coquimbo.	121
Figura 64: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Choapa. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.....	122
Figura 65: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Quilimarí	123
Figura 66: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Quilimarí	123
Figura 67: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Quilimarí , Región de Coquimbo	124
Figura 68: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Quilimarí , la Región de Coquimbo	125
Figura 69: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Quilimarí . Rangos en base a Norma de riego NCh1333.....	126
Figura 70: Izquierda: profundidad y nivel estático pozos APR Sin acuífero definido.....	127
Figura 71: Derecha: profundidad y nivel dinámico pozos APR Sin acuífero definido	127
Figura 72: Distribución Porcentual de Error de Balance Iónico. Muestras de Pozos APR estudiados de la Región de Coquimbo.	129

Figura 73: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Los Choros.....	132
Figura 74: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Los Choros ilustrado mediante diagramas de Stiff. Se incluye pozo 105-CALETA HORNOS, que no pertenece a este acuífero.....	133
Figura 75: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Elqui.....	134
Figura 76: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Elqui ilustrado mediante diagramas de Stiff.....	135
Figura 77: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Culebrón - Lagunillas.....	136
Figura 78: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Culebrón-Lagunillas ilustrado mediante diagramas de Stiff	137
Figura 79: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Limarí.....	138
Figura 80: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Limarí ilustrado mediante diagramas de Stif.....	139
Figura 81: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Choapa.	141
Figura 82: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Choapa ilustrado mediante diagramas de Stiff. Se incluye pozo 20-CAIMANES, que no se pertenece este acuífero.	142
Figura 83: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Quilimarí	143
Figura 84: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Quilimarí ilustrado mediante diagramas de Stiff.....	144
Figura 85: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados sin acuífero definido.....	145
Figura 86: Concentración de Nitrato en pozos APR estudiados en Región de Coquimbo, Se destacan áreas con posible contaminación difusa.	157
Figura 87: Concentración de sulfato su en pozos APR estudiados en Región de Coquimbo. Se destacan áreas con posible contaminación difusa.	158
Figura 88: Concentración de cloruro su en pozos APR estudiados en Región de Coquimbo. Se destacan áreas con posible contaminación difusa.....	160
Figura 89: Concentración de Calcio en pozos APR estudiados de región de Coquimbo, Se encierra en una circunferencia las áreas con concentraciones elevadas	162
Figura 90: Concentración de Magnesio en pozos APR estudiados de región de Coquimbo, Se encierra en una circunferencia las áreas con concentraciones elevadas.	163
Figura 91: Concentración de Solidos Disueltos Totales en aguas crudas de pozos APR región de Coquimbo. Categorizado en base a clasificación de índice de calidad (ver más adelante).	164
Figura 92: Concentración de Solidos Disueltos Totales en aguas crudas de pozos APR región de Coquimbo. Categorizado según rangos de salinidad de aguas en función de su manejo y usos descrito en norma NCh1333 para aguas de riego (ver más adelante).....	165
Figura 93: Concentraciones de Arsénico en aguas crudas de pozos APR, región de Coquimbo. Cabe destacar el bajo de número de pozos estudiados para este elemento.	166
Figura 94: Concentraciones de As [mg/L] para acuíferos Los Choros, Elqui y Culebrón-Lagunillas	167
Figura 95: Concentraciones de As [mg/L] para acuífero Limarí.....	168
Figura 96: Concentraciones de As [mg/L] para acuífero Choapa Quilimarí	169
Figura 97: Concentración de Hierro en aguas crudas de APR de región de Coquimbo. Se encierran sectores con altas concentraciones.	171

Figura 98: Concentraciones de Hierro [mg/L] para acuíferos Los Choros, Elqui y Culebrón-Lagunillas	172
Figura 99: Concentraciones de Hierro [mg/L] para acuífero Limarí.....	173
Figura 100: Concentraciones de Hierro [mg/L] para acuíferos Choapa y Quilimarí	174
Figura 101: Concentración de Manganeso en aguas crudas de APR de región de Coquimbo. Se encierran sectores con alta concentración.	176
Figura 102: Concentraciones de Manganeso [mg/L] para acuíferos Los Choros, Elqui y Culebrón-Lagunillas.....	177
Figura 103: Concentraciones de Manganeso [mg/L] para acuífero Limarí.....	178
Figura 104: Concentraciones de Manganeso [mg/L] para acuíferos Choapa y Quilimarí	179
Figura 105: Concentración de Plomo en aguas crudas de APR de región de Coquimbo. se destaca (circunferencia roja) pozo 110-PORTADA DE SOTAQUÍ que excede norma de agua potable NCh409. También se encierran sectores con concentraciones relativamente elevadas (circunferencias amarillas).....	181
Figura 106: Concentraciones de Plomo [mg/L] para acuíferos Los Choros, Elqui y Culebrón-Lagunillas. Ningún pozo supera el límite dado para aguas de riego dado por la norma NCh 1333.	182
Figura 107: Concentraciones de Plomo [mg/L] para acuífero Limarí. Ningún pozo supera el límite dado para aguas de riego dado por la norma NCh 1333.	183
Figura 108: Concentraciones de Plomo [mg/L] para acuíferos Choapa y Quilimarí . Ningún pozo supera el límite dado para aguas de riego dado por la norma NCh 1333.	184
Figura 109: Índice de Calidad por pozo APR, región de Coquimbo. Parámetros Locales: Hierro y Manganeso.....	202
Figura 110: Pozos APR según índice de calidades calculadas considerando parámetros locales el hierro y manganeso.	203

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Valores de Transmisividad (T) promedio por sector según pruebas de bombeo.	31
Tabla 2: Valores de Conductividad Hidráulica (K) promedio por sector según pruebas de bombeo	32
Tabla 3: Espesor saturado estimado del acuífero por sectores.	33
Tabla 4: Resumen de constantes elásticas acuífero cuenca río Elqui según estudio de Groundwater Investigators. K: conductividad hidráulica; S: coeficiente de almacenamiento; T: transmisividad (en : DGA 2003)	39
Tabla 5: Parámetros Elásticos acuífero Culebrón - Lagunillas según pruebas de bombeos en DGA (1998)	44
Tabla 6: Coeficientes de acumulación acuífero Culebrón - Lagunillas (DGA, 1998)	46
Tabla 7: Recarga por sector acuífero cuenca río Limarí (modificado de DGA 2008)	54

Tabla 8: Coeficientes de Permeabilidad y Transmisibilidad por Sector. (Modificado de DGA 2012, Tabla 7.4-3)	88
Tabla 9: Presiones y usos significativos del agua en cuencas estudiadas en el presente trabajo. Adaptado de INFRAECO 2014. las sub cuencas señaladas no necesariamente coinciden con las empleadas en el presente informe.....	77
Tabla 10: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la Región de Coquimbo. ANALAB: Laboratorio externo a DGA; LADGA: Laboratorio Ambiental DGA.	79
Tabla 11: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio ANALAB.	81
Tabla 12: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio Ambiental de la DGA. ...	82
Tabla 13: Relación entre clases de calidad y valores de corte.	88
Tabla 14: Criterios para establecer el IC general.....	90
Tabla 15: Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea (Custodio y Llamas, 1976).	131
Tabla 16: Listado de parámetros químicos analizados para caracterizar las aguas y su límite de detección.	146
Tabla 17: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Los Choros.	147
Tabla 18: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Elqui.....	148
Tabla 19: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Culebrón - Lagunillas.	149
Tabla 20: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Limarí.....	150
Tabla 21: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Choapa.	151
Tabla 22: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Quilimarí	152
Tabla 23: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para pozos sin acuífero definido.....	153
Tabla 24: Número de pozos fuera de fuera de norma (NCh 409, NCh1333) por parámetro. (*)Límite máximo de Sodio para aguas de riego se calcula según el porcentaje de Sodio siendo e 100% la suma de todos los cationes (Na + Ca + Mg + K). (**) Clasificación de aguas según salinidad (SDT y Conductividad eléctrica) según norma NCh1333 se presenta en Tabla 25. (***) Total de pozos con uno o más parámetros fuera de norma.	154

Tabla 25: Clasificación de pozos estudiados según su salinidad en base a norma NCh1333 para aguas de riego.	155
Tabla 26: Pozos que presentan uno o más parámetros sobre límites de norma NCh409 de agua potable. Si un pozo supera la norma se señala el valor obtenido para aquel parámetro. No se incluyen parámetros no detectados o que ningún pozo haya superado la norma.	186
Tabla 27: Pozos que presentan uno o más parámetros sobre límites de norma NCh1333 para agua de riego. Si un pozo supera la norma se señala el valor obtenido para aquel parámetro. No se incluyen parámetros no detectados o que ningún pozo haya superado la norma.	189
Tabla 28: Clasificación de pozos a partir de salinidad, en base a norma NCh1333 para aguas de riego. Se omiten los pozos clasificados como "Aguas con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales".(*)medición por sobre límite de medición del dispositivo empleado. (**) SDT por sobre los límites indicados por la norma. Observación: Conductividad eléctrica es medida en terreno mediante equipo marca Hanna, modelo HI-98129, por su lado los Solidos Disueltos Totales son obtenido por medio del Método gravimétrico (ME – 31 – 2007. Manual SISS) realizado por laboratorio ANALAB (externo).	191
Tabla 29: Contaminantes naturales típicos de aguas superficiales y subterráneas de Chile (DGA, 2009).	197
Tabla 30: Metales y parámetros químicos asociados a distintos tipos de actividad antrópica (DGA, 2009)	198
Tabla 31: Criterios de Selección de parámetros locales según metodología descrita en DGA (2009)	199
Tabla 32: Valores de Corte (VC) para clasificación de índice de calidad por parámetro. Valores son los señalados en estudio DGA (2009). Parámetros locales (a) fueron empleados en todos los acuíferos. Parámetros locales (b) fue empleado en acuífero Limarí.	201
Tabla 33: Número de casos y porcentajes asociados de pozos según su Índice de Calidad para cada acuífero.	204
Tabla 34: Índice de Calidad por APR de acuífero Los Choros. Parámetros locales: Hierro y manganeso.	205
Tabla 35: Índice de Calidad por APR de acuífero Elqui. Parámetros locales: Hierro y manganeso.	206
Tabla 36: Índice de Calidad por APR de acuífero Culebrón-Lagunillas. Parámetros locales: Hierro y manganeso.	207
Tabla 37: Índice de Calidad por APR de acuífero Limarí.	208
Tabla 38: Índice de Calidad por APR de acuífero Choapa. Parámetros locales: Hierro y manganeso.	212
Tabla 39: Índice de Calidad por APR de acuífero Quilimarí . Parámetros locales: Hierro y manganeso.	214
Tabla 40: Índice de Calidad por APR sin acuífero definido. Parámetros locales: Hierro y manganeso.	214

I. RESUMEN

El presente estudio informa acerca del estado físico-químico de las aguas subterráneas de la Región de Coquimbo a partir del monitoreo de 119 servicios de Agua Potable Rural (APR), cuyo principal objetivo fue elaborar un diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas mediante la determinación de un Índice de Calidad (IC) por pozo, así como comparar los resultados obtenidos con la norma de consumo de agua potable (NCh409), y de manera complementaria la norma de aguas de riego (NCh1333).

Los acuíferos incluidos son Los Choros, Elqui, Culebrón-Lagunillas, Limarí, Choapa y Quilimarí, así como 2 pozos que se encuentran fuera de los acuíferos anteriormente definidos (Pozos 105-CALETA HORNOS y 20-CAIMANES).

Los pozos APR fueron visitados y monitoreados durante los meses de Septiembre y Noviembre de 2016. Dentro de las actividades de terreno se incluyó la confección de fichas, el registro de parámetros in situ (Conductividad eléctrica, pH, Temperatura y Potencial REDOX) y el muestreo para el análisis de 22 parámetros en laboratorio (iones mayoritarios y minoritarios totales). Los resultados han sido graficados utilizando diagramas de Piper y Stiff para una mejor comprensión de la composición química y su distribución en la Región de Coquimbo.

En comparación con la norma NCh409 de agua potable, se presentaron 41 pozos con uno o más parámetros por sobre el límite permitido. Los parámetros fuera de norma más recurrentes son Hierro (Fe), con 26 ocurrencias, seguido de Manganeso (Mn), con 14 ocurrencias, y Cloruro (Cl) y Solidos Disueltos Totales (SDT) con 7 ocurrencias, de igual forma el Plomo se ve excedido respecto a la norma en 1 pozo.

De manera complementaria, en comparación con la norma NCh1333 para aguas de riego, se presentaron 48 pozos con uno o más parámetros fuera de norma. Destacan el Sodio con 35 ocurrencias, seguido de Sulfato con 17 y Cloruro con 15. En el caso de los microelementos, se presentan 9 casos con concentraciones de Manganeso fuera de norma y 2 de Hierro.

De los resultados obtenidos para los niveles elevados de algunos parámetros, se asocia que niveles altos de Hierro, y en medida Manganeso, estarían asociados a una condición geológica natural, salvo en algunas excepciones en que podría existir contaminación desde una fuente antrópica, ya sea actividades mineras o agrícolas-industriales. Así también se verifica la posible contaminación difusa de carácter antrópico en pozos ubicados principalmente en sectores acuíferos de Moderada, Alta o Muy Alta Vulnerabilidad. Por otra parte los sectores acuíferos El Ingenio, Río Limarí y Punitaqui en el acuífero Limarí, se asocian a niveles elevados de macroelementos e iones salinos, los cuales podrían contener una significativa intrusión salina, como lo visto para el pozo 105-CALETA HORNOS.

Aplicando la metodología de la DGA (2009) respecto a la determinación del Índice de Calidad (IC) por pozos, se realizó una selección de parámetros químicos, en dos grupos (1) denominado de

parámetros fijos, que incluyó el análisis de Sólidos Disueltos Totales (SDT), Calcio (Ca), Sodio (Na), Cloruro (Cl), Sulfato (SO₄), Magnesio (Mg) y Nitrato (NO₃), y (2) los parámetros locales, que permiten distinguir los acuíferos de la Región de Coquimbo, los cuales incluyen concentraciones de Hierro y Manganeseo.

A partir de los resultados obtenidos respecto de los IC, encontramos 1 pozo con IC Intratable (pozo 105-CALETA HORNOS), 17 pozos con IC Insuficiente, 27 pozos con IC Regular, 45 pozos con IC Bueno y 29 pozos con IC Excepcional y como principales parámetros que determinan el IC por pozo, el Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Cloruro (Cl), Sulfato (SO₄), Sodio (Na) y SDT.

Finalmente se presentan recomendaciones de acciones a seguir de manera de monitorear, supervisar y ampliar la red de monitoreo empleada en el actual trabajo, así como estudios complementarios que ayuden a comprender y delinear líneas base y posibles fuentes contaminantes que afectan las aguas subterráneas, tanto a nivel local como regional.

II. INTRODUCCIÓN

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

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

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

Bajo lo anterior, este estudio pretende dar cuenta de la calidad de las aguas subterráneas extraídas de pozos de Agua Potable Rural (APR), previo a cualquier método de tratamiento, comparando diversos parámetros fisicoquímicos con respecto a normas de empleo vigentes (NCh409-NCh1333) así como también el cálculo de su Índice de Calidad (IC).

Los resultados de este estudio permiten recomendar medidas de mejora de la red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas, así como dar indicios del origen (antrópicas o naturales) de las posibles fuentes contaminantes presentes en la región.

III.OBJETIVOS

III.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este estudio es generar información acerca del estado físico-químico de las aguas subterráneas en la IV Región de Coquimbo, a partir del monitoreo en terreno de las aguas subterráneas de pozos pertenecientes a los programas de Agua Potable Rural (APR) de la Región y determinar un Índice de Calidad por pozo.

III.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Informar los pozos que contienen parámetros fuera de las normas NCh 409 (agua potable) y NCh 1333 (Agua de riego, entre otras)
2. Determinar un Índice de Calidad de agua por pozo.
3. Identificar la presencia de sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa.
4. Generar un Informe Global de Calidad de Aguas Subterráneas de la Región de Coquimbo que contenga los resultados de análisis de laboratorio y la determinación de un Índice de Calidad (IC) por pozo.

IV.ANTECEDENTES DEL MEDIO FÍSICO

IV.1. FISIOGRAFIA

Gran parte del territorio nacional está caracterizado por poseer 3 unidades morfoestructurales principales, la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal de los Andes. No obstante, entre los 27° y 33° de latitud sur, que comprende a la IV región de Coquimbo en su totalidad, la Depresión Central desaparece caracterizándose por un relieve montañoso interno, surcado por valles transversales producto de erosión hídrica desde alta Cordillera, mientras que por otro lado, en el margen costero, grandes planicies de abrasión marina, más o menos disectadas por la erosión desde el interior, y con desarrollo de dunas (DGA, 1986).

IV.2. SUELOS

Los suelos en Chile son relativamente jóvenes, característica común a lo largo de todo el territorio nacional tomando relevancia en su composición aquellos heredados de los materiales parentales. Dentro de estos se distinguen 2 grandes grupos (1) suelos áridos al norte de los 37°S, en donde los procesos formativos están inhibidos por la deficiencia hídrica superficial generalizada y (2) suelos húmedos al sur de los 37°, donde el agua es suficiente y abundante (DGA, 1986).

Más específicamente, en el extremo norte de la IV región de Coquimbo se desarrollan suelos rojos desérticos típicos (ardisoles) producto de las bajas precipitaciones del lugar, mientras más al sur, ya en latitud de La Serena (30°S), la humedad creciente da origen a suelos pardo-cálcicos, alcalinos en su horizonte superior. Por otra parte, en los valles transversales, se encuentran formaciones que le permiten a la agricultura ser regada. A partir de los 30°S hacia el sur empieza a cobrar importancia la meteorización química y el ciclo orgánico en la formación de suelos (DGA, 1986).

IV.3. HIDROLOGIA

Entre los 27°y 33°S se presentan cuencas hidrográficas exorreicas, en donde la red hídrica está marcada por angostos valles transversales, los más importantes de ellos de alcance cordillerano, con ríos en torrente de régimen mixto aunque fundamentalmente nival, y caudales crecientes, de 2 hasta 30 m³/s. En esta zona se ha construido numerosos embalses para regularizar y aprovechar los escurrimientos superficiales (DGA, 1986).

IV.4. GEOLOGIA

IV.4.1. GENERALIDADES

La geología de la IV región de Coquimbo se presenta con una distribución lito-crono-estratigráfica principalmente norte-sur, en donde las edades de las rocas estratificadas es variable según los diferentes procesos formadores de estos depósitos a lo largo de la evolución geológica del margen occidental de Sudamérica. Esta región esta principalmente dominada por formaciones de roca volcánicas con algunas intercalaciones sedimentarias marinas y/o continentales, las cuales son instruidas por una serie de cuerpos plutónicos que, a escala regional (batolitos), son progresivamente más jóvenes de Oeste a Este, dala la migración del Arco volcánico hacia el oriente desde el Jurásico (salvo excepciones).

Las diferentes unidades de roca son de edades mesozoicas a cenozoicas con pocas excepciones de cuerpos metamórficos paleozoicos que afloran cercanos a la costa y distantes, en alta cordillera, cercano a la frontera internacional.

Respecto a los yacimientos metálicos, en la región se presentan tres franjas metalogénicas de interés económico por su volumen y ley (ver apartado de Geología Económica), estas son las franjas del Cretácico Inferior (franja ferrífera), Cretácico superior y Neógeno (epitermales y pórfidos).

IV.4.2. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA POR SECTOR ACUÍFERO

Los antecedentes bibliográficos dispuestos a continuación, comprenden la recopilación de información geológica de las áreas comprendidas por los diferentes acuíferos definidos por la DGA presentes en la IV región de Coquimbo, la que puede ser de utilidad tanto en la caracterización del medio hídrico subterráneo de los pozos APR muestreados, así como también para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

La información recolectada proviene de cartas y mapas geológicos confeccionados bajo el Plan Nacional de Geología Regional del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), así como informes técnicos pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA). Estos estudios presentan información de diferentes ámbitos en función de los objetivos propios de cada uno de ellos por medio de transcripciones literales y/o adaptadas directamente desde las fuentes, es por esto, que la información que se presenta a continuación puede carecer de un formato y terminología unificada.

Para ahondar aún más en la geología de cada zona se recomienda consultar el mapa geológico de la región de Coquimbo (Anexo 1.2) y/o consultar directamente a las fuentes señaladas en la Figura 1.

Fuente de Información Geológica

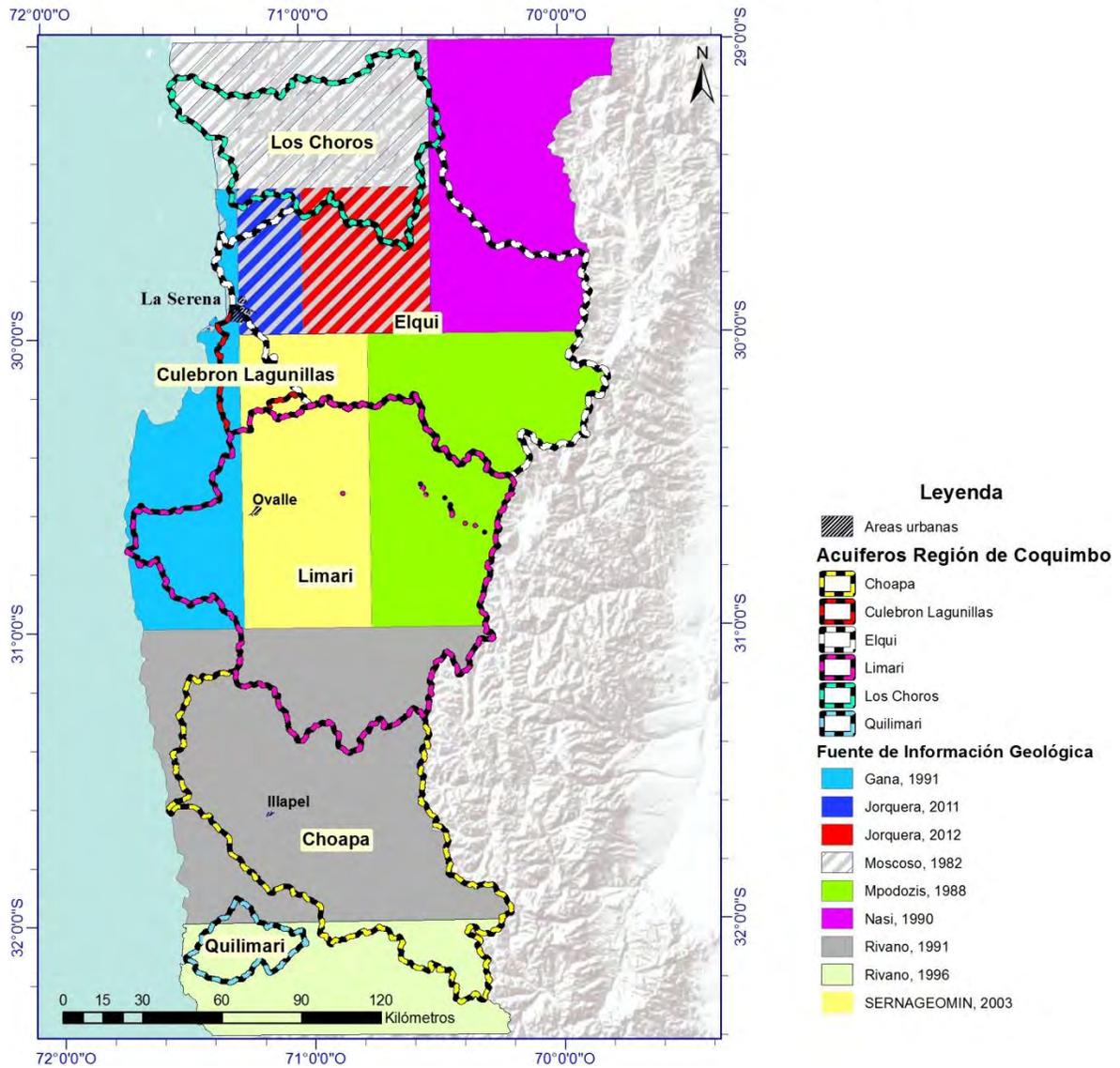


Figura 1: Fuente de Información Geológica. Todas las fuentes corresponden a publicaciones del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

IV.4.2.1. Geología área Acuífero Los Choros¹

En la hoya hidrográfica de la Quebrada Los Choros se reconocen principalmente rocas volcánicas estratificadas, que cubren más del 40% del área y cuyos rangos de tiempo abarcan del Jurásico al Neógeno, es decir, desde hace unos 200 millones de años (Ma.) hasta el presente.

Las rocas intrusivas, que incluyen desde granitos a gabros, se distribuyen en franjas longitudinales y sus edades decrecen hacia el este, variando desde el Jurásico Superior al Terciario Inferior (desde hace 150 Ma. hasta 24 Ma.).

Los sedimentos no consolidados modernos corresponden a gravas, arenas, ripios aluviales y arenas eólicas.

Las estructuras geomorfológicas de mayor relevancia a lo largo de la quebrada Los Choros corresponden a terrazas aluviales, abanicos aluviales, conos de deyección, escombreras y planicies costeras, esta última en el sector litoral y corresponden a terrazas de abrasión marina pendiente y constituida por depósitos marinos de la Formación Coquimbo.

Dentro de las estructuras cabe destacar el sistema de fallas con orientación NS y NNE que pertenecen al sistema de la Falla de Atacama, el cual controla la morfología local y regional, asociada también a los yacimientos de hierro más importantes del país.

IV.4.2.2. Geología área Acuífero Elqui²

La geología del área está constituida predominantemente de rocas fundamentales pre-Terciarias sobre sedimentos terciarios y cuaternarios, los cuales se ubican en las zonas llanas, por debajo de los 200 m.s.n.m., mientras que por sobre esta cota, en los sectores depresionales predominan los macizos rocosos.

Las unidades registradas corresponden a: Franja litoral. Está representada básicamente por grandes arenales consolidados y sitios de humedales, muchos de los cuales han sido drenados para permitir la construcción de caminos, viviendas y grandes complejos turísticos. La sección está expuesta permanentemente al viento y al oleaje, por lo que queda sujeta a la acción del mar durante temporales intensos y tsunamis.

¹ (FUENTE: DGA 2005)

² (FUENTE: DGA2003)

El valle. Está formado casi exclusivamente por gravas, arenas y ripios aluviales aterrizados originados en el Terciario Superior y el Cuaternario.

La media montaña. Está constituida por numerosos plutones, principalmente granodioríticos y graníticos así como unidades estratificadas volcánicas y sedimentarias como las constituyentes del Grupo Bandurrias así como las Gravas de Atacama

La alta montaña. Está constituida por rocas mesozoicas y rocas eruptivas paleozoicas estas son principalmente las Formaciones Los Elquinos, Algarrobal y Formación Matahuaico.

IV.4.2.3. Geología área Acuífero Culebrón-Lagunillas³

El Valle de Pan de Azúcar debe sus características de relieve y rellenos a fenómenos tectónicos ligados a fallas, a la acción fluvial asociada a los cauces actuales y antecesores de estos, y a la acción dinámica del océano.

Probablemente durante el cuaternario se produjeron fuertes oscilaciones del nivel del mar, variando entre 100 a 120 m por sobre este, y unos 80 a 100 m debajo del nivel actual. Esta condición, ligada a la acción de los cauces superficiales, produjo un proceso de profundización por erosión, cuando el nivel del mar descendía, y sedimentación cuando éste alcanzo niveles altos. De esta forma se constituyeron rellenos cuaternarios importantes con presencia de fósiles marinos, conformando terrazas marinas fluviales ubicadas entre los 100 y 120 m.s.n.m., alcanzando en ciertos sectores espesores de depósitos de hasta 100 m.

Ligado a la dinámica del océano, se produjo en el Plioceno una subsidencia continental cuyo efecto se vio aminorado por una intensa sedimentación desde el interior a partir del material acarreado por el río Elqui desde su origen en la alta cordillera. De esta forma, se atenuó el avance del mar hacia el interior y se formaron las terrazas costeras con sedimentos aluviales y marinos.

Los rellenos que cubren el basamento rocoso consisten principalmente en lentes heterogéneos y discontinuos de arcilla, limo, arena, grava y bolones, que sobreyacen en su mayor parte a rocas de edad jurásica-cretácica. Las rocas del basamento están compuestas por coladas de lava intercaladas con conglomerados, calizas y areniscas. Estas aforan en la zona costera afectadas por intrusiones graníticas de la cordillera de la Costa, de edades entre el Cretácico tardío al Terciario.

El lecho rocoso se encuentra intensamente plegado y dislocado, estimándose que las mayores perturbaciones se habrían producido en el Terciario entre el Eoceno y Mioceno. Esta zona se ve afectada por el sistema de falla atacama, la cual corresponde a un sistema de orientación Norte – Sur con numerosas fallas secundarias en direcciones oblicuas a estas.

³ (FUENTE: DGA, 1998)

IV.4.2.4. Geología área Acuífero Limarí⁴

En la cuenca del río Limarí se encuentran estratos de rocas volcánicas y sedimentarias principalmente mesozoicos que se disponen como cuatro segmentos de orientación aproximada norte-sur. Los dos segmentos orientales forman un sinclinorium, el cual es atravesado en su parte central por estructuras con trazas de orientación norte-sur. El segmento oriental del sinclinorium, que se ubica en la alta cordillera, corresponde a un bloque alzado y está constituido por rocas volcánicas, sedimentarias continentales y marinas, de edades triásica, jurásica y cretácica, intruidas por granodioritas terciarias. Hacia el este de este segmento aflora un complejo intrusivo de edad paleozoica constituido principalmente por granitos.

El segmento occidental del sinclinorium corresponde a un bloque hundido, constituido por rocas estratificadas de origen continental con intercalaciones marinas, pertenecientes al Cretácico y probablemente al Terciario Inferior, y en menor proporción por rocas intrusivas. Las rocas estratificadas están constituidas principalmente por rocas sedimentarias y volcánicas, caracterizadas por repentinos cambios de facies.

Hacia el oeste del sinclinorium desaparecen las rocas estratificadas mesozoicas y aparece un segmento constituido por rocas intrusivas y depósitos aluviales de terrazas. Las rocas intrusivas corresponden principalmente a granodioritas y tonalitas de grano grueso de color gris oscuro, de edad jurásica media, que se presentan meteorizadas en diversos sectores. También se encuentran afloramientos de granito de menor expresión superficial. En algunos sectores estas rocas se encuentran atravesadas por numerosos filones.

IV.4.2.5. Geología área Acuífero Choapa⁵

El área de interés hidrogeológico, que se ubica en el centro de los valles de los principales cauces de la cuenca (ríos Choapa, Illapel, Chalinga y estero Camisas), se puede caracterizar desde el punto de vista geológico por la presencia de sedimentos aluviales y coluviales del Cuaternario que se han depositado rellenando los valles provenientes de conos de deyección torrencial y escombros de falda, así como de remociones generadas por colapso gravitacional. Al avanzar desde las zonas cordilleranas hacia la depresión intermedia, se pueden encontrar conglomerados de areniscas, brechas y limolitas poco consolidadas, de la formación Confluencia, correspondiente al período

⁴ (FUENTE: DGA, 2008).

⁵ (FUENTE: DGA, 2012)

Mioceno-Plioceno. Estos conglomerados aparecen desde Salamanca hacia aguas abajo, en el río Choapa, así como en los ríos Chalinga e Illapel, aproximadamente desde Cárcamo hacia aguas abajo.

Más abajo, desde la confluencia de los ríos Illapel y Choapa, se observa una condición más heterogénea, pudiendo encontrarse además de las formaciones señaladas, lavas andesíticas rojas, brechas andesíticas y conglomerados rojos, del período Jurásico

IV.4.2.6. Geología área Acuífero Quilimarí ⁶

De acuerdo a los antecedentes recopilados (Estudio “Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable de Aguas Subterráneas Cuenca del Río Quilimarí”, DGA-DARH SIT-152, 2008), la cuenca del río Quilimarí se caracteriza por exhibir dos unidades intrusivas del periodo Cretácico y Jurásico, una secuencia de rocas estratificadas pertenecientes al Triásico, Jurásico y Cretácico, y por último depósitos Terciarios y Cuaternarios.

Las Rocas Intrusivas, correspondientes a granitoides mesozoicos de este segmento, se distribuyen en tres franjas de orientación N-S: la occidental, central y oriental. Pertenecientes a la franja occidental afloran en el área de estudio dos unidades plutónicas, estas son unidad Puerto Oscuro y unidad Chalinga, las que describen a continuación:

En cuanto a las Rocas Estratificadas del área, ellas están compuestas por una secuencia Mesozoica, que forma parte de la Cordillera de la Costa, y que consiste en una unidad volcánica ácida intercalada por depósitos marinos. Estos depósitos se disponen como franjas continuas y elongadas de orientación N-O, que principalmente afloran de más recientes a más antiguas en sentido oeste.

En la cuenca están presentes las siguientes formaciones, enunciadas de más antiguas a más recientes:

- Formación Pichidangui (Trp, Triásico superior), compuesta por rocas volcánicas y marinas.
- Formación Los Molles (Llm, Triásico Superior-Liásico), volcanoclástica y marina transicional.
- Formación Ajjal, Cerro Calera y/u Horqueta (Ji, Jurásico Medio); constituida por rocas volcanoclásticas y sedimentarias, indiferenciadas.
- Formación Lo Prado (Kp, Cretácico inferior), la conforman rocas de origen marino y volcánico.
- Formación Veta Negra (Kvn, Cretácico inferior), rocas volcanoclásticas y continentales.

⁶ (FUENTE: DGA, 2012).

- Formación Las Chilcas (Klc, Cretácico inferior), volcanoclástica y continental-lagunar.

En términos de Depósitos Terciarios y Cuaternarios, se reconoce la Formación Confluencia, la que pertenece al periodo Terciario y está compuesta por conglomerados, areniscas, brechas y limonitas poco consolidadas, distribuyéndose en la parte oeste a lo largo de la cuenca. El relleno cuaternario está constituido por depósitos aluviales y coluviales que se encuentran conteniendo al río, hacia la desembocadura de éste se encuentran depósitos eólicos y litorales y depósitos eólicos más antiguos.

En cuanto a Estructuras, en el sector del valle del Quilimarí, la principal estructura es la Falla de la Silla del Gobernador (N14°E / 80°E). Ella es producto de la inversión de la cuenca en el Cretácico superior, esta zona de cizalle tiene un largo reconocido de cercano a 50 km y una ancho variable de hasta 900 m. El protolito asociado corresponde principalmente a rocas tobáceas de la Formación Pichidangui y a lutitas de la base de la Formación Los Molles.

IV.4.3. GEOLOGÍA ECONÓMICA REGIONAL

Algunos sectores de la corteza terrestre se caracterizan por un cierto enriquecimiento en elementos químicos, minerales o sustancias en general. Estos sectores o anomalías pueden conllevar algún interés económico, constituyendo recursos que pueden ser tanto metálicos (Cu, Fe, Zn, Au, etc.) como materiales industriales (Cuarzo, Caliza, etc.)(Figura 2). La geología económica se entiende como una rama de la geología que se ocupa en la definición y modelamiento de los diferentes yacimientos minerales desde un punto de vista genético, así como de las actividades necesarias para el descubrimiento y caracterización de depósitos (exploración) para luego ser explotados de manera rentable.

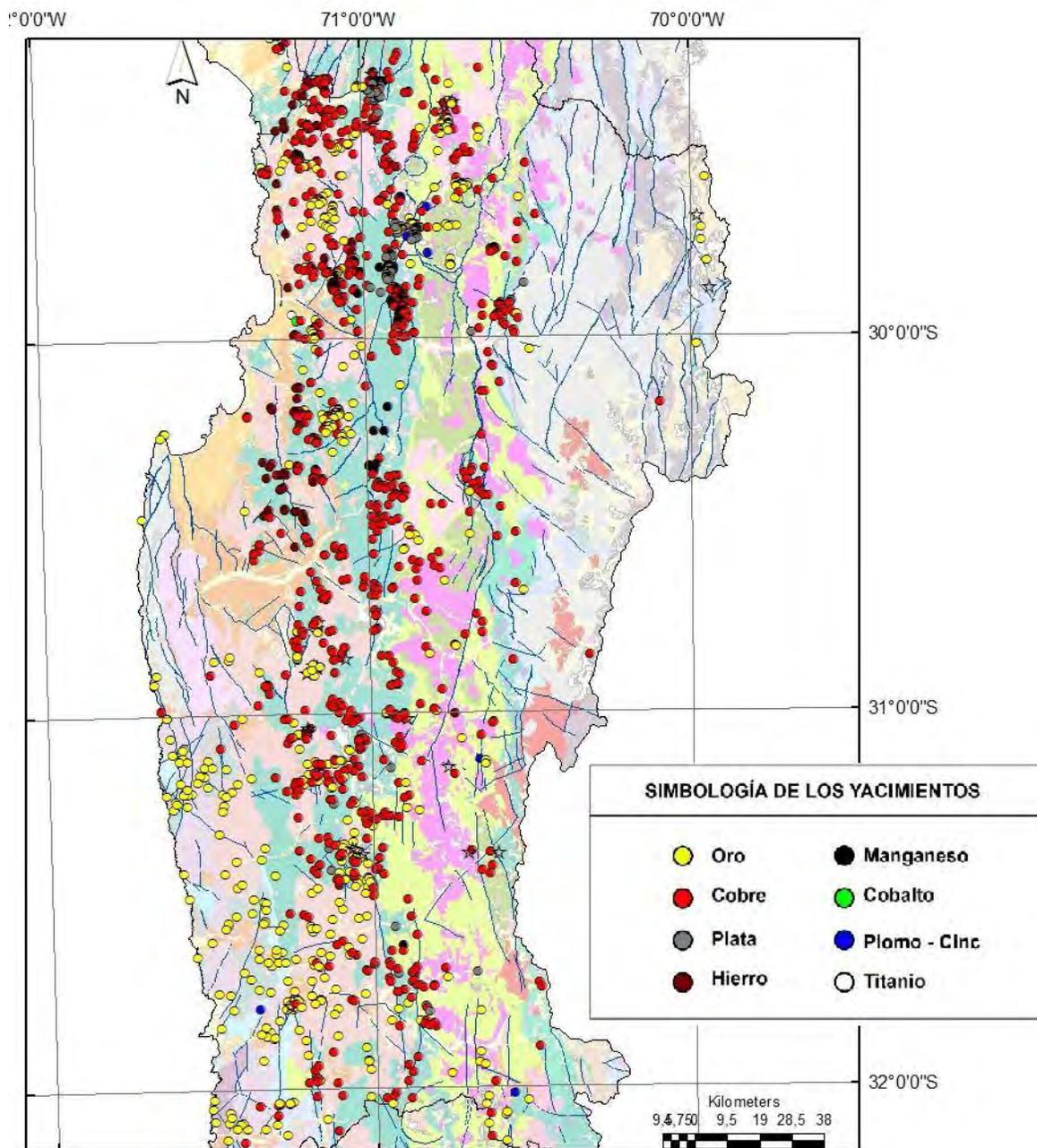


Figura 2: Distribución depósitos metalíferos por Recurso. (SERNAGEOMIN 2014)

En Chile la minería metálica es la principal área productiva del país, siendo el principal productor de cobre del mundo con presencia importante de yacimientos de otros metales tales como Plata, Oro y Hierro. La concentración anómala de estos metales, lo cual permite su explotación, puede tener consecuencia en su entorno, ya sea por procesos netamente naturales o bien por factores antrópicos. Es por ello relevante presentar antecedentes geológicos sobre el emplazamiento y carácter de estos yacimientos los cuales pueden llegar a interactuar con los diferentes reservorios de aguas subterráneas.

En primera instancia, desde una perspectiva genética, el emplazamiento de los diferentes yacimientos metálicos andinos está condicionado a la actividad magmática durante las diferentes etapas de formación del orógeno Andino. En este sentido las variaciones en el régimen de convergencia de placas conllevan una particular configuración tectónica que permite la formación de variados tipos de depósitos, al ser sometidos a diversas variables tales como el ángulo de subducción, vector y tasas de convergencia, condiciones de esfuerzo, grosor cortical. Una de las condiciones de primer orden que determina las características y ubicación de los diferentes depósitos, es el tipo y emplazamiento de cuerpos intrusivos en el arco volcánico. En la historia Andina, desde el Jurásico Tardío hasta la actualidad, se ha evidenciado una marcada tendencia de migración del arco hacia el Este. Esto ha permitido agrupar a los yacimientos Andinos en diferentes *Franjas Metalogénicas* las cuales están caracterizadas por un rango de edad específico (épocas Metalogénicas), dadas por particulares configuraciones tectónicas del pasado (Figura 3) (Maksaev 2001).

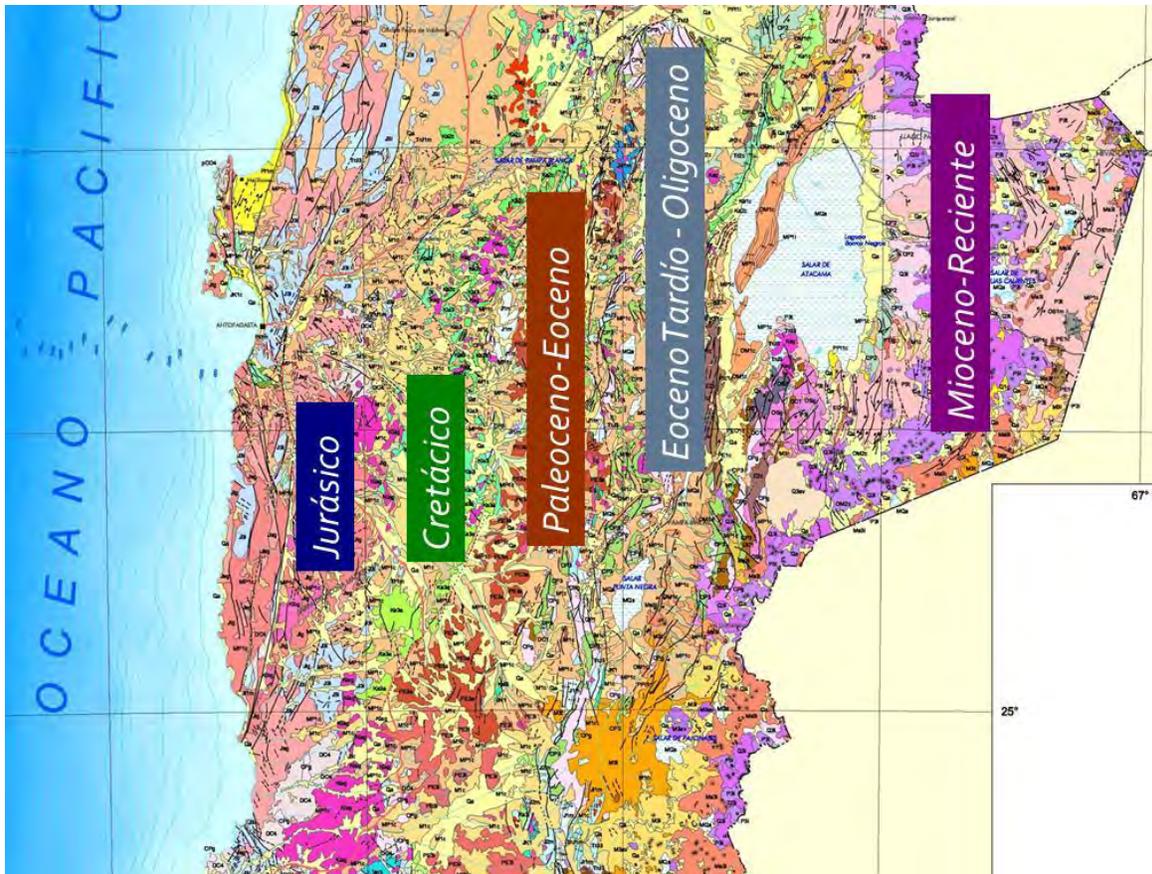


Figura 3: Representación de la ubicación aproximada de las diferentes épocas - franjas metalogénicas en los Andes Chilenos. Se puede observar como el arco magmático ha migrado progresivamente hacia el Este desde el Jurásico a la actualidad.

Se pueden identificar 2 etapas mayores en la metalogénesis Andina:

- I. Jurásico – Cretácico Temprano, caracterizada por depósitos estrato-ligados de Cu (Ag), de Cu-Au-óxidos de Fe (IOCG), óxidos de Fe-apatito, pórfidos Cu subordinados y baja ley. En esta etapa se pueden identificar 2 franjas Metalogénicas: Jurásica y Cretácica Temprana.
- II. Cretácico Tardío – Presente, con un fuerte dominio de pórfidos cupríferos y epitermales de metales preciosos. Se pueden identificar 3 franjas metalogénicas mayores: Paleoceno - Eoceno, Eoceno Tardío – Oligoceno, y Mioceno - reciente.

Estas dos etapas mayores están limitadas por la llamada Fase Peruana en donde ocurre un cambio mayor en la configuración tectónica del proto-pacífico afectando directamente a las condiciones tectónicas del margen occidental de Sudamérica.

En la región de Coquimbo se presentan mayormente yacimientos asociados a actividad magmática-hidrotermal, y en menor medida una asociación con eventos sedimentarios-hidrotermal o concentración mecánica en placeres. A continuación se presenta una breve reseña sobre las características de los depósitos de las franjas Metalogénicas de mayor importancia de la Región de Coquimbo.

IV.4.3.1. Franja Metalogénica del Cretácico Inferior

Ubicada en el extremo occidental de la cordillera de los Andes, principalmente entre las regiones de Atacama y Metropolitana, en lo que se puede entender el dominio morfoestructural de la cordillera de la costa, se caracteriza por la presencia de una gran diversidad de depósitos (Figura 4). Se pueden identificar algunos pórfidos cupríferos en general subeconómicos, donde Carmen de Andacollo (pórfido Cu-Mo) es el principal yacimiento en explotación presentando una alta ley de Oro (0.23 g/t Au).

La principal mineralización de esta franja está dada por yacimiento de hierro (Magnetita – Apatito) entre los 26° a 31°S. Estas están alojadas en rocas del Cretácico inferior cercanas a intrusivos dioríticos a granodioríticos del Albiano. El control estructural regional de estos depósitos ferríferos, por los cuales algunos autores llaman franja ferrífera a la franja del Cretácico inferior, está dominada por el Sistema de Falla de Atacama. Ejemplos representativos de estos depósitos son Cerro Negro, Bandurrias, Algarrobo, El Tofo y el Romeral entre otros.

Periféricos a la zona en que se alojan Fe-Apatito, netamente en la zona de falla Atacama, existen también depósitos de Óxidos de Hierro de cobre – Oro (IOCG) tales como Candelaria, Manto Verde, y otros menores del distrito Punta del Cobre MaksaeV 2001.

Esta es Una de las franjas más productivas de la Región y de mayor concentración de yacimientos.

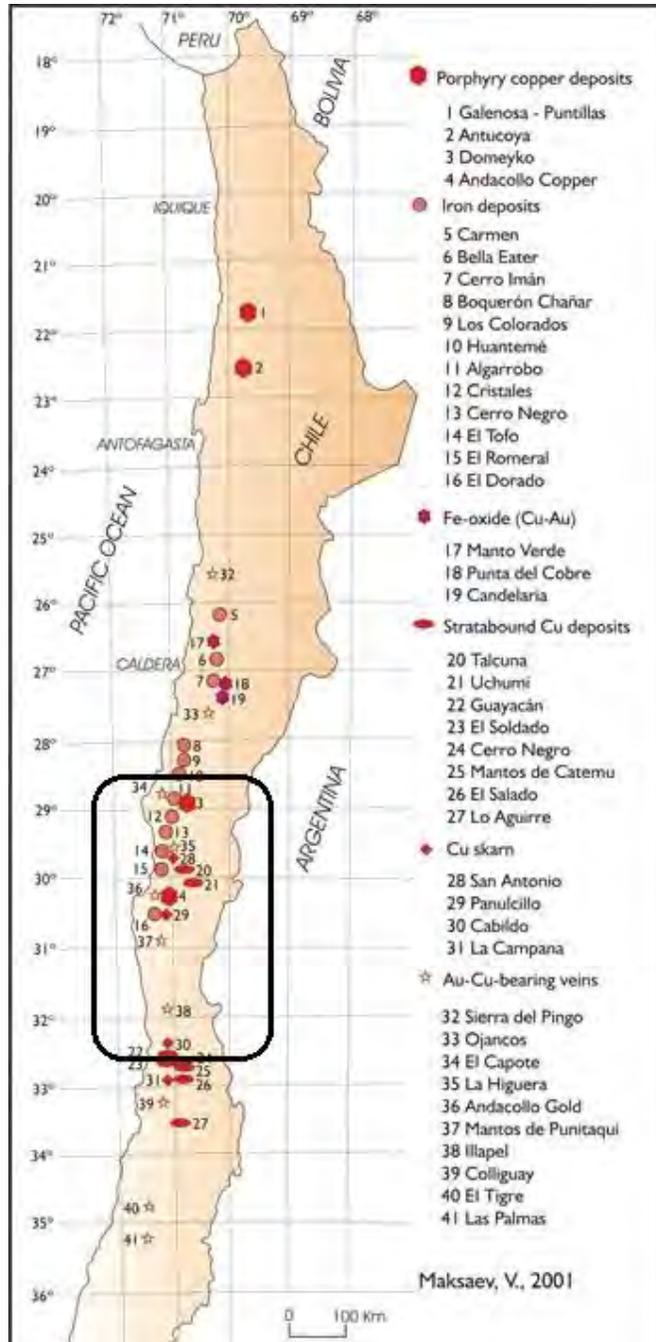


Figura 4: Distribución de Yacimientos agrupados en la franja Metalogénica del Cretácico Temprano.

IV.4.3.2. Franja Metalogénica del Cretácico Superior

Esta es una faja distribuida en la parte media del país al menos entre Copiapó y Rancagua (Figura 5). Incluye vetas mesotermales a epitermales de oro y plata. La mayor parte de las vetas auríferas corresponde a sistemas de Tipo cuarzo – sulfuros – oro ± cobre como los Distritos El Espino, Farellón Sanchez y Alhué; sistemas de Tipo carbonato-metales base-oro como Mantos de Punitaqui y depósitos epitermales como el distrito Inca de Oro, Lo Chancón (mina El Inglés) y el yacimiento El Bronce de Petorca. También se encuentran distritos clásicos de vetas mesotermales argentíferas hospedadas en rocas carbonatadas neocomianas como Caracoles, Chimberos – Tres Puntas, Chañarillo y Arqueros. Localmente existen prospectos de pórfidos de Cu-Au en el distrito de Inca de Oro (Dinamarquesa, Carmen) Makshev 2001.

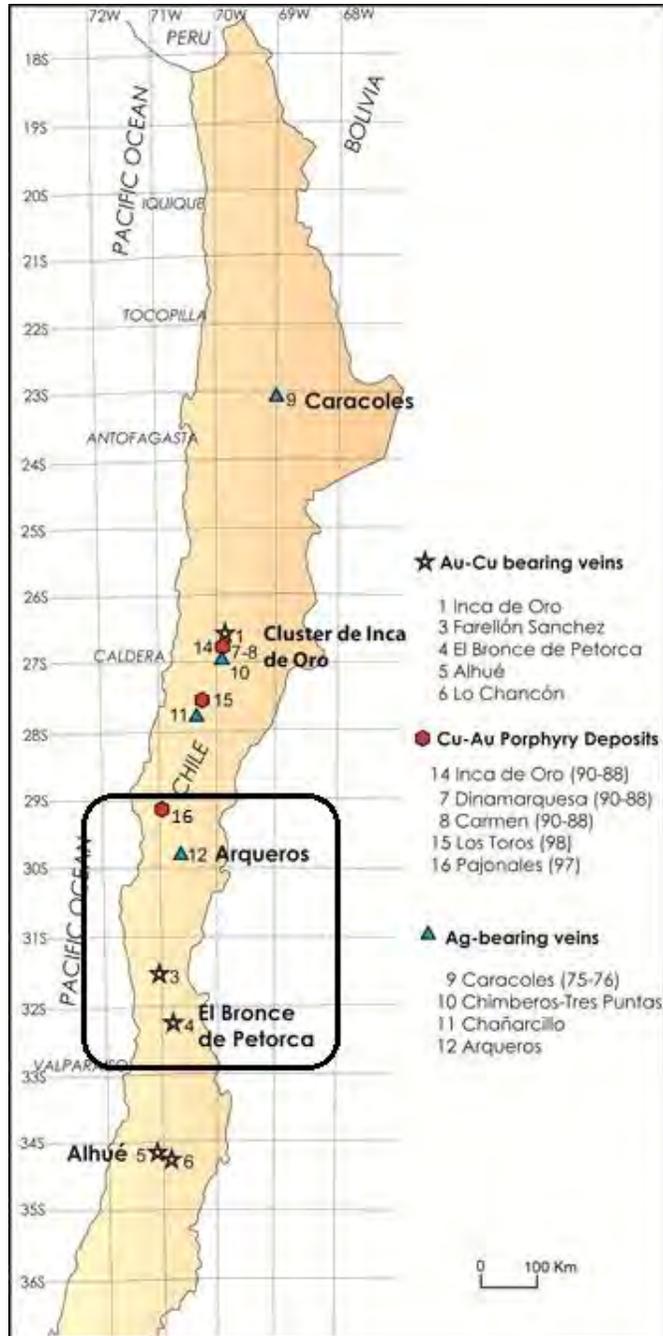


Figura 5: Distribución de Yacimientos agrupados en la franja Metalogénica del Cretácico Superior.

IV.4.3.3. Franja Metalogénica del Neógeno

Esta es la Franja Metalogénica más oriental de Chile y se extiende por la Alta Cordillera en el sector adyacente al límite con Bolivia y Argentina (Figura 6), extendiéndose hacia el oriente en el territorio de dichos países. Esta Franja incluye otro grupo de pórfidos cupríferos de gran importancia económica para el país, como Los Pelambres, Río Blanco - Los Bronces y El Teniente.

En la Alta Cordillera entre los 26° y 33° S, se incluye a las previamente conocidas Fajas de Maricunga y El Indio con depósitos epitermales de metales preciosos mayormente de tipo sulfato - ácido como La Coipa, Pascua, El Indio, El Tambo.

Los depósitos epitermales de la franja de El Indio tienen una edad comparable a la de pórfidos cupríferos del Mioceno Superior de la zona central de Chile y la misma posición geográfica en la Alta Cordillera traslapándose con los pórfidos cupríferos. Consecuentemente, algunos de los sistemas epitermales de tipo sulfato-ácido representan niveles superiores de sistemas de tipo pórfido a profundidad. En el extremo norte esto es debido a la existencia de pórfidos auríferos con sobreimposición de alteración de tipo ácido-sulfato, y por la alteración - mineralización de tipo ácido-sulfato en el prospecto Aldebarán sobre el pórfido de Cu-Au de Cerro Casale. Complementariamente, la existencia de mineralización de tipo pórfido cuprífero ha sido mencionada en niveles profundos del distrito El Indio MaksaeV 2001.

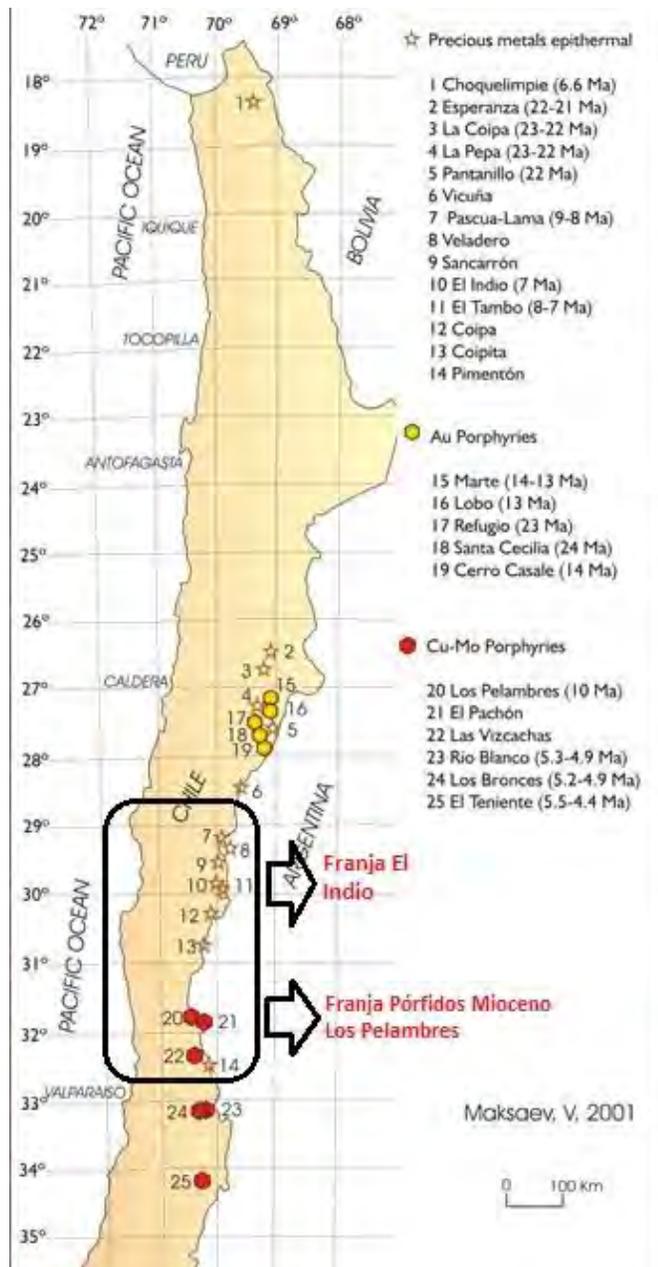


Figura 6: Distribución de Yacimientos agrupados en la Franja Metalogénica del Neógeno (Mioceno – Plioceno).

IV.5. HIDROGEOLOGIA

Los antecedentes bibliográficos dispuestos a continuación comprenden la recopilación de información cualitativa y cuantitativa que puede ser de utilidad tanto en la caracterización del medio hídrico subterráneo de los pozos APR muestreados, así como de ayuda en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

La información recolectada proviene de diversas fuentes, principalmente estudios realizados por la Dirección General de Aguas (DGA), o bien estudios realizados por consultoras especializadas bajo mandato de la Dirección general de aguas (DGA). Estos estudios presentan información de diferentes ámbitos en función de los objetivos propios de cada uno de ellos por medio de transcripciones literales y/o adaptadas directamente desde las fuentes, es por esto, que la información que se presenta a continuación puede carecer de un formato y terminología unificada.

A continuación se presentan transcripciones literales y/o adaptadas directamente desde las fuentes, y los datos que se han podido recolectar se constituyen como información ilustrativa de algunos parámetros físicos de cada medio, y no como resultado del presente estudio.

IV.5.1. HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

En base al trabajo realizado por la Dirección General de Aguas (DGA, 1986a - 1986b) el territorio nacional se presenta organizado en provincias y subprovincias hidrogeológicas, en donde las 3 provincias presentadas (altiplánica, andina vertiente Pacífico, y cuencas costeras) responde a patrones de escurrimiento que a grandes rasgos se observa en el continente sudamericano.

En lo que compete al presente trabajo se describe la Subprovincia de Valles Transversales, comprendida en la Provincia Andina Vertiente Pacífico, y la Subprovincia de Cuencas Costeras Exorreicas, comprendida en la Provincia de Cuencas Costeras. (Figura 7)

IV.5.1.1. Subprovincia de Valles Transversales

En este sector (27° a 33°S) la existencia de acuíferos está directamente ligada a los rellenos cuaternarios fluviales de la caja de los ríos. La alimentación proviene de la infiltración de recursos superficiales (DGA, 1986b).

Los acuíferos tienen espesores variables de pocos metros hasta aproximadamente 200 metros, y son libres. Se explotan con fines de abastecimientos de agua potable doméstica e industrial, y con fines de riego en la medida que el agua no da abasto. La del agua se presenta en general buena en la cabecera de los ríos (< 500 mg/l del Total de Sólidos Disueltos (TDS)), y sufre hacia aguas abajo un deterioro gradual por salinización, llegando hasta los 1000 y 2000 mg/l de TDS, en los sectores vecinos a la costa. La productividad de los pozos es bastante elevada (>10 m³/h/m) (DGA, 1986b).

IV.5.1.2. Subprovincia de Cuencas Costeras Exorreicas

Frente al sector de los valles transversales, en la zona litoral, existen algunos acuíferos en los rellenos aluviales de las cuencas costeras. Estos acuíferos, en general libres, tienen espesores que no superan los 100 metros. La explotación es muy restringida, la productividad de los pozos es variable, pero no supera los 10 m³/h/m. la calidad del agua es regular (200 a 1000 mg/l TDS), y el uso predominante es el doméstico. Se estima que el recurso subterráneo de estas cuencas costeras provendría de recargas locales (precipitaciones y camanchacas) (DGA, 1986b).

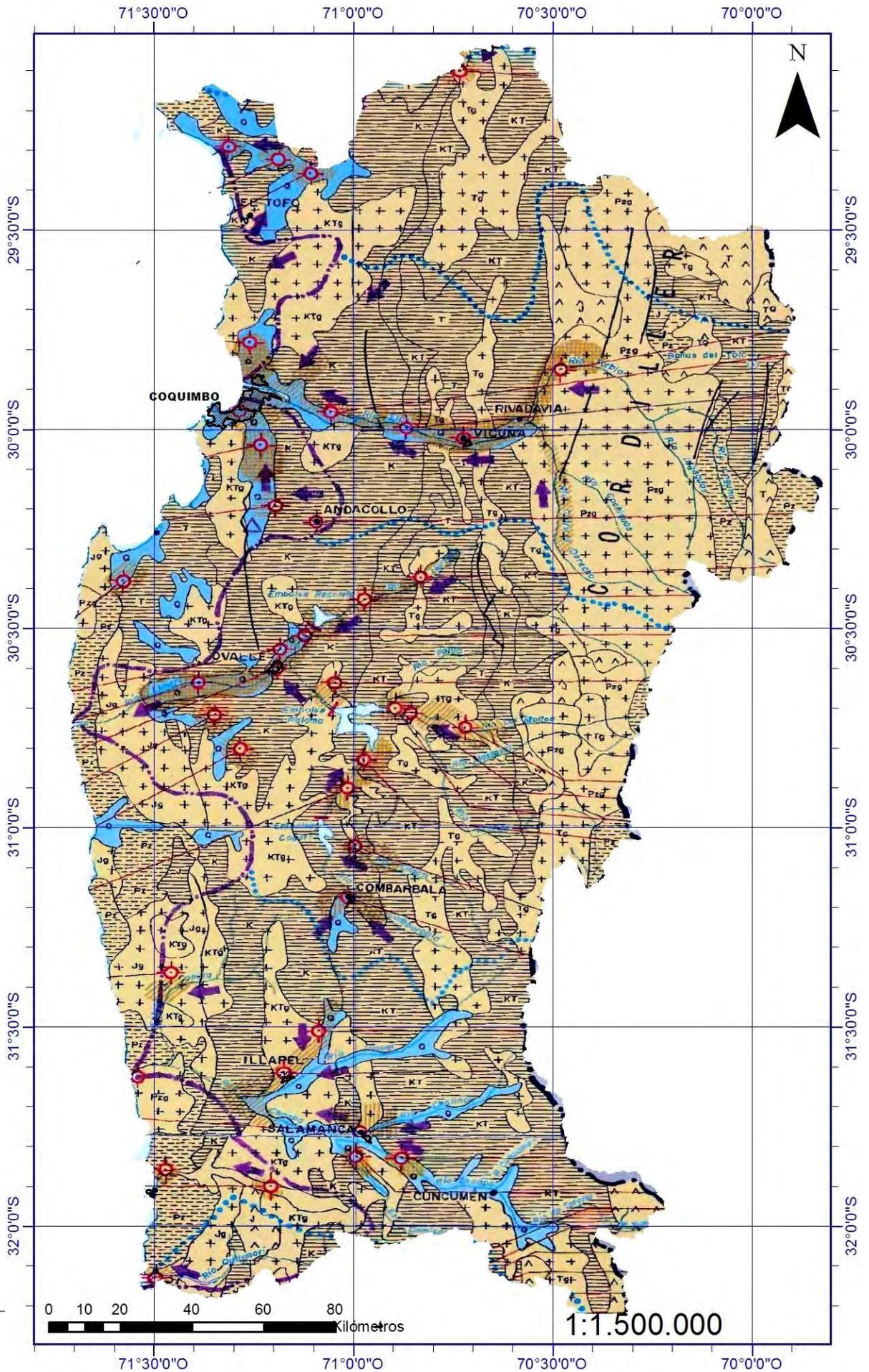
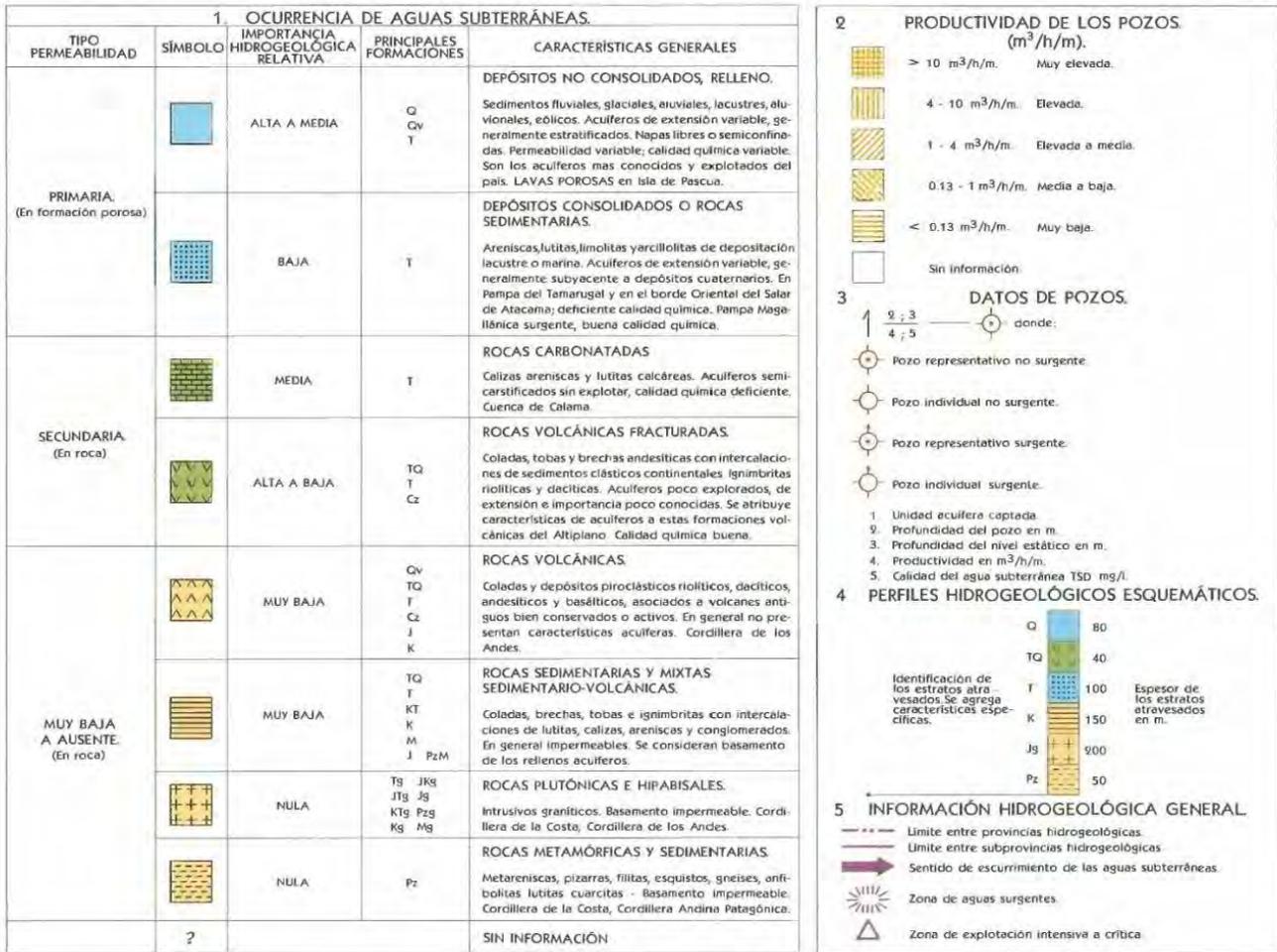


Figura 7: Mapa Hidrogeológico de Chile. Modificado de DGA (1986a). Leyenda en Figura 8.

MAPA HIDROGEOLÓGICO

LEYENDA GENERAL I HIDROGEOLOGÍA



II INFORMACIÓN REFERENCIAL

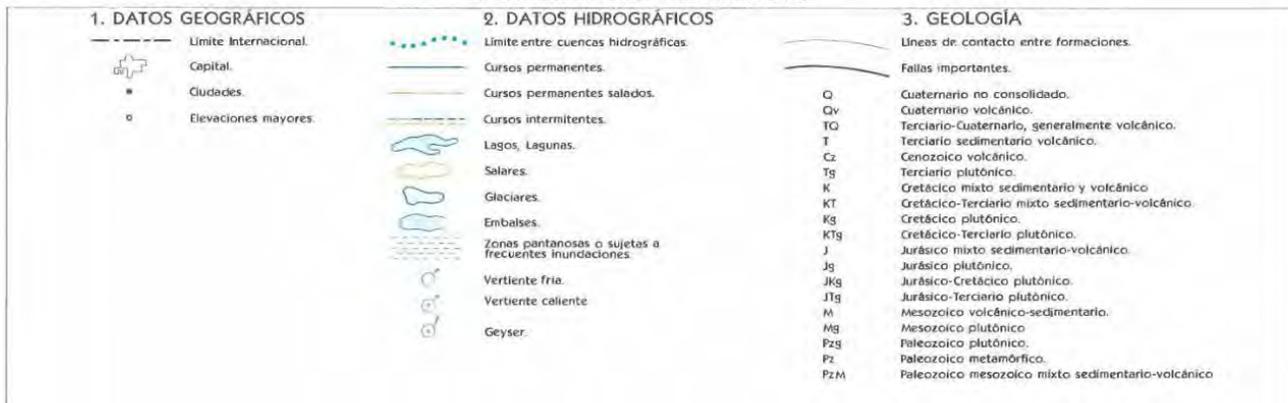


Figura 8: Leyenda Figura 7 (DGA, 1986a)

IV.5.2. DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA POR ACUÍFERO

En la región de Coquimbo se reconocen 6 sistemas acuíferos de aprovechamiento común SHAC (Figura 11) principales, siendo estos:

- Los Choros
- Elqui
- Culebrón – Lagunillas
- Limarí
- Choapa
- Quilimarí

En las secciones siguientes se presenta la información recolectada sobre diferentes aspectos hidrogeológicos de las cuencas mencionadas. La información, según sea el caso, ha sido copiada textualmente o bien adaptada y editada desde su fuente original.

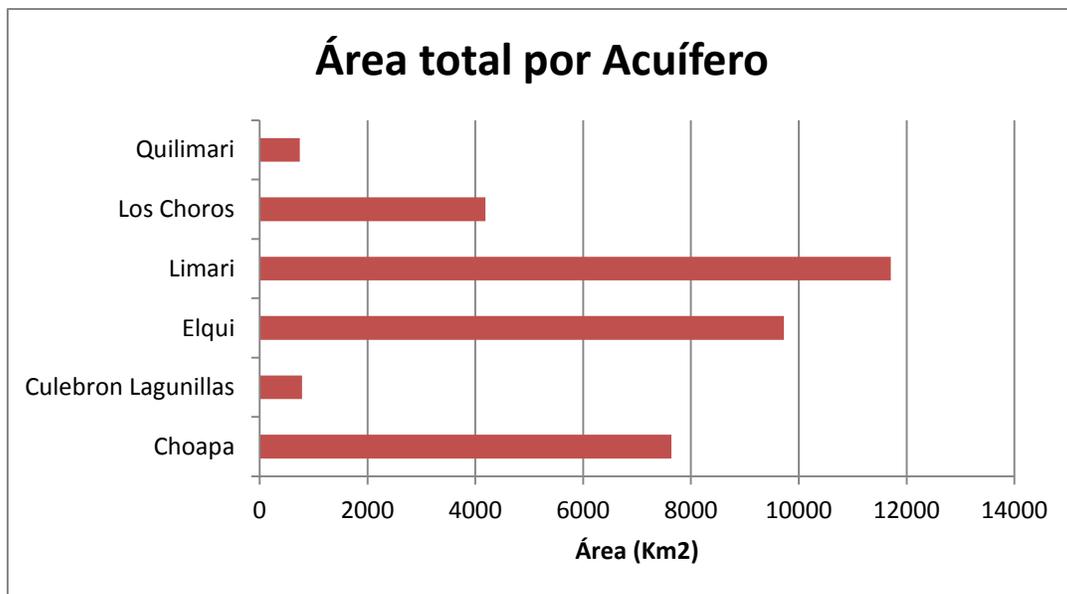


Figura 9: Área total por acuífero, Región de Coquimbo (elaboración propia).

Área por sector Acuífero

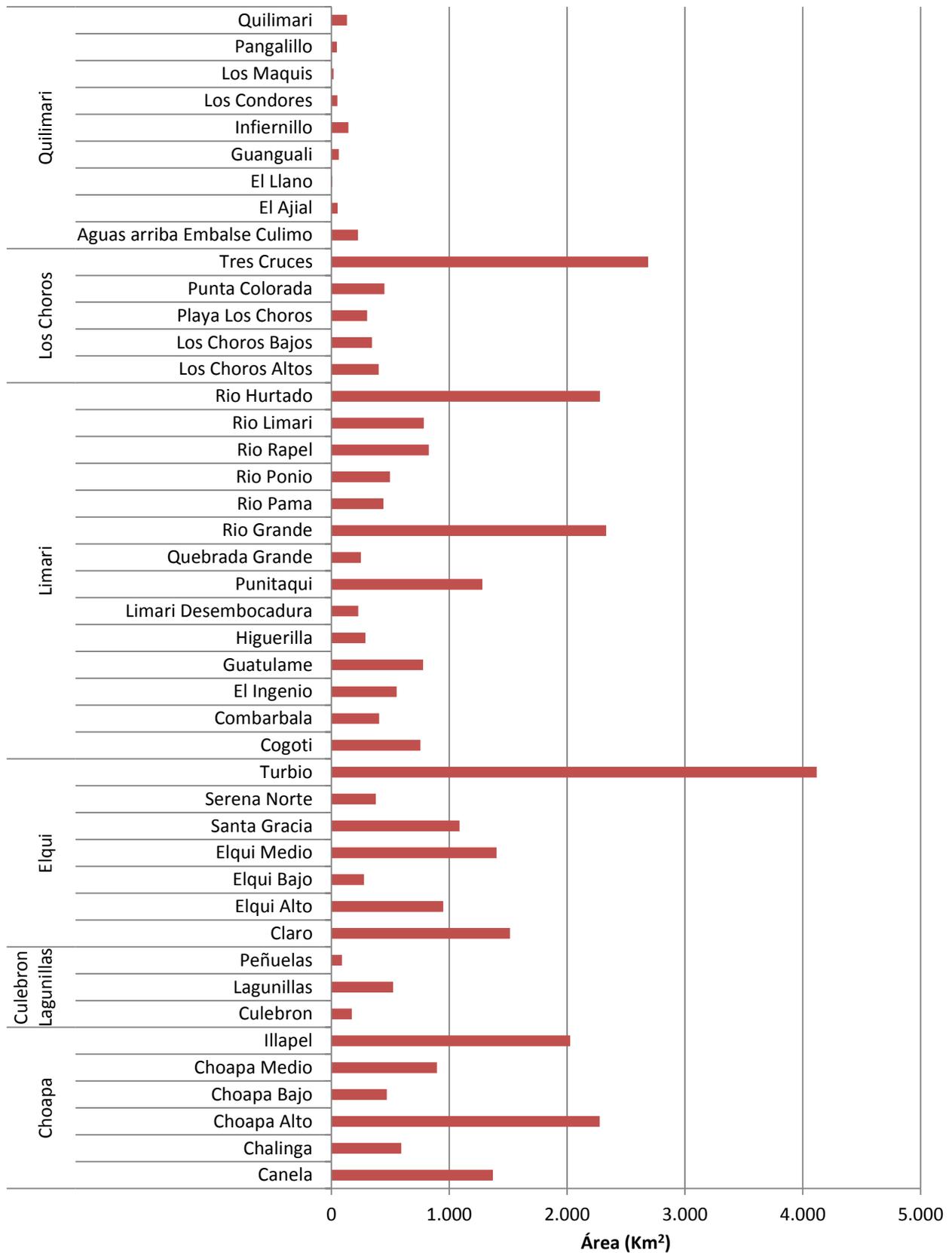


Figura 10: Área total por cada sector acuífero (elaboración propia).

Distribución Acuíferos Región de Coquimbo

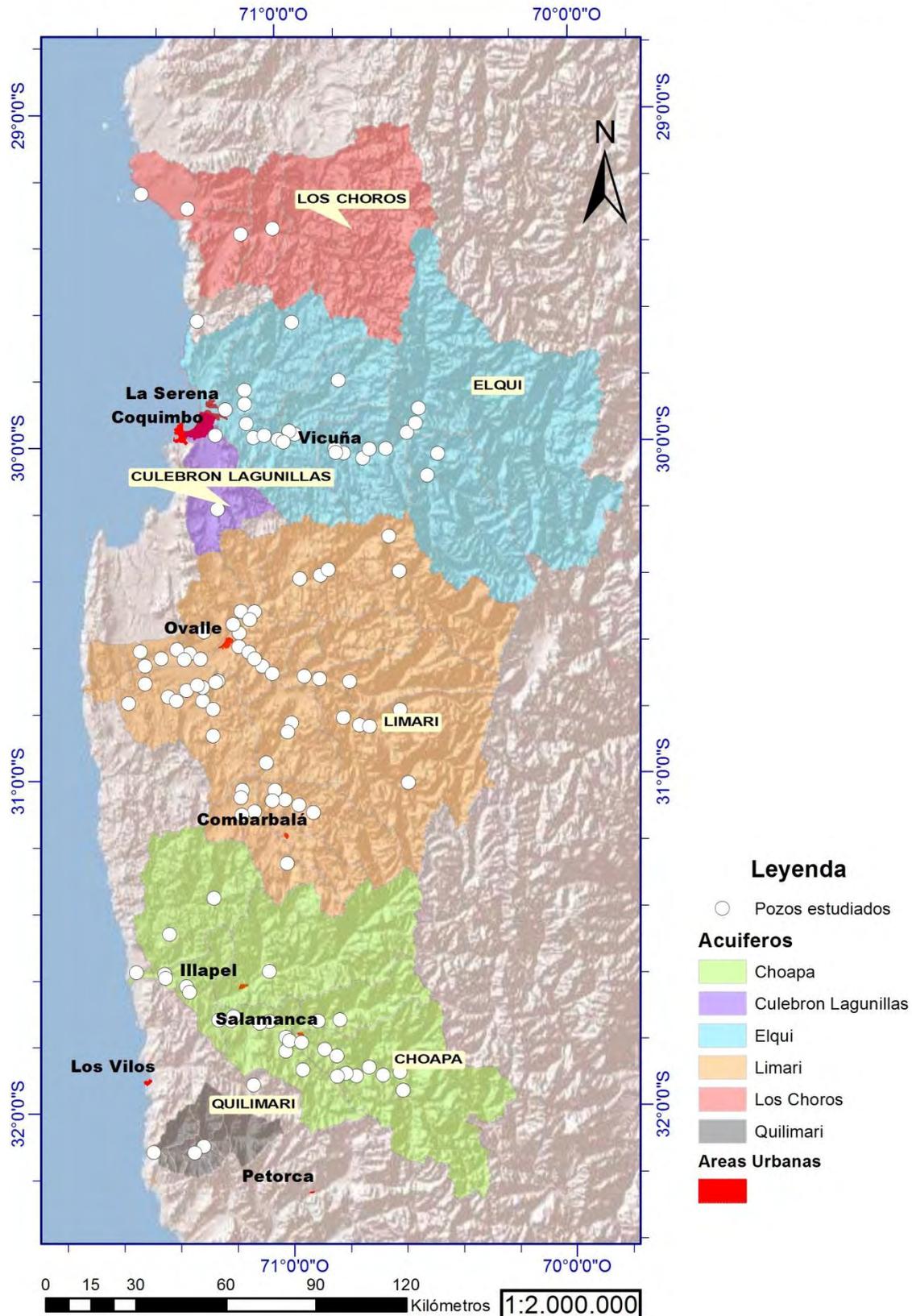


Figura 11: Distribución de Acuíferos de región de Coquimbo y pozos APR de muestreo. Elaboración propia.

IV.5.2.1. Hidrogeología Acuífero Los Choros⁷

A continuación se presenta la descripción hidrogeológica de la cuenca de quebrada Los Choros (Figura 12)

Los antecedentes hidrogeológicos de la cuenca Los Choros fueron obtenidos a partir de los siguientes trabajos:

- “Modelo de simulación Quebrada Los Choros: evaluación de los recursos hídricos en la Quebrada Los Choros, IV región Coquimbo” realizado por el Departamento de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas (DGA, 2004a). Este trabajo tiene como objetivo principal evaluar el recurso hídrico subterráneo analizando escenarios futuros de explotación.
- Estudio de intrusión salina en acuíferos costeros: sector costa Quebrada Los Choros, IV región realizado por la Dirección General de Aguas en conjunto con el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (DGA, 2005). Este trabajo tiene como objetivo general de este estudio es la definición de un programa de monitoreo y control preventivo de un acuífero costero para minimizar el riesgo potencial de intrusión salina.

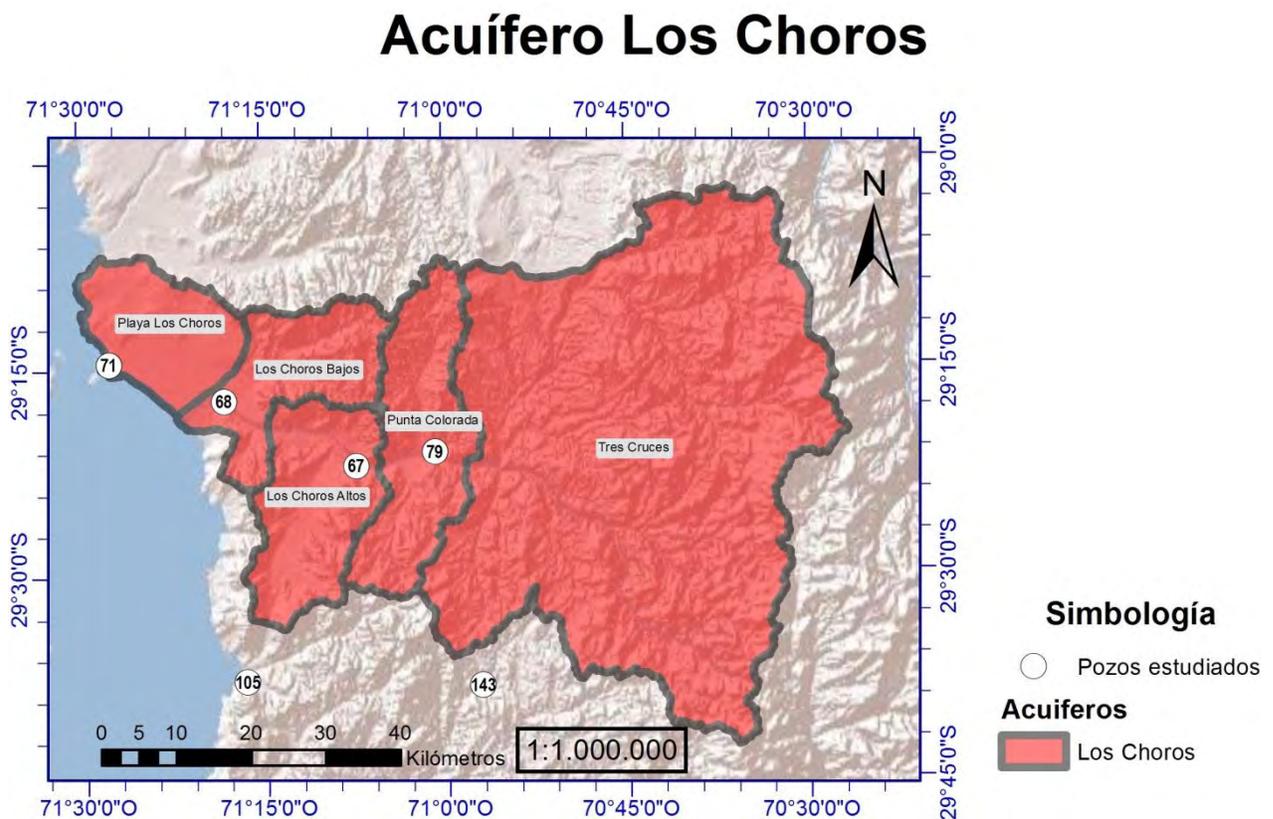


Figura 12: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca de Quebrada Los Choros, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo 2. Elaboración propia

⁷ Fuente DGA 2005

Unidades Hidrogeológicas

De las formaciones geológicas presentadas en el punto anterior, aquellas relevantes en términos hidrogeológicos corresponden principalmente a los rellenos sedimentarios del Terciario, Gravas de Atacama, y Cuaternario, Depósitos Modernos no Consolidados. Las demás formaciones mencionadas corresponden a la roca fundamental y se consideran formaciones impermeables. Por otra parte no se consideran los posibles acuíferos en roca fracturada que pudiesen existir en la formación Bandurrias o en rocas ígneas de la Franja Central y Oriental, por no existir información suficiente a la fecha.

Se ha reconocido la existencia de un acuífero freático de gran continuidad, que presenta su mejor desarrollo en el tramo comprendido entre Punta Colorada y unos dos kilómetros aguas abajo de la quebrada Los Choros Altos. Se identifican **5 unidades hidrogeológicas** en la cuenca.

La **primera unidad** de relevancia hidrogeológica corresponde al basamento rocoso de los rellenos cuaternarios, considerada como una superficie impermeable.

Se han agrupado en una **segunda unidad**, los depósitos de los conos de deyección, escombreras y materiales coluviales en general, como una unidad permeable, pero de escaso interés hidrogeológico debido a su escasa capacidad de almacenamiento de agua. La importancia de estos sedimentos radica en su gran capacidad para permitir la infiltración de las aguas lluvias y, por consiguiente, para operar como vías de transporte del agua subterránea hacia sectores del relleno aluvial del acuífero con menores cotas.

En el tramo terminal y hasta unos 6 Km, aguas arriba de la localidad de El Trapiche, se reconoce en la Quebrada Los Choros la formación sedimentaria definida como Gravas de Atacama, como una **tercera unidad** hidrogeológica. Estos sedimentos se emplazan hacia los bordes de la quebrada y suelen presentarse bastante erosionados en sus tramos distales. Se caracterizan por presentar un grado de compactación bastante elevado, llegando en algunos sectores a exhibir una cementación incipiente.

En el sector costero existen depósitos eólicos dispuestos sobre la Formación Coquimbo, que no presentan mucho interés del punto de vista hidrogeológico, pero su gran capacidad para infiltrar y transportar las aguas lluvias hacia estratos más profundos, le confieren importancia en la recarga del acuífero, constituyendo la **cuarta unidad** hidrogeológica.

Por último, se ha reconocido una **quinta unidad**, sedimentaria y permeable, relevante en términos hidrogeológicos, correspondiente a los rellenos aluviales de la quebrada principal. Estos se disponen en el lecho, y constituyen el material permeable de mayor capacidad de transporte y almacenamiento del recurso hídrico. Su extensión, espesor y permeabilidad le permiten almacenar y transmitir cantidades importantes de agua. Su espesor y cobertura son variables en toda el área que abarca. La permeabilidad va disminuyendo a medida que se acerca al océano debido a la disminución de la pendiente del lecho y la consecuente sedimentación de los materiales más finos.

El espesor y cobertura de los rellenos aluviales a lo largo de la quebrada son muy variables. Las potencias mayores se registran en el tramo medio y terminal, desde donde van disminuyendo gradualmente hacia aguas arriba, hasta llegar a valores que posiblemente no excedan algunas decenas de metros en el sector alto de la estructura. Esto se ve muy marcado desde los 13 Km aguas arriba de Tres Cruces hacia el oriente.

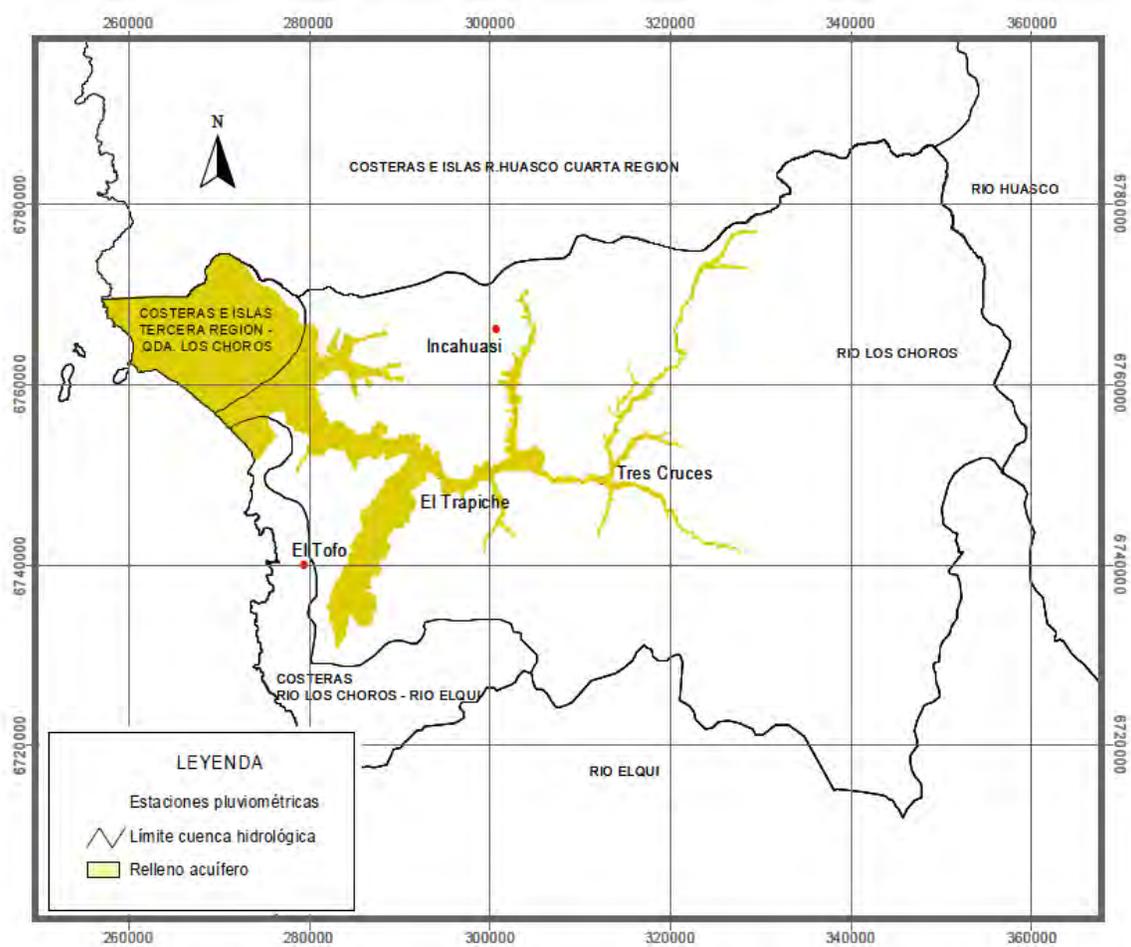


Figura 13: Distribución de relleno acuífero de Los Choros (DGA 2004)

Descripción de acuífero

La unidad sedimentaria de mayor importancia hidrogeológica corresponde a los depósitos aluviales dispuestos a lo largo de toda la cuenca (**quinta unidad** hidrogeológica), sobre todo en el cauce principal. Se reconoce en esta unidad la existencia de un importante nivel permeable superior que constituye un acuífero de carácter freático, que se presenta continuo a lo largo y ancho de esta estructura.

En el sector alto de la quebrada, desde Tres Cruces hacia el este, el ancho medio de esta unidad hidrogeológica alcanza aproximadamente 300 metros en el sector medio, es decir, entre quebrada Espinuda y el área de tributación de la Quebrada Los Choros Altos, éste es de aproximadamente 500 metros; y en el tramo terminal, que comprende desde la confluencia con la Quebrada Los Choros Altos hasta la desembocadura en el mar, el ancho de esta formación sedimentaria presenta alrededor de 680 metros.

En relación con el espesor del acuífero en el sector alto de la Quebrada Los Choros, se ha determinado que el relleno cuaternario presenta una potencia media de 60 m. La interpretación de los sondeos mediante transiente electromagnético indicaría un modelo de tres capas o estratos. El superior, con espesor variable entre 53 y 138 m con una media de 60 m fue correlacionado con gravas, ripios y arenas que corresponden a un acuífero que en su extremo superior se encuentra drenado. El segundo estrato presenta un espesor que varía entre 23 m y 48 m, identificado como roca basal alterada, que también podría corresponder a un acuífero. El estrato más profundo se identifica como el basamento rocoso sano.

Aguas abajo de Tres Cruces, específicamente en el sector de Punta Colorada, el acuífero presenta rellenos de mayor volumen que el anterior. En este sector, el valle se amplía hasta tener un ancho medio de 1500 m. El basamento rocoso se encontraría a una profundidad máxima de 280 m hacia el eje del cauce. Sin embargo, desde el punto de vista estratigráfico, se verifica la presencia de capas con diversos contenidos de arcilla. El basamento rocoso estaría ubicado a los 70 m de profundidad, en la parte más oriental del sector.

El sector medio de la hoya hidrográfica, correspondiente a Quebrada Choros Altos, abarca tanto la parte principal del valle, como un sector transversal formado principalmente por las Gravas de Atacama. El sector del valle principal, entre El Trapiche y Angostura, presenta características similares a las existentes entre Tres Cruces y Punta Colorada, rellenos constituidos por sedimentos cuaternarios gruesos. La estratigrafía del acuífero principal de Quebrada Los Choros, en la zona más cercana a Angostura. Mediante la aplicación de dos Sondajes Eléctricos Verticales, se ha identificado una capa de estratos secos, de 3 a 4 m de espesor, seguido de una capa de sedimentos húmedos con materiales finos o arcillosos, de 4 a 10 m de espesor. Bajo éstas, se encuentra un posible acuífero de espesor entre 85 a 100 m, compuesto por sedimentos y roca fracturada saturados. La roca se alcanza entre 100 y 108 m de profundidad.

Finalmente, el sector terminal de la quebrada, desde Choros Bajos hacia desembocadura, presenta espesores del relleno acuífero que fluctúan entre los 10 y los 200 m de profundidad, separados internamente por estratos impermeables constituidos principalmente por limo.

Parámetros Elásticos

Transmisividad (T)

Se estima que, de acuerdo a las características sedimentológicas del acuífero freático y a los espesores medios saturados, la transmisividad de esta unidad sería aproximadamente la siguiente para los distintos tramos: 650 m²/día en el sector alto; 1100 m²/día en el sector medio; y no mayor a 130 m²/día en el sector terminal.

Se estima una variación del coeficiente de transmisividad en el relleno acuífero de la quebrada Los Choros que comprende entre 100 y 400 m²/día. Sin embargo, se observan valores significativamente más altos en Tres Cruces (1660 m²/día). En el sector de Choros Bajos se observa el mínimo valor calculado (44 m²/día), con un promedio del sector en torno a 100 m²/día.

Según pruebas de bombeo se ha determinado la transmisividad representativa del acuífero según se muestra en la Tabla 1 (DGA 2005)

Tabla 1: Valores de Transmisividad (T) promedio por sector según pruebas de bombeo.

SECTOR	T [m²/día]
Tres Cruces	644,9
Punta Colorada Norte	467,5
Punta Colorada Sur	141,0
Entre Punta Colorada y Qda. Agua Grande	396,3
Entre Angostura y la costa	202,8
Quebrada Agua Grande	235,5
El Trapiche	289,3
Parte baja Quebrada La Higuera	97,3
Entre Qda. La Higuera y Angostura	85,0

Conductividad Hidráulica (K)

Se estima que la permeabilidad horizontal sería de 10^{-6} m/s en los sedimentos pliocénicos (Gravas de Atacama) y de 10^{-4} m/s en los depósitos pleistocénicos y recientes.

Se estima que la permeabilidad horizontal en las Gravas de Atacama (observadas desde El Trapiche hasta la costa) sería del orden de 1 m/día (10^{-5} m/s). En el relleno aluvial K sería muy variable, fluctuando entre 100 y 10 m/día (10^{-3} - 10^{-4} m/s) en los sectores medio alto de la cuenca; y entre 10 y 0.1 m/día (10^{-4} - 10^{-6} m/s) en el extremo final.

Según pruebas de bombeo se ha determinado la permeabilidad representativa del acuífero según se muestra en la Tabla 2. Dichos valores, permiten concluir que el espesor saturado del acuífero en cada uno de los sectores de la cuenca, corresponden a aquellos presentados en la Tabla 3. DGA 2005

Tabla 2: Valores de Conductividad Hidráulica (K) promedio por sector según pruebas de bombeo

Sector	K [m/s]
Tres Cruces	2,6E-04
Punta Colorada Norte	3,2E-04
Punta Colorada Sur	3,8E-05
Entre Punta Colorada y Qda. Agua Grande	8,6E-05
Quebrada Agua Grande	4,0E-05
El Trapiche	3,8E-04
Parte baja Quebrada La Higuera	1,4E-04
Entre Qda. La Higuera y Angostura	2,3E-05
Entre Angostura y la costa	1,6E-05

En términos generales, la permeabilidad de los estratos importantes desde el punto de vista de capacidad de conducción del agua subterránea, debiese fluctuar entre 10^{-3} y 10^{-6} m/s. La aparición de estratos limosos y arcillosos se hace más frecuente a medida que se avanza hacia la costa; también se acentúa en las zonas en que las quebradas laterales entregan sus aportes a la quebrada principal (quebradas Pajonales y La Higuera).

La permeabilidad va disminuyendo a medida que se acerca al océano debido a la disminución de la pendiente del lecho y la consecuente sedimentación de los materiales más finos.

Tabla 3: Espesor saturado estimado del acuífero por sectores.

Sector	Espesor saturado [m]
Tres Cruces	28,8
Punta Colorada Norte	16,8
Punta Colorada Sur	42,7
Entre Punta Colorada y Qda. Agua Grande	53,4
Quebrada Agua Grande	58,5
El Trapiche	7,1
Parte baja Quebrada La Higuera	24,3
Entre Qda. La Higuera y Angostura	48,7
Entre Angostura y la costa	61,5

Recargas y Descargas

La recarga que alimenta el acuífero en la quebrada de Los Choros proviene de dos fuentes principales, que serían la infiltración directa de las aguas lluvias y la infiltración de una parte de la escorrentía superficial que se produce ocasionalmente.

Debido al predominio de formaciones impermeables en gran parte de la cuenca, en especial en el sector alto de ella donde se producen las mayores precipitaciones y las pendientes son más fuertes, el agua precipitada escurre superficialmente hasta alcanzar el relleno sedimentario donde, una vez saturada la superficie, se produce escurrimiento superficial que más tarde puede infiltrar hacia aguas abajo e inclusive, en las grandes tormentas, puede alcanzar superficialmente el mar.

La descarga del sistema subterráneo de Quebrada Los Choros se verifica mediante tres mecanismos, que corresponden a la descarga hacia el mar por el extremo terminal; la explotación artificial a la que se somete actualmente el sistema; y la evaporación y evapotranspiración que se verifica en las zonas de afloramiento de agua.

La cuantificación de los caudales de recarga y descarga del sistema, ha sido determinada por medio de modelos de simulación hidrogeológicos en la cuenca de Quebrada Los Choros, y se estima en 390 l/s. (DGA 2005)

Intrusión Salina

En base a al Estudio de intrusión salina en acuíferos costeros: Sector Costa Quebrada Los Choros, IV región, realizado por la Dirección General de Agua (DGA, 2005), se concluye *“un estado de incipiente salinización que se acentúa en mayor grado en el sector occidental del Llano los Choros”* y *“que el origen de la fuente de contaminación de las aguas en la zona costera de Quebrada Los Choros lo constituye la penetración tierra adentro de la cuña salina, y en bastante menor grado pudiese desarrollarse producto de la infiltración de las aguas utilizadas para riego u otros fenómenos”*.

Luego de una evaluación de la situación de ese entonces de la hidroquímica de las aguas subterráneas cercanas e a la costa en el acuífero Los Choros, en relación a la normativa para usos de agua potable y riego se concluye que *“una gran porción de la zona costera del acuífero de Quebrada Los Choros presenta limitaciones para dichos usos”*. Se puede observar, a modo ilustrativo, la distribución del grado de afectación de las aguas en la costa de Los Choros en base a la concentración de cloruro, en la Figura 14

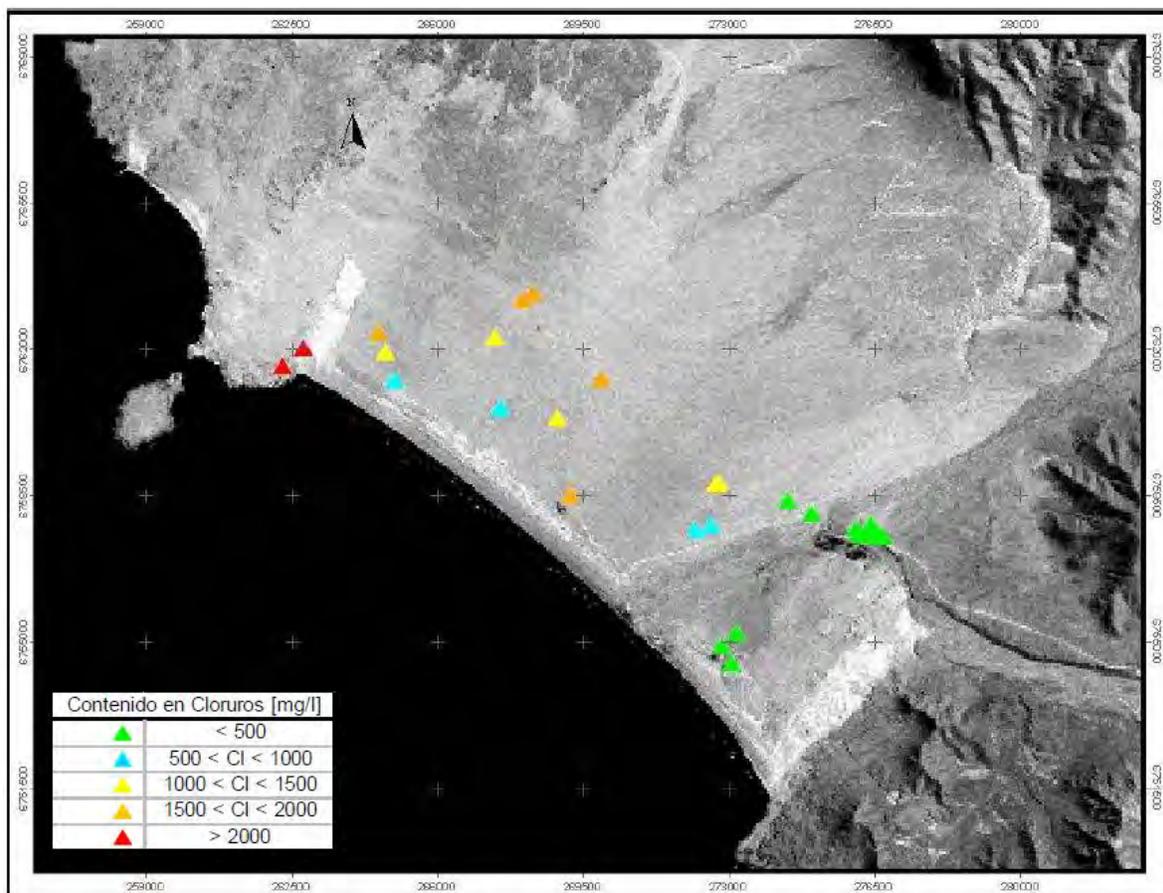


Figura 14: Grado de afectación a la calidad de las aguas según distribución espacial (DGA, 2005).

IV.5.2.2. Hidrogeología Acuífero Elqui⁸

A continuación se presenta la descripción hidrogeológica de la cuenca del río Elqui (Figura 15).

Los antecedentes hidrogeológicos de la cuenca Los Choros fueron obtenidos a partir del trabajo “Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Elqui, IV región: informe técnico” realizado por Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas (DGA, 2003). Este trabajo tiene como objetivo realizar una evaluación de los recursos hídricos subterráneos de acuíferos del río Elqui, IVª Región y su comparación con la explotación prevista de los derechos solicitados y los usos y derechos factibles de regularizar, para diversos escenarios de extracción.

Unidades Hidrogeológicas

A lo largo de la cuenca los rellenos sedimentarios que constituyen acuíferos se pueden separar en **tres capas o niveles** principales que en su conjunto no exceden los 250 m de potencia.

El **nivel más superficial** corresponde a los primeros 15 m de profundidad y está compuesto por depósitos de gravas con arenas, ripio, bolones e intercalaciones menores de sedimentos finos. Estos depósitos presentan una baja compactación y buena a muy buena capacidad hídrica.

El **segundo nivel** presenta un espesor variable entre 30 m y 120 m. Está compuesto por arenas de tamaño variable con gravas, bolones y arcillas e intercalaciones de lentes de arcilla de dimensiones variables.

El **nivel más profundo** tiene espesores también variables entre 30 m y 120 m. Este “estrato” queda representado por una sucesión de interdigitaciones de niveles arenosos con gravas y niveles arcillosos con clastos de tamaño característicos de grava. Debido a su mayor compactación y menor granulometría, la capacidad hídrica de este último nivel es inferior a la del nivel superior. Bajo este nivel se dispone el basamento rocoso del acuífero.

⁸ Fuente DGA 2003

Acuífero Elqui

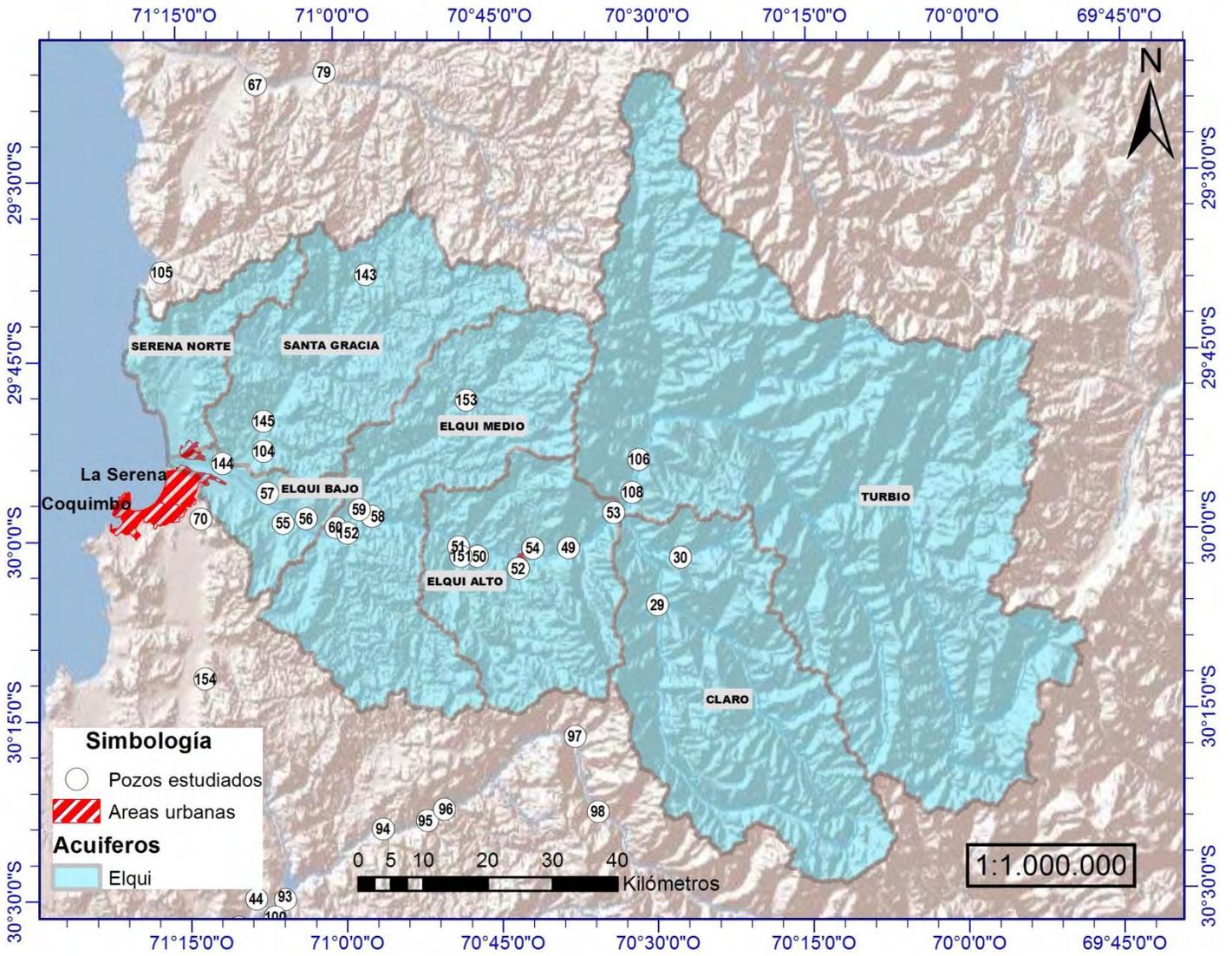


Figura 15: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca de río Elqui, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo 2. Elaboración propia.

Descripción de acuífero

En términos generales, los límites físicos del acuífero corresponden al basamento rocoso que aflora en los márgenes del valle a ambos costados del río. La profundidad del basamento a lo largo del valle fue definido en función de una secuencia de perfiles geofísicos. En general, el basamento se ubica a profundidades del orden de los 100 m en la parte alta del valle y llega hasta los 220 m en la zona más costera.

Desde la perspectiva de la concepción del modelo, los materiales de relleno de la zona de estudio se representaron en **2 estratos (acuíferos)** de espesor variable. El límite superior del estrato superficial corresponde al nivel de la superficie de terreno y el límite inferior del estrato profundo corresponde al basamento rocoso.

Tal como se ha señalado, el **acuífero superficial** se aloja principalmente en los rellenos conformados básicamente por gravas y arenas, presentando un carácter freático o libre.

El **acuífero inferior** presenta una mayor compactación y debido a la sin número de intercalaciones arcillosas, puede presentar ciertos confinamientos a nivel local.

Debido a que en la zona de estudio se reconocen variaciones en las características de los rellenos que conforman los acuíferos, tanto espacialmente como en profundidad, para ambos estratos se consideró conductividades hidráulicas variables espacialmente.

Recargas y Descargas

Los antecedentes han permitido establecer que la recarga actual del acuífero se produce principalmente por infiltración en el riego y canales, y en menor medida, por recarga del río en ciertos sectores, por infiltración directa de aguas lluvia y por infiltración indirecta desde piedemontes. Esta última corresponde a la recarga lateral del sistema, que representa parte de la lluvia que cae en las cuencas aportantes laterales y que en su destino final llegan a recargar el sistema.

Se realizó una estimación de la recarga del acuífero para la década del 50, considerando que en esa época el riego era poco significativo y por consiguiente, se consideró que la principal fuente de recarga la constituían las precipitaciones directas sobre el acuífero y aquellas que se produce en quebradas laterales que drenan finalmente al valle.

Para el cálculo se subdividió la cuenca hidrográfica del Valle del Elqui en 5 zonas aportantes, todas ellas limitadas por los márgenes del acuífero, de forma que en conjunto abarcan completamente sus bordes impermeables laterales. Estas zonas corresponden a:

- i. Sector Alto: Abarca desde la convergencia de los ríos Turbio y Claro hasta la localidad del Tambo.

- ii. Sector Medio: Corresponde al sector ubicado entre la localidad del Tambo y la Quebrada Talca.
- iii. Santa Gracia: Corresponde al sector ubicado en la quebrada Santa Gracia.
- iv. Elqui Bajo: Corresponde al sector ubicado entre la Quebrada Talca y el borde costero.
- v. Serena Norte: Corresponde al sector ubicado desde el sector norte de la desembocadura del río Elqui hacia el norte incluyendo las áreas de Vegas Norte y Juan Soldado.

Parámetros Elásticos

En el estudio de Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Elqui IV región se considera apropiado presentar, sólo los antecedentes de pruebas de bombeo con análisis de constantes elásticas reportados en el estudio de Groundwater Investigators (en : DGA 2003). Sin embargo, en esta referencia no se presenta la metodología usada ni el detalle del cálculo, por lo que sólo es posible hacer referencia a los resultados, los que se reportan en la Tabla 4. Esta tabla muestra una serie de valores de conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S) en distintos pozos de explotación. Se debe señalar que estos pozos se encuentran ubicados en función de los perfiles geofísicos confeccionados y no se dispone de su ubicación precisa (coordenadas UTM).

Los coeficientes de permeabilidad (K) y transmisividad (T) estimados por distintos métodos presentan una variación importante. En efecto, el coeficiente de permeabilidad varía entre 2 y 5 m/día hasta valores de 45 a 65 m/día. De igual forma, la transmisividad varía entre 130 m²/día y 5300 m²/día.

Esta variación se puede explicar en función de las variaciones granulométricas en los rellenos sedimentarios observados a lo largo del valle, sin embargo, parte importante de la incertidumbre no puede dilucidarse sin un conocimiento cabal de la metodología de cálculo utilizada. Se estima altamente probable que algunas de las pruebas de bombeo analizadas estén influenciadas por el río, lo que podría explicar valores muy altos estimados para el coeficiente de transmisividad. Por consiguiente y desde el punto de vista conceptual, se puede afirmar que la conductividad hidráulica del acuífero puede variar entre 1 y 60 m/día, aproximadamente.

Tabla 4: Resumen de constantes elásticas acuífero cuenca río Elqui según estudio de Groundwater Investigators. K: conductividad hidráulica; S: coeficiente de almacenamiento; T: transmisividad (en: DGA 2003)

Sección Geofísica	Pozo	K (m/min)	K (m/día)	S	T (m ² /min)	T (m ² /día)	Espesor Saturado (m)	Acuífero
3	B3	0,018	25,9	0,0002	0,18	259	10	inferior
		0,0033	4,7	0,0008	0,27	389	82	ambos
4	B5'			0,0007	0,17	245		ambos
				0,002	0,13	187		ambos
		0,0021	3	0,0083	0,24	346	114	ambos
6	B7			0,0016	0,11	158		inferior
				0,0001	0,09	130		medio
				0,0007	0,16	230		superior
		0,0015	2,2	0,0002	0,17	245	113	todos
6'	B7	0,0014	2		0,18	259	129	ambos
11	C6	0,0029	5		0,28	403	97	ambos
	C7'	0,0019	2,7		0,18	259	95	ambos
					0,17	245		ambos
18	B8			0,0005	3,7	5.328		ambos
				0,0005	3,1	4.464		ambos
		0,045	64,8	0,0006	2,9	4.176	64	ambos
26'	B9	0,031	44,6	0,0017	1,76	2.534	57	inferior
		0,017		0,0007	1.98	2.851		ambos

Intrusión Salina

En el sector de la desembocadura del río la napa subterránea se presenta bastante superficial, contribuyendo al desarrollo de vegas y presentando además un alto contenido de sales, debido a la intrusión salina desde el mar.

IV.5.2.3. Hidrogeología Acuífero Culebrón-Lagunillas

A continuación se presenta la descripción hidrogeológica de la cuenca de Pan de Azúcar (Figura 16).

Los antecedentes hidrogeológicos de la cuenca Los Choros fueron obtenidos a partir de los siguientes trabajos:

- “Control y evaluación De recursos hídricos subterráneos IV región. Volumen 1: Estudio y modelo hidrogeológico valle pan de azúcar” realizado por AC – Ingenieros consultores Ltda. bajo solicitud de Dirección General de Aguas en el año 1998 (DGA, 1998a). Este trabajo tiene como objetivo analizar los componentes del sistema hídrico y la elaboración de un modelo de simulación hidrogeológico que permita estudiar el comportamiento del sistema a través del tiempo, suponiendo distintos escenarios de explotación.
- “Aplicación del modelo hidrogeológico valle pan de azúcar. Informe Técnico” realizado por el Departamento de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas en el año 2004 (DGA, 2004b). Este trabajo tiene como objetivo efectuar una aplicación del modelo referido (DGA, 1998a) sobre la base de analizar la demanda a partir de las nuevas captaciones de aguas subterráneas considerando un período de simulación de 40 años.

Unidades Hidrogeológicas

En el trabajo “Estudio y modelo hidrogeológico, valle pan de azúcar” realizado por AC- ingenieros consultores ltda., en 1998 (DGA 1998), se identifican **tres estratos o capas** que caracterizan la formación acuífera (Figura 17).

El estrato superior (capa arcillosa) corresponde a materiales gruesos en una matriz con porcentajes no despreciables de arcillas, las que en sectores se vuelven casi impermeables. Su espesor varía entre los 20 y 40 metros.

El **estrato inmediatamente inferior** (zona acuífera) lo conforman varias capas de distintas granulometrías, presentándose alternancias de capas permeables y poco permeables, su espesor varía entre 30 y 40 metros.

Y el **tercer estrato** (zona inferior) tiene contacto con el basamento rocoso y se tienen pocos antecedentes de él, pero se trataría de capas semi-permeables e impermeables.

Acuífero Culebrón - Lagunillas

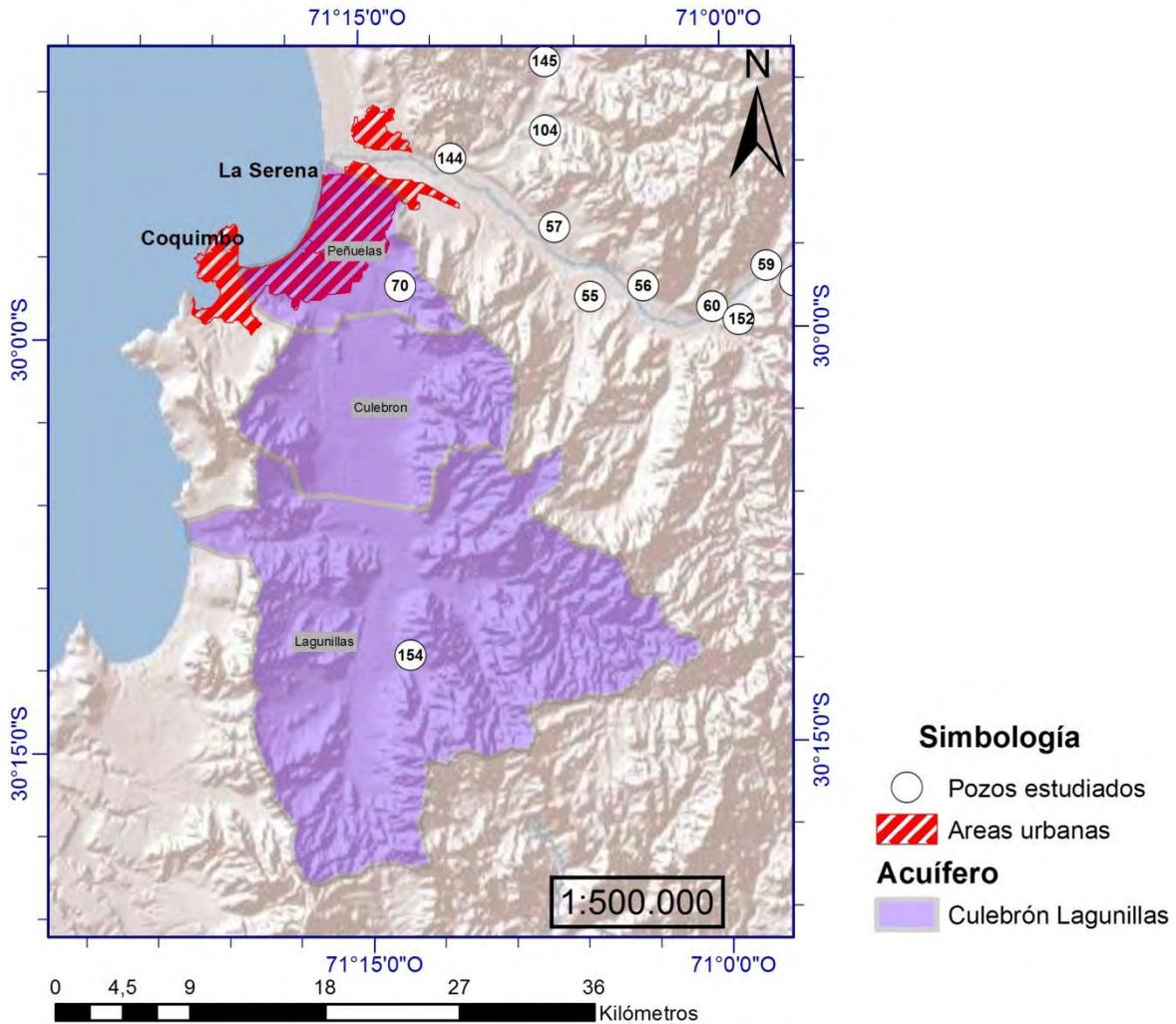


Figura 16: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca de Pan de Azúcar, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo 2. Elaboración propia.

Descripción de acuífero

El valle de Pan de azúcar (en donde se aloja el acuífero Culebrón Lagunillas) es un llano que se extiende de Sur a Norte a unos 9 Km de la línea de la costa abarcando aproximadamente 20 km de longitud entre la quebrada lagunillas y quebrada peñuelas. El valle se encuentra rodeado por serranía cuyos puntos más altos llegan a 700 m.s.n.m. constituyéndose como manifestación superficial del basamento rocoso.

Mediante perfiles gravimétricos del valle de Pan de azúcar, se ha podido identificar la geometría del basamento rocoso en profundidad. En el extremo norte del área de estudio el relleno llega a profundidades del orden de 500 m, aflorando la roca hacia el margen oriental y en la zona costera. Entre el cerro Plan de Azúcar y el borde occidental (estero Culebrón) el sedimento alcanza a profundidades del orden de 90 m. Hacia el oriente del cerro Pan de Azúcar se registran los máximos espesores de relleno del área, alcanzando los 870 m. Más al sur el basamento se presenta un poco plegado llegando a profundidades de 970 m. En la zona de El Sauce el relleno alcanza hasta los 750 m en la ruta 43, hacia el poniente el relleno se reduce variando entre 100 m y 275 m, respectivamente.

De acuerdo a todos los antecedentes, se puede apreciar que la mayor parte de las formaciones acuíferas de la cuenca están constituidas por estratos de espesor variable, con intercalaciones de materiales impermeables y semipermeables subyacentes, en muchos sectores, a un estrato superficial predominantemente arcilloso de baja permeabilidad. Esta capa de material cuya potencia varía entre 20 y 40 m, dificulta la infiltración de agua y excedentes de riego, generando escorrentía superficial hacia cauces definidos, como lo son el estero Culebrón, canales y acequias.

La Presencia de un estrato superficial arcillosos explica la existencia de napas confinadas en varios sectores. A pesar de la existencia del estrato superficial, en el extremo oriente de la ex hacienda El Sauce, existen napas libres, ya que el nivel estático se encuentra próximo o por debajo del límite inferior del estrato arcilloso (25 a 35 m de profundidad)

La zona de mayor importancia hidrogeológica se ubica circulando la ruta 43 y parte de la ex hacienda El Sauce. En ese sector se encuentran rellenos sedimentarios de mayor espesor y permeabilidad, encontrándose estratos muy permeables de hasta 40 m de espesor.

En diferentes sectores el acuífero pasa de condiciones confinadas a semi-confinadas, dada la capa superior con cantidades variables de arcillas, que confieren características semipermeables a impermeables. (DGA 1998).

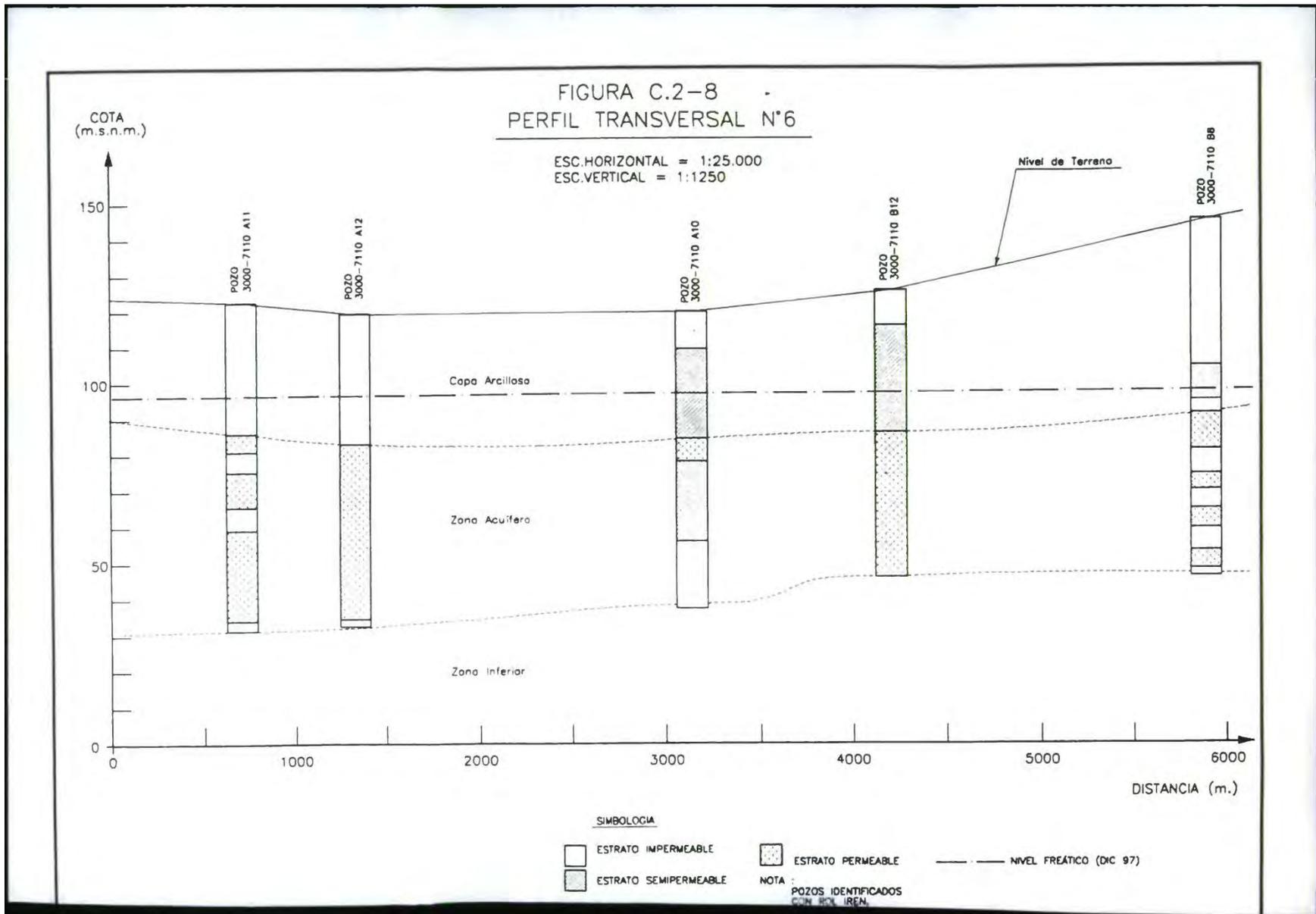


Figura 17: Perfil transversal a modo de ilustración de unidades hidrogeológicas de acuífero culebrón-lagunillas (DGA 1998)

Recargas y Descargas

La principal recarga del acuífero proviene del drenaje de cuencas laterales por medio de las quebradas La Cortadera, Las Cardas, Martínez entre otras. En menor grado también existe recarga debida a la infiltración de riego predial y de precipitaciones.

Las descargas naturales en forma de escorrentía superficial son el estero Culebrón y en forma de Dren la quebrada Lagunillas, mientras que las descargas naturales en forma subterránea son la quebrada Peñuelas, el estero Culebrón y el mar. (DGA 2004)

Parámetros Elásticos

Conductividad Hidráulica (K)

Las mayores permeabilidades, según las pruebas de bombeo, son del orden de $1 \cdot 10^{-3}$ (m/s) y corresponden a transmisividades del orden de 1000 (m²/día) (Tabla 5).

Tabla 5: Parámetros Elásticos acuífero Culebrón - Lagunillas según pruebas de bombeos en DGA (1998)

PARÁMETROS ELÁSTICOS EN LA ZONA DE ESTUDIO							
Rol Iren	K [m/s]	m [m]	T [m ² /día]	Rol Iren	K [m/s]	m [m]	T [m ² /día]
2950 7110 C14	2 1E-04	11.0	203	3000 7110 B8	8 3E-05	34.7	249
2950 7110 C19	4 2E-05	37.7	138	3000 7110 B9	1.3E-04	40.0	443
3250 7120 C26	4 9E-05	47.5	200	3000 7110 B10	1 0E-04	31.0	279
3000 7110 A9	4 9E-05	23.7	101	3000 7110 B11	8 2E-05	17.0	120
2950 7110 C1	5 7E-04	2.3	112	3000 7110 B12	6 5E-05	40.8	230
3000 7110 C2	1 9E-04	21.0	342	3000 7110	3 1E-05	46.0	123
2950 7110 C14	8 6E-06	291.5	218	3000 7110 B15	1 5E-04	55.2	716
2950 7110 C25	8 1E-05	30.4	213	3000 7110 B17	2 3E-04	46.7	933
2950 7110 C30	2 1E-05	15.0	27	3000 7110 B19	1 0E-04	23.0	201
2950 7110 D1	1 0E-04	5.2	45	3000 7110 C1	6 2E-04	12.7	684
2950 7110 D2	5 2E-05	12.0	54	3000 7110 C3	4 5E-04	18.0	705
2950 7110 D3	1 5E-04	14.0	186	3000 7110	5 1E-05	65.0	289
2950 7110 D4	1 9E-04	3.3	53	3000 7110 C5	2 4E-04	37.0	777
2950 7110 D5	2 1E-05	35.0	62	3000 7110 C6	1 8E-04	21.7	338
2950 7110 D6	1 0E-04	28.0	254	3000 7110 C8	1 3E-04	37.2	419
2950 7110 D9	4 7E-05	41.0	165	3000 7110 C9	6 7E-04	9.0	520
2950 7110 D10	5 2E-05	14.5	65	3000 7110 C11	8 5E-05	38.0	280
2950 7110 D13	7 1E-05	22.0	135	3000 7110 D1	2 2E-04	13.5	254
2950 7110 D15	6 6E-05	18.0	103	3000 7110 D2	4 7E-04	8.7	350
2950 7110 D16	9 7E-05	14.5	121	3000 7110 D3	3 5E-04	9.5	289
2950 7110 D17	3 4E-05	26.5	77	3000 7110 D5	3 9E-04	17.6	589
3000 7110 A1	6 6E-06	10.0	6	3000 7110 D6	2 5E-04	12.0	257
3000 7110 A1	2 6E-04	21.5	482	3000 7110 D8	2 0E-04	11.3	195
3000 7110 A2	1 8E-04	29.5	453	3000 7110 D9	5 7E-05	22.5	111
3000 7110 A3	2 0E-04	6.6	115	3000 7110 D10	2 2E-04	33.0	621

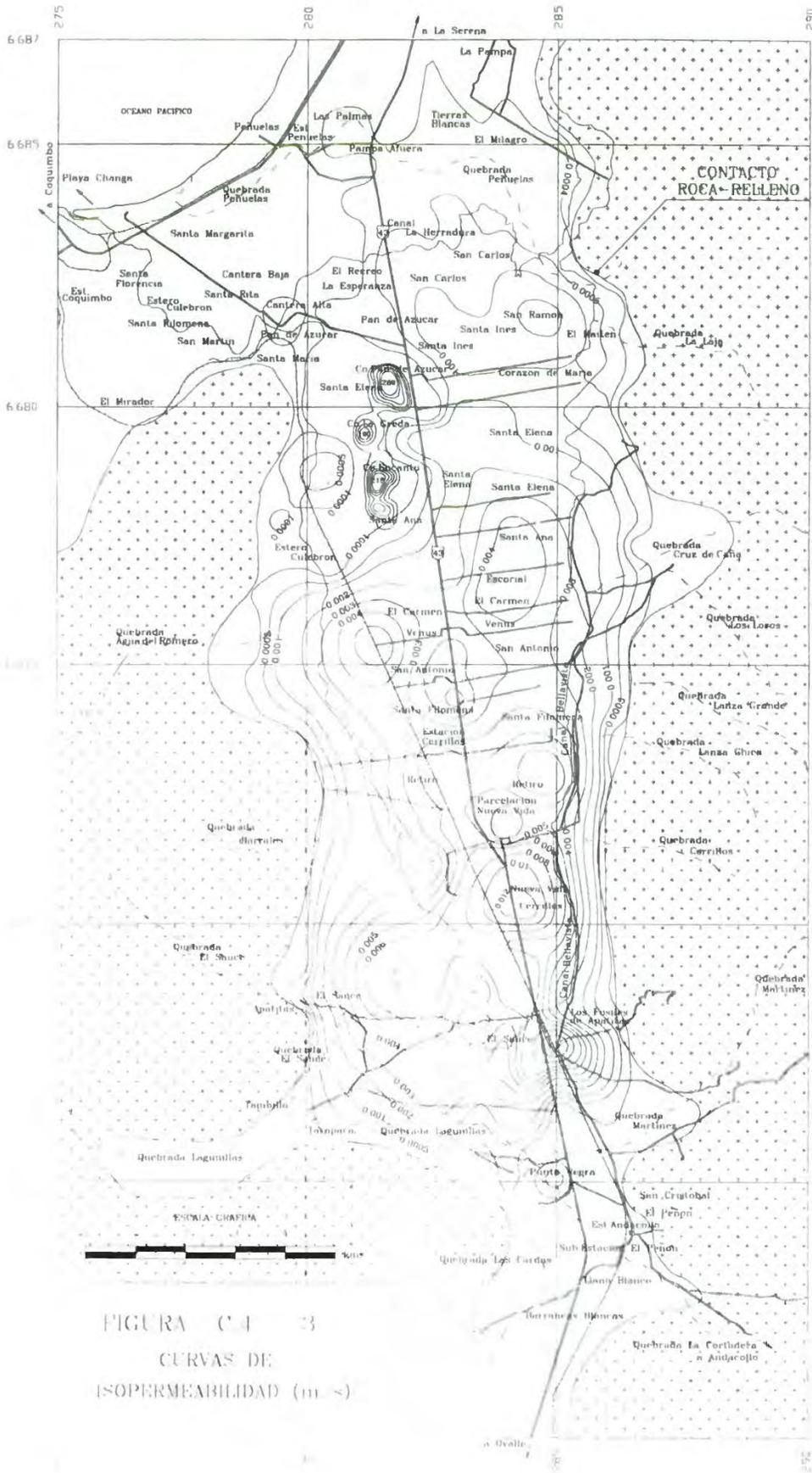


Figura 18: Curvas de Isopermeabilidad de Acuífero Culebrón - Lagunillas (DGA, 1998).

Transmisividad

La zona que presenta la transmisividad más alta ($T > 800 \text{ m}^2/\text{día}$) se ubica circundando la Ruta 43 en el sector de Cerrillos (entre la Vuelta del Martillo y el sector norte de la ex hacienda El Sauce). También en el límite suroriente de la ex hacienda El Sauce se presenta un sector de transmisividad superior a $800 \text{ m}^2/\text{día}$.

Hacia el norte, por el sector central del valle, se va haciendo presente con mayor intensidad la influencia del cordón que incluye el cerro Pan de Azúcar, los que puede explicar los menores valores de transmisividad debido a la deposición de finos proveniente de los cerros.

Frente al cerro Pan de Azúcar, en una franja Este-Oeste, el valor de la transmisividad desciende a unos de $200 \text{ m}^2/\text{día}$. Entre el cerro a Pan de Azúcar y quebrada Peñuelas se presenta los acuíferos de menor calidad del valle.

Almacenamiento (S)

Los resultados de estimación de coeficiente de almacenamiento, luego de calibración del modelo hidrogeológico del acuífero Culebrón - Lagunillas por el estudio de DGA (1998a), se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Coeficientes de acumulación acuífero Culebrón - Lagunillas (DGA, 1998)

Estrato	Inicial			Final		
	Porosidad Efectiva	Almacenam. Napa Libre	Almacenam. Napa Conf. [m^{-1}]	Porosidad Efectiva	Almacenam. Napa Libre	Almacenam. Napa Conf. [m^{-1}]
Arcilloso	0.3	0.05	0.001	0.3	0.008	0.0005
Acuífero	0.3	0.05	0.001	0.3	Figura F.6-3	Figura F.6-3
Capa Inferior	0.3	0.05	0.001	0.3	0.008	0.0005

IV.5.2.4. Hidrogeología Acuífero Limarí

A continuación se presenta la descripción hidrogeológica de la cuenca del río Limarí (Figura 19).

Los antecedentes hidrogeológicos de la cuenca Los Choros fueron obtenidos a partir del trabajo “Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Limarí: informe técnico” realizado por Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas en el año 2008 (DGA, 2008). Este trabajo tiene como objetivo determinar los volúmenes totales anuales posibles de otorgar como derechos de agua subterránea.

Unidades Hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas se dividieron en principio según se ubicaran en zonas de **rellenos sedimentarios no consolidados** o en **rocas**. Para los acuíferos ubicados en rellenos sedimentarios no consolidados se definieron dos zonas, una de **alta permeabilidad** y otra **semipermeable**.

Unidad sedimentaria de Alta Permeabilidad: Corresponde a una unidad constituida principalmente por bolones, gravas, arenas, y sedimentos finos en menor cantidad. Se presenta principalmente en los depósitos fluviales actuales, a lo largo de los cauces actuales, en conos aluviales, coluviales y terrazas fluviales subactuales, todos de edad cuaternaria, con espesores que fluctúan entre 6 y 30 m dependiendo de los distintos depósitos.

Unidad sedimentaria Semipermeable: Está constituida por mezclas de arenas, gravas y limos, con una cantidad variable de arcilla, donde esta combinación puede ser clasto o matriz soportada.

Esta unidad se encuentra en los depósitos de terrazas aluviales, los cuales debido a su mayor edad (miocena a holocena) y a sus condiciones de deposición presentan una mayor cantidad de materiales finos que los depósitos más recientes. El espesor reconocido de esta unidad llega a los 100 m. El potencial hidrogeológico de esta unidad es moderado.

Unidades en Roca: En el sector poniente de la cuenca, esta unidad se encuentra en rocas pertenecientes a la formación Quebrada Marquesa, Arqueros, La Negra y en la zona de Intrusivos Mesozoicos y de Rocas Metamórficas Paleozoicas. Corresponde a porciones de roca meteorizadas y/o fracturadas que almacenan agua en distintas proporciones. Su extensión y profundidad no se conoce con exactitud, ya que son pocos los pozos en los que se ha reconocido esta unidad.

En los sectores rocosos de la zona oriental de la cuenca, esta unidad en roca corresponde al basamento rocoso que, si bien puede presentar una porosidad y permeabilidad primaria, no conforma acuíferos. Sin embargo, en caso de encontrarse fracturadas o altamente meteorizadas, podrían contener acuíferos y pertenecer, por lo tanto, a la unidad de permeabilidad media a baja, pero no se cuenta con antecedentes que muestren la existencia de pozos y/o elevados valores de permeabilidad. Sobre esta unidad se ha depositado el relleno sedimentario (DGA, 2008).

Acuífero Limarí

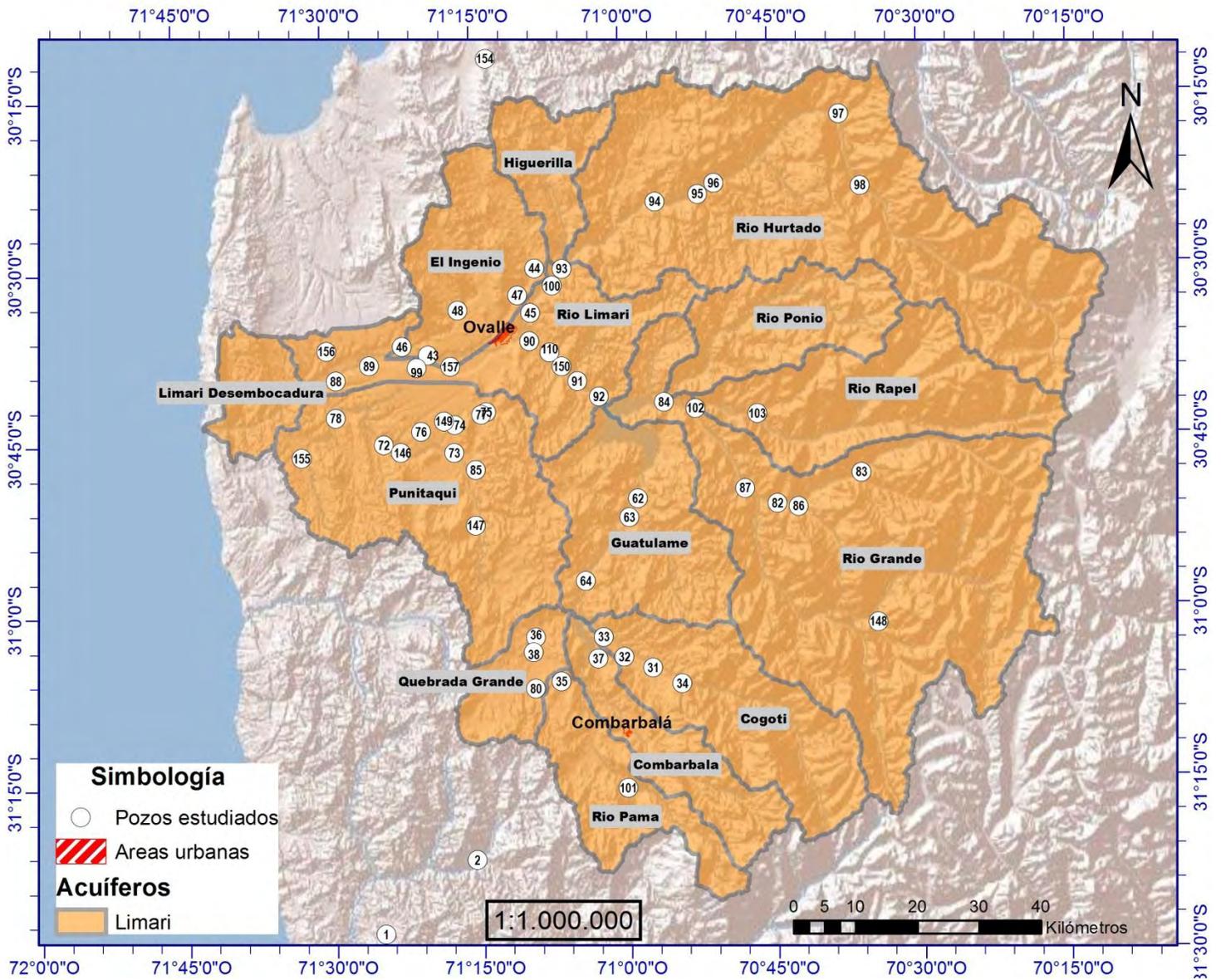


Figura 19: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca del río Limarí, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo 2. Elaboración propia.

Descripción de acuífero

La **unidad de alta permeabilidad** desarrolla principalmente acuíferos libres, asociados a los principales cursos de agua (ríos Limarí, Grande, Cogotí y estero Punitaqui), encontrándose en conexión directa con ellos. La baja compactación de sus sedimentos condiciona altas conductividades hidráulicas que permiten la extracción de grandes a moderados caudales específicos de agua, lo que se traduce en un alto potencial hidrogeológico. A lo largo de cauce del río Limarí, el nivel freático presentado en los pozos es somero no desciende de los 5 m. En los conos aluviales y depósitos coluviales también se presentan acuíferos libres con niveles freáticos que varían entre 5 y 30 m. En los depósitos coluviales, los acuíferos se encuentran conectados generalmente a acuíferos en roca.

El grado de permeabilidad de la **Unidad Semipermeable** varía dependiendo de la proporción entre sedimentos gruesos y finos, y en particular de la cantidad de arcilla presente. La mayoría de los acuíferos de esta unidad corresponden a acuíferos libres, no obstante existen en menor grado acuíferos cubiertos, semiconfinados y confinados. Estos últimos se deben a la presencia de niveles de limo y arcilla.

En general, el potencial hidrogeológico de la **unidad hidrogeológica en Roca** en el sector occidental es moderado a alto. Los pozos encontrados conforman acuíferos libres, con niveles freáticos variables, entre 3 y 30 m. En varios de los sondajes presentes en esta unidad, la parte superior de los acuíferos (o la zona no saturada, dependiendo de la profundidad del nivel estático) se encuentra constituida por depósitos coluviales que cubren a los cuerpos de roca. Por otro lado, el potencial hidrogeológico presente en rocas del sector oriental se ha considerado en la práctica despreciable.

Los **flujos de agua subterránea** provenientes de las cuencas de los ríos Grande y Hurtado confluyen hacia los depósitos fluviales actuales del río Limarí, mientras que los flujos provenientes desde el sur de la depresión fluyen a través de los depósitos semipermeables en general hacia el estero Punitaqui (Figura 20).

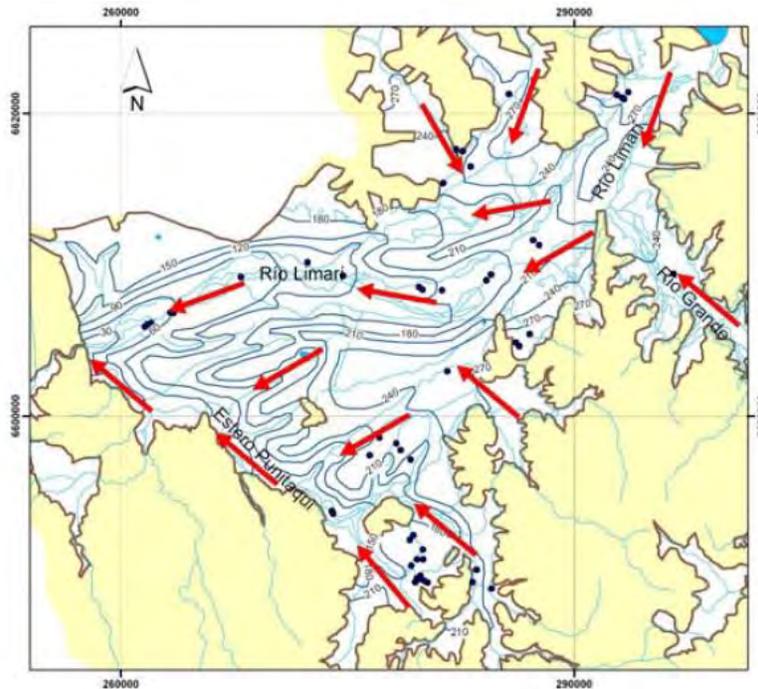


Figura 20: Curvas equipotenciales y dirección del flujo de agua subterránea (DGA, 2008).

A continuación se presenta la descripción de acuíferos en base a la sectorización hidrogeológica de la cuenca del río Limarí presentada en la Figura 19.

Río Hurtado: El sector río Hurtado comprende desde el nacimiento del río Hurtado hasta el embalse Recoleta. El sector del río Hurtado se caracteriza por tener un valle en general muy estrecho, debido a lo cual la capacidad de almacenamiento es muy reducida. En general el relleno fluvial moderno es de poca e irregular potencia, de alrededor de 4,5 m. No existen estimaciones de la permeabilidad de los acuíferos en este sector.

Ríos Ponio y Rapel: Estos sectores comprenden las cuencas de los ríos Ponio y Rapel respectivamente, hasta su junta con el río Grande. La mayor parte de los pozos que poseen estratigrafía en estos sectores presentan granulometría gruesa y buena transmisividad (entre 450 y 1.600 m²/día), encontrándose a los pies de conos aluviales que nacen en quebradas menores. Por otro lado, los pozos que se encuentran fuera de los conos aluviales presentan niveles limo-arcillosos que disminuyen notablemente su rendimiento. El espesor del relleno en el sector es de alrededor de 30 m, existiendo profundidades del basamento detectadas de entre 27 y 35 m.

Río Grande: Este sector comprende la cuenca del río Grande desde el nacimiento de los ríos Mostazal y Grande hasta el embalse La Paloma. En general los acuíferos en este sector presentan poca extensión superficial y en profundidad, estimándose que en esta zona no existe un relleno fluvial antiguo. Las zonas de mayor interés hidrogeológico se encontrarían en la zona de la

confluencia de los ríos Grande y Mostazal, además de los sectores ubicados en las desembocaduras de quebradas.

Cogotí: Este sector comprende la cuenca del Río Cogotí, desde su nacimiento hasta el embalse Cogotí. El río Cogotí presenta un relleno fluvial moderno de buena permeabilidad y de potencia no mayor a 7 m. En general no presenta relleno fluvial antiguo, a excepción de pequeños sectores en los que no alcanza espesores mayores a 20 m (la transmisividad medida en dichos sectores varía entre 60 y 372 m²/d).

Combarbalá: Este sector comprende la cuenca del Río Combarbalá, desde su nacimiento hasta el embalse Cogotí. El valle del río Combarbalá es encajonado, con escaso desarrollo de depósitos fluviales, los cuales corresponden a rellenos fluviales modernos de entre 6 y 7 m de potencia, sin presentarse un depósito fluvial antiguo salvo en la zona de Combarbalá donde éste alcanza un espesor de hasta 21 m.

Río Pama: Este sector comprende la cuenca del río Pama, desde su nacimiento hasta su junta con el río Combarbalá. Al igual que los anteriores presenta poca capacidad de almacenamiento, variando la potencia del relleno fluvial moderno entre 1 y 5 m, y la del fluvial antiguo es irregular alcanzando los 10 m de espesor.

Quebrada Grande: Este sector comprende la cuenca de la Quebrada Grande, desde su nacimiento hasta su junta con el río Guatulame. Es un sector con poca a nula capacidad de almacenamiento.

Higuerilla: Este sector comprende la cuenca de la Quebrada Higuerilla hasta su desembocadura en el embalse Recoleta. No se dispone de información de estratigrafías de pozos que permitan conocer las características hidrogeológicas de este sector. El relleno en este sector incluye una gran extensión de depósitos de terrazas aluviales, los cuales es probable que en parte no se encuentren saturados y, por lo tanto, no alberguen un acuífero. Esto último se comprueba al observar que los pozos se ubican cerca de las riberas de los cauces superficiales.

El Ingenio: Este sector comprende las cuencas de las Quebradas Higuerilla y La Placa hasta su junta con el río Limarí.

Río Guatulame: Este sector comprende desde la salida del río Guatulame desde el embalse Cogotí hasta su desembocadura al embalse La Paloma. El relleno del río Guatulame presenta una extensión considerable inmediatamente aguas arriba del embalse La Paloma, siendo la potencia del relleno fluvial moderno de hasta 13 m, mientras que la potencia del relleno fluvial más antiguo alcanza una potencia de 50 m. Ambos rellenos se acuñan hacia aguas arriba alcanzando en las zonas más altas del río Guatulame un espesor total de entre 5 y 8 m.

Río Limarí: Este sector comprende el río Limarí desde su inicio en el embalse Recoleta pasando por la ciudad de Ovalle hasta su paso por la carretera Panamericana, lugar donde se emplaza la estación fluviométrica "Limarí en Panamericana". Abarca además la subcuenca del río Grande entre el embalse La Paloma y su junta con el río Limarí. En esta zona se desarrolla una gran

planicie constituida por depósitos de terrazas aluviales, que están conformadas por clastos redondeados localizados dentro de una matriz areno-limosa de porcentajes variables, y poseen una potencia de hasta alrededor de 200 m. La transmisividad de estos depósitos es del orden de 9 a 86 m²/día. El relleno fluvial actual posee una potencia de entre 10 y 20 m, está constituida por bolones, gravas y arenas, y algunos niveles de limos y arcillas, presentando una alta permeabilidad (transmisividad comprendida entre 300 y 1500 m²/día).

Aguas abajo del embalse La Paloma se presenta un relleno fluvial moderno de alrededor de 6 m, que aumenta hacia el norte hasta alcanzar una potencia estimada de entre 10 y 15 m. En este sector el acuífero se hace más extenso, alcanzando el relleno fluvial antiguo una potencia de más de 80 m, con una granulometría conformada por gravas y conglomerados con gran proporción de limos y arcillas, que le imponen una baja permeabilidad (la transmisividad estimada para el sector es de entre 10 y 100 m²/día).

Punitaqui: Este sector comprende la cuenca del río Punitaqui hasta su confluencia con el río Limarí.

Limarí desembocadura: Este sector abarca el río Limarí desde su paso por la carretera Panamericana hasta su desembocadura al mar. En general no existen muchos pozos en este sector, por lo que la información hidrogeológica es escasa (DGA, 2008).

Recargas y Descargas

La recarga de los acuíferos en el sector de estudio proviene de diversos factores. Los factores más importantes corresponden al aporte por precipitaciones, a las infiltraciones desde los ríos y al riego, dado por un alto desarrollo de la agricultura (Tabla 7).

Otras entradas de menor importancia corresponden a los aportes subterráneos de quebradas tributarias, que forman pequeños acuíferos en contacto con el acuífero principal y son muy difíciles de evaluar. Si bien los factores mencionados corresponden a fuentes de recarga, la recarga neta al acuífero es menor, debido a pérdidas por evapotranspiración, por escorrentía y por consumo de las plantas.

Para las cabeceras de cuenca se supuso que la recarga proviene básicamente de la precipitación, siendo despreciables los aportes por riego u otras fuentes. Esto se justifica dado que las cuencas de cabeceras presentan escasos depósitos sedimentarios, ubicados principalmente en los cursos de los ríos. Esto determina que las áreas de cultivo en comparación con la superficie total de la cuenca sean marginales, lo que sumado a la alta pluviosidad de la zona y que no existen volúmenes de regulación importantes, hacen que las recargas por riego en esta zona sean despreciables para los alcances de este estudio.

Por otro lado en las cuencas intermedias, al disminuir las pendientes medias se observa mayor cantidad de relleno lo que se asocia directamente a acuíferos más extendidos y mayores superficies dedicadas a la agricultura. Considerando además el sistema de riego La Paloma, que asegura con un 85% de probabilidad el riego para las zonas ubicadas bajo los embalses Recoleta, Cogotí y La Paloma, donde la pluviosidad es más baja, se tiene que el mayor aporte de recarga en esta zona está dada por el riego (DGA, 2008).

Tabla 7: Recarga por sector acuífero cuenca río Limarí (modificado de DGA 2008)

Sector acuífero	Recarga por Precipitaciones (L/s)	Recarga por Riego (L/s)	Recarga total (L/s)	Recarga total (m ³ /año)	Porcentaje de recarga por Precipitaciones	Porcentaje de recarga total de recarga por Riego
Río Hurtado	193,5	0,0	193,5	6102216	100,0	0,0
Río Ponio	41,4	0,0	41,4	1305590	100,0	0,0
Río Rapel	127,4	0,0	127,4	4017686	100,0	0,0
Río Grande	288,4	0,0	288,4	9094982	100,0	0,0
Cogotí	76,6	0,0	76,6	2415658	100,0	0,0
Combarbalá	41,1	0,0	41,1	1296130	100,0	0,0
Río Pama	45,0	0,0	45,0	1419120	100,0	0,0
Quebrada Grande	23,7	0,0	23,7	747403	100,0	0,0
Higuerilla	21,1	0,0	21,1	665410	100,0	0,0
El Ingenio	71,0	56,6	127,6	4023994	55,6	44,4
Río Limarí	129,0	456,5	585,5	18464328	22,0	78,0
Guatulame	120,6	117,4	238,0	7505568	50,7	49,3
Punitaqui	325,8	416,9	742,7	23421787	43,9	56,1
Limarí Desembocadura	16,9	0,0	16,9	532958	100,0	0,0

Parámetros Elásticos

La unidad sedimentaria de alta permeabilidad presenta altas conductividades hidráulicas, del orden de 100 a 10⁻² cm/s. así como también, en el cauce del río Limarí, los pozos entregan en promedio un caudal específico de 3,7 lt/s/m, con un máximo de 7 lt/s/m, que por otro lado, en los sectores con conos aluviales y depósitos coluviales caudales específicos de 1,2 lt/s/m

Por su lado, en la unidad sedimentaria Semipermeable, el grado de permeabilidad varía dependiendo de la proporción entre sedimentos gruesos y finos, y en particular de la cantidad de arcilla presente, con valores de conductividad hidráulica entre 10⁻² a 10⁻⁶ cm/s. Los sondajes en esta unidad, entregan caudales específicos de 0,4 lt/s/m, con niveles estáticos variables (entre 7 y 30 m), someros cerca de cerros islas ubicados al suroeste del estero Punitaqui y al sur de Ovalle, asociados a la presencia de acuíferos confinados y semiconfinados, y niveles estáticos más profundos (entre 20 y 30 m) hacia el interior de las terrazas, asociados a acuíferos libres y cubiertos.

Finalmente Los pozos encontrados en la Unidad hidrogeológica en roca tienen rendimientos promedio de 1 l/s/m.

Información sobre transmisividades de los sectores acuíferos correspondiente a Río Limarí, Cogotí Ríos Ponio y Rapel se presentan en la descripción de dichos sectores en la sección anterior (DGA, 2008).

IV.5.2.5. Hidrogeología Acuífero Choapa

A continuación se presenta la descripción hidrogeológica de la cuenca del río Choapa (Figura 21).

Los antecedentes hidrogológicos de la cuenca Los Choros fueron obtenidos a partir de los siguientes trabajos:

- “Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del Choapa: informe técnico” realizado por Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas en el año 2007 (DGA, 2007). Este trabajo tiene como objetivo determinar los volúmenes totales anuales posibles de otorgar como derechos de agua subterránea.
- “Investigación recarga artificial de acuíferos cuencas del río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo” realizado por AC Ingenieros Consultores Ltda. bajo solicitud de la División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas, en el año 2012 (DGA, 2012). El objetivo de este trabajo es la identificación de zonas de infiltración relevantes de los acuíferos de las cuencas del Choapa y Quilimarí para la implementación de obras de recarga artificial en el cauce principal o en otros sectores que se proponga.

Unidades Hidrogeológicas

Según los resultados de las mediciones Nano-TEM, es decir, hacia los costados de los valles, se identificaron las siguientes unidades:

La **unidad más superficial** que está constituida por sedimentos secos de diferentes granulometrías, donde predominan los materiales más gruesos del tipo gravas. Tiene un espesor variable entre 5 y 35 metros, con un valor medio entorno a los 18 m.

Bajo la unidad descrita se ubica una **segunda unidad** que estaría conformada por sedimentos húmedos o saturados. Tiene un espesor variable entre 1 y 35 m, con un valor medio entorno a los 9 m.

Se identificó una **tercera unidad**, conformada por sedimentos de muy baja permeabilidad, con un espesor variable entre 5 y 40 m y un valor medio entorno a los 17 m.

También se identificó una **cuarta unidad** de sedimentos saturados que constituiría el acuífero, con un espesor variable entre 4 y 40 m y con un valor medio entorno a los 12 m.

Finalmente, la **quinta unidad** identificada correspondería a la roca basal, que se ubica a profundidades entre 6 y 75 m, con un valor medio de 35 m. (DGA, 2012).

Acuífero Choapa

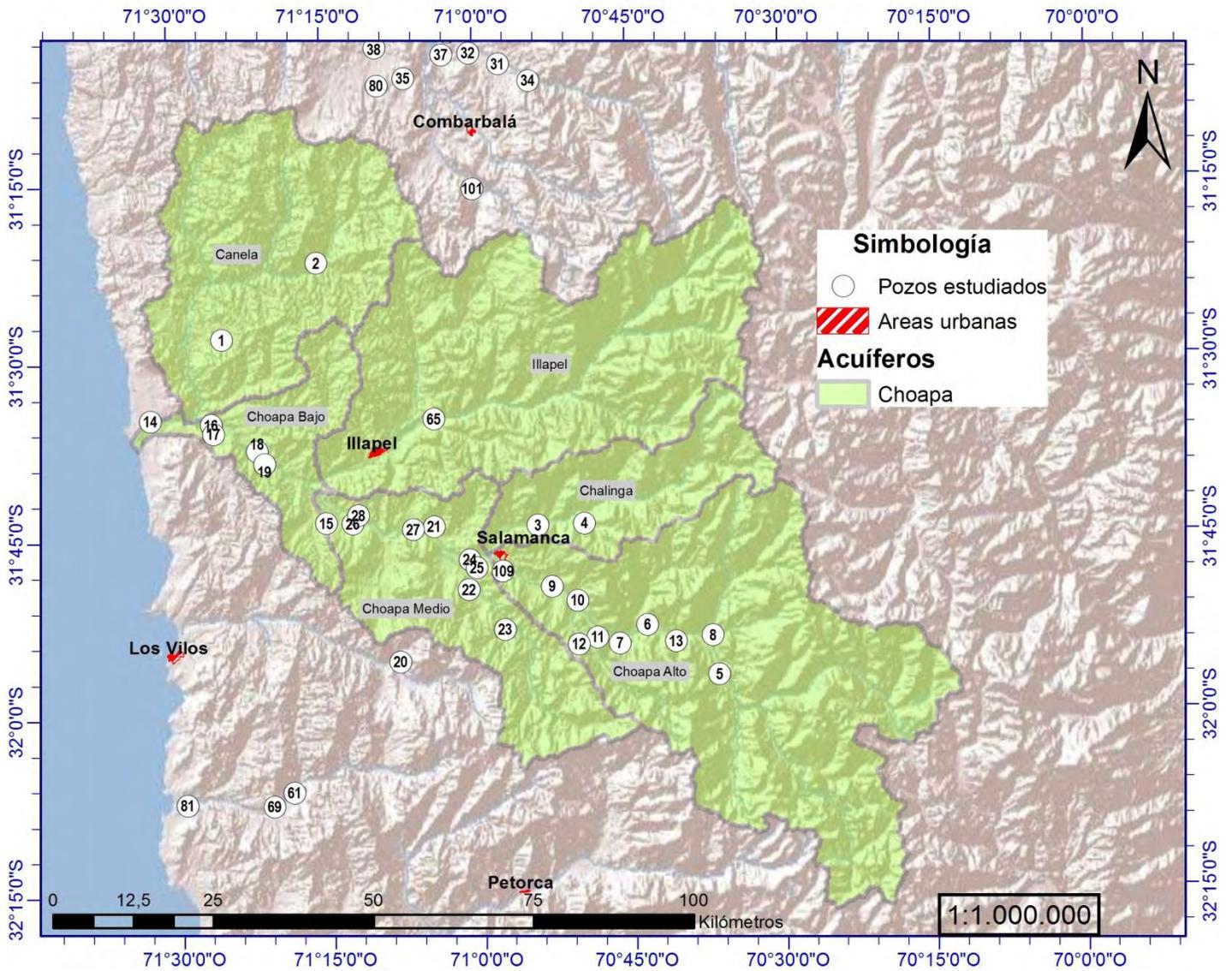


Figura 21: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca del río Choapa, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo2. Elaboración propia.

Descripción de acuífero

Desde el punto de vista hidrogeológico, es posible identificar **cuatro acuíferos** de interés hidrogeológico. El **principal** corresponde a los depósitos cuaternarios en torno al **río Choapa**. Este acuífero conduce un flujo de aguas subterráneas en la dirección NE-SO. Los acuíferos de **Chalinga** e **Illapel**, drenan las aguas subterráneas de las cuencas del mismo nombre en la dirección SE-NO hacia el acuífero del Choapa y próximo a la desembocadura del Choapa. El acuífero del **estero Canela** drena en sentido N-S hacia el relleno del Choapa.

Valle Río Choapa, entre Mincha y Desembocadura

Existen 4 sectores donde el fondo rocoso alcanza 100 m.s.n.m., uno en las cercanías de la localidad de Huentelauquén, otro en Los Lilenes, en la confluencia del río con el Estero Canela, y en el subsuelo de Mincha y sus alrededores. En estos sectores se forman 4 acuíferos y de ellos los de mayor importancia en volumen son los de Huentelauquén y Mincha, debido al espesor y ancho del relleno como puede apreciarse en los cortes hidrogeológicos. En el resto del área la roca está entre 0 y 25 m.s.n.m.

El relleno tiene un espesor máximo de 150 m en la localidad de Mincha. Otros sectores de gran espesor son la desembocadura y la confluencia del estero Canela con el río Choapa, donde se alcanzan 125 m de relleno. El valor medio del espesor total se estima en 50-75 m. El espesor saturado es casi equivalente al total, puesto que el nivel de la napa oscila entre los 0 y 5 metros, como se establece al analizar las características de la capa.

Valle Río Choapa, entre Coyuntagua y Tunga Norte

La topografía del basamento rocoso constituye el fondo del embalse subterráneo. Esta alcanza 0 m.s.n.m. bajo el relleno del centro del valle, en mayor medida en el acuífero bajo la localidad de Tunga Norte, y menos bajo Tunga Sur, donde mayoritariamente está entre 50 y 100 m.s.n.m.; la roca está aún más alta en el acuífero bajo Coyuntagua donde varía entre los 100 y 150 m.s.n.m

La topografía del terreno varía, como ya se ha explicado, entre 100 y 150 m.s.n.m., de modo que considerando la cota del basamento rocoso se puede establecer que el espesor máximo de relleno es de 100 m en el acuífero de Tunga Norte, 110 m en el de Tunga Sur (pero en una menor extensión que en Tunga Norte), y 40 m en Coyuntagua.

Valle Río Choapa, entre Salamanca y Las Juntas

En el sector existen 4 zonas de suma importancia en cuanto al volumen embalsado, los cuales se ubican bajo los siguientes sectores:

- El Tambo-Tahuinco.
- Chuchiñí.
- Peralillo.
- Estación Choapa-Pintacura.

En estas zonas la roca más profunda se encuentra a lo menos a 0 m.s.n.m. y la topografía del terreno es de 410-480, 350-400, 320-380, y 175-250 m.s.n.m., respectivamente. De modo que el acuífero de mayor importancia en cuanto a espesor es el primero, luego el segundo, tercero y cuarto. Asimismo, el primer sector resulta de mayor importancia en cuanto al volumen embalsado, ya que el área media es mayor que en el segundo sector, y la de éste mayor que la del tercer sector.

En todo el embalse Salamanca - Las Juntas la profundidad de la napa es escasa, puesto que existen diversas vertientes, y los niveles de las norias son cercanos al terreno. Luego el relleno se encuentra completamente saturado.

El espesor de relleno se ha trazado tomando como base la diferencia entre la topografía del terreno y del basamento rocoso. En los sectores de mayor atractivo éste alcanza entre 0 y 400 m en el sector de El Tambo-Tahuinco, entre 0 y 300 m en los de Chuchifil y Peralillo, y entre 0 y 250 m en la otra zona. En el resto del embalse existen zonas de mediano espesor cuyo relleno es del orden de los 100 a 300 m como máximo, y otros sectores de estrechamiento donde sólo se alcanzan espesores máximos de 50 a 100 m.

Valle Río Choapa, entre Cuncumén y Salamanca

El basamento rocoso tiene una profundidad máxima que varía desde 350 m.s.n.m., bajo la localidad de Salamanca donde la cota de terreno es de 500 m.s.n.m., hasta 700 m.s.n.m. en la localidad de Coirón que se encuentra a 850-900 m.s.n.m. Si bien el espesor máximo resulta similar en ambas partes, el área embalsada disminuye por efecto del estrechamiento del valle aguas arriba de la localidad de Quelén.

La mayor parte del embalse subterráneo tiene un espesor de 100 m bajo el centro del valle, y desde esa profundidad asciende hasta el cerro con una pendiente uniforme. En algunos sectores específicos como Salamanca, Higerilla, Llimpo, Quelán, Coirón y Tranquilla llega a un espesor de 150 m bajo el centro del valle. Se pueden distinguir 4 acuíferos con características diferentes, los cuales son los siguientes:

- Relleno aluvial superior: Está constituido por bolones y arena, con una potencia media de 30 a 50 m y un ancho entre 600 y 1.100 m, esto significa un volumen de 1.000 Mm³. El origen de esta capa son los acarrees fluviales del cuaternario reciente.

- Relleno aluvial inferior: Se compone de arenas, limo, arcillas y gravas intercaladas con bolones en algunos sectores, la potencia media es del orden de los 50 a 80 m, en tanto el ancho transversal al valle varía entre 600 y 1500 m. Se ha estimado un volumen de esta capa en 2000 Mm³. El relleno aluvial inferior está asentado directamente sobre las rocas de basamento, y tuvo su origen en las sedimentaciones glaciales y fluvioglaciales de origen morrénico. También existe el aporte de los acarreos de quebradas laterales, que consiste en material anguloso y mal clasificado.
- Relleno de arena fina y uniforme: Se ha detectado una capa de 20 m de espesor constituida por arenas finas intercaladas con arcillas, la cual se ubica entre el relleno aluvial inferior y el basamento rocoso. El origen de este relleno corresponde a las formaciones graníticas de la Cordillera de la Costa.
- Relleno Lateral: El relleno lateral se encuentra entre la superficie y el basamento rocoso en sectores donde desembocan los esteros de algunas quebradas afluentes al río Choapa, alcanzando una potencia de 50 a 80 m.

Está conformado por un conjunto de materiales mal clasificados entre los que se mezclan bolones, gravas y arenas en una matriz de arcilla y limos. El origen de esta capa se debe al relleno coluvial de los pequeños cursos que se forman esporádicamente, laterales al río, y al aporte de la erosión de los cerros.

A pesar que existen 4 acuíferos diferenciables conforme a su aptitud hidrogeológica, los materiales de estas unidades constituyen un solo acuífero, puesto que las capas se encuentran en comunicación hidráulica, de carácter libre.

Conforme a la cubicación de los acuíferos, y considerando que el relleno lateral así como el de arena fina y uniforme aportan una pequeña cantidad en volumen, se puede establecer que el acuífero tiene un volumen cercano a los 3.000 Mm³.

Valle Río Illapel, entre Huintil y Las Juntas

Entre Las Juntas y Huintil el basamento rocoso del embalse subterráneo bajo el Río Illapel tiene una elevación de 150 m.s.n.m. como mínimo y 600 m.s.n.m. como máximo. La roca alcanza su mayor profundidad a los 150 m.s.n.m., y ocurre en el acuífero del tramo Las Juntas-Cuz Cuz y el acuífero bajo la ciudad de Illapel. Los 600 m.s.n.m. se alcanzan en los límites del embalse subterráneo con la roca a la altura de la localidad de Huintil. En la mayor parte del embalse ocurre que la profundidad máxima de la roca se encuentra en los 200 m.s.n.m., con excepción de los sectores más profundos ya mencionados. El límite entre roca y relleno asciende por tramos desde 200 m.s.n.m., en Las Juntas, hasta 600 m.s.n.m., en Huintil.

Del dimensionamiento de la sección saturada de los acuíferos se puede establecer que el acuífero de Cárcamo es superior al de Illapel y ambos muy superiores al de Cuz. De todos estos, el acuífero de Illapel resulta más atractivo puesto que su extensión es mayor.

El espesor resulta inferior a 100 m de potencia en los primeros 10 Km del Valle, que corresponden al tramo comprendido entre Las Juntas y la Ciudad de Illapel. En este sector el espesor es mayoritariamente próximo a los 50 m, alcanzando los 100 m sólo en algunas áreas. Entre la ciudad de Illapel y Mal Paso el embalse subterráneo se profundiza, alcanzando hasta 150 m y 200 - 250 m puntualmente; en cuanto al espesor más observado se puede comentar que éste es 100 m. Entre Mal Paso y Huintil el espesor del relleno disminuye bruscamente, alcanzando valores entre 50 y 0 m.

Valle Estero Chalinga, entre San Agustín y Salamanca

La topografía de la roca de basamento asciende rápidamente por el valle del Río Chalinga, de la misma manera como asciende la topografía del terreno. Debido a ello, la cota de la roca bajo el río y cercana a Salamanca varía entre 500 y 200 m.s.n.m.; en tanto bajo la localidad de San Agustín está entre 1.000 y 700 m.s.n.m. Conforme a lo anterior, el límite entre la roca y el relleno asciende desde Salamanca hasta San Agustín desde los 500 m.s.n.m. hasta los 1.000 m.s.n.m. Las zonas en que el embalse subterráneo tiene un mayor volumen son los tramos bajo las localidades de Salamanca y El Peumo, y en San Agustín.

El espesor total es de 300 m de relleno bajo la localidad de Chalinga, 250 m bajo Arboleda Grande, 200 m bajo El Peumo hasta Las Lajas, y 300 m bajo San Agustín. El relleno es significativamente menor entre Cunlagua y Maravillar de modo que en esta área el embalse subterráneo es poco importante como elemento de regulación.

Valle Estero Camisas, entre el Canal Buzeta y el Río Choapa

El acuífero del estero Camisas presenta su mayor desarrollo en la desembocadura en el río Choapa y disminuye linealmente hacia aguas arriba. Presenta un ancho medio de aproximadamente 1 km en las inmediaciones del trazado de la línea del ferrocarril que une las localidades de El Tambo y Tahuinco. Aguas arriba y frente al poblado de Colliguay el ancho medio del acuífero disminuye a unos 600 m en forma aproximada.

Continuando aguas arriba se angosta hasta casi desaparecer unos 2 km aguas arriba del cruce del Canal Buzeta sobre el Estero Camisas. El espesor total del acuífero va desde unos 180 m en las cercanías de la línea del ferrocarril, disminuyendo a medida que se desplaza aguas arriba alcanzando unos 100 m de profundidad frente al poblado de Colliguay.

Valle Estero Canela, entre el nacimiento y Canela Baja

En este acuífero se dispone de muy poca información. Se trata de un acuífero de escasa potencia y que es utilizado por medio de norias de una profundidad máxima de 10 m. El espesor total en la mayoría del sector no debe sobrepasar los 20 m y se encuentra muy interrelacionado con el estero.

Es probable que exista algún acuífero en la roca, sin embargo esto no ha podido ser estudiado en detalle y se deja establecido solo como una posible investigación a futuro (DGA, 2007).

Recargas y Descargas

Para todos estos acuíferos de la cuenca del Choapa ocurre que, por estar muy ligados al río, están siempre llenos, por lo que prácticamente no aceptan recarga, siendo la recarga neta (o recarga efectiva no rechazada) en promedio, muy pequeña o casi cero.

Para todos, la percolación más importante es la que proviene desde el río, siendo la percolación desde canales y zonas de riego despreciable frente a la primera (DGA, 2007).

IV.5.2.6. Hidrogeología Acuífero Quilimarí

A continuación se presenta la descripción hidrogeológica de la cuenca del río Quilimarí (Figura 22).

Los antecedentes hidrogeológicos de la cuenca Los Choros fueron obtenidos a partir de los siguientes trabajos:

- “Control y evaluación De recursos hídricos subterráneos IV región. Volumen 2: Estudio hidrogeológico y balance hídrico valle Quilimarí” realizado por AC – Ingenieros consultores Ltda. bajo solicitud de Dirección General de Aguas en el año 1998 (DGA, 1998b). Este trabajo tiene como objetivo identificar los aspectos más relevantes para la cuantificación de las necesidades de agua de los diferentes usuarios y la elaboración de herramientas de apoyo adecuadas que permitan efectuar las recomendaciones requeridas para lograr un razonable aprovechamiento de los recursos hídricos.
- “Investigación recarga artificial de acuíferos cuencas del río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo” realizado por AC Ingenieros Consultores Ltda. bajo solicitud de la División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas, en el año 2012 (DGA, 2012). El objetivo de este trabajo es la identificación de zonas de infiltración relevantes de los acuíferos de las cuencas del Choapa y Quilimarí para la implementación de obras de recarga artificial en el cauce principal o en otros sectores que se proponga.

Acuífero Quilimarí

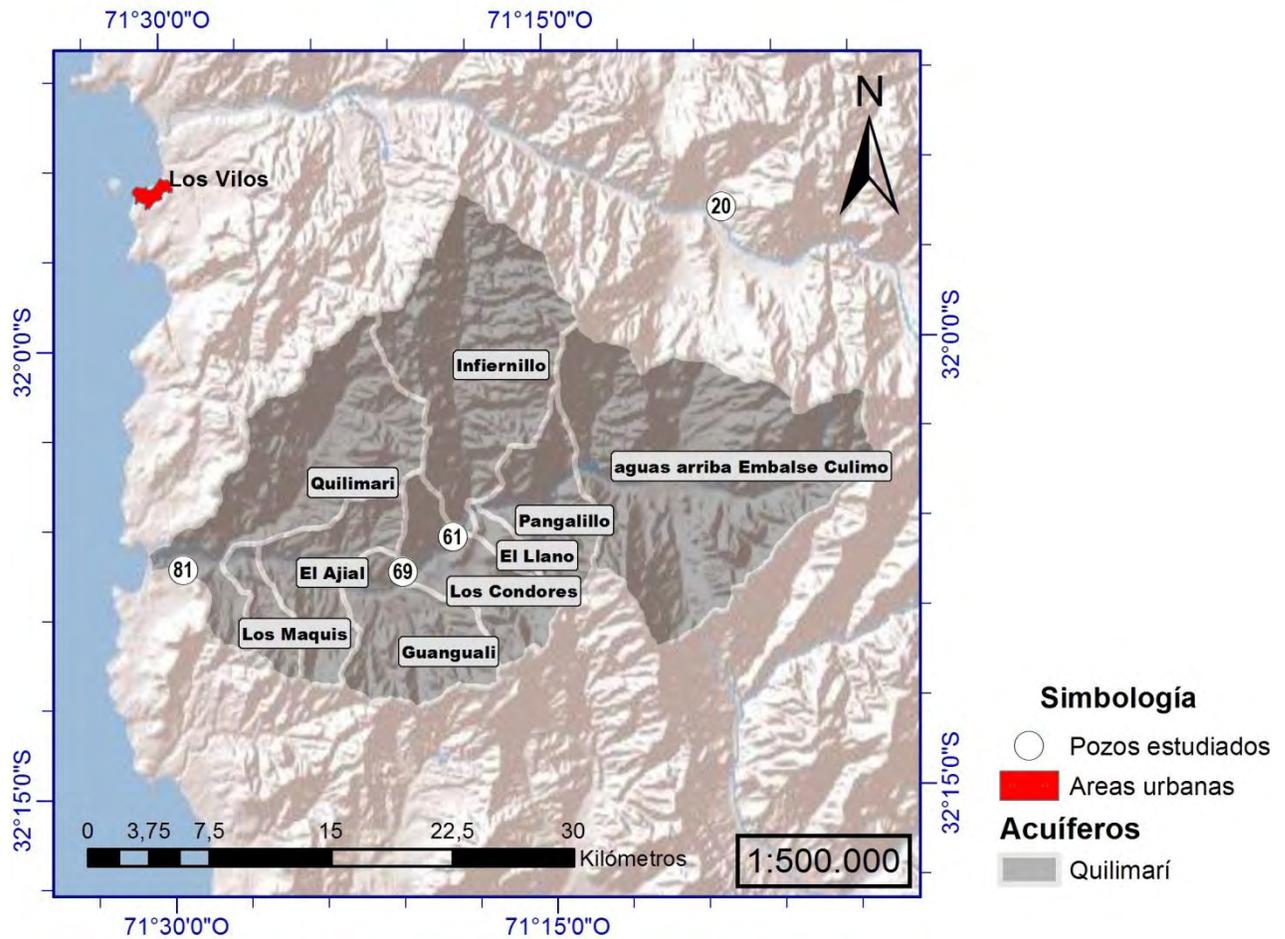


Figura 22: Zonificación de sectores acuíferos de Cuenca del río Quilimarí, y puntos de muestreo del presente estudio. Las especificaciones de cada pozo se adjuntan en Anexo2. Elaboración propia.

Unidades Hidrogeológicas

La identificación de unidades hidrogeológicas de la cuenca del río Quilimarí se ha efectuado por medio de métodos geofísicos tales como perfiles de Transiente Electromagnético (TEM) en las modalidades TEM y Nano-TEM presentado en el trabajo de AC Ingenieros Consultores Ltda., en el año 2012 (DGA, 2012).

El trabajo efectuado por permitió definir diferentes unidades que han sido interpretadas geológicamente en base a criterios geofísicos.

Las unidades señaladas se pueden describir de la siguiente forma: La **unidad más superficial** que está constituida por sedimentos secos, de diferentes granulometrías, donde predominan los materiales más gruesos, del tipo gravas. Tiene un espesor variable entre 5 y 20 m.

Bajo la unidad descrita se ubica una **segunda unidad** que estaría conformada por sedimentos húmedos o saturados, con un espesor entre 5 y 10 m y que se observa sólo en la parte media y baja del tramo analizado del valle del río Quilimarí. Por sus características, podría tratarse de un acuífero que se ubicaría entre los 20 y 30 m de profundidad.

Se identificó una **tercera unidad**, de espesor aproximado 25 m, conformada por sedimentos de muy baja permeabilidad, que también se concentra en la zona media y baja del tramo analizado. Se ubicaría entre los 25 y 50 m de profundidad.

También se identificó una **cuarta unidad** de sedimentos saturados que podría constituir un acuífero, el espesor es de 25 a 30 m, por lo que se ubicaría entre los 50 y 80 m de profundidad, especialmente en la zona media y baja del tramo, donde la potencia del relleno es más importante.

La **quinta unidad** identificada correspondería a la roca basal y se ubicaría a profundidades mayores a 50 m en la zona media y baja del tramo analizado y a profundidades entre 20 y 30 m en la zona más cercana al embalse Culimo.

Descripción de acuífero

Por otro lado, en el trabajo realizado por AC Ingenieros Consultores Ltda., en el año 1998 (DGA, 1998), se dispone de una descripción sectorizada de los acuíferos de la cuenca del río Quilimarí, lo que se presenta a continuación:

A lo largo del lecho del río, es posible identificar cuatro zonas que constituyen embalses subterráneos, conformados por acuíferos de buena calidad. La primera corresponde al sector de la hoya hidrográfica a la altura de Guangualí, donde el valle alcanza un ancho promedio de 1000 m y

un espesor superior a los 40 m. El aporte a este reservorio proviene principalmente del sector de Culimo – Los Cóndores y de las infiltraciones de los canales de riego ubicados hacia aguas arriba.

Las quebradas al norte y al sur de Guangualí drenan una extensa área montañosa, convergiendo con el valle principal en este punto e incrementando los recursos del acuífero en referencia. En este sector se puede apreciar una zona de 8 m. de espesor con un material permeable y poros compuesto por ripio, gravas y arena con escasa arcilla, en tanto que entre los 8 y los 31 m. se advierte un predominio de arcilla y limo con niveles totalmente impermeables. Se puede observar que en profundidad el material permeable disminuye en cantidad y tamaño, reapareciendo mezclado con material más fino a partir de los 24 m. De este modo, se puede establecer que este embalse subterráneo presenta una capacidad de almacenamiento y una transmisividad reducidas.

La segunda zona de embalsamiento del subsuelo se ubica en el extremo occidental de la cuenca del sector del pueblo de Quilimarí. Su aporte proviene principalmente del flujo subterráneo del propio valle el cual se concentra al pasar por un delgado cañón formado por rocas permeables. Los recursos provenientes de la quebrada seca por el norte y de algunas quebradas más pequeñas por el sur, incrementan la disponibilidad de este depósito.

Visualizando la granulometría correspondiente se advierte un primer nivel permeable compuesto de ripio y arena con escasa arcilla, que comprende 6 m de profundidad. A continuación se encuentra un potente nivel arcilloso entre los 6 y 22,5 m con una delgada intercalación de ripio y arena. A mayor profundidad se dispone un tercer nivel hasta los 33 m con sedimentos gruesos tales como gravas, ripio y arena gruesa, junto a sedimentos más finos como arena fina, limo y escasa arcilla.

De estos tres niveles, el superior y el inferior presenta alta permeabilidad, en tanto que el intermedio resulta impermeable, dado su contenido arcilloso. Este último ejerce una cierta presión y un grado de confinamiento al estrato de mayor profundidad.

Las restantes zonas de embalsamiento se ubican al oeste de Tilama, y entre Los Cóndores y El Llano. En ambos casos se trata de acuíferos más pequeños, situados a poca profundidad, en la intersección de varias quebradas tributarias con el valle principal, donde además este se estrecha. El primero de ellos corresponde a un relleno con composición granulométrica muy permeable y de bajo espesor en el cual los recursos correspondientes a las infiltraciones fluyen en forma natural hacia el oeste. En cuanto al acuífero de Los Cóndores – El Llano, este se alimenta de los recursos drenados desde el sector de Tilama y de la totalidad del área de la quebrada Infiernillo.

Adicionalmente a estos acuíferos definidos, existen en la cuenca analizada algunos sectores en los cuales es factible encontrar recursos subterráneos que se relacionan con depósitos de materiales más antiguos y con ciertos niveles de fracturas. Sin embargo, los flujos asociados son en general temporal y de escasa importancia en el marco global que se pretende modelar, razón por la cual no se han incorporado en las evaluaciones de balance.

Algunos de estos últimos sectores se relacionan con formación de rocas volcano-clásticas jurásicas y cretácicas distribuidas en áreas muy reducidas al centro y oriente de la cuenca. En estas zonas se puede encontrar pequeñas vertientes de agua con caudales de algunas décimas de litro por segundo, las que se producen por infiltraciones a través de grietas y fracturas en los meses de invierno. Sin embargo, este tipo de suministro no puede ser considerado como permeable por cuanto la mayor parte de las vertientes se secan en primavera.

Los restantes sectores con algunas presencias de recursos hídricos subterráneos, se encuentran en las zonas de terrazas del curso medio inferior del río Quilimarí y los depósitos coluviales del sector Tilama – Culimo. Los depósitos de terrazas se pueden dividir en dos tipos: el primero se constituye de conglomerados semiconsolidados y una matriz arenosa con escasos lentes de arcillas en los niveles superiores. Estas terrazas se ubican en el sector occidental de la hoya, en la franja envolvente del río Quilimarí.

El segundo tipo de terrazas está constituido por material granodiorítico alterado que configura una cubierta de maicillo. Estas se han formado por la erosión y la meteorización del cuerpo intrusivo. La permeabilidad y porosidad son altas, pero su escaso espesor entre 0,5 y 1,5 m restringen el volumen del acuífero, dando origen a algunas vertientes estacionales en la zona circundante a Guangualí.

Los depósitos coluviales, por su parte, predominan en el sector de Culimo – Tilama y corresponden a suelos con clastos andesíticos con arenas gruesas y baja proporción de finos. Sus niveles de compactación y porosidad podrían asociarse con acuíferos de cierta calidad, pero debido a su posición tipográfica sobre el relleno aluvial de valle, la capacidad de almacenamiento es prácticamente nula.

Parámetros Elásticos

Algunos parámetros elásticos obtenidos desde algunos pozos distribuidos en la cuenca del río Quilimarí son presentados en el trabajo de AC Ingenieros Consultores Ltda., en el año 2012 (DGA, 2012), como transmisividad (T) y permeabilidad (K) los cuales se presentan en la Tabla 8

Tabla 8: Coeficientes de Permeabilidad y Transmisibilidad por Sector. (Modificado de DGA 2012, Tabla 7.4-3)

Localidad - Pozo	Sector	Transmisividad (T) (m ² /día)	Permeabilidad (K) (m/s)
Los Cóndores	Quilimarí Alto	224	2,53E-04
Guangualí 1	Quilimarí medio	54	1,05E-04
Guangualí 2	Quilimarí medio	48	4,30E-05
Quilimarí 1	Quilimarí bajo	316	9,24E-05
Quilimarí 2	Quilimarí bajo	55	3,53E-05

IV.6. VULNERABILIDAD DE ACUIFEROS

SERNAGEOMIN ha desarrollado un informe y mapa de Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de la región de Coquimbo entre el año 2005 y 2006 respectivamente (Espinoza, 2005; Wall 2006). En estos trabajos define el concepto de vulnerabilidad de acuíferos como *“una medida cualitativa o cuantitativa, en general expresada mediante un índice sin dimensiones, de la mayor o menor facilidad con que se puede infligir ese perjuicio”* (Espinoza, 2005). Para la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), la vulnerabilidad es definida como una propiedad intrínseca de un sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad de éste frente a impactos humanos o naturales.

Para la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos se consideran 2 elementos esenciales:

- Litología de la zona no saturada, que puede ser tantos acuíferos en roca fracturada o en depósitos no consolidados principalmente alojados en los lechos de valles y quebradas fluviales. Son los segundos los que presentan mayor importancia hidrogeológica por sus características intrínsecas, por ende son los más estudiados y se tiene mayor certeza de sus características.
- Profundidad del nivel estático, este determina el espesor de la zona no saturada que representa la interfaz entre la fuente del posible contaminante y las aguas subterráneas.

Es por esta razón que la clasificación de vulnerabilidad “depende de las variaciones de los niveles estáticos en el tiempo y de la cantidad de información existente, por lo que requieren de una actualización constante”. Es más se señala que “un mapa de vulnerabilidad posee una vigencia de 5 a 10 años aproximadamente, al cabo de los cuales debe reevaluarse la vulnerabilidad de los acuíferos, debido principalmente a la variación que pudiera experimentar el nivel estático (profundidad del agua subterránea) y a la cantidad de información geológica de la cobertura sobre el acuífero (zona no saturada) que pudiese haber sido generada”. Por todo lo anterior, la información entregada por estos mapas debe ser tomada como referencial y no como una caracterización detalle de cada sector acuífero.

Los niveles de vulnerabilidad estipulados por SERNAGEOMIN (Espinoza, 2005) se dividen en las siguientes categorías:

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

Por último resulta relevante señalar que *“en el largo plazo todos los acuíferos son vulnerables a contaminantes persistentes en el tiempo y no degradables, inclusive aquéllos que presentan una baja vulnerabilidad a la contaminación. Estos últimos tienden a ser los más difíciles de limpiar una vez contaminados, por lo que no existen sectores en el acuífero en los que el agua subterránea no se vea afectada por la presencia de contaminantes conservativos y persistentes”* (Espinoza, 2005).

Se recomienda estudiar el mapa de Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de la región de Coquimbo (Wall, 2006) adjunto en Anexo 3.

A continuación se presenta la vulnerabilidad de cada acuífero, con los resultados señalados en el informe de Espinoza (2005).

IV.6.1. VULNERABILIDAD ACUÍFERO LOS CHOROS

Vulnerabilidad Acuífero Los Choros

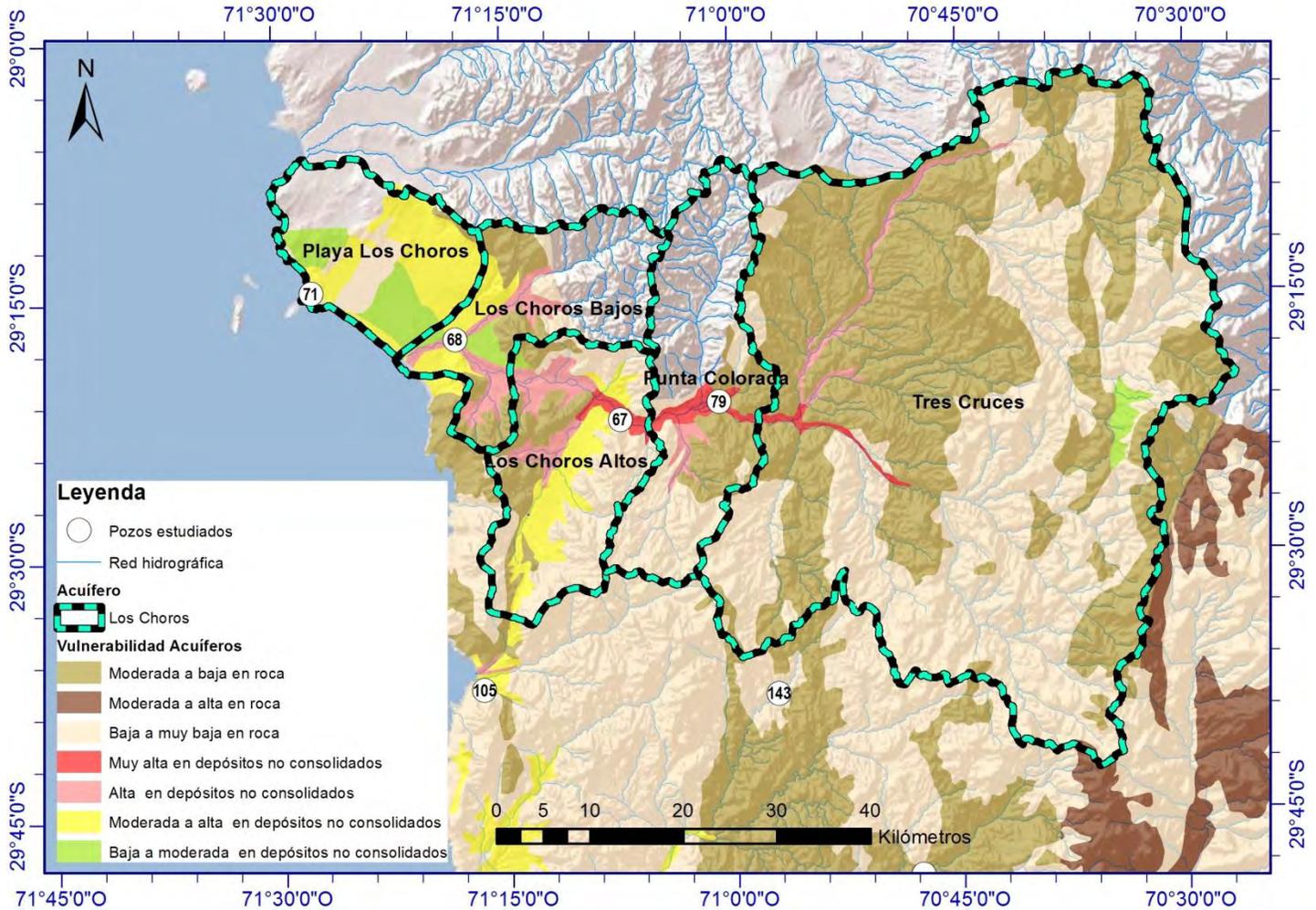


Figura 23: Vulnerabilidad acuífero Los Choros. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).

Las vulnerabilidades más altas (Muy alta) se concentran en los depósitos no consolidados del lecho de la quebrada los Choros entre los sectores de los Choros Altos, Punta Colorada y Tres Cruces. Vulnerabilidades Altas se concentran quebrada los Choros entre los sectores los Choros Bajos y los Choros Altos y en Quebrada Los Espinos en el sector de Tres Cruces.

IV.6.2. VULNERABILIDAD ACUÍFERO ELQUI

Vulnerabilidad Acuífero Elqui

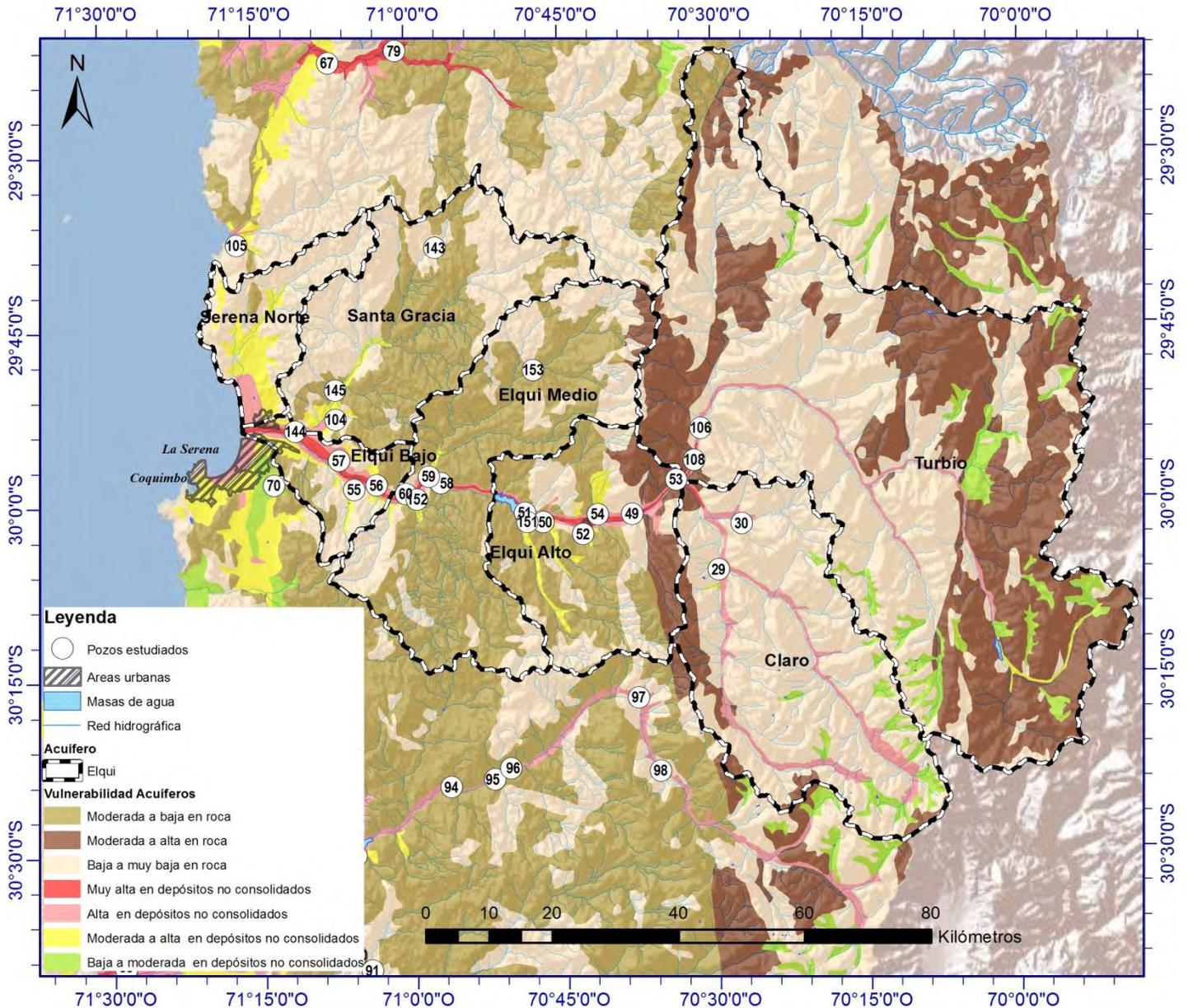


Figura 24: Vulnerabilidad acuífero Elqui. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).

Las vulnerabilidades más altas (Muy alta) se concentran en los depósitos no consolidados del lecho del río Elqui del sector de Elqui Alto hacia la desembocadura. Vulnerabilidades Altas están subordinadas a las Muy altas en depósitos aluviales en las cabeceras de los cerros del valle del río Elqui, así como en los lechos de los ríos Turbio y Claro.

IV.6.3. VULNERABILIDAD ACUÍFERO CULEBRÓN LAGUNILLAS

Vulnerabilidad Acuífero Culebrón Lagunillas

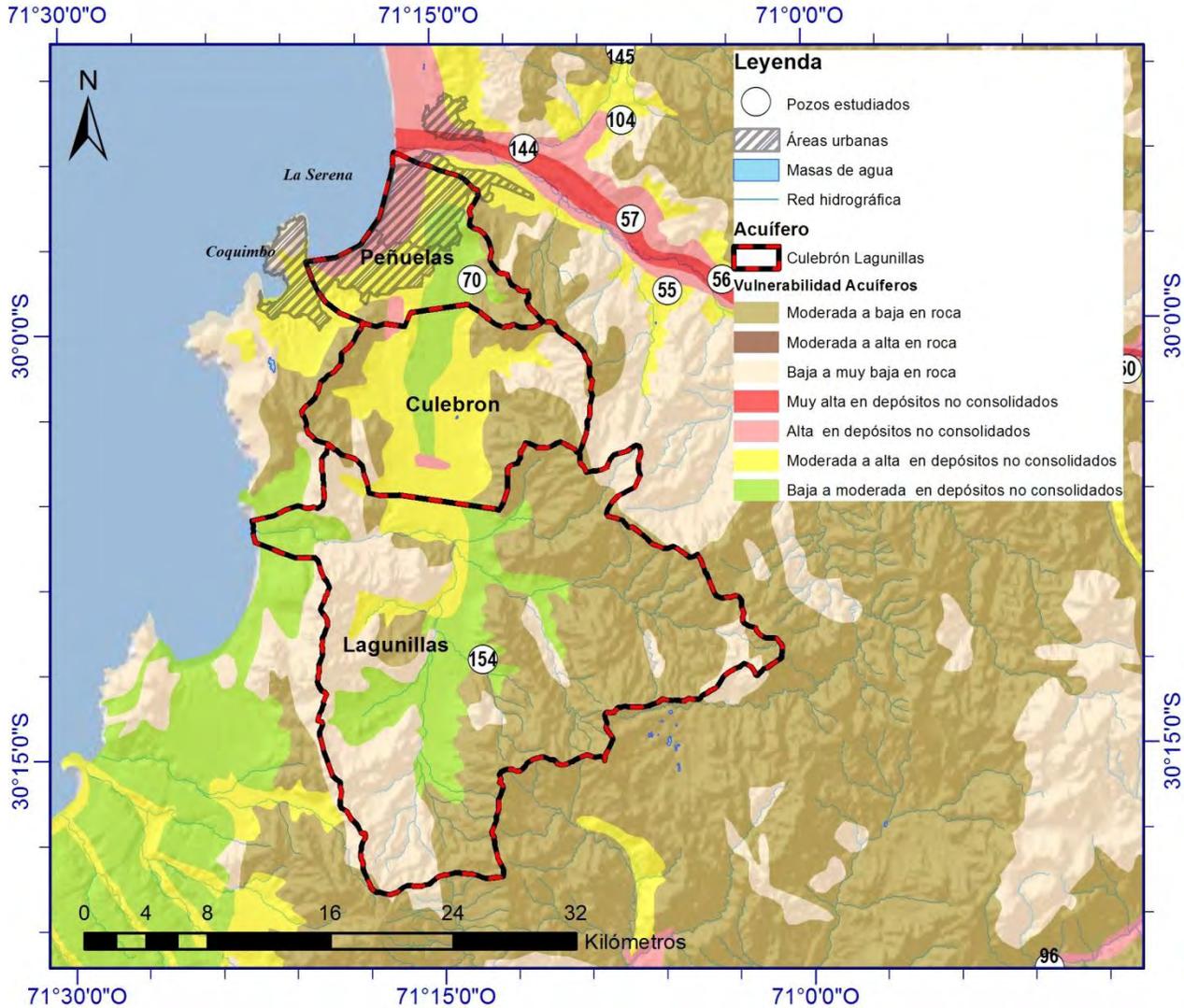


Figura 25: Vulnerabilidad acuífero Culebrón Lagunillas. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).

No se presentan vulnerabilidades Muy altas en este acuífero y más aún las vulnerabilidades Altas son de menor preponderancia. Cabe señalar que el desarrollo hidrográfico de esta cuenca es limitado contando sólo con unos pocos canales de caudales menores.

IV.6.4. VULNERABILIDAD ACUÍFERO LIMARÍ

Vulnerabilidad Acuífero Limarí

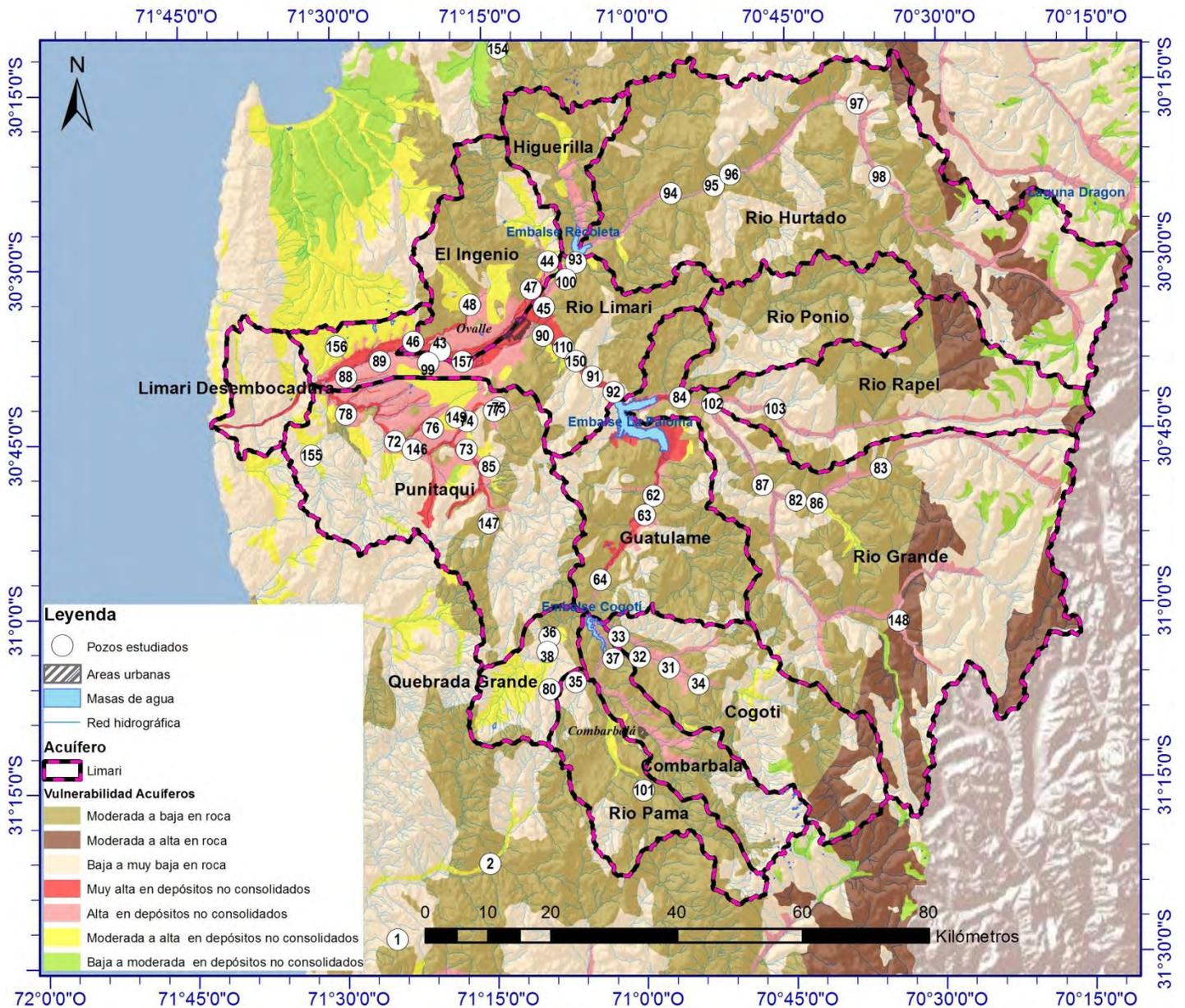


Figura 26: Vulnerabilidad acuífero Limarí. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).

Vulnerabilidades muy altas se concentran en el cauce del río de Limarí desde su desembocadura hasta el sector de Guatulame en donde se encuentra también el embalse La Paloma, así también en el sector de Punitaqui. Vulnerabilidades altas están subordinada a los cauces anteriormente señalado así como también se presentan en los lechos de los ríos en Hurtado, Rapel, Grande, Cogotí, hacia las cabeceras de la red hidrográfica.

IV.6.5. VULNERABILIDAD ACUÍFERO CHOAPA

Vulnerabilidad Acuífero Choapa

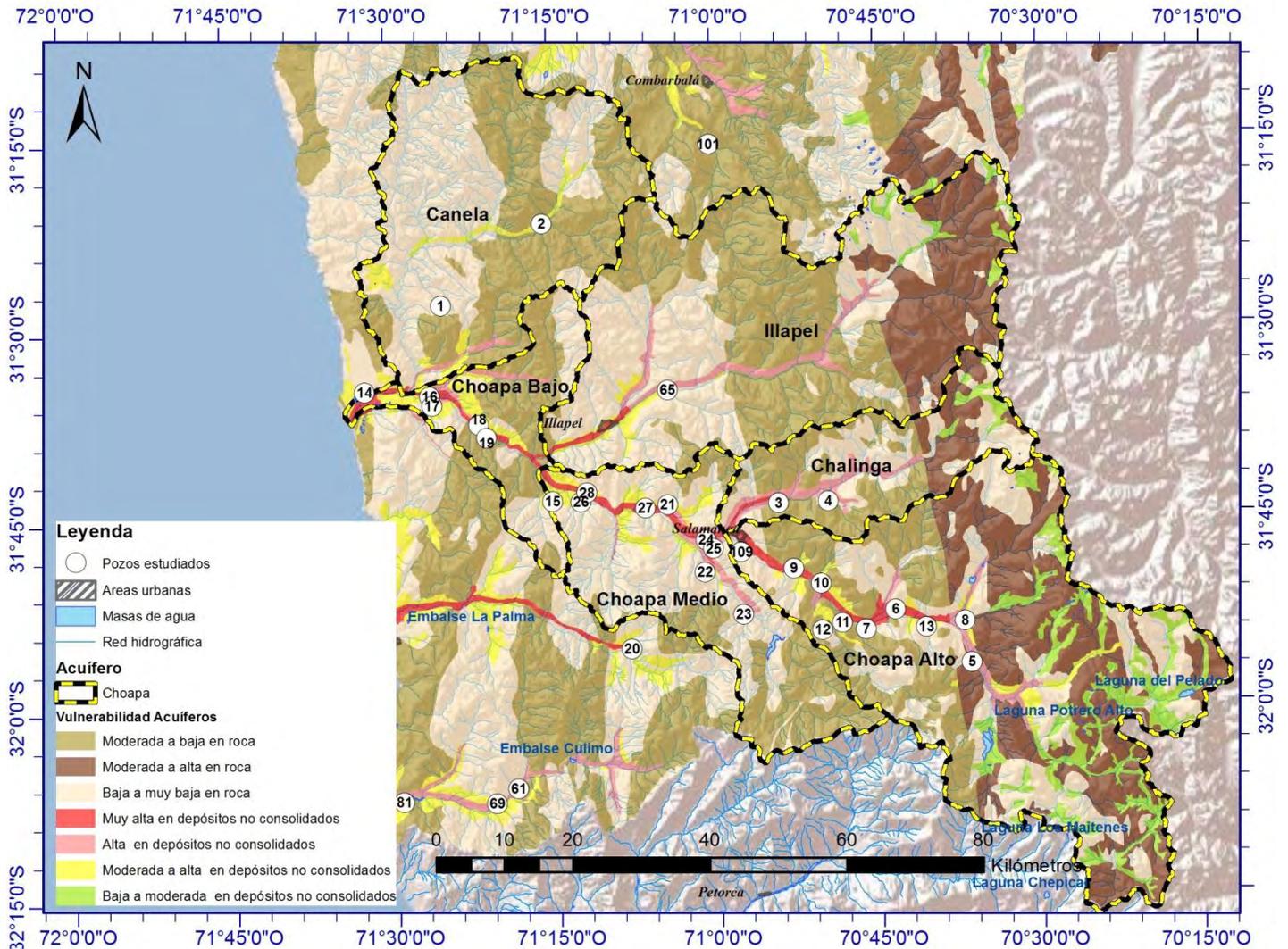


Figura 27: Vulnerabilidad acuífero Choapa. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).

Vulnerabilidades Muy altas se extienden en gran parte del cauce del río Chopa, desde la desembocadura hasta el sector de Choapa Alto, vulnerabilidades Altas se encuentran subordinadas a este cauce, así como también en los lechos de los río Illapel y Chalinga y en las quebradas también tributaria del río Choapa, hacia las cabeceras de la hoya hidrográfica.

IV.6.6. VULNERABILIDAD ACUÍFERO QUILIMARÍ

Vulnerabilidad Acuífero Quilimarí

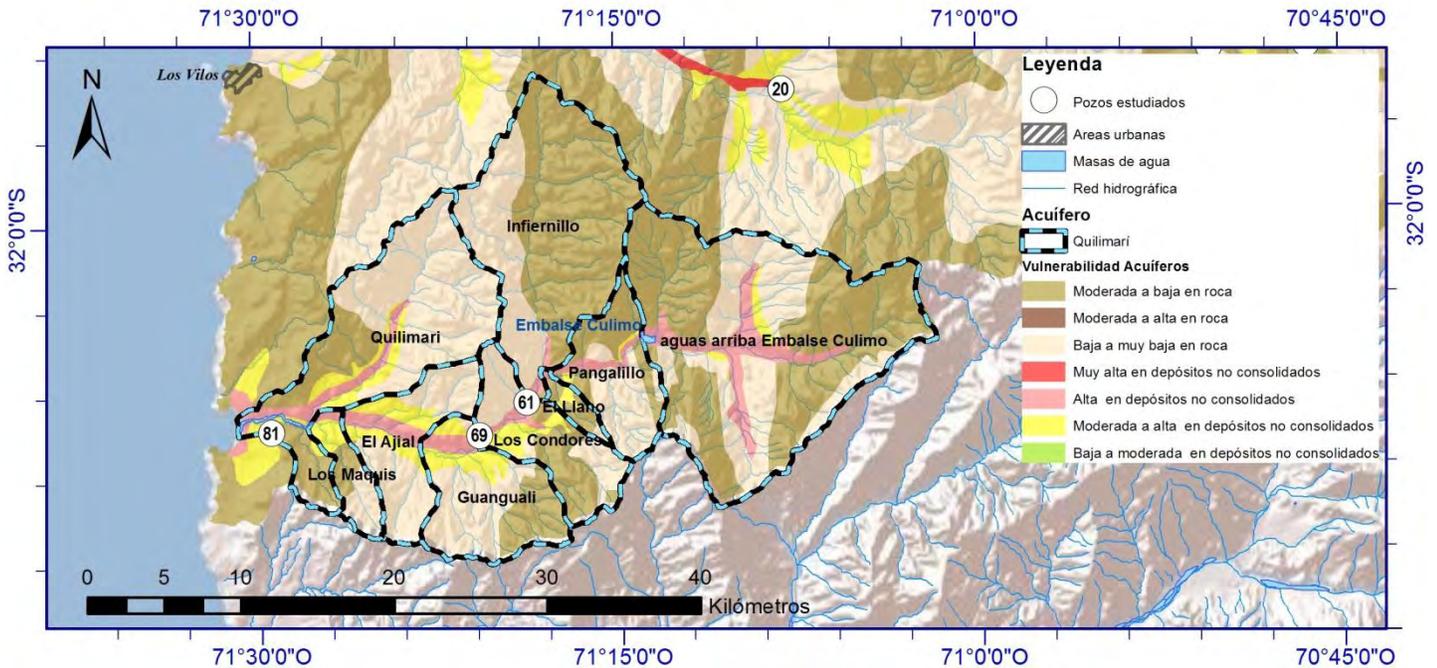


Figura 28: Vulnerabilidad acuífero Quilimarí. Se etiquetan los diferentes sectores acuíferos contenidos en la cuenca, así como pozos estudiados, los números identifican a cada pozo según la Anexo 2. (Modificado de Wall, 2006).

No se presentan vulnerabilidades Muy altas en este acuífero presentado vulnerabilidades Altas a lo largo de prácticamente todo el cauce del río Quilimarí y en algunas quebradas afluentes de este.

IV.7. USOS Y PRESIONES SOBRE EL AGUA - POSIBLES FUENTES CONTAMINANTES DE CARÁCTER ANTRÓPICO

En el estudio “Análisis Crítico de la Red De Calidad De Aguas Superficiales y Subterráneas” realizado por Infraestructura Y Ecología S.A. (DGA S.I.T N° 337), se realiza un compendio de los diferentes usos y presiones de/sobre los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, con tal de reformular la red de control de calidad de aguas a lo largo del país.

En este estudio se definen 2 posibles interacciones con el medio hídrico, estas son las Presiones y los Usos. Por un lado las Presiones se definen como *“cualquier actividad humana que incida sobre el estado de las aguas superficiales y subterráneas”*, estas pueden ser directas (cuando sus efectos son localizados en un punto en relación a un cuerpo receptor), indirectas (cuando no cuenta con descargas a cuerpos de agua), por regulación (alteración de la cantidad de agua o bien de alguna propiedad física como la temperatura del agua) o difusas (cuando los efectos se extienden en una superficie,, actividad agrícola). Por otro lado se entiende por usos del agua como el empleo de las distintas masas de agua que cumplen con variadas funciones ambientales, tanto para el uso humano (consumo, riego, recreación), como en su función ecológica (vida acuática).

Bajo estos conceptos se recopila la información disponible de usos presiones sobre el agua para las diferentes cuencas y subcuencas hídricas distribuidas en el país. Como usos se consideran el consumo humano, riego y la recreación y vida acuática, por otro lado como presiones se consideraron descargas de aguas servidas, proyectos con estudios de impacto ambiental (diferentes categorías) aprobados por SEIA, Relaves mineros, rellenos sanitarios, embalses, proyectos hidroeléctricos, actividades forestales, agrícolas y ganaderas, constituyendo estas como posibles fuentes contaminantes de carácter antropogénico.

En el estudio señalado se detallan los usos y presiones más significativos por cuenca y subcuenta (Tabla 9) en donde, a nivel regional, las presiones presentes son principalmente ligadas a las actividades mineras y agrícolas. Así mismo los usos más significativos del agua en la región es el consumo humano y riego.

Se recomienda consultar el Anexo 4 donde se disponen espacialmente los diferentes usos y presiones sobre las aguas para las diferentes cuencas de la región de Coquimbo, realizado por INFRAECO 2014.

Tabla 9: Presiones y usos significativos del agua en cuencas estudiadas en el presente trabajo. Adaptado de INFRAECO 2014. Las sub cuencas señaladas no necesariamente coinciden con las empleadas en el presente informe.

Cuenca	NOMBRE SUBCUENCA	PRESIONES SIGNIFICATIVAS	USOS SIGNIFICATIVOS
Los Choros	Q. Los Choros hasta junta Q. del Pelicano		
	Q. del Pelicano	Minería.	
	Q. Los Choros entre Q. del Pelicano y desembocadura	Minería.	
Elqui	Rio Turbio		
	Rio Claro	Agricultura.	Consumo Humano, Riego.
	R. Elqui Medio	Regulación de cauce, Minería, Agricultura.	Consumo Humano, Riego.
	R. Elqui Bajo	Minería, Agricultura.	Consumo Humano, Riego.
Culebrón - Lagunillas	E. El Culebrón - Q. El Romeral (Incl.)	Minería, Aguas Servidas, Áreas Urbanas e Industriales, Forestal, Agricultura.	Consumo Humano, Riego.
Limarí	Rio Hurtado	Minería, Agricultura.	Consumo Humano, Riego.
	Rio Grande Alto (hasta arriba junta Rio Rapel)	Minería, Agricultura.	Riego.
	R. Grande Medio (arriba Junta R. Rapel y R. Guatulame o Muro Emb. Paloma)	Agricultura.	Consumo Humano, Riego.
	R. Guatulame (Muro Embalse Paloma)	Minería, Agricultura.	Consumo Humano, Riego.
	Rio Grande Bajo (entre Embalse Paloma y Rio Hurtado)	Agricultura.	Riego.
	Rio Limarí	Minería, Agricultura.	Consumo Humano, Riego.
Choapa	Rio Choapa Alto (hasta abajo junta Rio Cuncumen)	Minería.	
	Rio Choapa Medio (entre Rios Cuncumen e Illapel)	Minería, Agricultura.	Consumo Humano, Riego.
	Rio Illapel	Minería.	Consumo Humano, Vida acuática.
	Rio Choapa Bajo (entre Rio Illapel y Desembocadura)	Minería, Forestal.	Consumo Humano.
Quilimarí	Rio Quilimarí hasta Muro Embalse Culimo	Agricultura.	Riego.

V. METODOLOGÍA

V.1. SELECCIÓN DE POZOS PARA MUESTREO

Para la selección de los puntos de muestreo de aguas subterráneas se consideraron los pozos construidos en la zona y la disponibilidad de antecedentes mínimos de éstos, ello a partir de la revisión de bases de datos correspondiente a los pozos construidos por la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP como parte del programa de abastecimiento de Agua Potable Rural (APR). El proceso de selección se realizó en tres etapas de acuerdo al diagrama que se presenta en la Figura 29. Además se consideró la elección de pozos que sean continuamente usados y cuenten con posibilidad de acceso, en donde contenga al menos un pozo por provincia, un pozo por acuífero en una distribución espacial homogénea priorizando los pozos con menor profundidad.

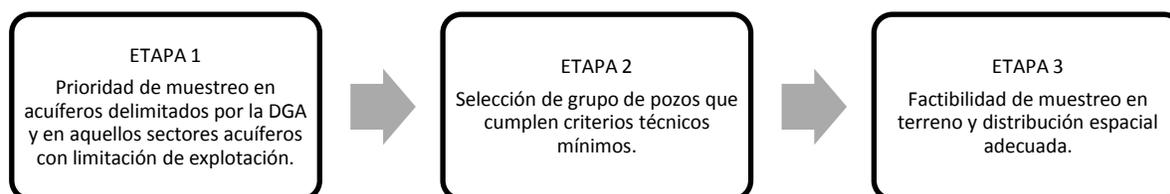


Figura 29: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas

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

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

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

Finalmente, en la Etapa 3 se llevó a cabo una selección práctica de 119 pozos, basada en la factibilidad de ejecutar el muestreo en terreno de forma expedita, cumpliendo con los estándares técnicos requeridos para disponer de muestras representativas del acuífero:

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

Considerando las tres etapas descritas anteriormente, además del presupuesto disponible para los análisis químicos, se procedió a muestrear 119 pozos.

V.2. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS

Con el objetivo de determinar la actual condición físico-química de las aguas subterráneas en los acuíferos de la Región de Coquimbo e identificar la presencia de sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa, se seleccionó el conjunto de parámetros tanto fisicoquímicos, así como iones y microelementos (metales) resumidos en Tabla 10, los cuales permiten caracterizar de un modo más integral la calidad de las agua.

Tabla 10: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la Región de Coquimbo. ANALAB: Laboratorio externo a DGA; LADGA: Laboratorio Ambiental DGA.

Categoría	Total de parámetros	Parámetro
Físico-químico (análisis en terreno)	4	Temperatura, pH, conductividad eléctrica., potencial de óxido reducción.
Iones (análisis en laboratorio ANALAB)	10	Cloruro (Cl ⁻), Sodio (Na ⁺), Potasio (K ⁺), Calcio (Ca ²⁺), Magnesio (Mg ²⁺), Nitrato (NO ₃ ⁻), Amonio (NH ₄ ⁺), Sulfato (SO ₄ ²⁻), Bicarbonato (HCO ₃ ⁻), Fosfato (PO ₄ ³⁻), Alcalinidad total, Solidos disueltos totales.
Microelementos (análisis en laboratorio LADGA)	11	Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Mercurio (Hg), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Selenio (Se) y Zinc (Zn)

En cuanto a los análisis, éstos fueron analizados por un laboratorio externo (ANALAB) contratado mediante licitación pública ID N°1019-60-LE16. El trabajo contratado para este estudio incluyó la visita a terreno de 119 pozos en la Región de Coquimbo, la toma de muestras de aguas subterráneas para el análisis de iones y la posterior entrega de informes de análisis en los formatos y plazos establecidos en las bases de licitación.

V.3. USO DE EQUIPOS Y MATERIALES

Durante el trabajo en terreno se utilizaron los siguientes equipos:

- Se utilizó el equipo marca Hanna, modelo HI-98129 para la medida de Temperatura, Conductividad eléctrica y pH.
- Para la medición del potencial óxido reducción se utilizó un equipo marca Hanna, modelo HI 98.121.

Las metodologías analíticas usadas por el laboratorio ANALAB consistieron en el uso del método QUECHERS, de comprobada factibilidad. Las confirmaciones de los resultados positivos se realizaron a través el análisis mediante cromatógrafos acoplados a detectores de masa (GC – MS, HPLC MS/MS y HPLC-MS)

Equipo:

- Marca: Perkin Elmer
- Modelo: Optima 7300DV
- Rango de Lectura: 0,1 -300 mg/l

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

- Temperatura del agua (°C)
- Conductividad eléctrica del agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- pH (unidad de pH)
- Potencial óxido reducción (mV)

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

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

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

Conductividad eléctrica: calibrado con patrón de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Hi 7031). Resolución 1.

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

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

V.4. METODOLOGÍAS ANALÍTICAS

Las metodologías utilizadas por el laboratorio ANALAB para la determinación de Iones son los señalados en la Tabla 11, a continuación.

Tabla 11: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio ANALAB.

Parámetro	Metodología de análisis
Cloruro	Metodología ME – 28 – 2007. Manual SISS. Método volumétrico.
Nitrato	Metodología ME – 16 – 2007. Manual SISS. Método electrodo específico.
Amonio	Método ME – 27 – 2007. Manual SISS. Método electrodo específico.
Sulfato	Metodología ME – 30 – 2007. Manual SISS. Método gravimétrico.
Bicarbonato	Método 2320 – B. Standard Methods. 22th Ed. 2012. Método volumétrico.
Alcalinidad	Método 2320 – B. Standard Methods. 22th Ed. 2012. Método volumétrico
Sólidos disueltos totales	ME – 31 – 2007. Manual SISS. Método gravimétrico.
Sodio	Método 3111 – B-D. Standard Methods. 22th Ed. 2012
Potasio	Método 3111 – B-D. Standard Methods. 22th Ed. 2012
Calcio	Método 3111 – B-D. Standard Methods. 22th Ed. 2012
Magnesio	Método 3111 – B-D. Standard Methods. 22th Ed. 2012
Fosfato	Hach Method 8048, USEPA Approved, SMEWW 21th Ed., Method 4500-P-E.

Las metodologías utilizadas por el Laboratorio Ambiental de la DGA para el análisis de microelementos corresponden a las siguientes (Tabla 12):

Tabla 12: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio Ambiental de la DGA.

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

V.5. SELECCIÓN DEL PERÍODO Y FRECUENCIA DE MUESTREO

Se consideró 1 muestreo (frecuencia anual) para así evitar las variaciones producidas naturalmente por la estacionalidad y medir los cambios relativamente a largo plazo. El periodo de muestreo entre Septiembre y Noviembre de 2016, concentrándose el muestreo en los meses de Septiembre y Octubre.

V.6. PREPARACIÓN DEL TRABAJO EN TERRENO

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

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

En las actividades en terreno participaron:

- Departamento de conservación y Protección de Recursos Hídricos, Dirección General De aguas, Ministerio de Obras Públicas
- Laboratorio ANALAB.

La metodología de muestreo se realizó de acuerdo con los estándares de la Norma chilena NCh 411/11 (Guía para el muestreo de aguas subterráneas) y el LADGA-IM-02 Instructivo muestreo aguas subterráneas del laboratorio de la DGA.

V.7. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS QUÍMICOS

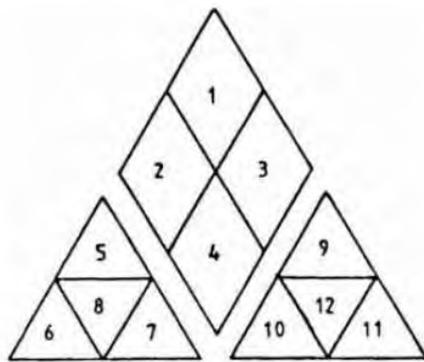
La calidad de los resultados de los análisis químicos de iones son verificados mediante el cálculo del balance iónico. Este cálculo considera la sumatoria de cationes y aniones expresados en unidades de miliequivalentes/litro (meq/L). El error de balance iónico no debe ser mayor a 5% (en términos absolutos) según la expresión que se presenta a continuación (DGA, 2009):

$$Error(\%) = 100 * \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}$$

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

- Parámetros físico-químicos medidos en terreno: gráficas de bolas sobre cartografía.
- Iones mayoritarios: diagrama de Stiff y diagrama de Piper. Para su construcción se utilizó el software EASY QUIM v5.0 (2012).
- Microelementos: gráficos de barra comparando con estándares de calidad de agua para consumo humano (NCh 409/2005) y aguas para riego (NCh 1333)

La interpretación de los diagramas de Piper (Figura 30) se realizó acorde con la siguiente clasificación de las aguas que considera la distribución porcentual de cationes y aniones.



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

Figura 30: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.

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

V.8. MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFERO SEGÚN ÍNDICE DE CALIDAD

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

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

En Chile, en el año 2009, la DGA licitó un estudio para definir un Índice de Calidad que pudiera ser aplicado para la clasificación de sectores acuíferos en cuanto a la calidad de sus aguas, y que pudiera ser utilizado indistintamente en acuíferos de todo el país con sus particularidades como pueden ser geométricas (acuíferos extensos o encajonados en quebradas), geológicas (con altas concentraciones de parámetros nocivos para la salud, pero de origen natural), antrópicas (con actividades potencialmente contaminantes diferentes), con o sin intrusión salina, etc. Su resultado fue el estudio S.I.T. N°183 (DGA, 2009) llamado "Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos",

que diseñó un Índice de Calidad que fue aplicado en tres sectores acuíferos diferentes: Aconcagua, Los Choros y El Loa.

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

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

V.8.1. ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA

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

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

Calidad, para determinar si la calidad tiene un origen natural o antrópico, industrial, agrícola, procedente de asentamientos humanos, etc.

- Para que los resultados sean comparables a nivel nacional, los parámetros seleccionados en la metodología de cálculo del Índice de Calidad corresponden a parámetros de análisis común, ofreciendo, además, la posibilidad de incluir algunos parámetros específicos de carácter local como podrían ser para determinados sectores el Arsénico, el Boro, el Aluminio, el Hierro, entre otros.
- Es posible realizar la comparación temporal de la calidad química de las aguas de un mismo acuífero, observando los cambios ocurridos en el tiempo, en relación, por ejemplo, al periodo anterior o la línea base.
- Para facilitar la comprensión e interpretación, los resultados del Índice de Calidad se representan en mapas que permiten la lectura también de personas no especialistas.

A continuación, se resume de manera general el esquema metodológico (Figura 31) utilizado para el cálculo de los Índices de Calidad por pozo y sector acuífero, levemente modificada del estudio DGA (2009). Se destaca que el procesamiento de la información y los diferentes cálculos que realiza la metodología, se ejecutan a través de un sistema SIG para la interpolación de variables, y visualización en mapas de resultados, tanto intermedios como finales.

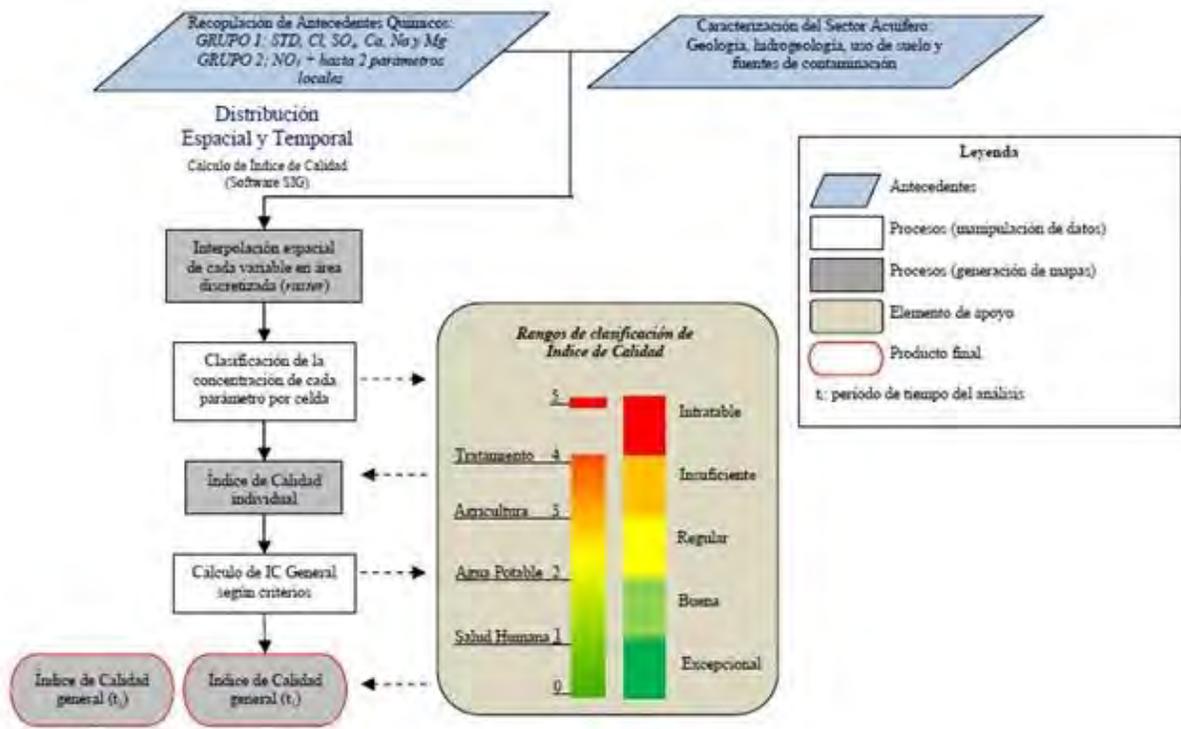


Figura 31: Esquema y diagrama de flujo de metodología de cálculo de Índice de Calidad de aguas subterráneas (modificado de DGA, 2009)

V.8.2. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD

La metodología de clasificación de aguas en cuanto a su calidad incluye trabajar con dos grupos de parámetros químicos (Figura 31).

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

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

Para el cálculo del Índice de Calidad (IC) se requiere que inicialmente la información química sea evaluada mediante el balance iónico, límites de detección y valores anómalos, lo que permitirá

trabajar con datos confiables y establecer comparaciones con normativas vigentes, tanto a nivel nacional como internacional. Esto, además de considerar su temporalidad y la unidad hidrogeológica de interés, con el fin de confeccionar mapas que permitan realizar un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas a través del IC por pozo y por sector acuífero.

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

V.8.2.1. Índice de calidad individual

Después validar la calidad de los datos se debe calcular el Índice de Calidad Individual (IC individual) para cada uno de los parámetros, fijos y locales. Este se obtiene mediante la interpolación lineal de las concentraciones contrastadas con los valores de corte definidos para cada parámetro (VC1, VC2, VC3 y VC4), obteniendo un IC individual de valor discreto entre 1 y 5, que corresponden a las 5 categorías de calidad del parámetro, de mejor a peor, respectivamente (ver Figura 32).

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

Tabla 13: Relación entre clases de calidad y valores de corte.

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

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

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

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

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

En el presente estudio, los valores de corte son los definidos por la DGA (2009) para determinar el Índice de Calidad (IC).

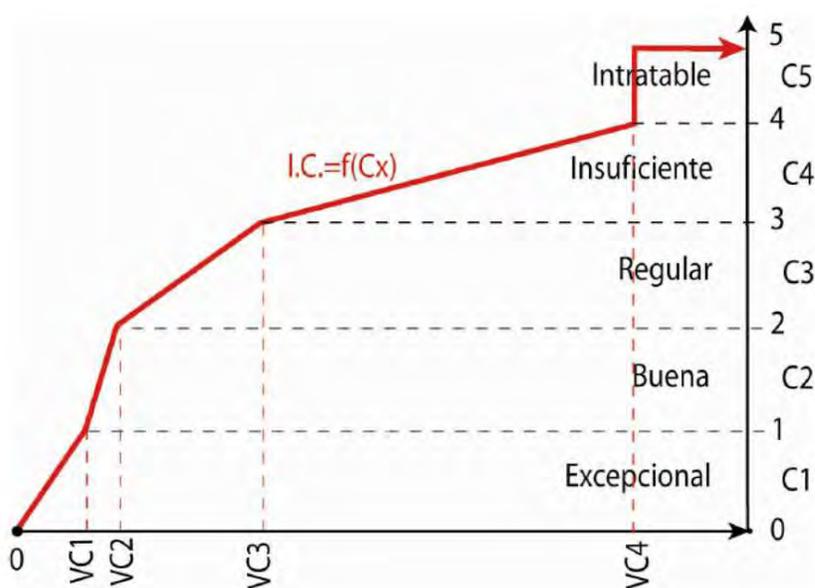


Figura 32: Cálculo de índice de calidad mediante interpolación lineal entre clases.

V.8.2.2. Cálculo del IC general

A partir de los IC individuales se calcula posteriormente el Índice de Calidad general (IC general) del pozo y sector acuífero mediante la aplicación de los siguientes criterios (Tabla 14):

Tabla 14: Criterios para establecer el IC general.

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

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

IC Excepcional

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

IC Buena

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

IC Regular

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

IC Insuficiente

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

IC Intratable

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

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

VI.RESULTADOS Y DISCUSIONES

VI.1. DATOS REGISTRADOS EN TERRENO

VI.1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES EN TERRENO Y LABORATORIO

La totalidad de los pozos muestreados (119) corresponden a pozos utilizados para abastecimiento de la población rural (Programa Agua Potable Rural – APR, de la Dirección de Obras Hidráulicas). Previamente al muestreo se verificó el cumplimiento de las condiciones mínimas que aseguren la calidad de las muestras.

Fotografías, Muestreo Región de Coquimbo



La distribución administrativa de los pozos estudiados se encuentra especificadas en las Figuras 33 y 34, así también como su distribución con respecto al área por acuífero indicado por la DGA en las Figuras 35 a 36.



Figura 33: Pozos estudiados por provincia, Región de Coquimbo.

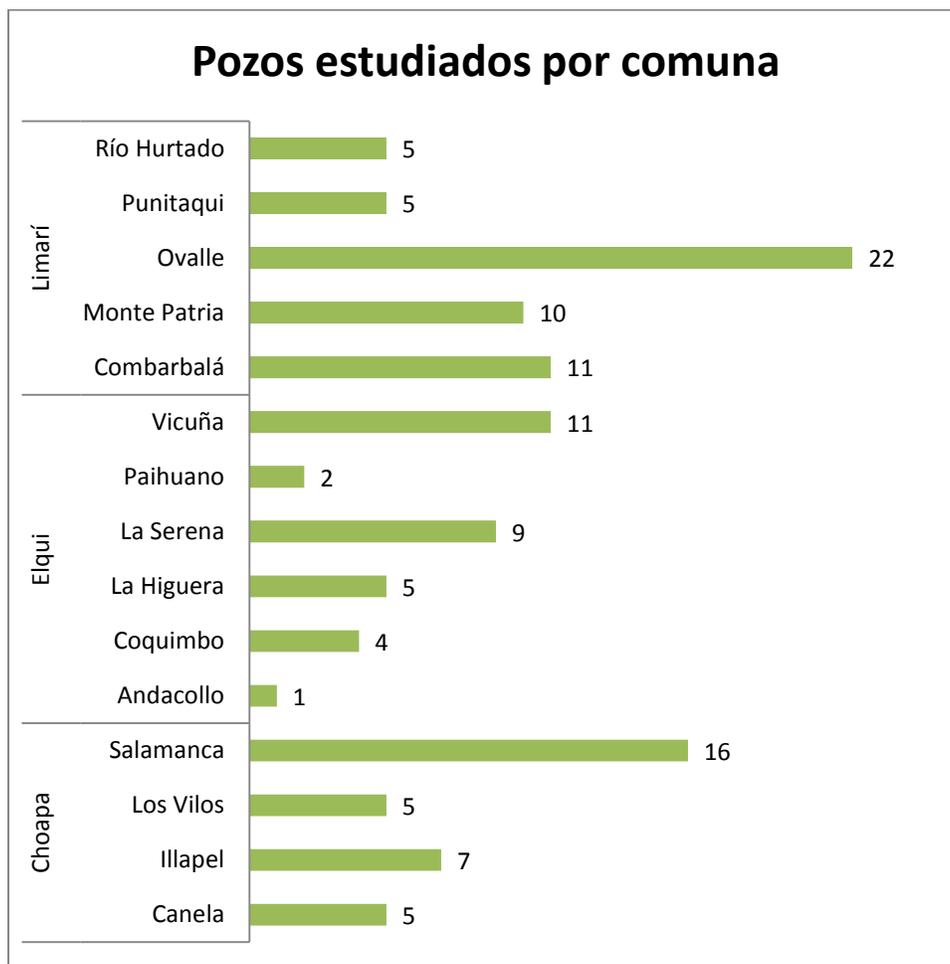


Figura 34: Pozos estudiados por Comuna, Región de Coquimbo

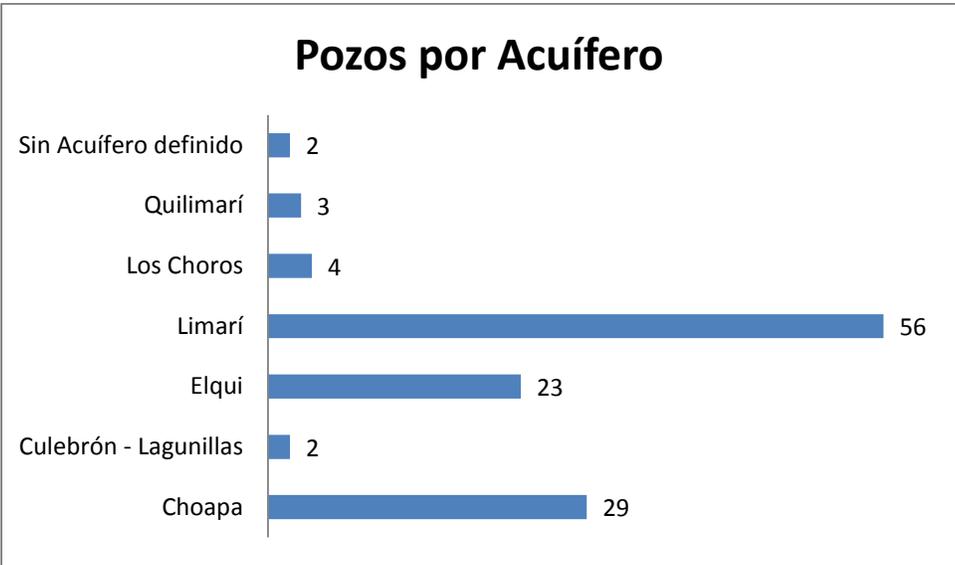


Figura 35: Pozos estudiados por acuífero, Región de Coquimbo.

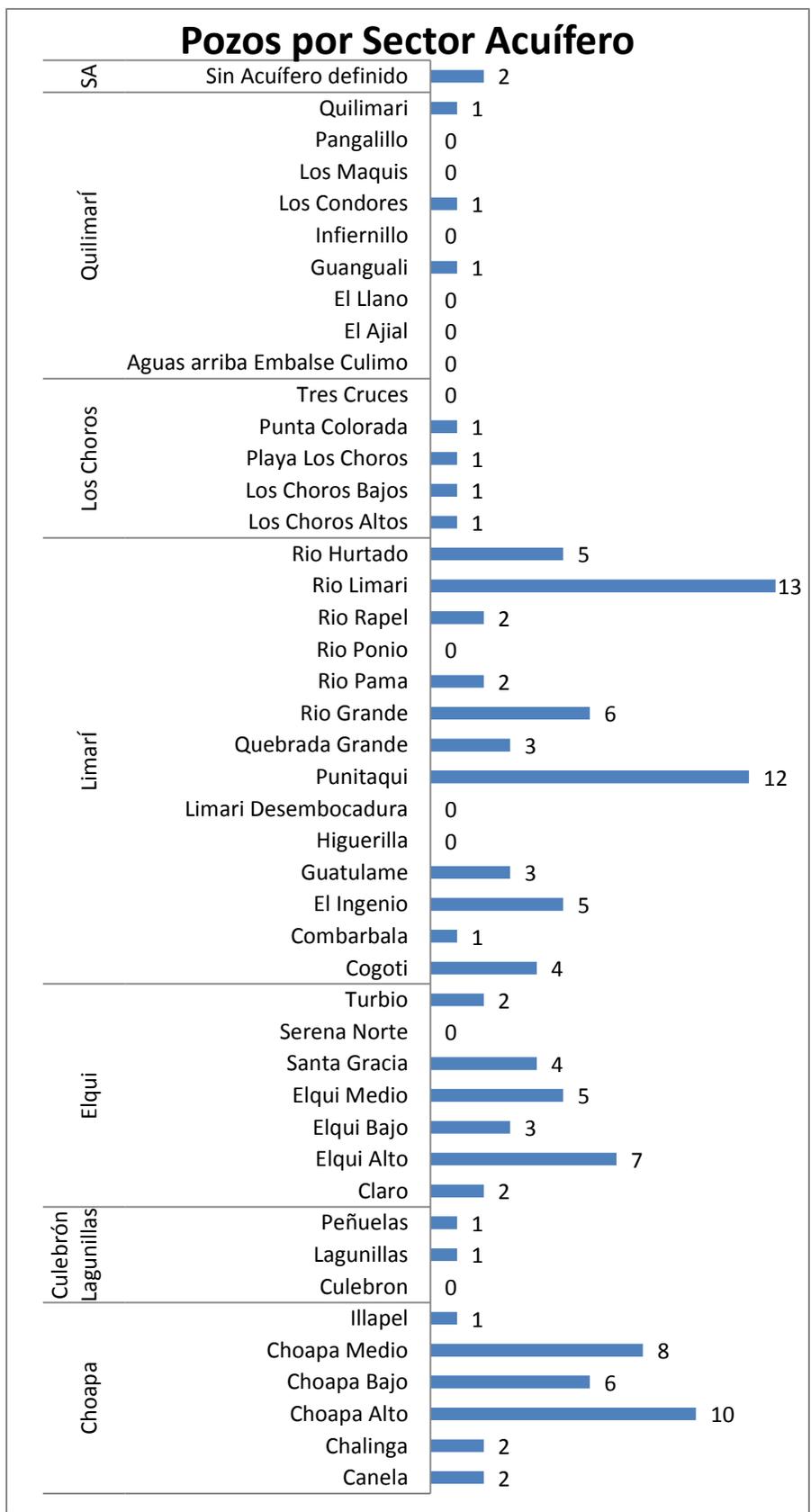


Figura 36: Pozos estudiados por sector acuifero, Región de Coquimbo.SA: Sin Acuifero definido.

VI.1.2. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y PROFUNDIDADES

VI.1.2.1. GENERALIDADES SOBRE DATOS DE TERRENO-

A continuación se presentan los resultados de los parámetros físicos medidos en terrenos, tales como profundidad de cada pozo, los niveles estáticos y dinámicos de sus aguas, temperatura, pH y Conductividad eléctrica.

En primera instancia se presenta mapas regionales de temperaturas, pH y Conductividad eléctrica (Figuras 37, 38, 39), para luego en las secciones siguientes presentar la misma información focalizada en cada acuífero.

Temperatura

Temperatura Pozos APR estudiados
Región de Coquimbo

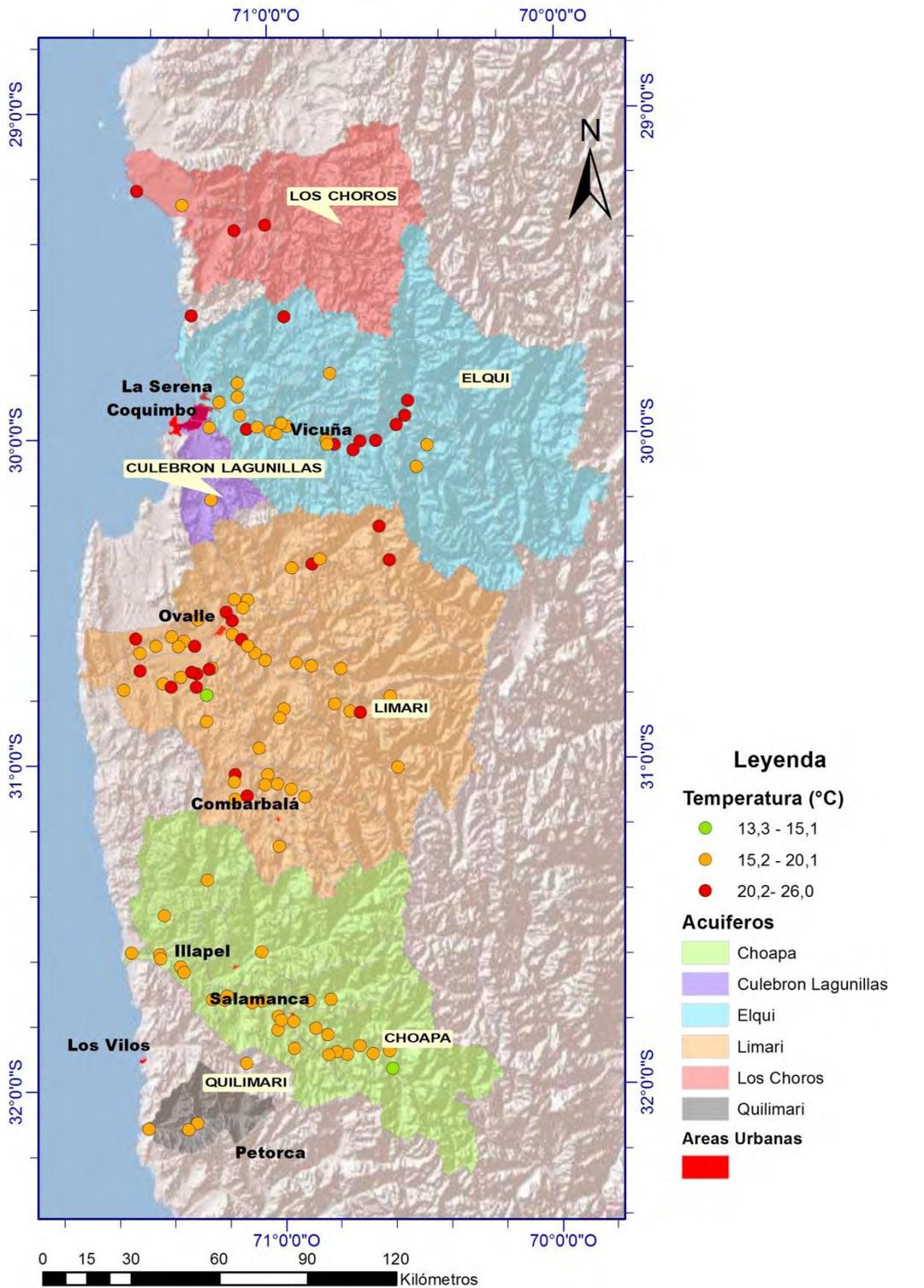


Figura 37: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de la Región de Coquimbo.

PH

pH Pozos APR estudiados Región de Coquimbo

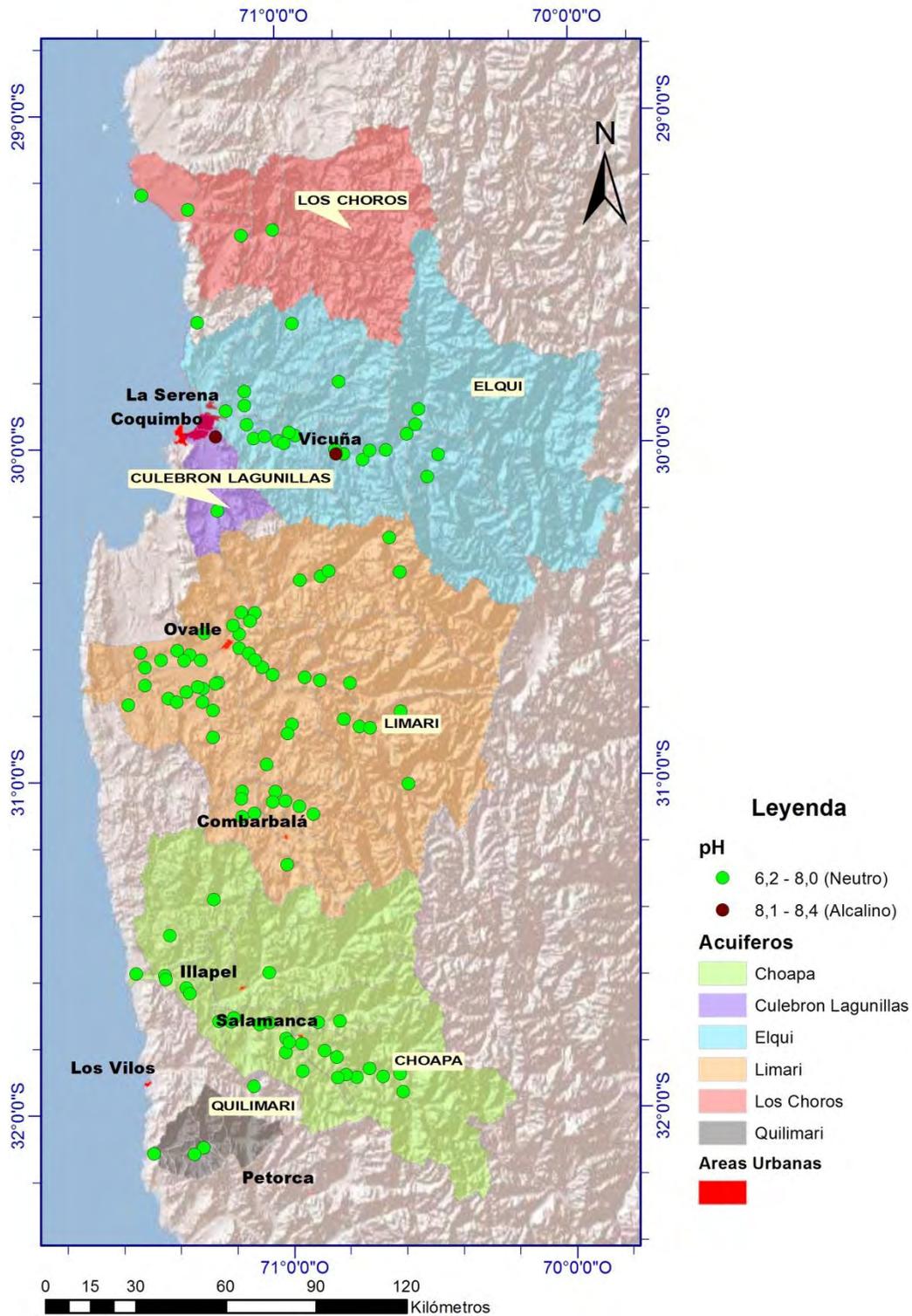


Figura 38: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de la Región de Coquimbo

Conductividad Eléctrica

Conductividad Eléctrica (CE) Pozos APR Región de Coquimbo

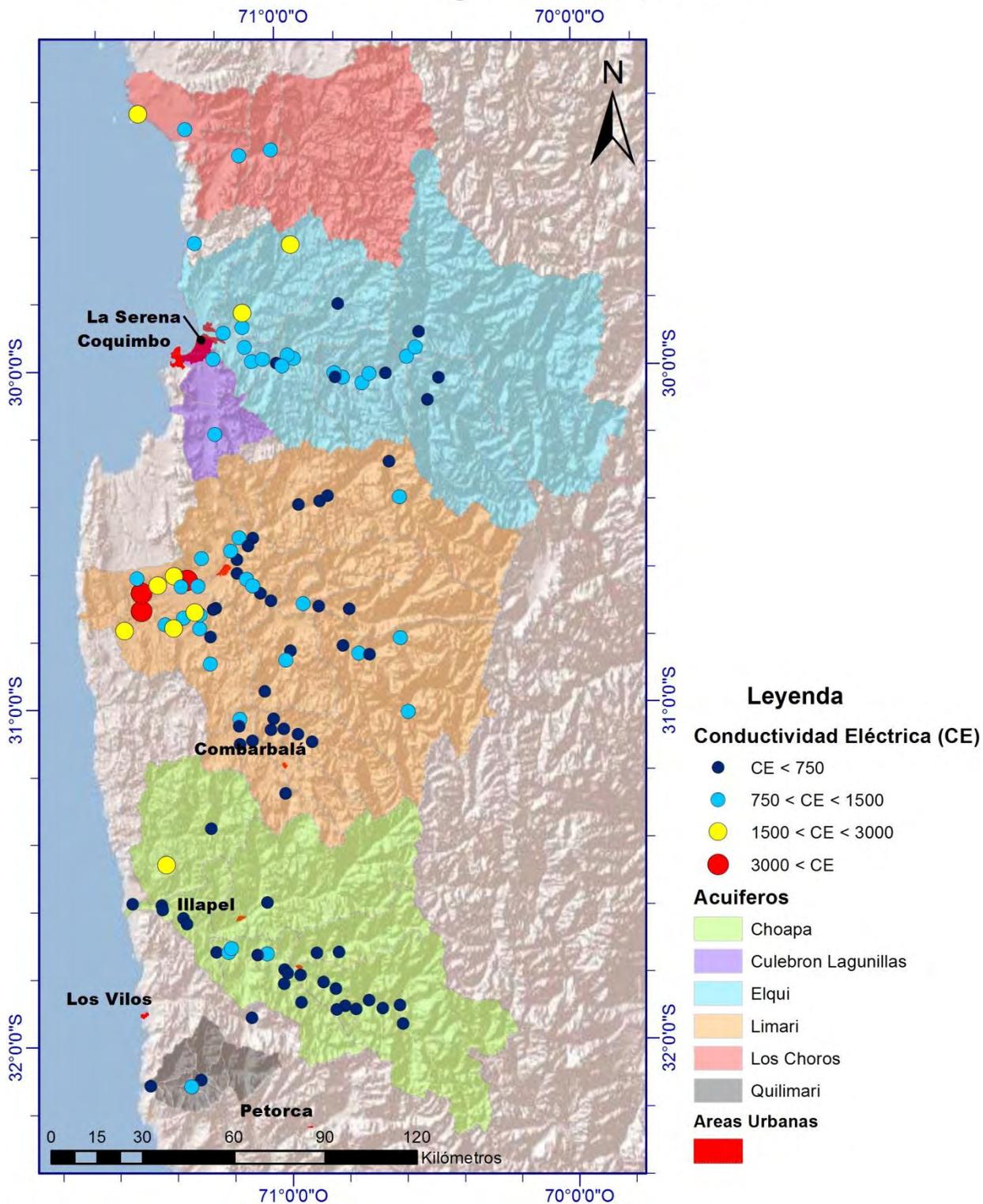


Figura 39: Conductividad Eléctrica de muestras de aguas extraídas de pozos APR de la Región de Coquimbo

VI.1.2.2. DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO LOS CHOROS

Profundidades

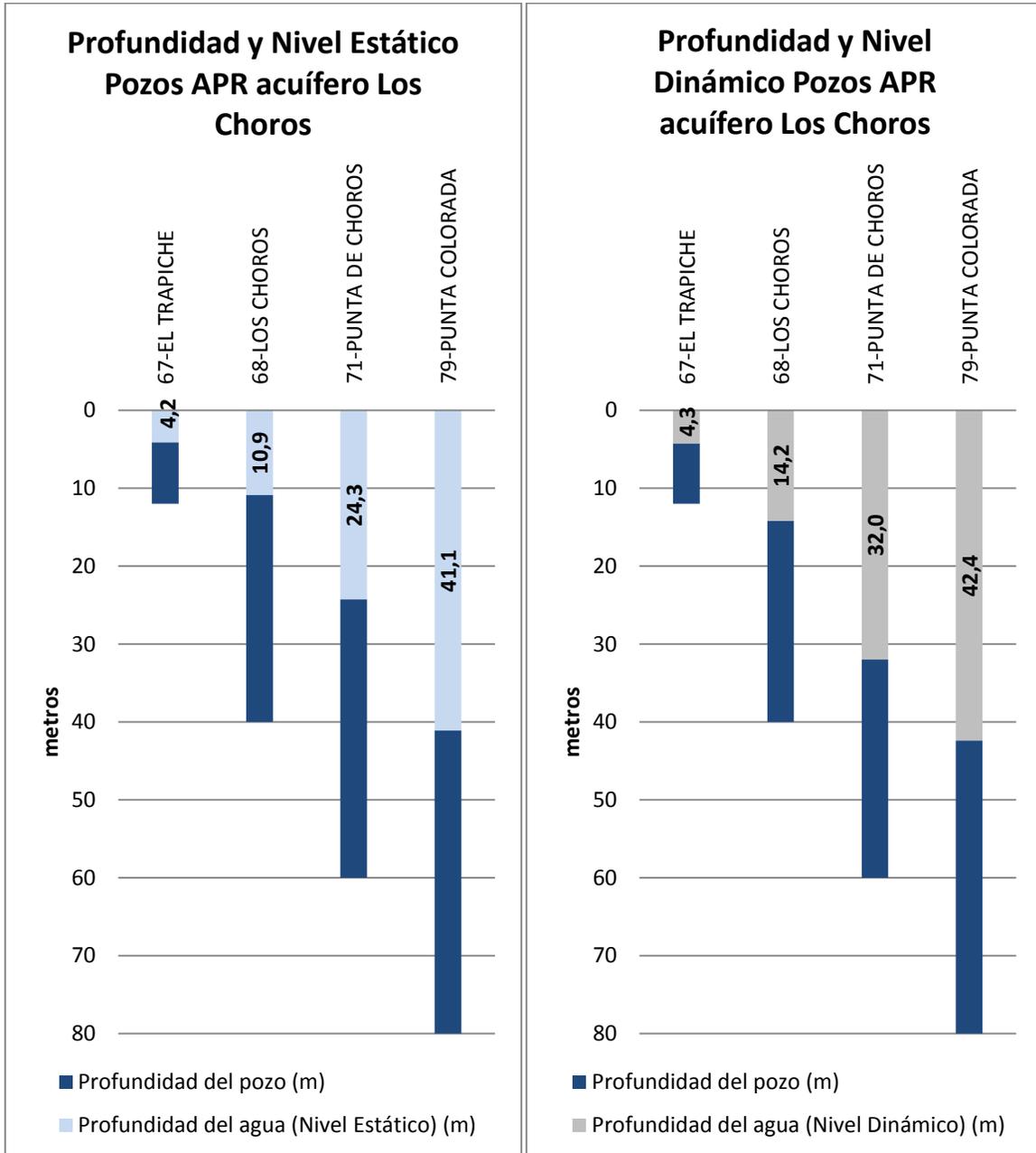


Figura 40: Izquierda: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Los Choros
Figura 41: Derecha: Profundidad y Nivel Dinámico Pozos APR acuífero Los Choros

Temperatura

Temperatura pozos - Acuífero Los Choros

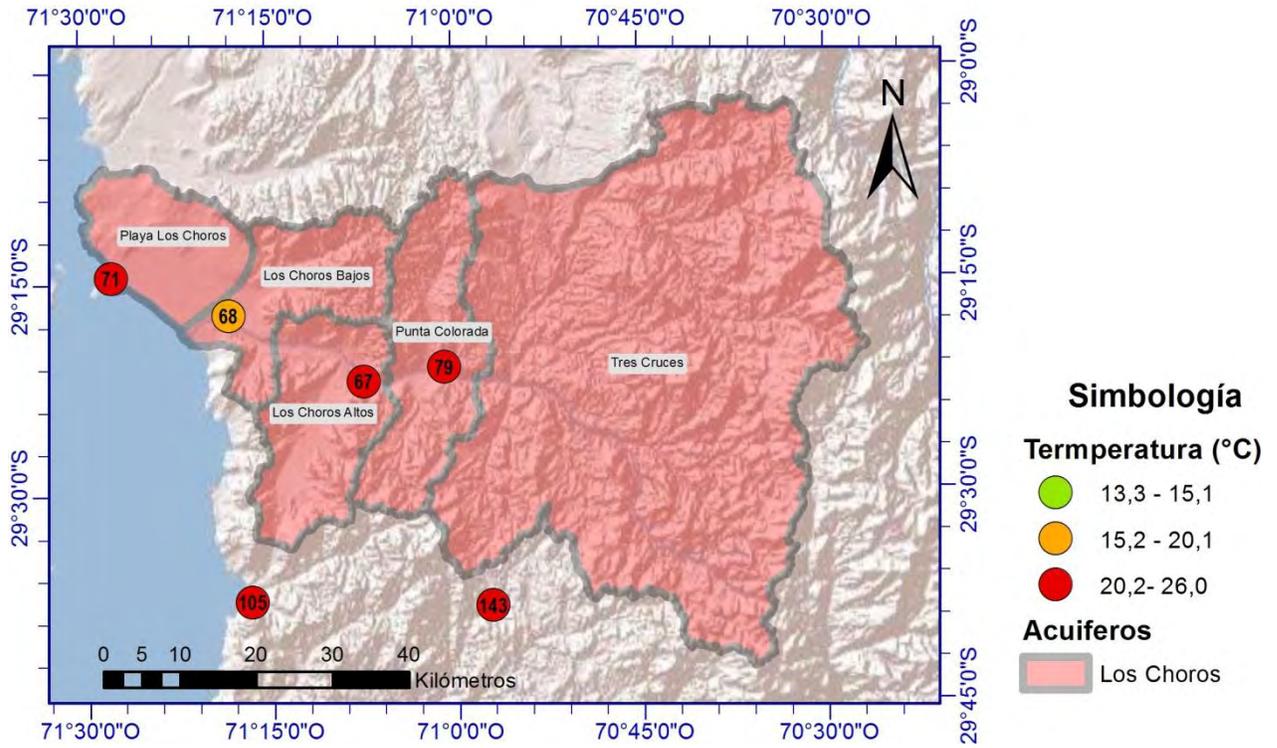


Figura 42: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Los Choros, Región de Coquimbo

PH

pH pozos - Acuífero Los Choros

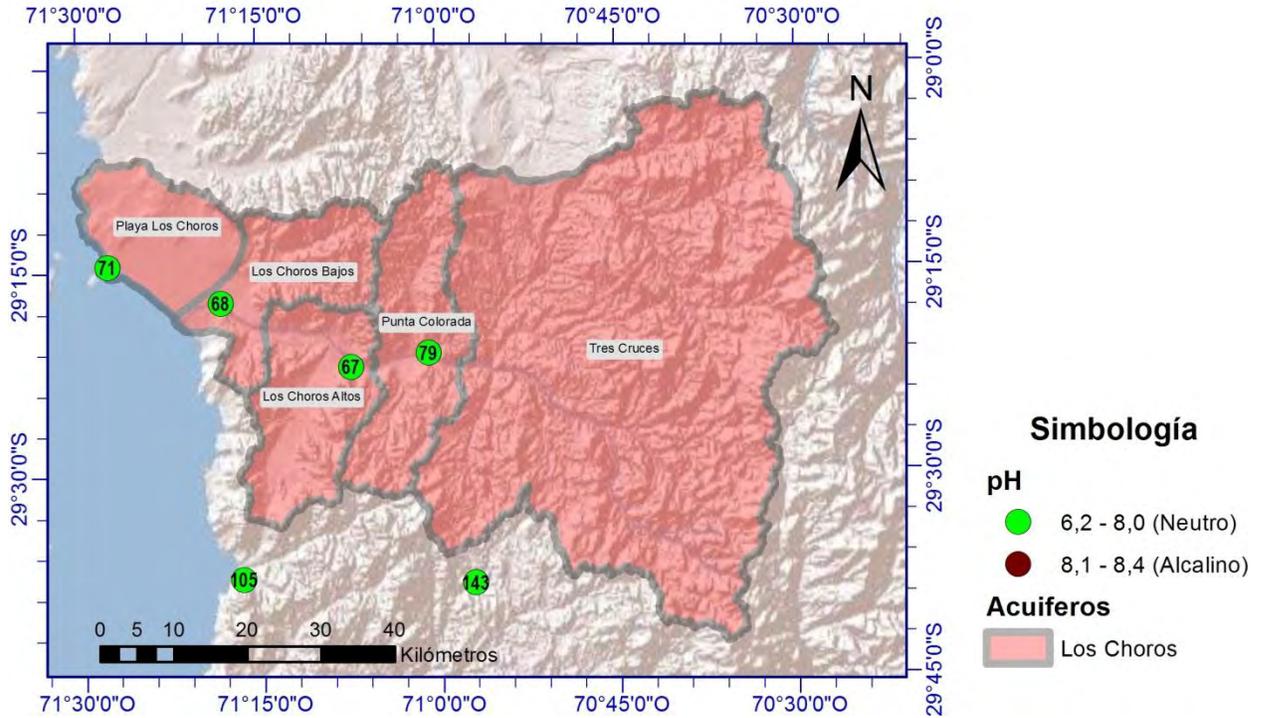


Figura 43: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Los Choros, la Región de Coquimbo

Conductividad Eléctrica

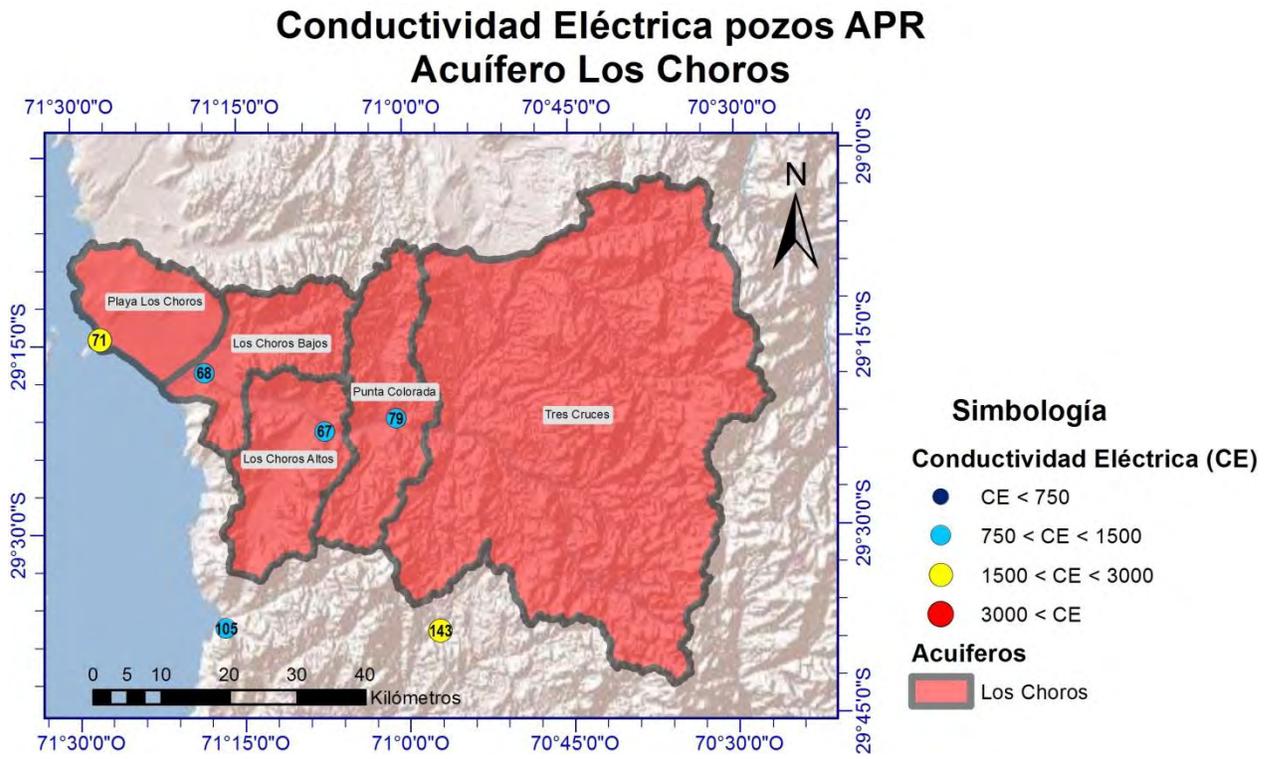


Figura 44: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Los Choros. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.

VI.1.2.3. DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO ELQUI

Profundidades

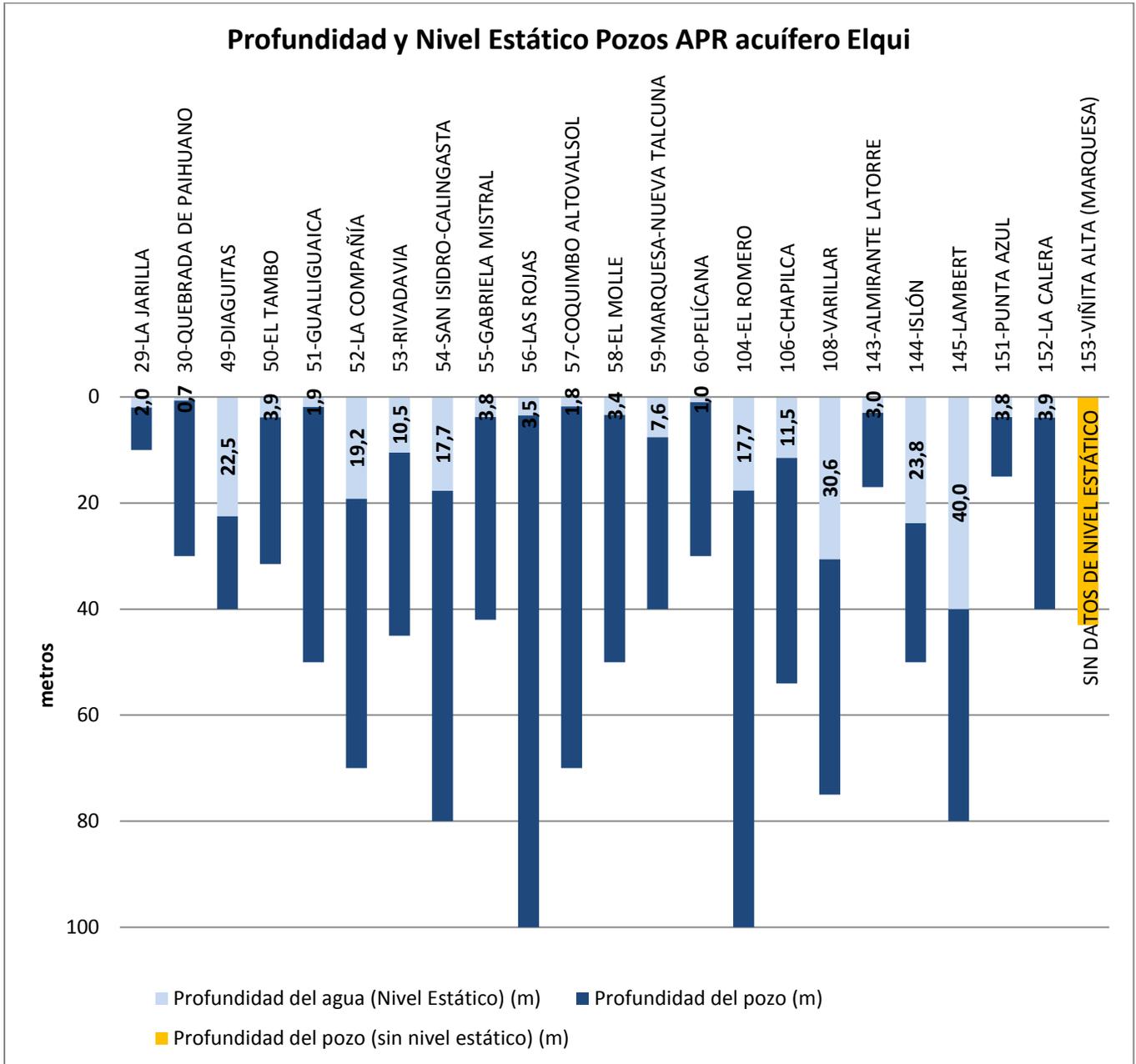


Figura 45: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Elqui

Profundidad y Nivel Dinámico Pozos APR acuífero Elqui

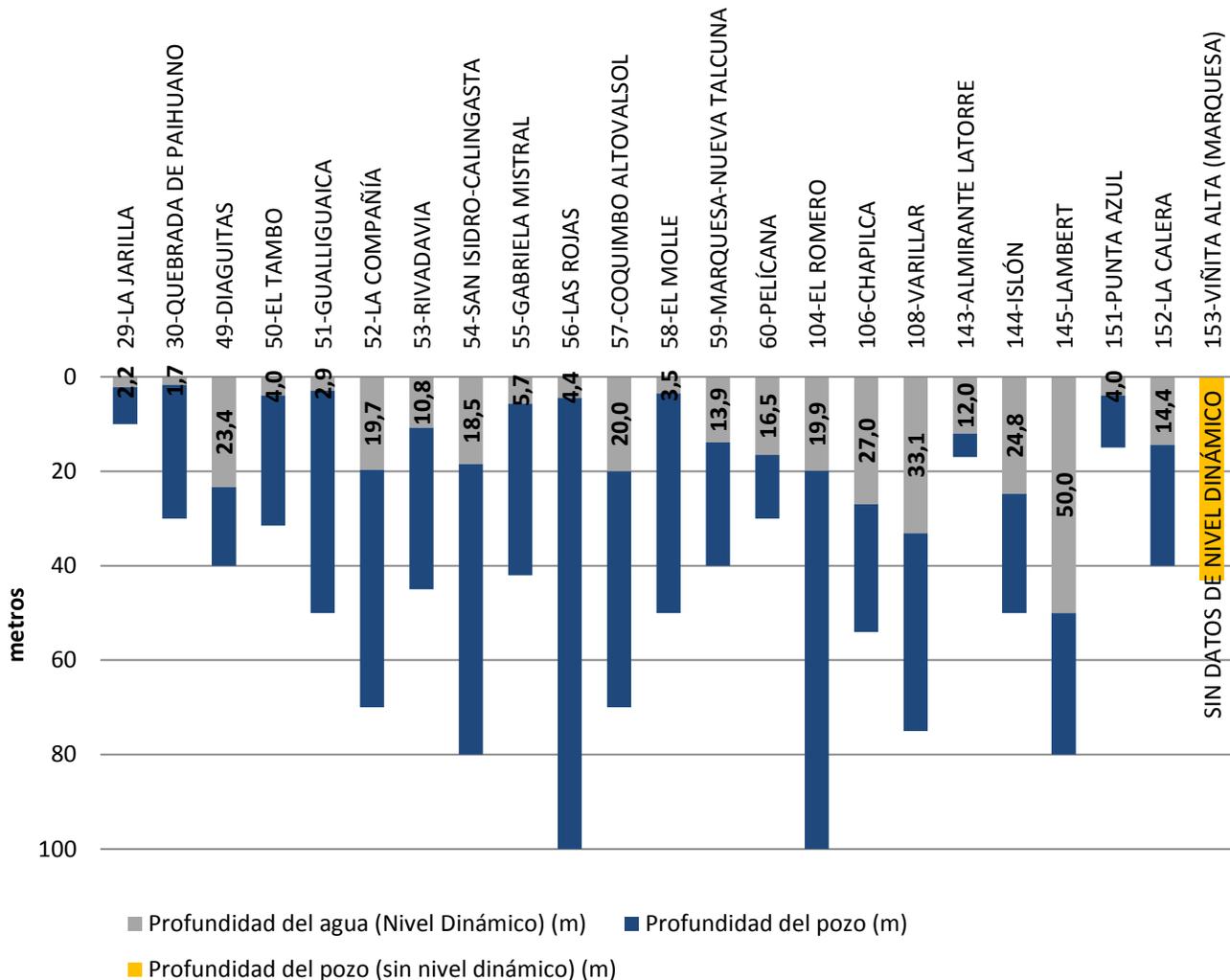


Figura 46: Profundidad y Nivel Dinámico Pozos APR acuífero Elqui

Temperatura

Temperatura pozos - Acuífero Elqui

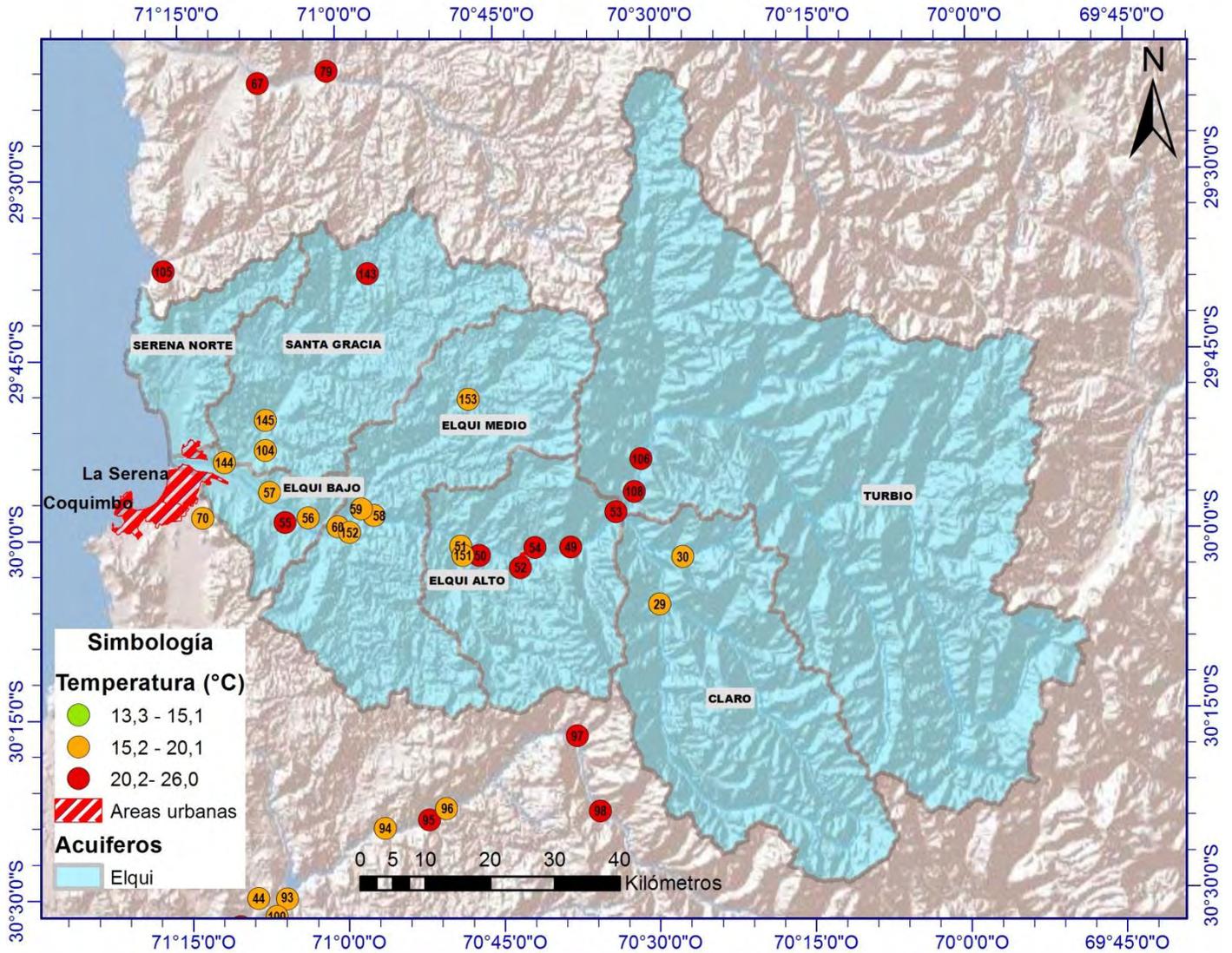


Figura 47: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Elqui, Región de Coquimbo

pH pozos - Acuífero Elqui

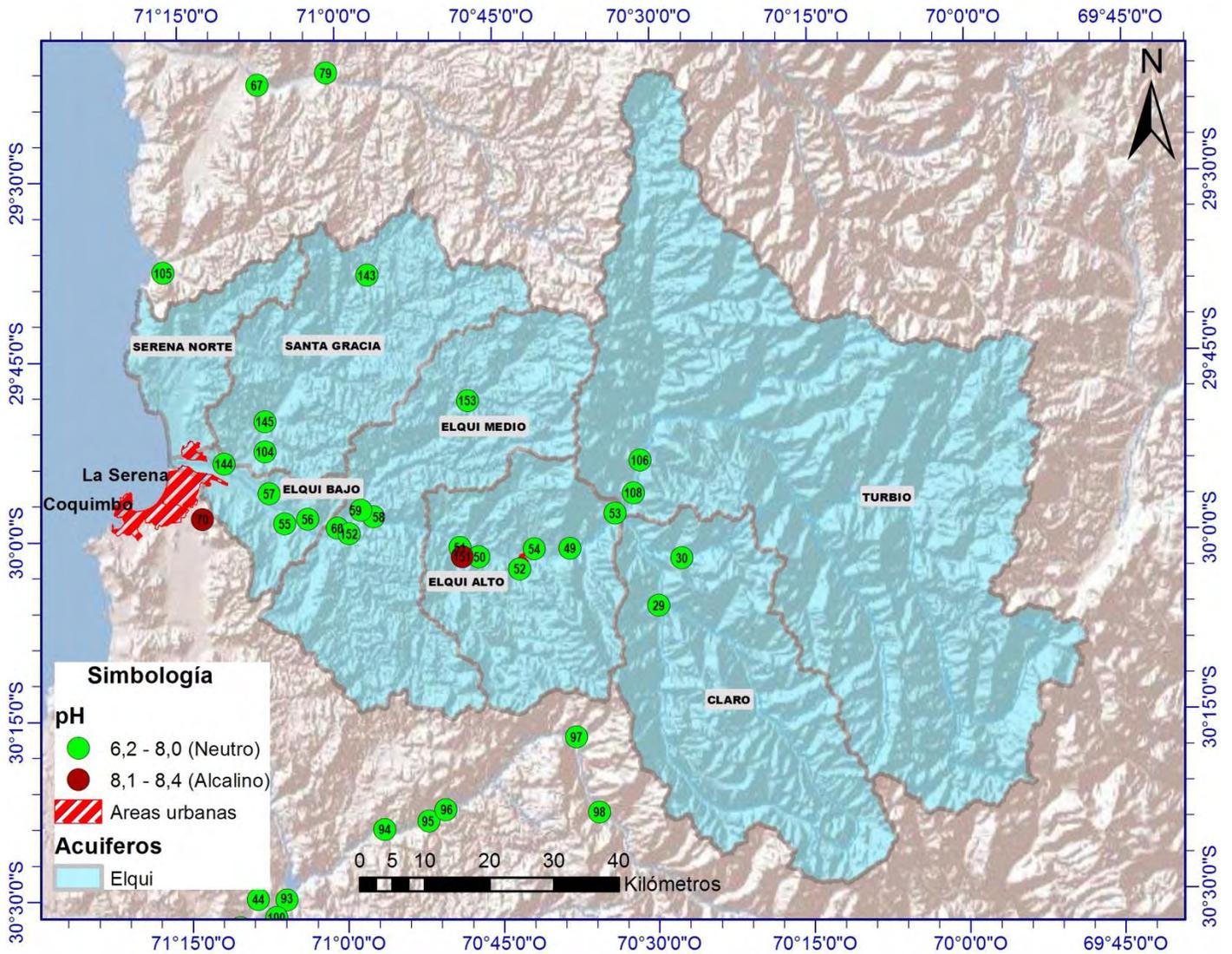


Figura 48: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Elqui, la Región de Coquimbo

Conductividad Eléctrica pozos APR Acuífero Elqui

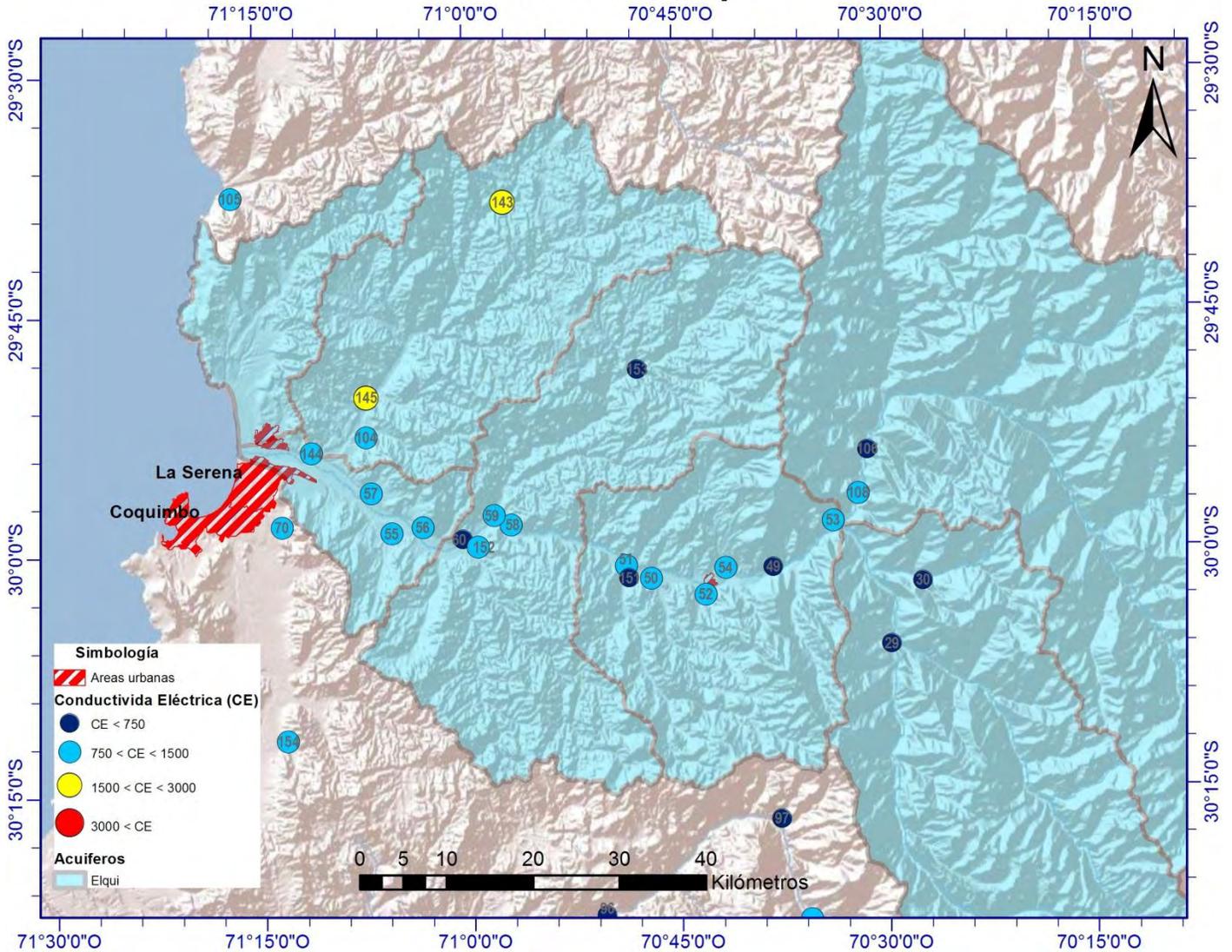


Figura 49: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Elqui. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.

VI.1.2.4. DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO CULEBRÓN – LAGUNILLAS

Profundidades

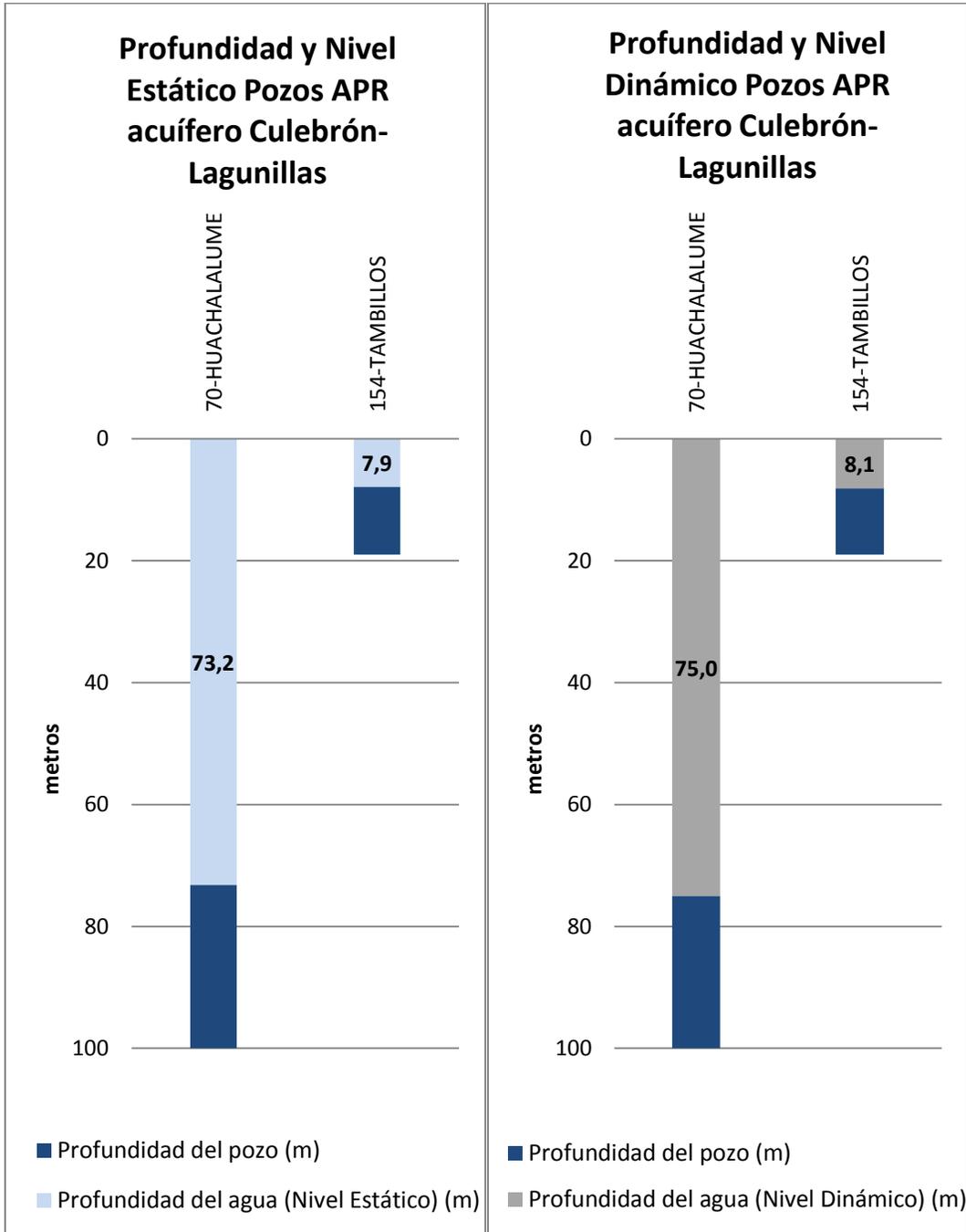


Figura 50: Izquierda: profundidad y nivel estático pozos APR acuífero Culebrón-Lagunillas

Figura 51: Derecha: profundidad y nivel dinámico pozos APR acuífero Culebrón-Lagunillas

Temperatura

Temperatura pozos - Acuífero Culebrón-Lagunillas

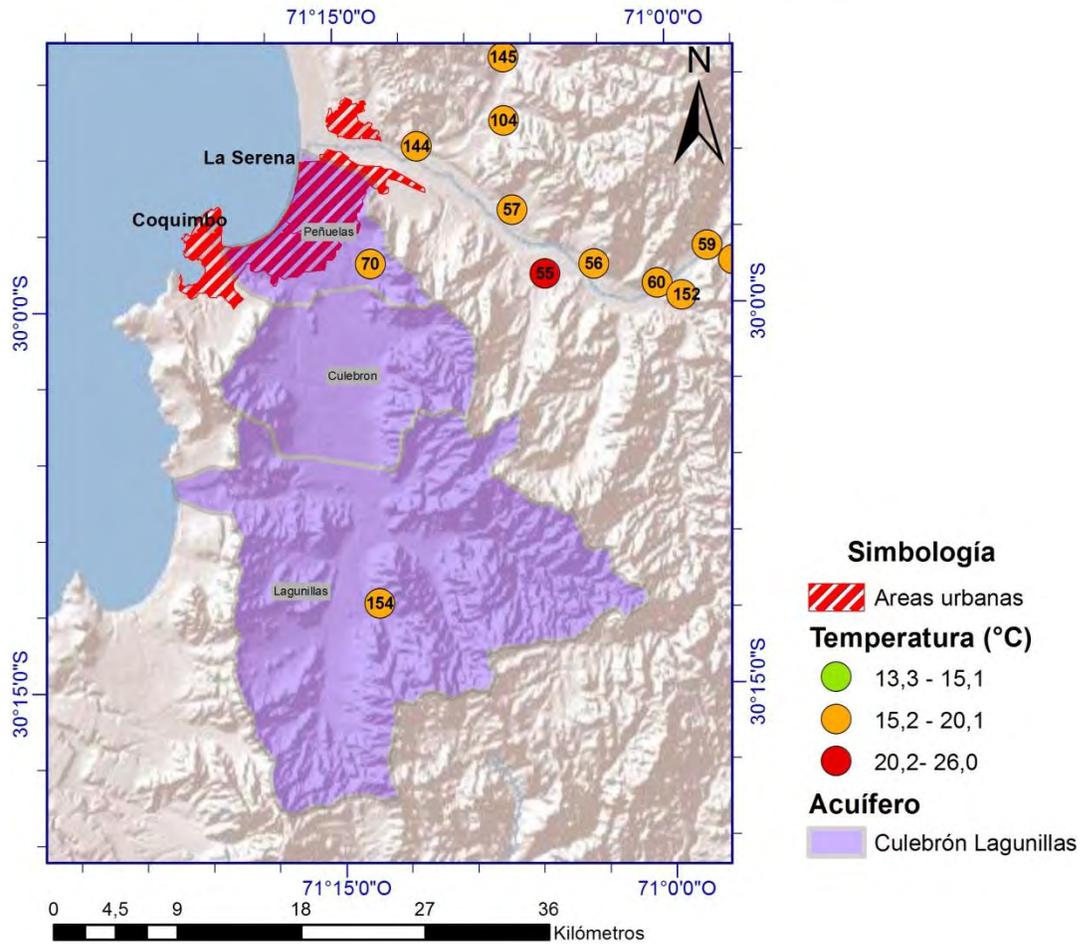


Figura 52: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Culebrón-Lagunilla.

PH

pH Pozos - Acuífero Culebrón-Lagunillas

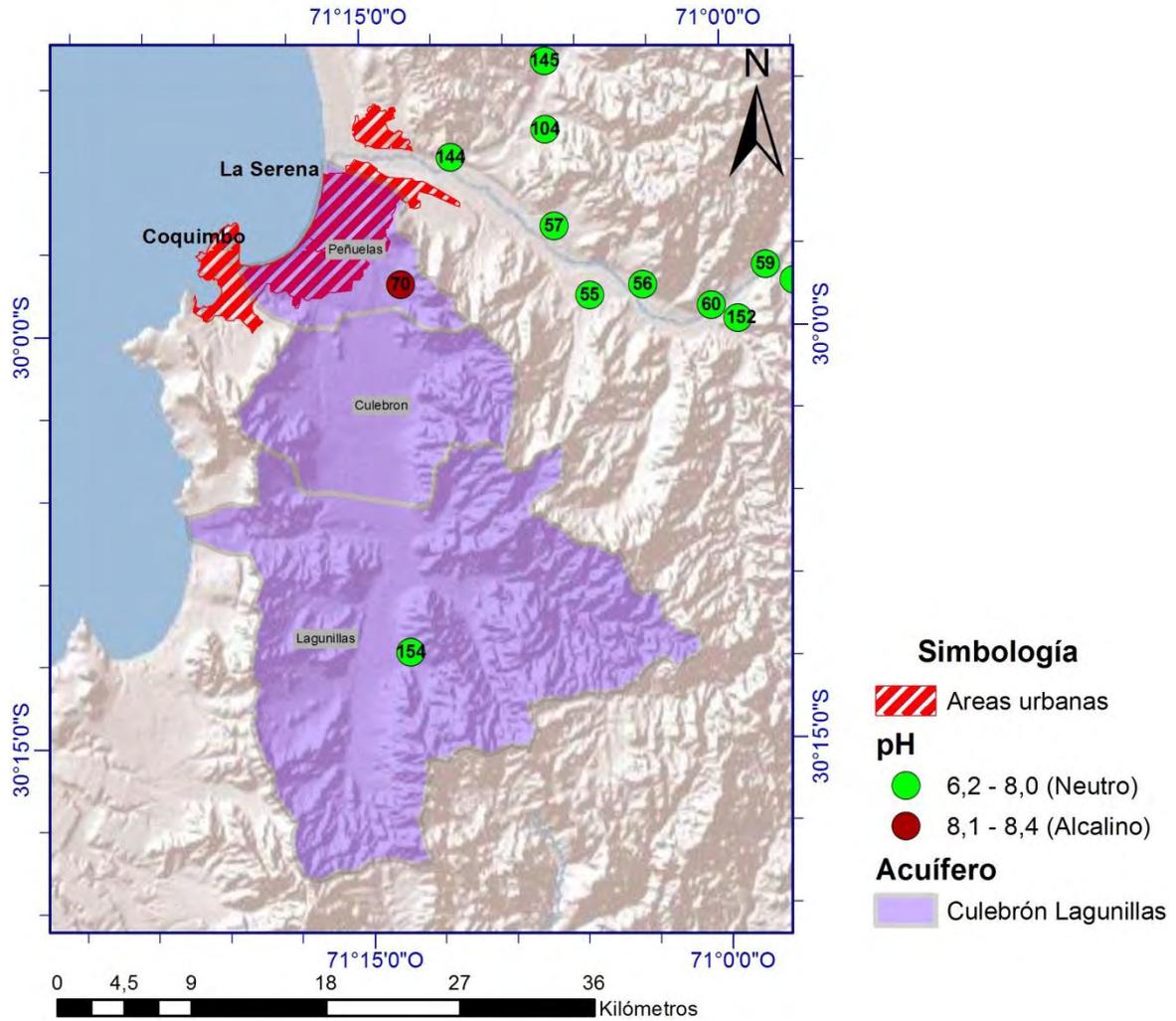


Figura 53: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Culebrón - Lagunillas, la Región de Coquimbo

Conductividad Eléctrica

Conductividad Eléctrica pozos APR Acuífero Culebrón - Lagunillas

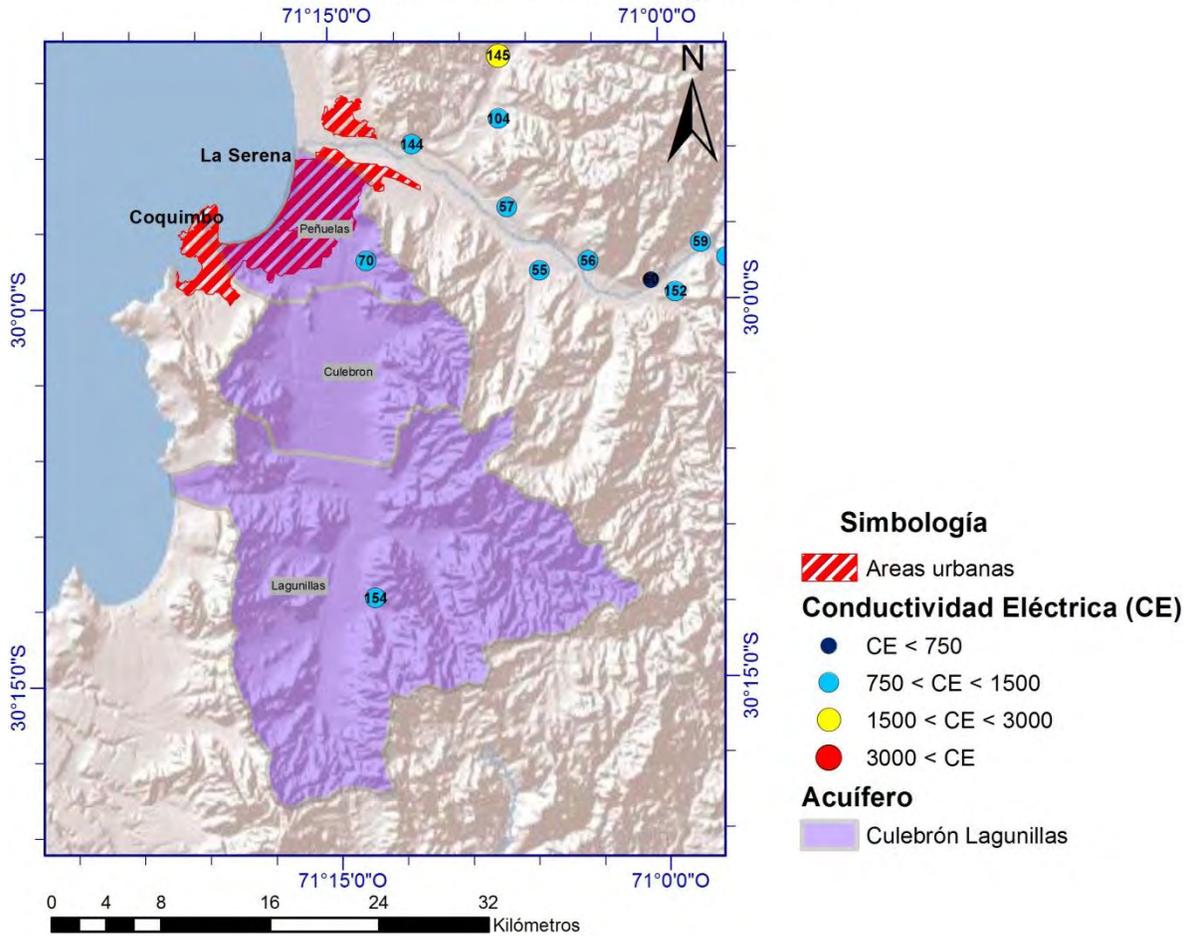


Figura 54: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Culebrón-Lagunillas. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.

VI.1.2.5. DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO LIMARÍ

Profundidades

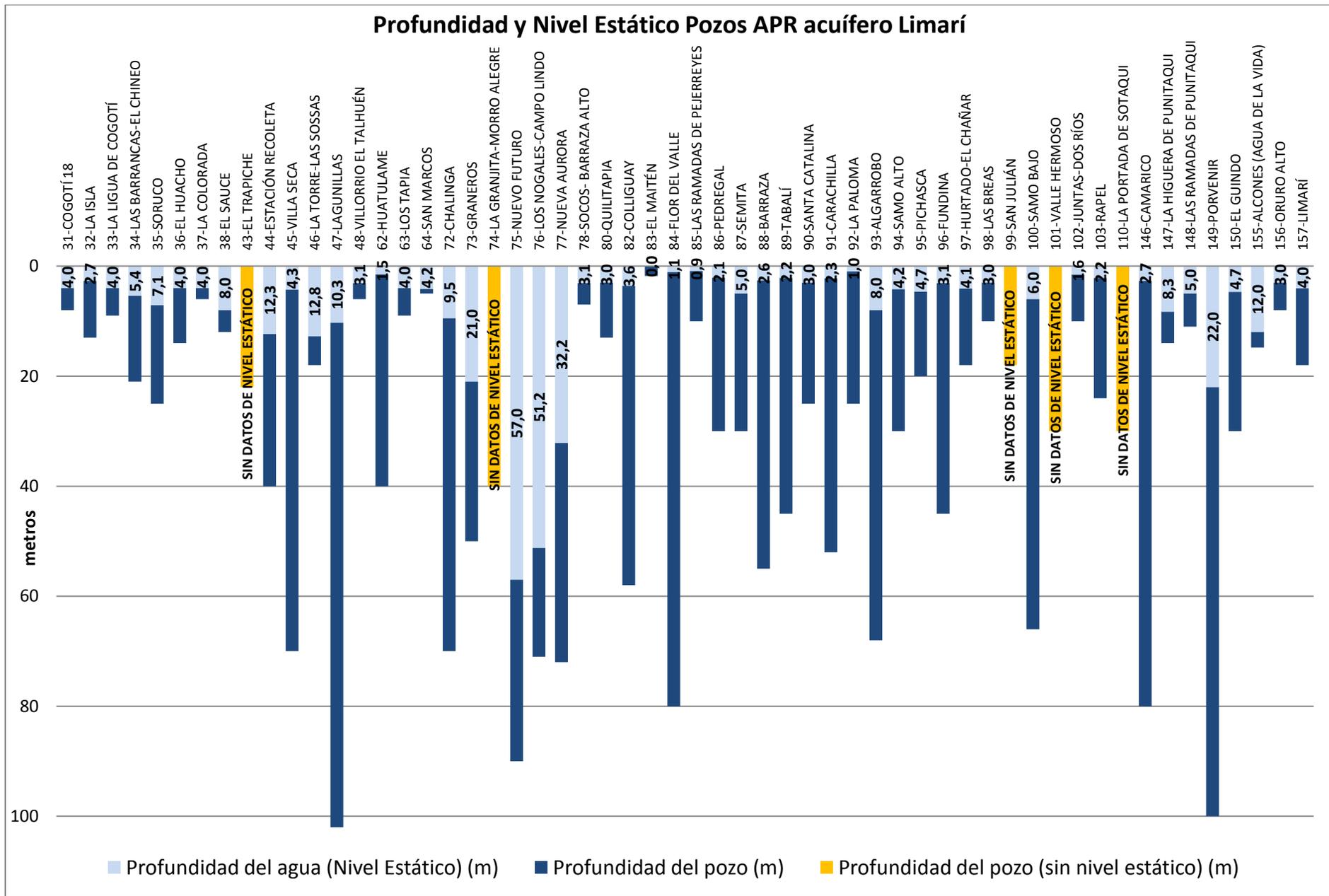


Figura 55: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Limarí

Profundidad y Nivel Dinámico Pozos APR acuífero Limarí

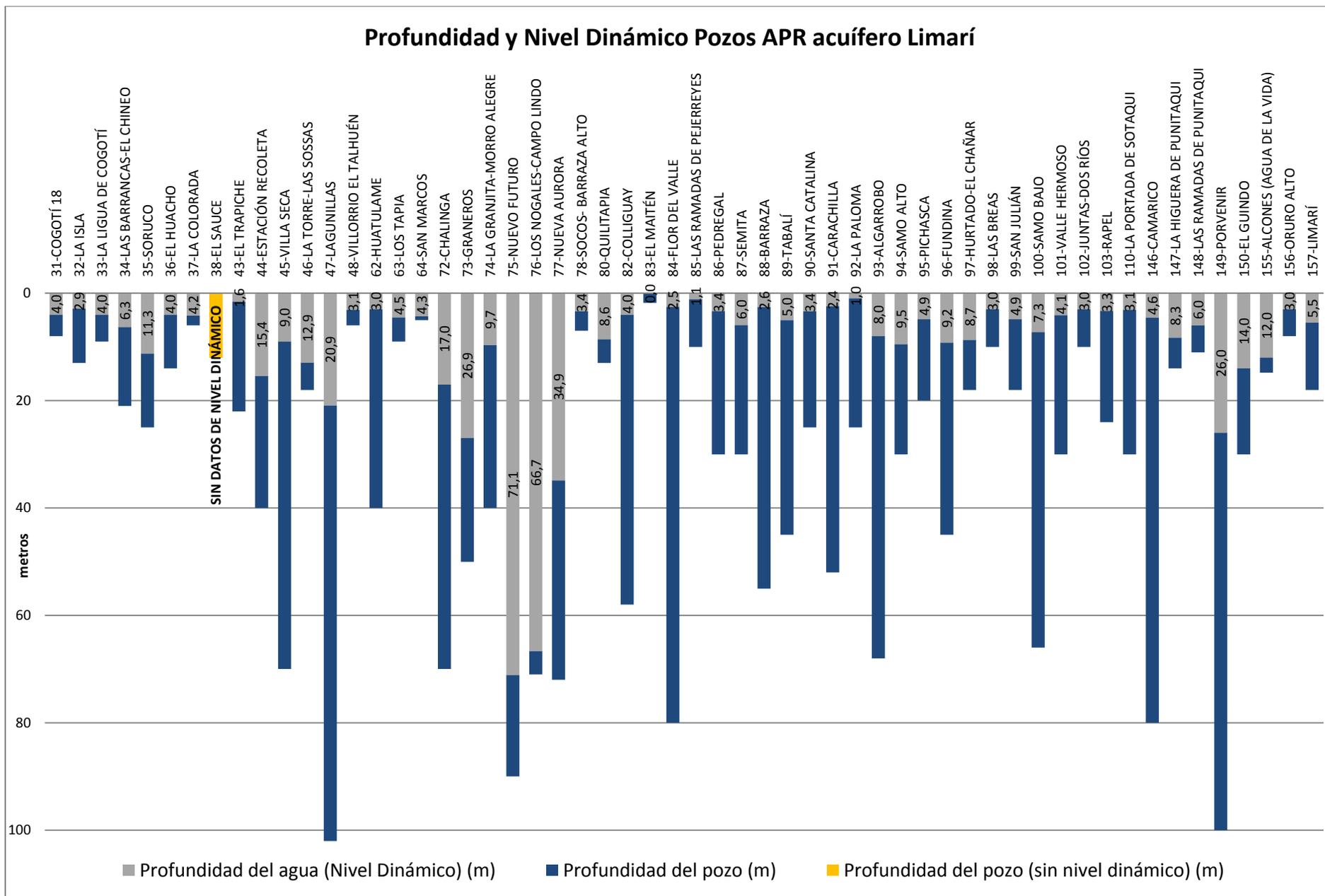


Figura 56: Profundidad y nivel dinámico pozos APR acuífero Limarí

Temperatura

Temperatura pozos - Acuífero Limarí

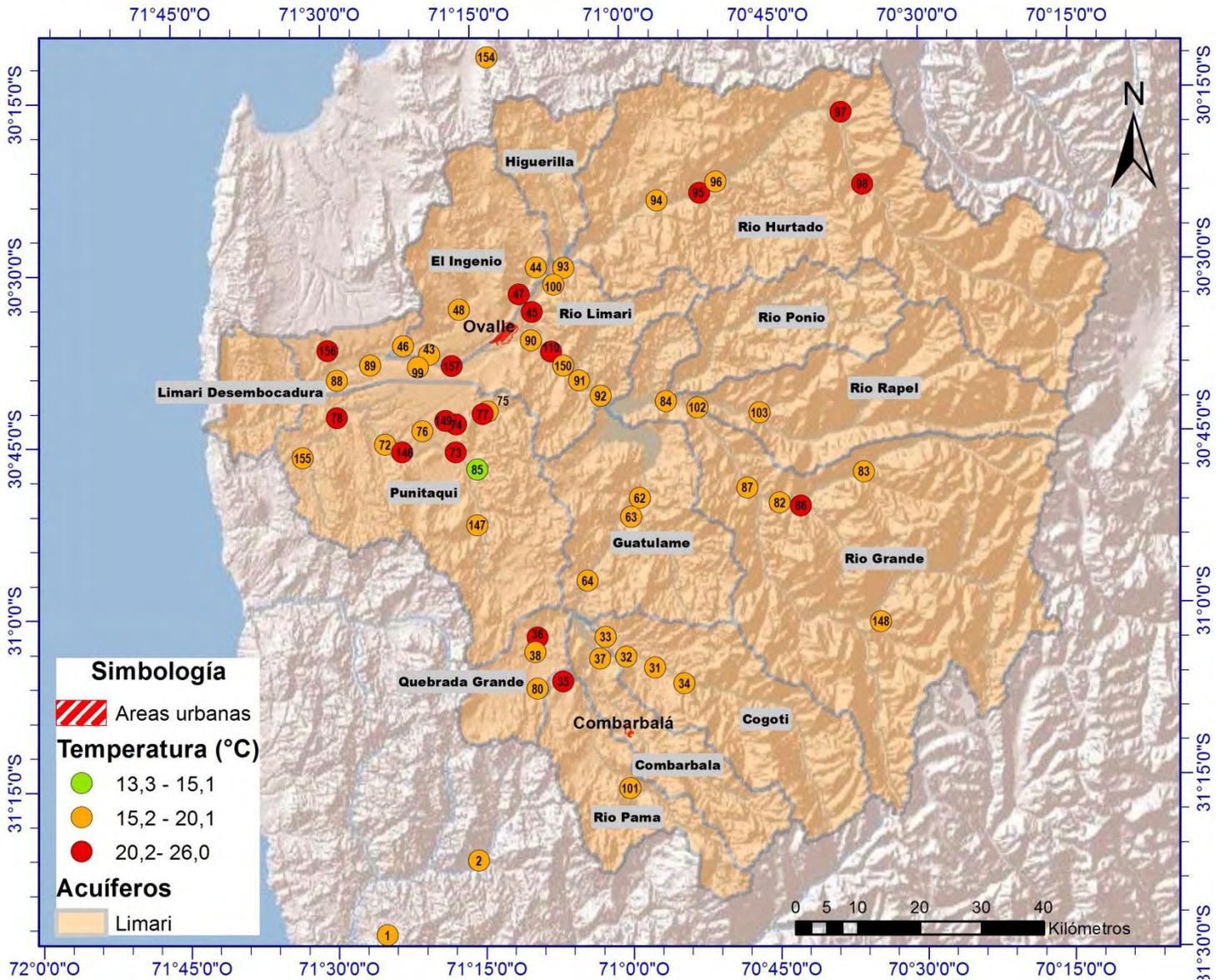


Figura 57: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Limarí, Región de Coquimbo.

pH pozos - Acuífero Limarí

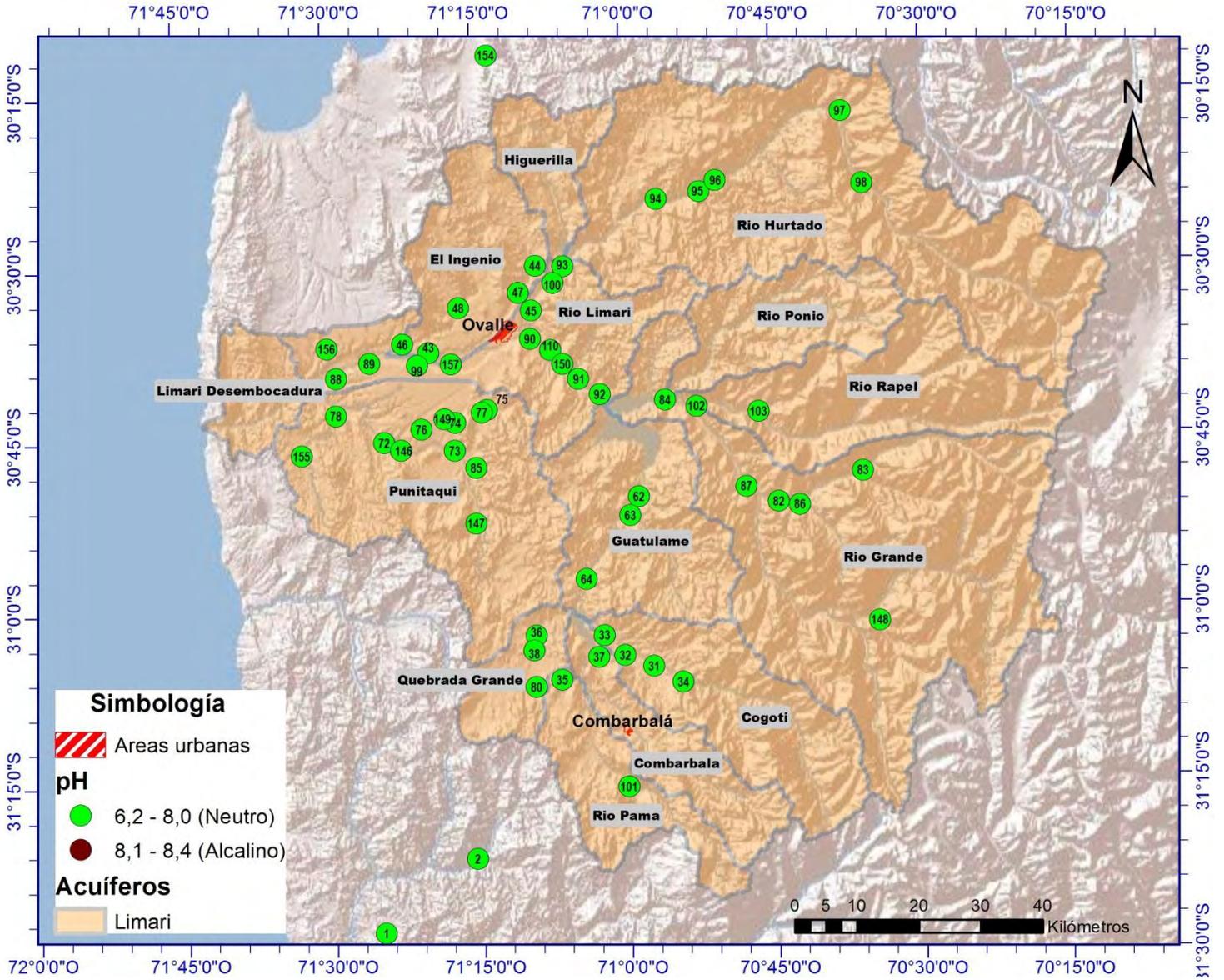


Figura 58: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Limarí, la Región de Coquimbo

Conductividad Eléctrica pozos APR Acuífero Limarí

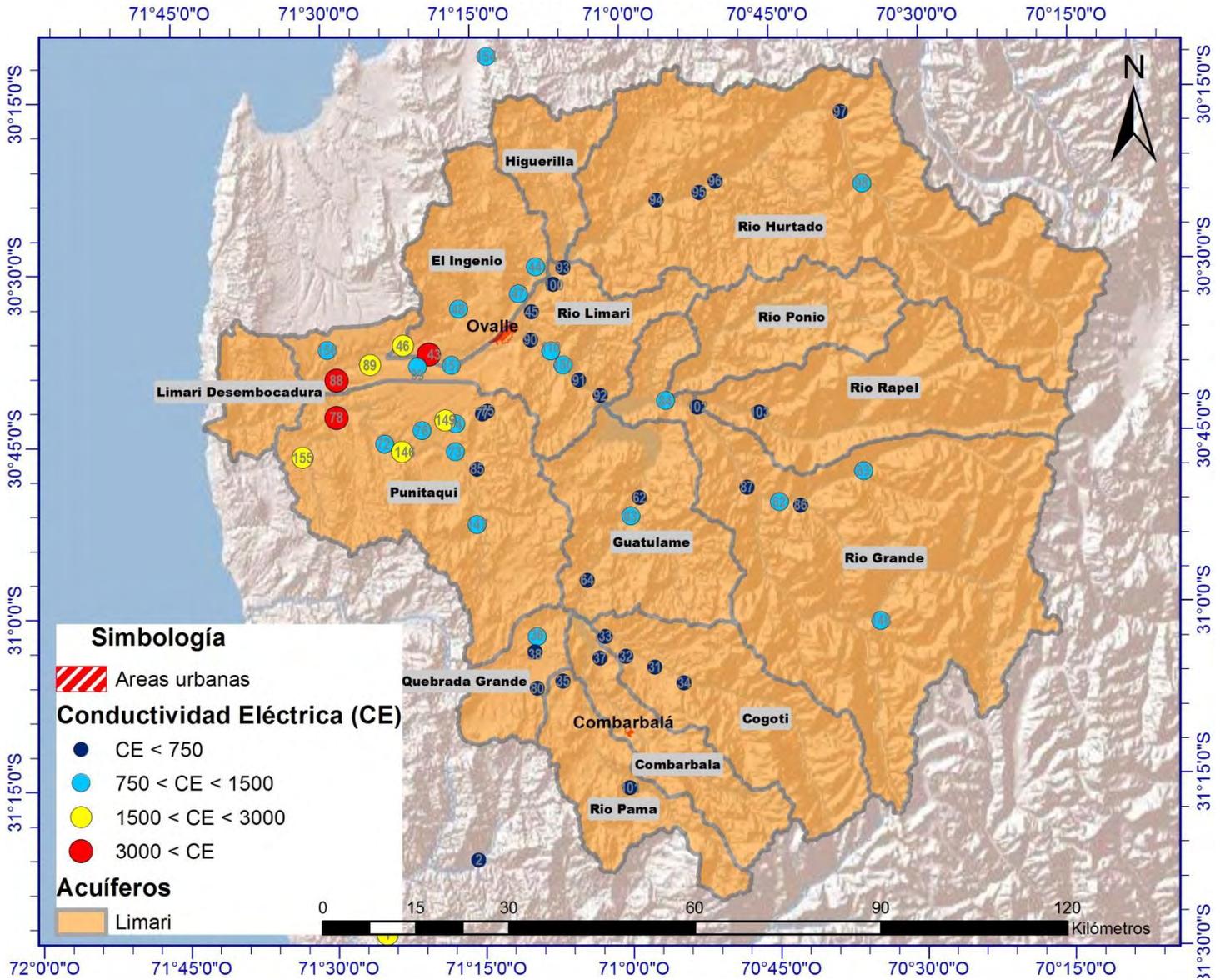


Figura 59: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Limarí. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.

VI.1.2.6. DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO CHOAPA

Profundidades

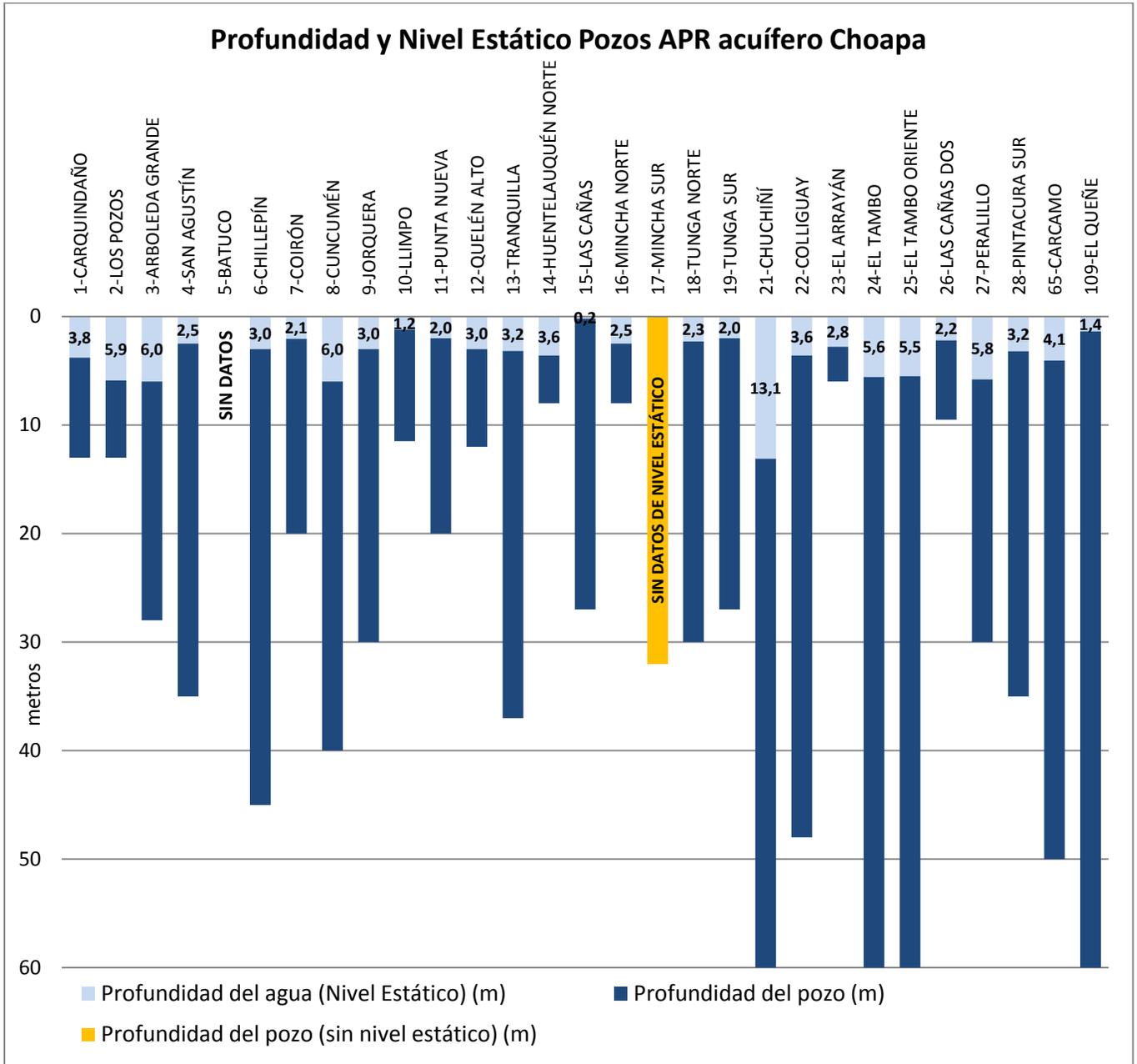


Figura 60: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Choapa

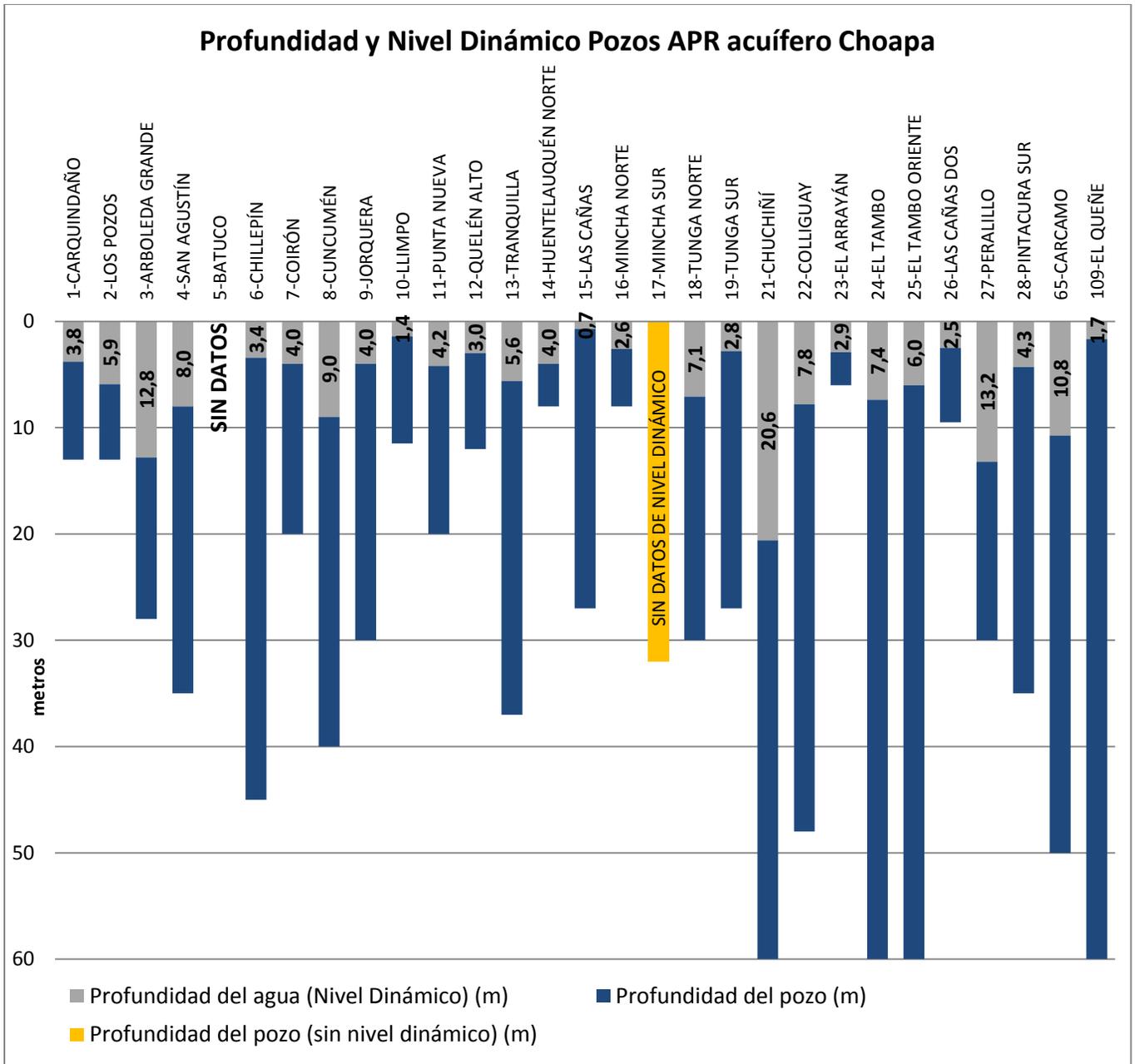


Figura 61: Profundidad y Nivel Dinámico Pozos APR acuífero Choapa

Temperatura

Temperatura pozos - Acuífero Choapa

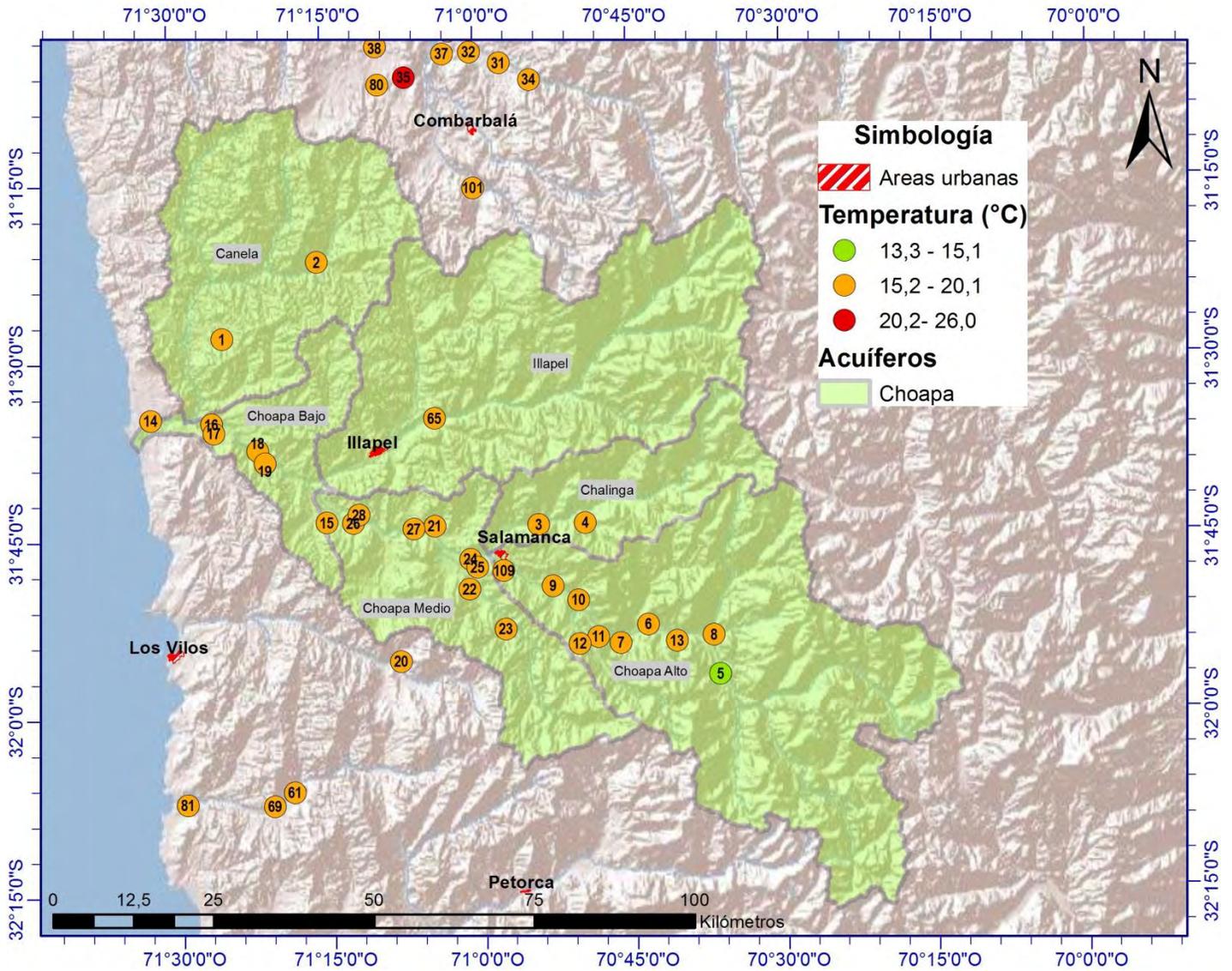


Figura 62: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Choapa, Región de Coquimbo

PH

pH Pozos - Acuífero Choapa

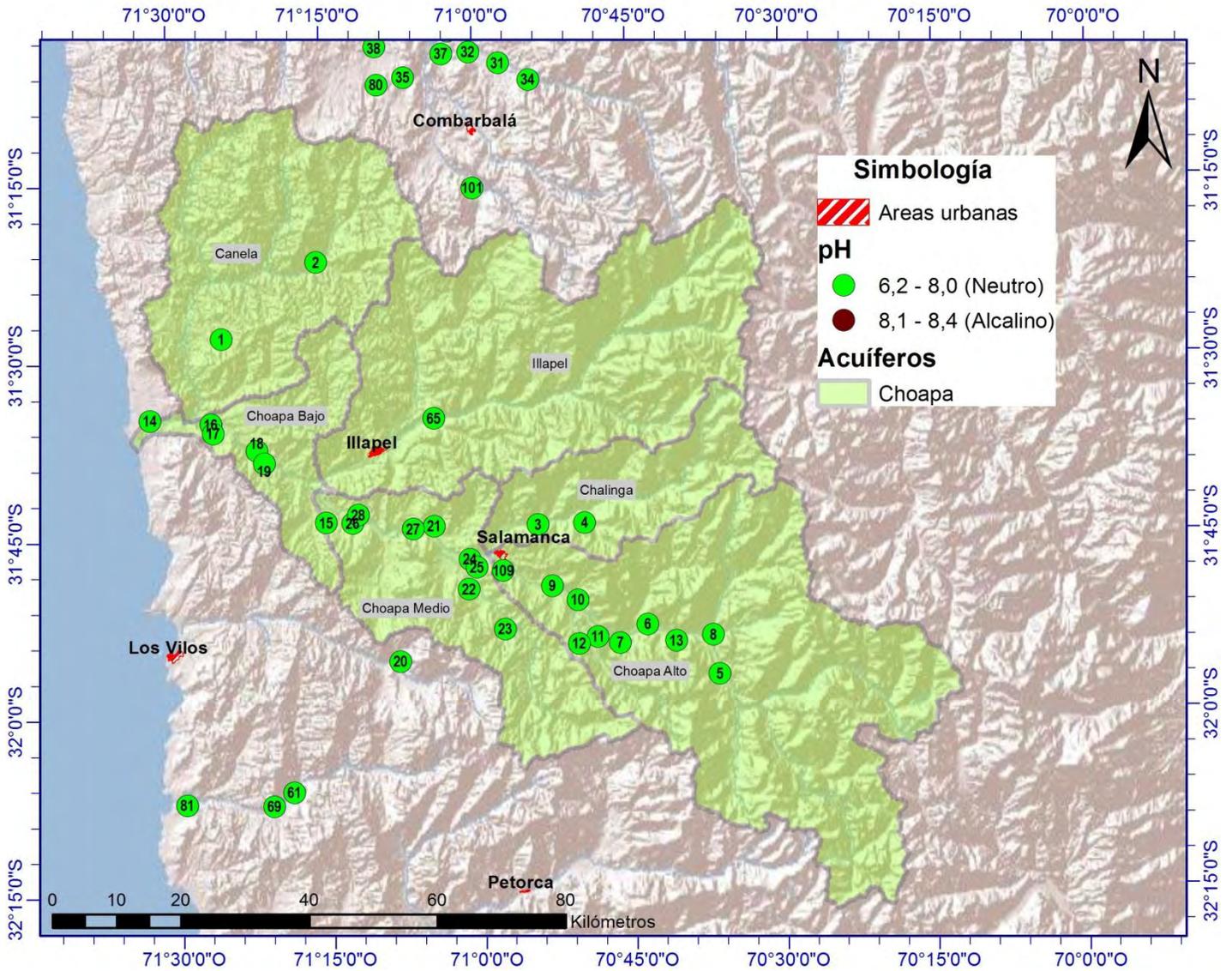


Figura 63: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Choapa, la Región de Coquimbo.

Conductividad Eléctrica pozos APR Acuífero Choapa

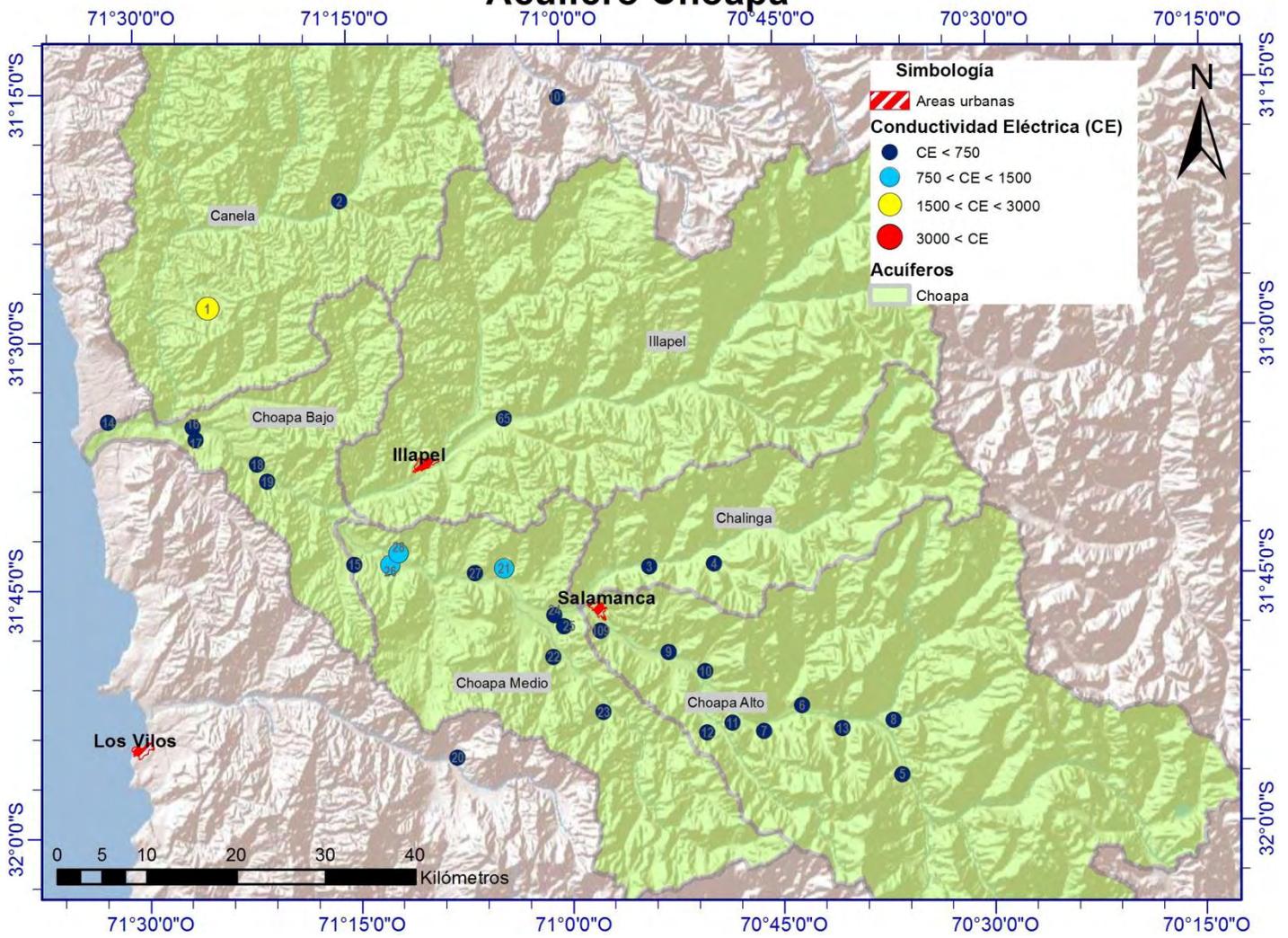


Figura 64: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Choapa. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.

VI.1.2.7. DATOS DE TERRENO POZOS DE ACUÍFERO QUILIMARÍ

Profundidades

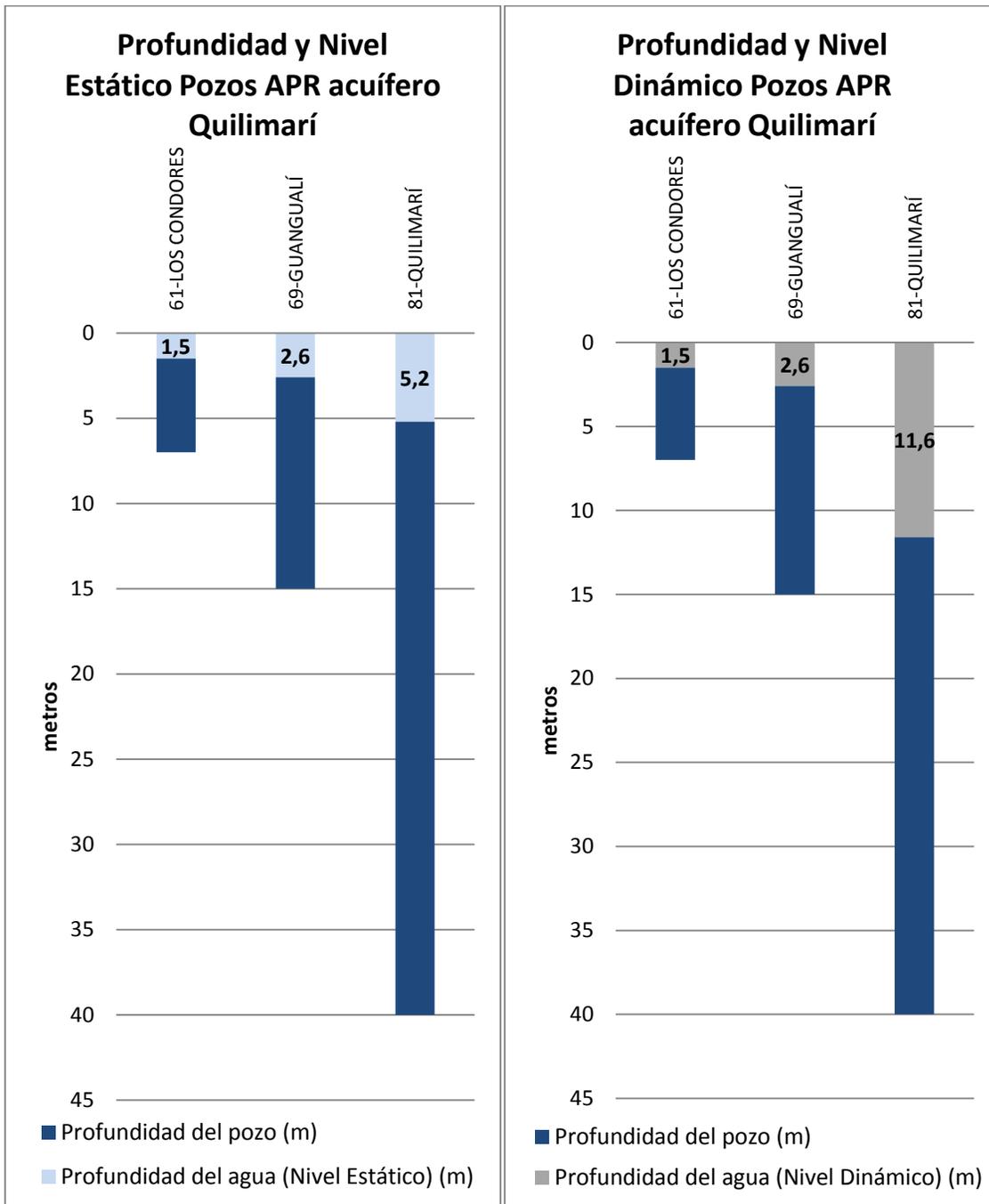


Figura 65: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Quilimarí

Figura 66: Profundidad y Nivel Estático Pozos APR acuífero Quilimarí

Temperatura

Temperatura pozos - Acuífero Quilimarí

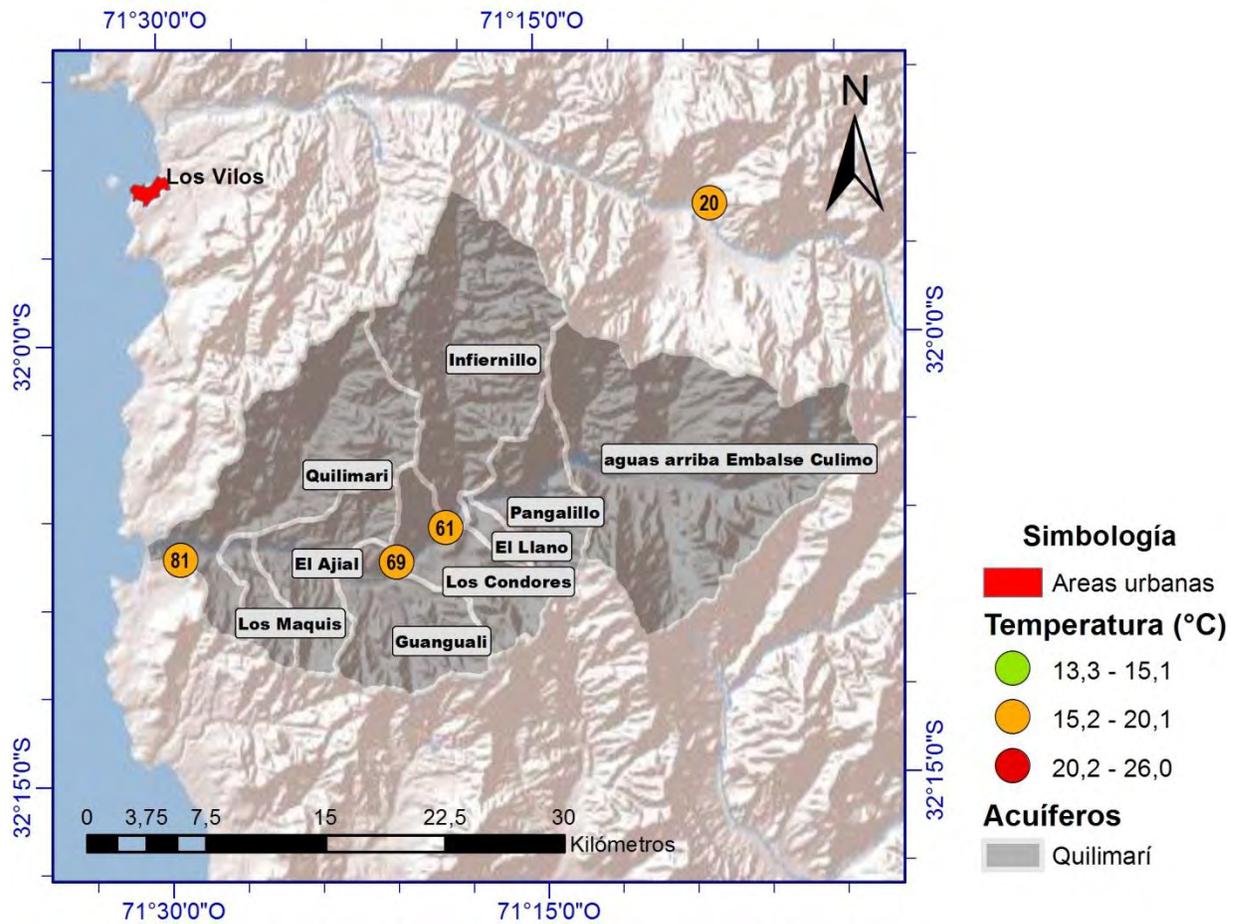


Figura 67: Temperatura de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Quilimarí, Región de Coquimbo

PH

pH pozos - Acuífero Quilimarí

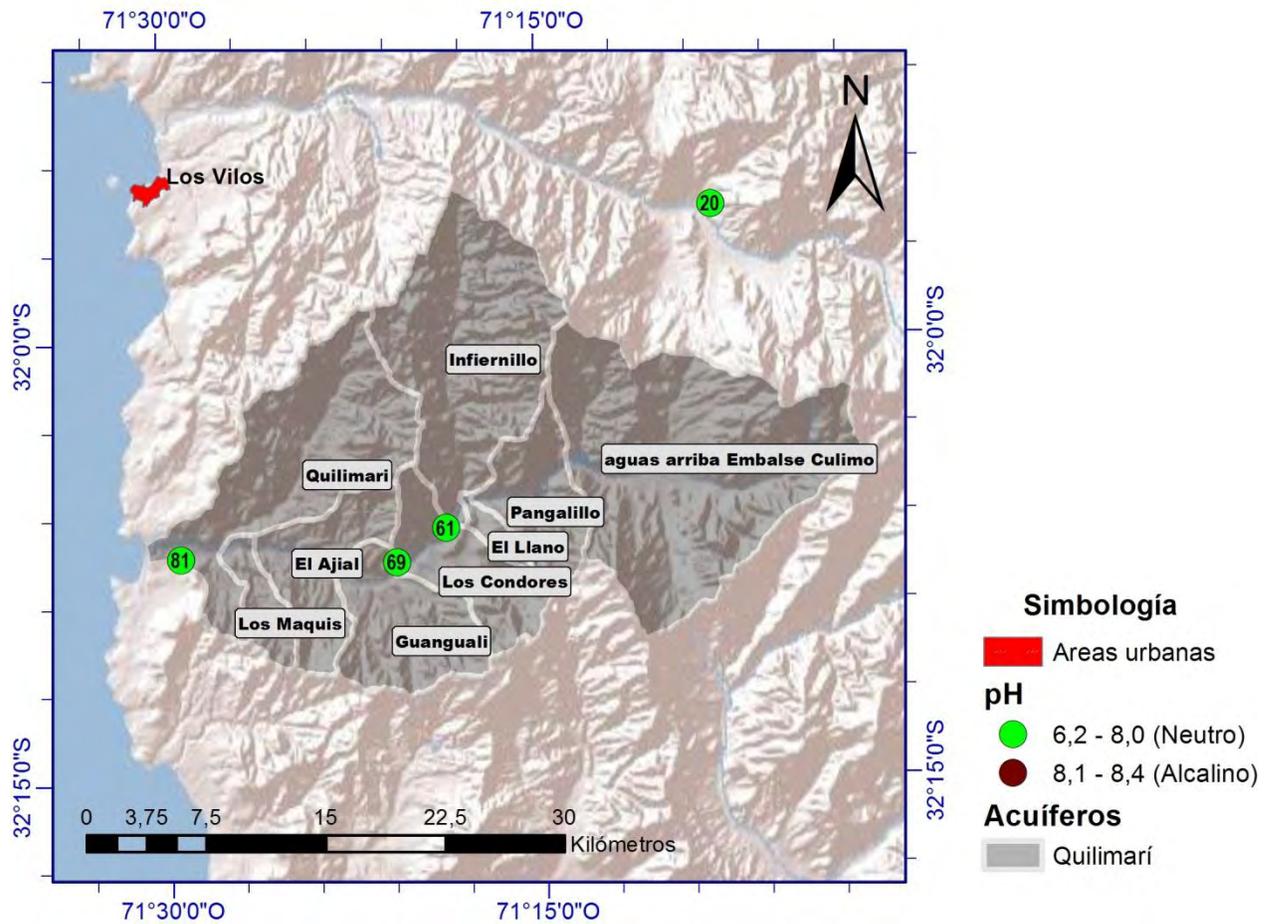


Figura 68: pH de muestras de aguas extraídas de pozos APR de acuífero Quilimarí, la Región de Coquimbo

Conductividad Eléctrica

Conductividad Eléctrica pozos APR Acuífero Quilimarí

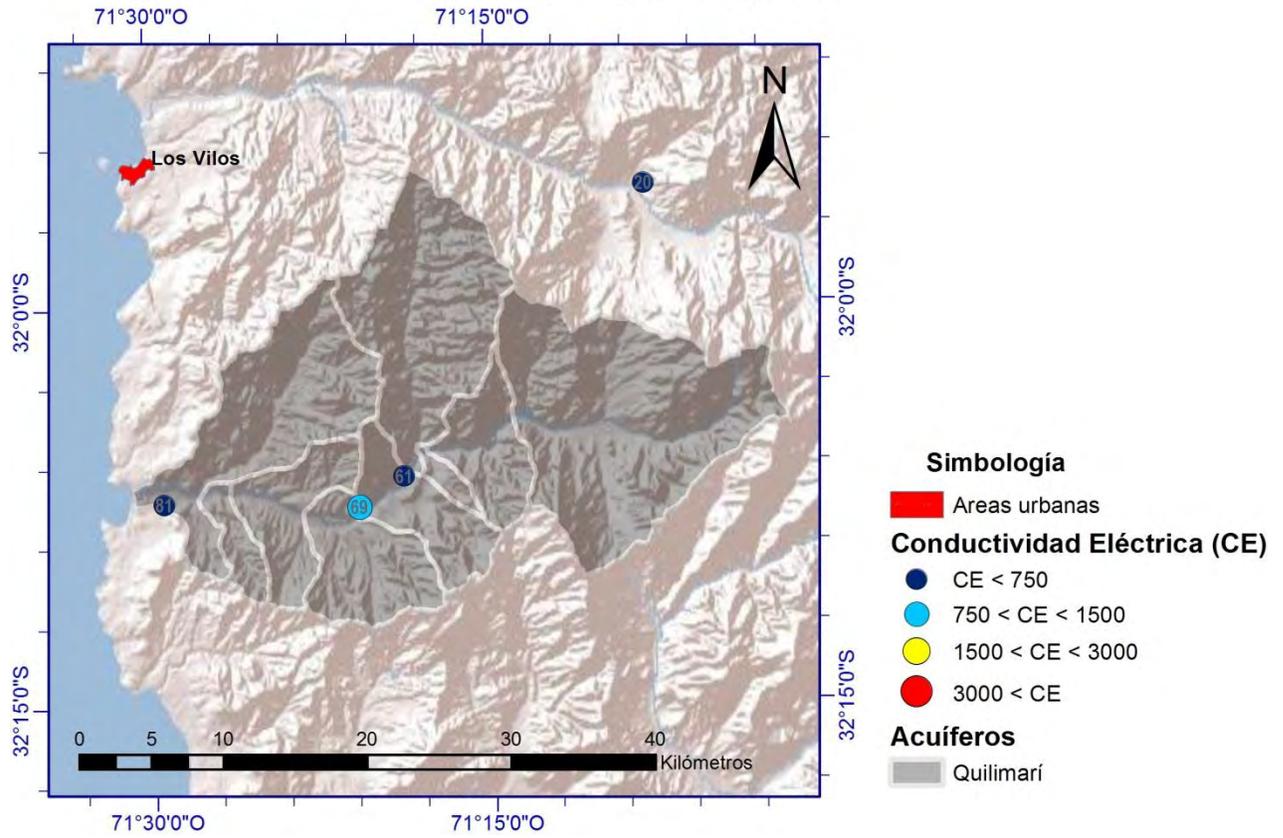


Figura 69: Conductividad Eléctrica pozos APR estudiados de acuífero Quilimarí. Rangos en base a Norma de riego NCh1333.

VI.1.2.8. DATOS DE TERRENO DE POZOS SIN ACUÍFERO DEFINIDO

Profundidades

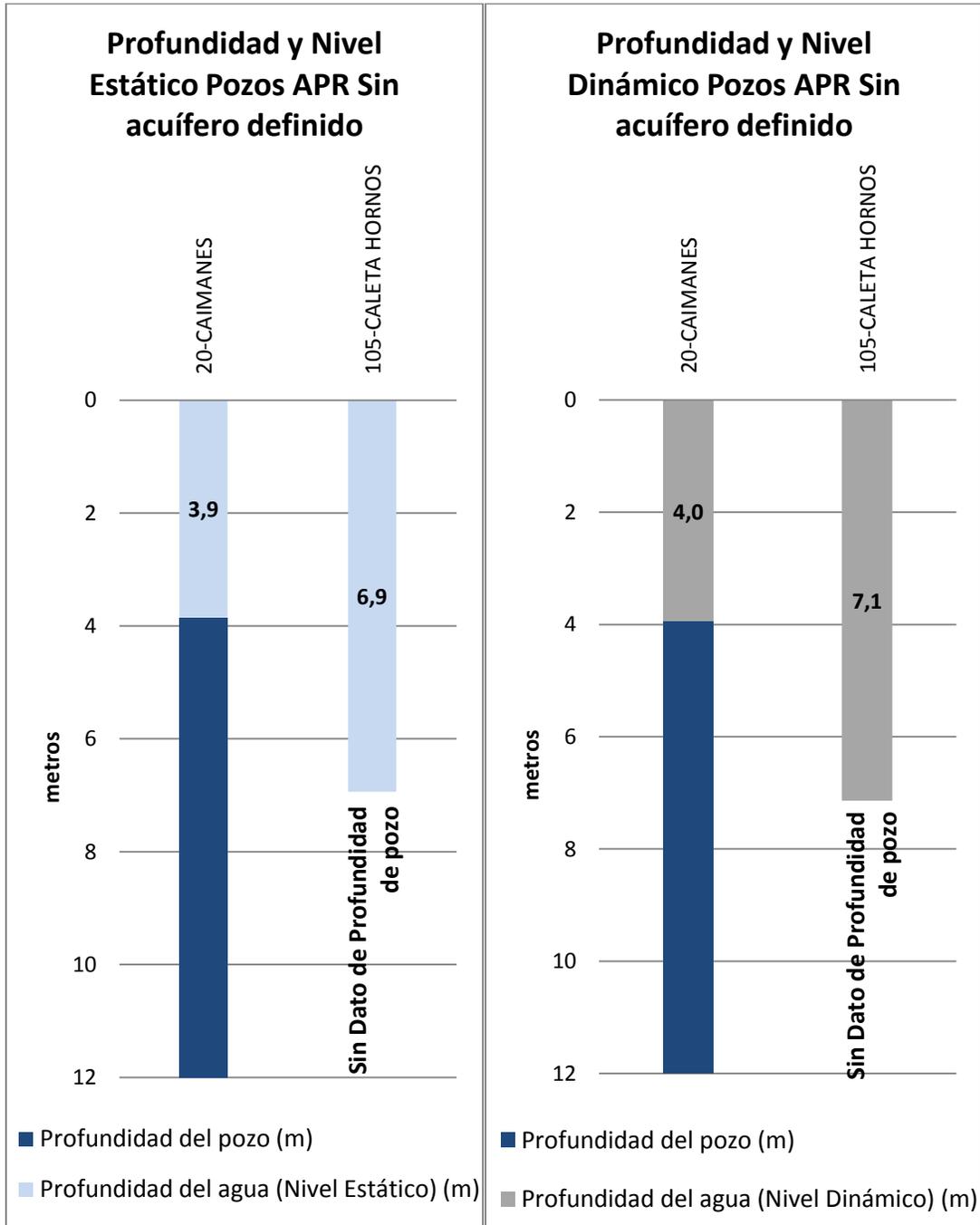


Figura 70: Izquierda: profundidad y nivel estático pozos APR Sin acuífero definido.
Figura 71: Derecha: profundidad y nivel dinámico pozos APR Sin acuífero definido

Temperatura

El rango de temperatura de los pozos 20-CAIMANES y 105-CALETA HORNOS se encuentran indicados en las Figuras 62 y 42 respectivamente, correspondientes a los acuíferos Choapa y Los Choros.

PH

El rango de pH de los pozos 20-CAIMANES y 105-CALETA HORNOS se encuentran indicados en las Figuras 63 y 43 respectivamente, correspondientes a los acuíferos Choapa y Los Choros.

Conductividad Eléctrica

El rango de pH de los pozos 20-CAIMANES y 105-CALETA HORNOS se encuentran indicados en las Figuras 64 y 44 respectivamente, correspondientes a los acuíferos Choapa y Los Choros.

VI.3. CALIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

Valores más grandes que el 5 % de error en el Balance Iónico sugieren una significancia de error suficiente para excluir el análisis de ciertas aplicaciones interpretativas.

El error de balance iónico fue cuantificado por el laboratorio ANALAB a partir de los resultados de análisis químicos que informaron para cada una de las 119 muestras. Al respecto se detectó 75 casos (63%) con un error entre 0% y 3%, 43 casos (36%) con un error entre 3% y 5%, y 1 caso (0,84%) con un error por sobre 5% (Figura 72). Este último corresponde al pozo N°29 - LA JARILLA de la comuna de Paiguano, acuífero Elqui, el cual presenta un error de 5,04%. En vista de los resultados, se consideró adecuado utilizar el total de los datos de análisis químicos de las muestras de agua tomadas en los 119 pozos, considerando al pozo N°29 cercano al límite de admisibilidad.

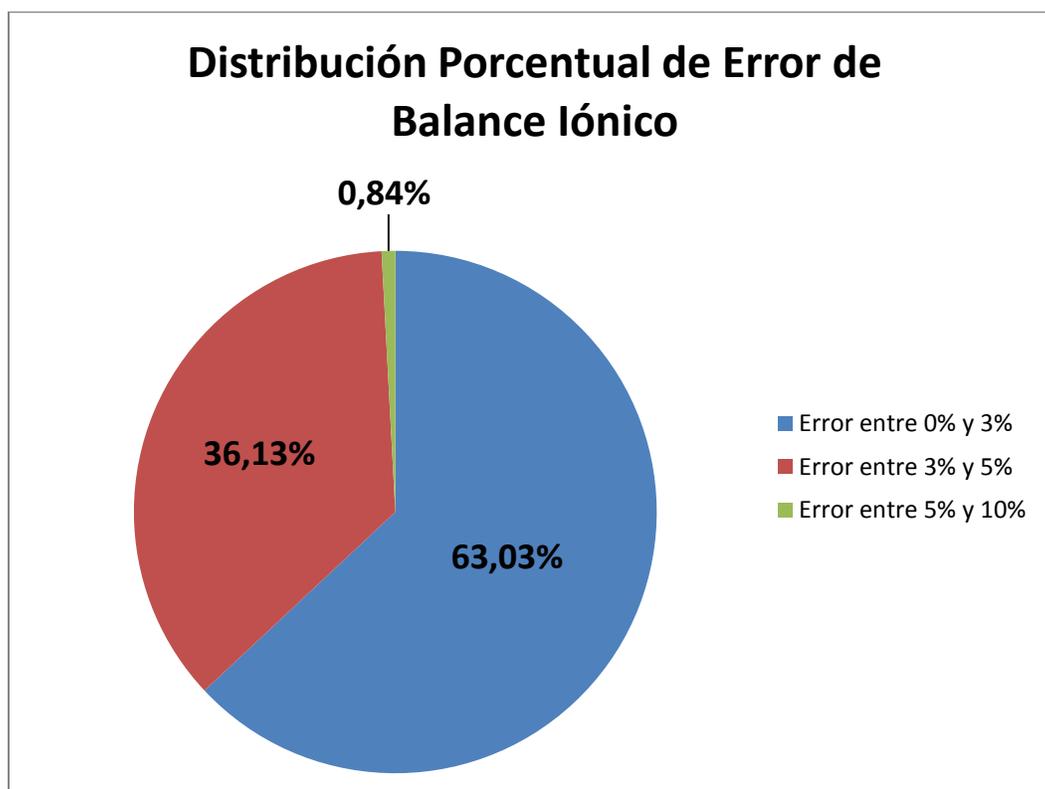


Figura 72: Distribución Porcentual de Error de Balance Iónico. Muestras de Pozos APR estudiados de la Región de Coquimbo.

VI.4. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS

Con el objetivo de tener una caracterización y clasificación general de la composición química de las aguas subterráneas de la Región de Coquimbo, se elaboraron diagramas de Piper y Stiff por cada acuífero estudiado. Estos diagramas representan los componentes químicos mayoritarios (Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Bicarbonato, Sulfato y Cloruro) presentes en forma natural en las aguas que abastecen los sistemas APR de la Región.

La composición de las aguas subterráneas estarán condicionada en primera instancia por la composición de agua de lluvia una composición es muy variable. Cerca de la costa se esperaría aguas más ricas en Cl, Na y K y a medida que las precipitaciones se internan en el continente se esperaría un enriquecimiento en las concentraciones de iones tales como SO_4 , HCO_3 Y Ca. La disminución del contenido de NaCl esta inversamente proporcional a la distancia desde la costa donde se produzca la precipitación, y se ve amplificado por efecto de una orografía abrupta, (como lo es la Cordillera de la Costa).

Luego de que el agua de lluvia, u otro proceso de recarga, es infiltrado al medio subterráneos, la composición se verá netamente influenciado por la mineralogía con la cual entra en contacto estas aguas además del tiempo de interacción entre ambos. Como regla general se espera que a mayor tiempo de residencia de un agua en el acuífero, mayor será la concentración de sales disueltas en esta. En relación a sus composiciones específicas se ha señalado como guía, en el caso de concentraciones de aniones, que aguas con menor tiempo de residencia serán generalmente más bicarbonatadas, las cuales evolucionan a aguas cada vez más sulfatadas y finalmente a aguas cloruradas. En el caso de los cationes se esperaría en aguas de poco tiempo de residencia de carácter cálcicas, pasando luego a magnésicas y finalmente sódicas. Sumado a esto se esperaría a mayor profundidad las aguas fueran más salinas. Todo lo anterior considerando un flujo lineal subterráneo sin una surgencia y re infiltración, y sin sopesar efectos locales que puedan interferir significativamente en la composición de las aguas, como lo pueden ser intrusiones salinas costeras, recargas de aguas de riego, yacimientos minerales, fuentes geotermales, etc.

Por otro lado, la composición de las aguas subterráneas está condicionada por diversos factores, tanto naturales como antropogénicos. En la Tabla 15 se enlista los orígenes más comunes de los diferentes parámetros mayoritarios analizados tradicionalmente para caracterizar la composición de aguas subterráneas.

Tabla 15: Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea (Custodio y Llamas, 1976).

Tipos	Ion	Origenes
Aniones	Cloruro (Cl ⁻)	Mezclas con agua marina, ataque de rocas y minerales (evaporitas, sodalita, apatito, etc), de gases y líquidos de emanaciones volcánicas, vertidos urbanos e industriales.
	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Lavado de terrenos marinos, oxidación de sulfuros de todo tipo de rocas, concentración en el suelo de aguas de lluvia, disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, actividades urbanas, industriales y agrícolas.
	Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	Disolución de CO ₂ atmosférico o del suelo, disolución de calizas y dolomitas (ayudado por CO ₂ o por ácidos naturales), hidrólisis de silicatos.
	Nitrato (NO ₃ ⁻)	Abonos agrícolas, procesos de nitrificación naturales, agua de lluvia, desarrollo de pozos explosivos, descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera.
Cationes	Sodio (Na ⁺)	Ataque de feldespatos y otros silicatos, lavado de sedimentos marinos, mezcla con agua de mar, disolución de sales evaporitas, contaminación urbana e industrial, concentración en agua de lluvia.
	Potasio (K ⁺)	Ataque de ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc), disolución de sales potásicas (sylvita, carnalita), agua de lluvia, contaminación minera, industrial y agrícola (abonos).
	Calcio (Ca ²⁺)	Disolución de calizas, dolomitas, yeso y anhidrita, ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos, disolución de cemento calcáreo de muchas rocas, agua de lluvia
	Magnesio (Mg ²⁺)	Disolución de dolomitas y calizas dolomíticas, ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos, lavado de rocas evaporíticas magnésicas (carnalita), agua de mar, contaminación industrial y minera.

VI.4.1. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS ACUÍFERO LOS CHOROS

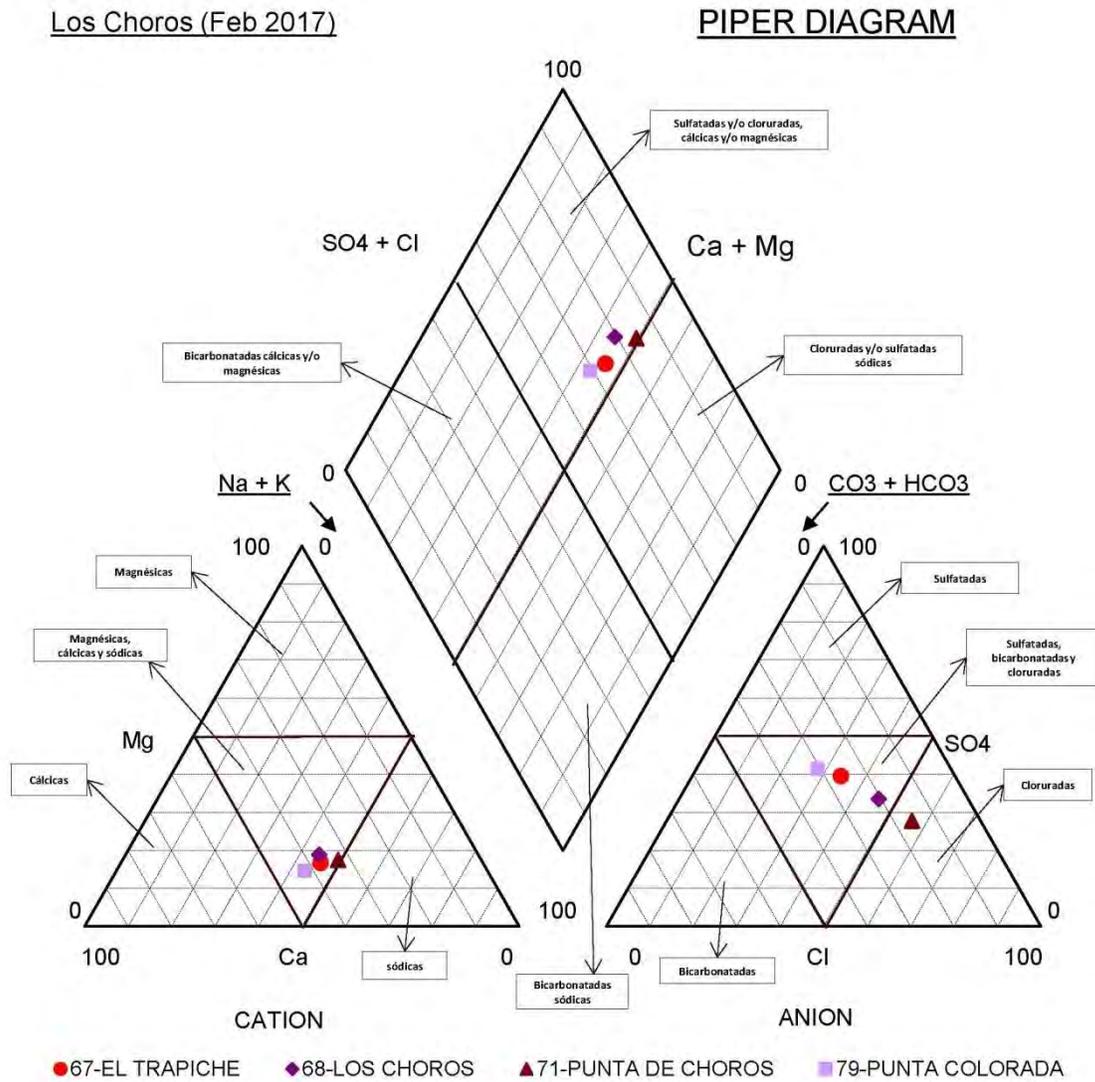


Figura 73: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Los Choros.

Composición aguas acuífero Los Choros

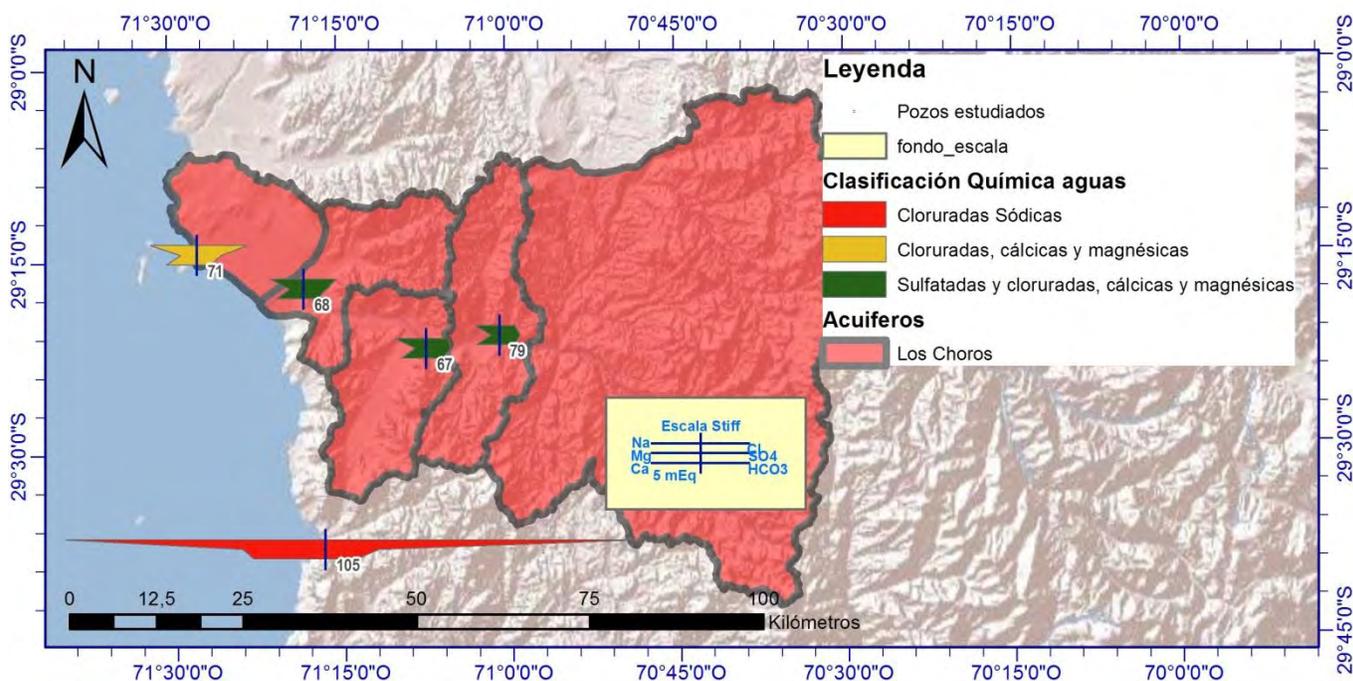


Figura 74: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Los Choros ilustrado mediante diagramas de Stiff. Se incluye pozo 105-CALETA HORNOS, que no pertenece a este acuífero.

Como se pueden observar en la Figura 73 y 74, la composición de las aguas del acuífero Los Choros corresponde principalmente a sulfatadas y Cloruradas, como cálcicas y magnésicas, con excepción del pozo 71-PUNTA DE CHOROS con mayor contenido de cloruro respecto a sulfato. Cabe observar que este pozo se encuentra próximo a la línea de la costa en donde estudios anteriores dan cuenta de una importante intrusión salina en el acuífero costero (DGA, 2015). Así mismo, se puede observar en las Figura 40 y 41 que la profundidad de este pozo llega a los 80 metros con un nivel freático en torno a los 30 m. lo cual da cuenta de un considerable estado de explotación el cual implicaría influencia de esta intrusión salina en la composición de las aguas de este pozo.

Como se puede observar en la figura 72, los porcentajes intermedios y homogéneos de sus aniones dan cuenta de aguas subterráneas con tiempos de residencia considerablemente prolongados, esto se condice con el hecho de que el cauce quebrada los Choros se mantiene seco gran parte del año, sin presentar escorrentía, sólo con flujo superficial en crecidas dados eventos meteorológicos puntuales.

VI.4.2. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS ACUÍFERO ELQUI

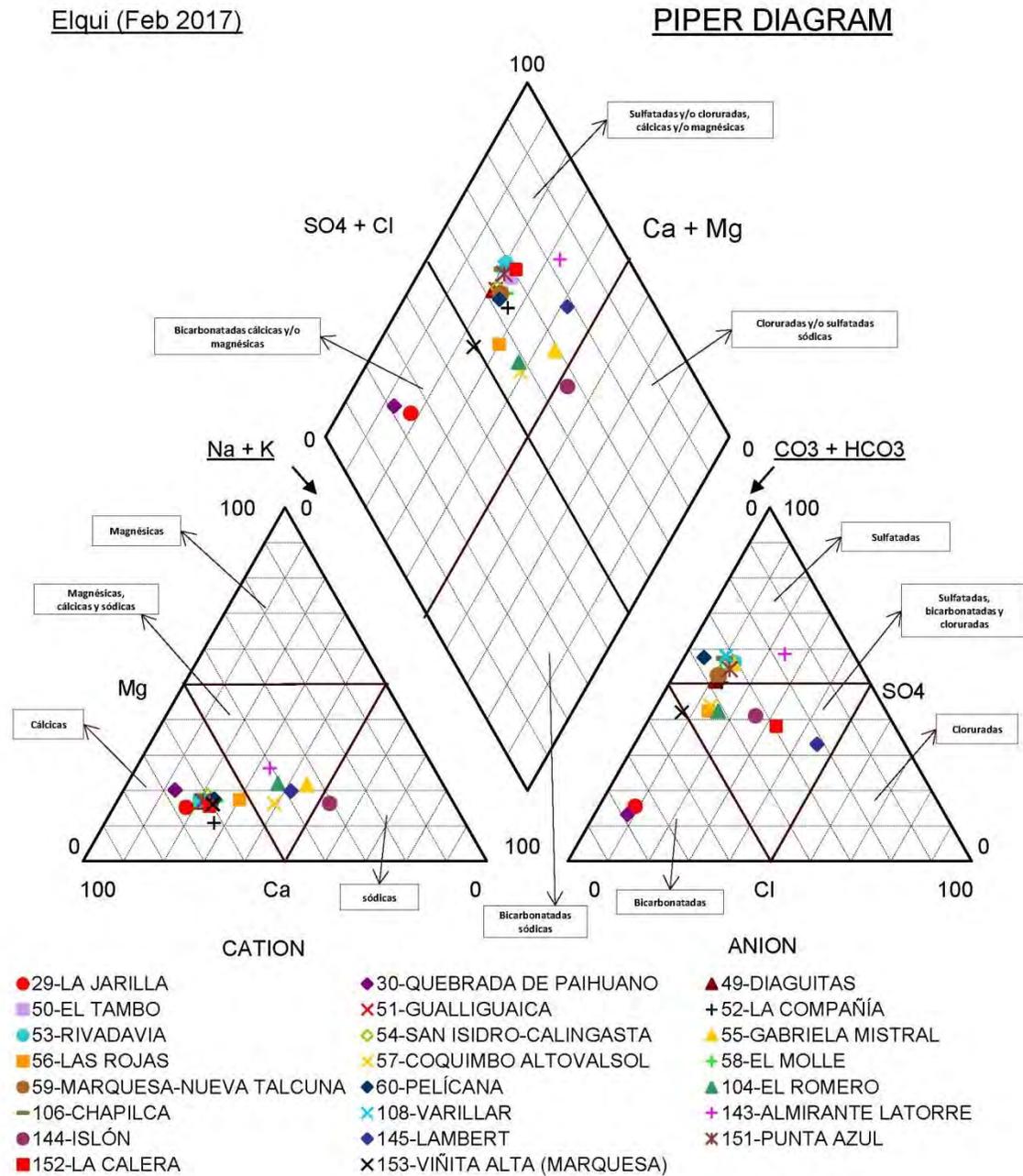


Figura 75: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Elqui.

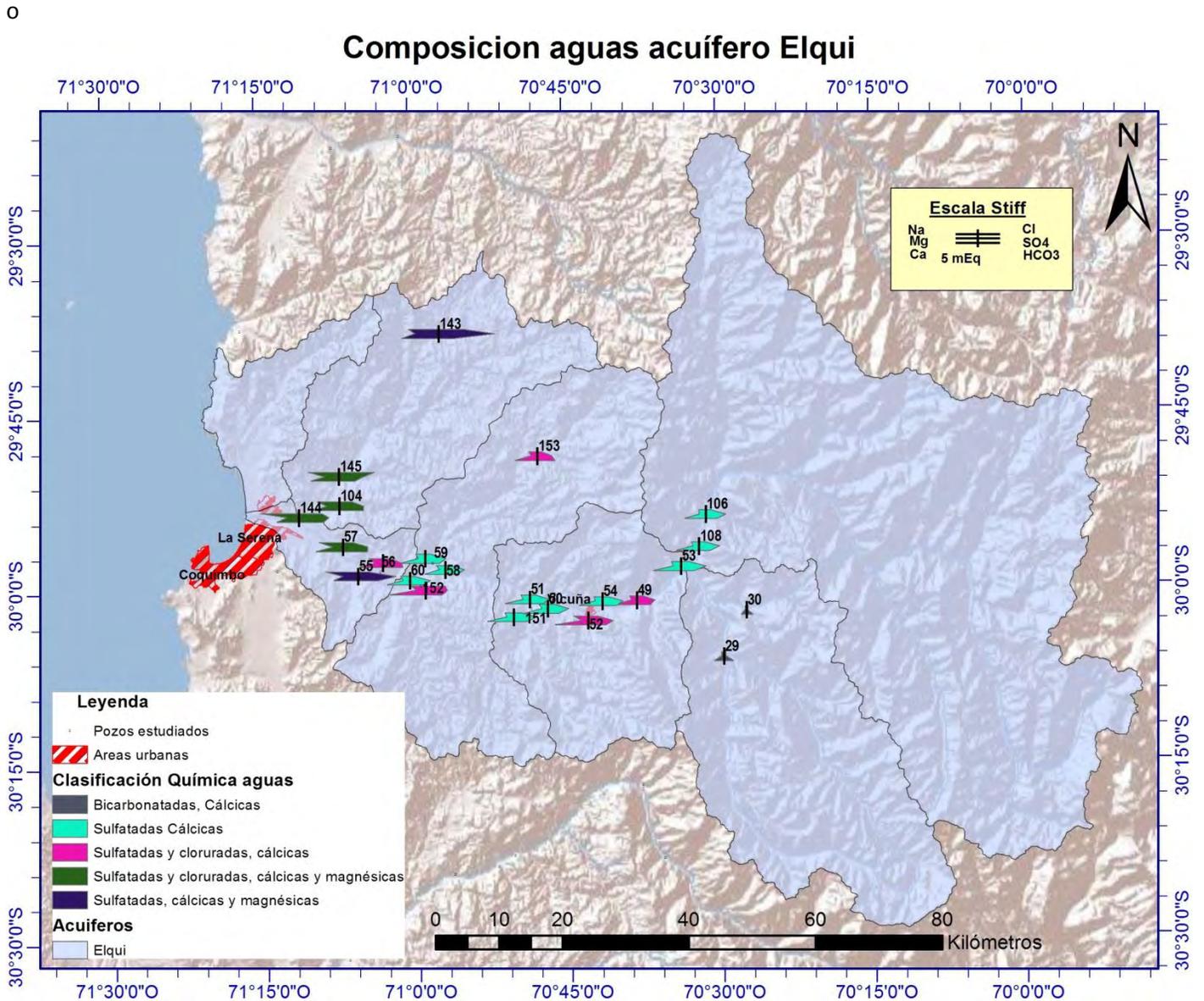


Figura 76: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Elqui ilustrado mediante diagramas de Stiff

Observando la Figura 76 se puede constatar como las aguas siguen un enriquecimiento en sales hacia aguas abajo lo cual se condice con los tiempos de residencia en el acuífero de las aguas en este sentido. Aguas arriba en el sector acuífero de río Claro, los pozos 29 y 30 son de clasificación Bicarbonatadas cálcicas, sin concentraciones elevadas de iones. Más abajo, en el margen inferior del sector de Río Turbio, así como del sectores de Río Elqui Alto y Medio las aguas pasan a composiciones sulfatadas, cloruradas, cálcicas, y finalmente cada vez más magnésicas hacia los sectores de Elqui Bajo y Santa Clara, donde los pozos se posicionan en sedimentos del valle principal del Río Elqui con una importante actividad agrícola asociada.

Excepciones a esta secuencia son los pozos 55-GABRIELA MISTRAL y 143- ALMIRANTE LA TORRE los cuales presentan un enriquecimiento en sulfato. En ambos casos se puede presumir efectos locales, en especial en el segundo, el cual se encuentra considerablemente aguas arriba en el río San Clara.

VI.4.3. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS ACUÍFERO CULEBRÓN – LAGUNILLAS

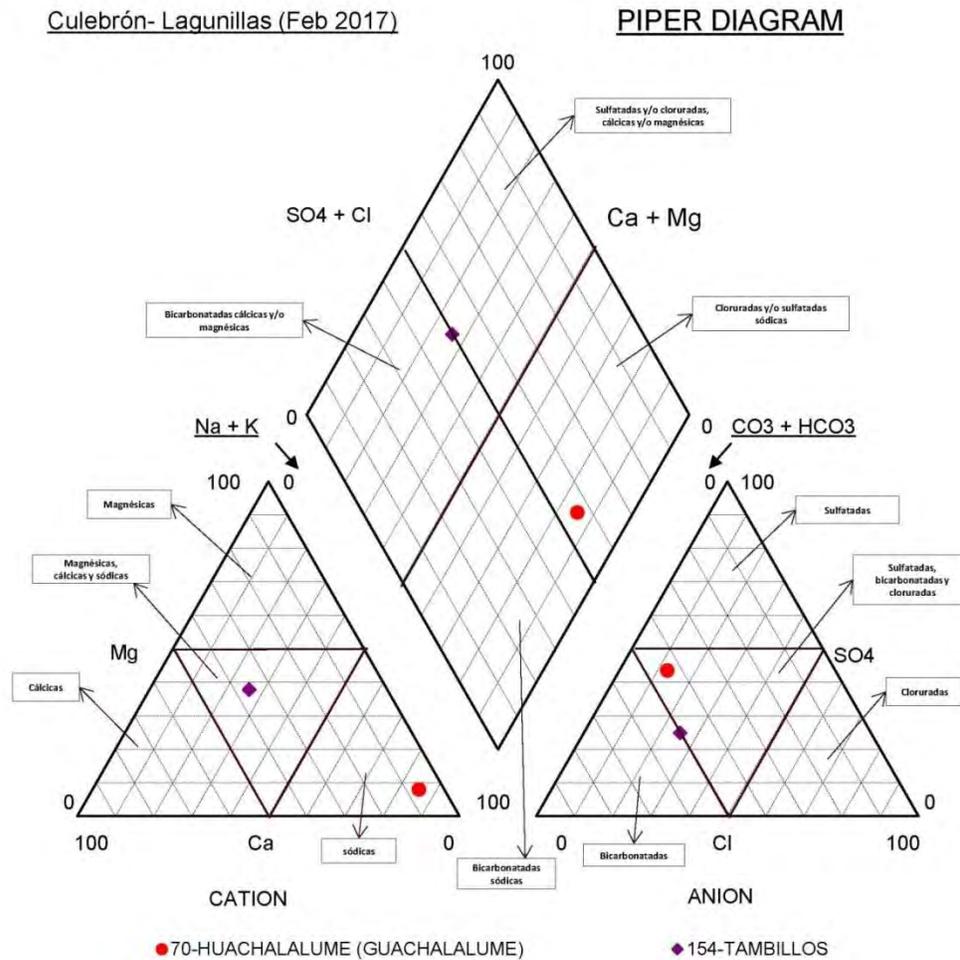


Figura 77: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Culebrón - Lagunillas.

Composición aguas acuífero Culebrón - Lagunillas

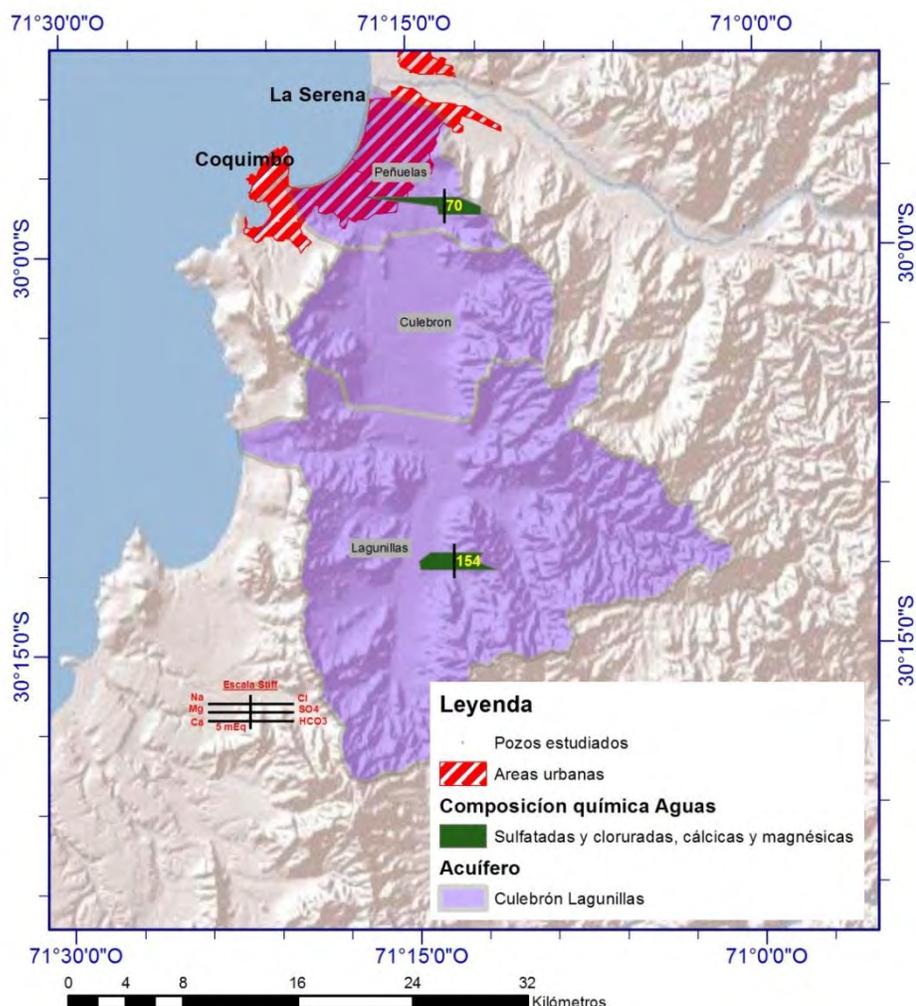


Figura 78: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Culebrón-Lagunillas ilustrado mediante diagramas de Stiff

En la Figura 77 y 78 se puede observar, conjuntamente, una importante presencia iónica en los pozos muestreados de esta cuenca. En particular el pozo 154-TAMBILLOS presenta un enriquecimiento en bicarbonato, magnesio y calcio, lo que hace, y por otro lado el pozo 70-HUACHALALUME, presenta una concentración importante de sodio respecto a otros parámetros.

Al observar las profundidades de los pozos y niveles freáticos de estas captaciones (Figuras 50 y 51) es posible percatarse que el pozo 154 es de relativa poca profundidad (20 m) y un nivel freático en torno a los 8 m, lo cual daría cuenta de aguas de relativa poca tiempo residencia así como también con mayores oportunidades de ser afectada por actividad la importante actividad antrópica en superficie (agricultura e industria) (Tabla 9). En contraste a los 100 metros de profundidad del pozo 70 y un nivel freático entorno a los 74 metros, lo cual daría cuenta de captación de aguas de

gran profundidad desde un nivel acuífero inferior, de diferentes características al nivel más superficial, que albergaría aguas con un mayor tiempo de residencia, y por ende más salinas.

VI.4.4. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS DE ACUÍFERO LIMARÍ

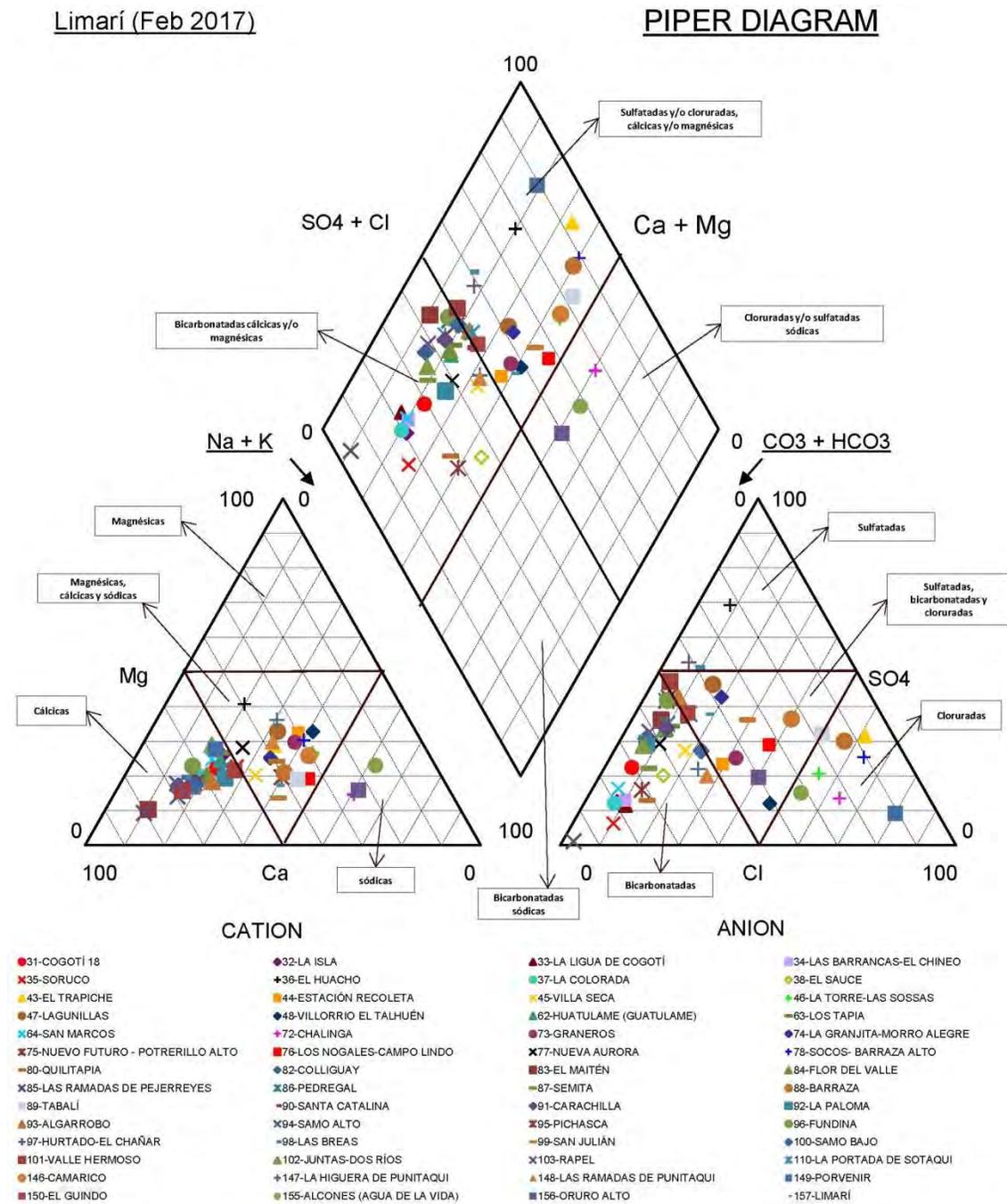


Figura 79: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Limarí.

Composición aguas acuífero Limarí

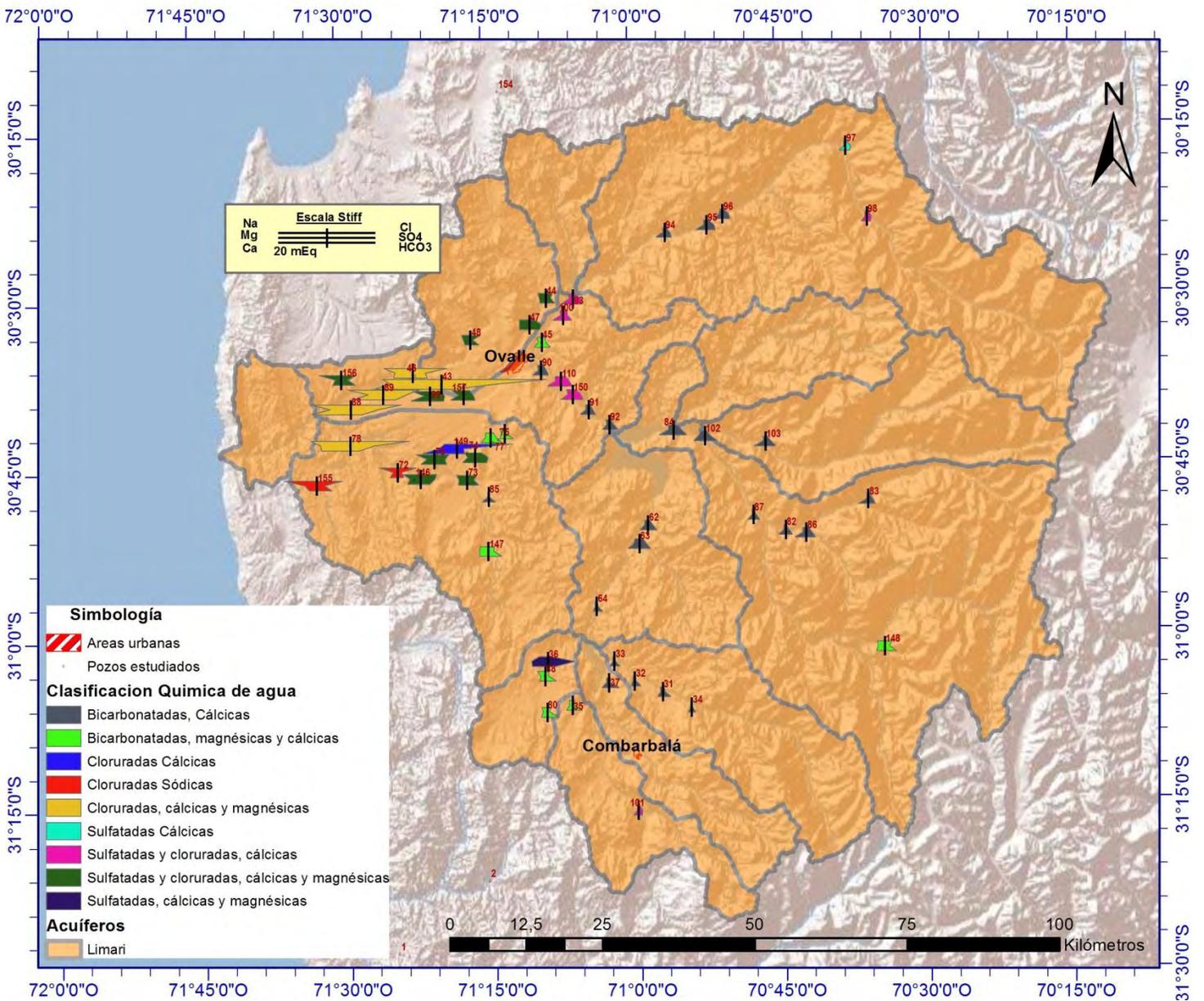


Figura 80: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Limarí ilustrado mediante diagramas de Stiff

En la Figura 79 se puede observar la gran diversidad de composiciones que presentan los pozos muestreados de la cuenca del río Limarí. Esta situación es lógica pensando en al gran extensión y heterogeneidad de la cuenca, así como ser el acuífero más estudiado en el presente estudio, con el 47% de los pozos muestreados de la región.

En términos generales se puede observar que aguas arribas de la cuenca presentan composiciones bicarbonatadas cálcicas a magnésicas, con una carga iónica progresivamente más abundante aguas abajo. Aguas abajo de la localidad de Ovalle se puede observar un importante aumento en la carga iónica de las aguas, así como un carácter marcadamente más salino, con aguas de composiciones cloruradas sulfatadas, cálcicas y magnésicas. Se destacan los pozos 43, 46, 78, 88,

89, 149 y 155 los cuales presentan elevados niveles de cloruro de sodio disuelto. El nivel freático de los pozos mencionados no supera los 26 metros, siendo en general menores a 5 metros. Sumado a esto la carga iónica que presenta esta zona, sectores de Río Limarí aguas abajo de Ovalle, El Ingenio y Punitaqui, se condice con una alta vulnerabilidad de acuífero (Figura 26), así como también se registran importantes recargas de agua subterránea a partir de aguas de riego (Tabla 7), lo que probablemente sería una condición de primer orden en la elevada concentración iónica de las aguas de estos sectores.

VI.4.5. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS DE ACUÍFERO CHOAPA

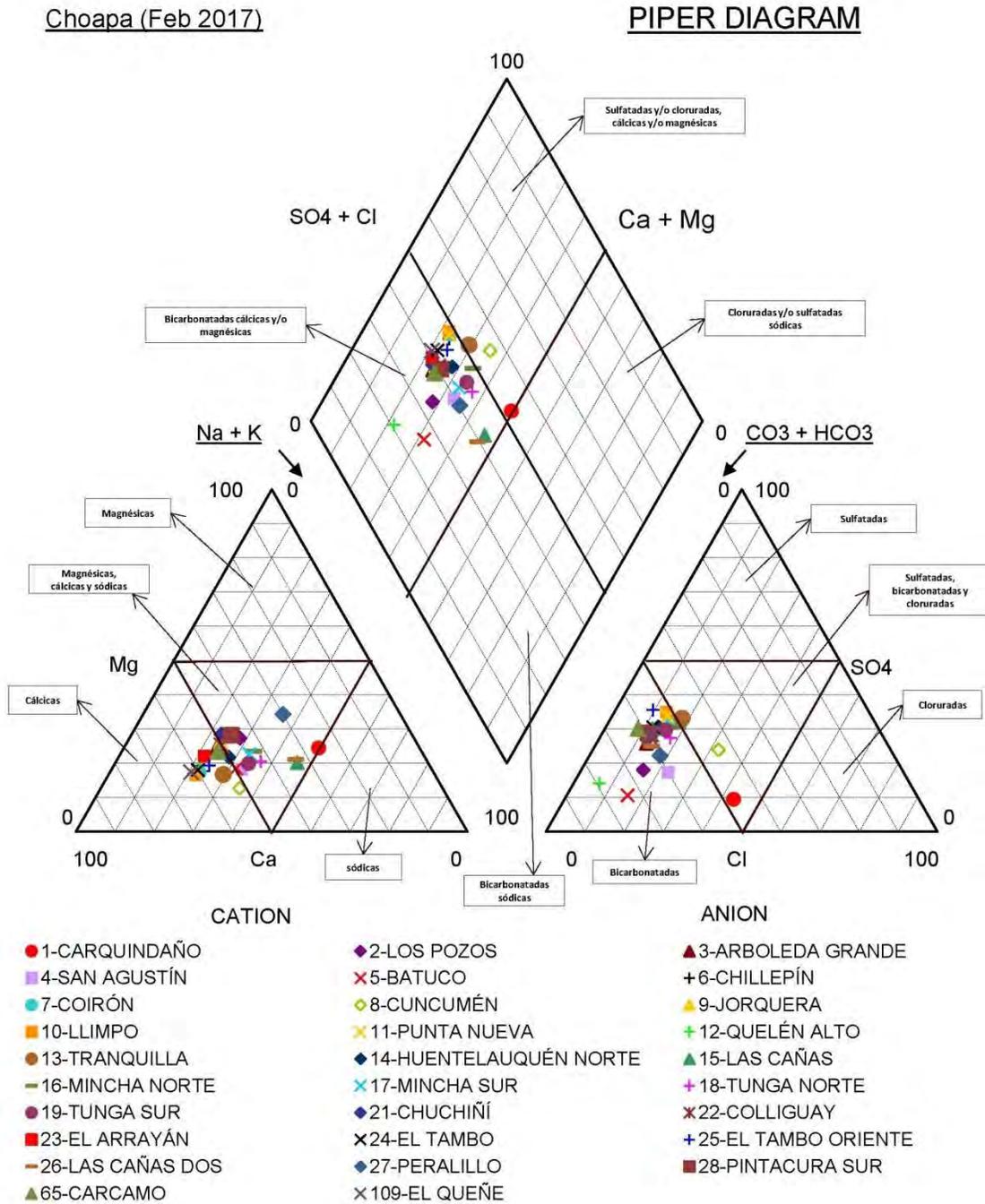


Figura 81: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Choapa.

Composición aguas acuífero Choapa

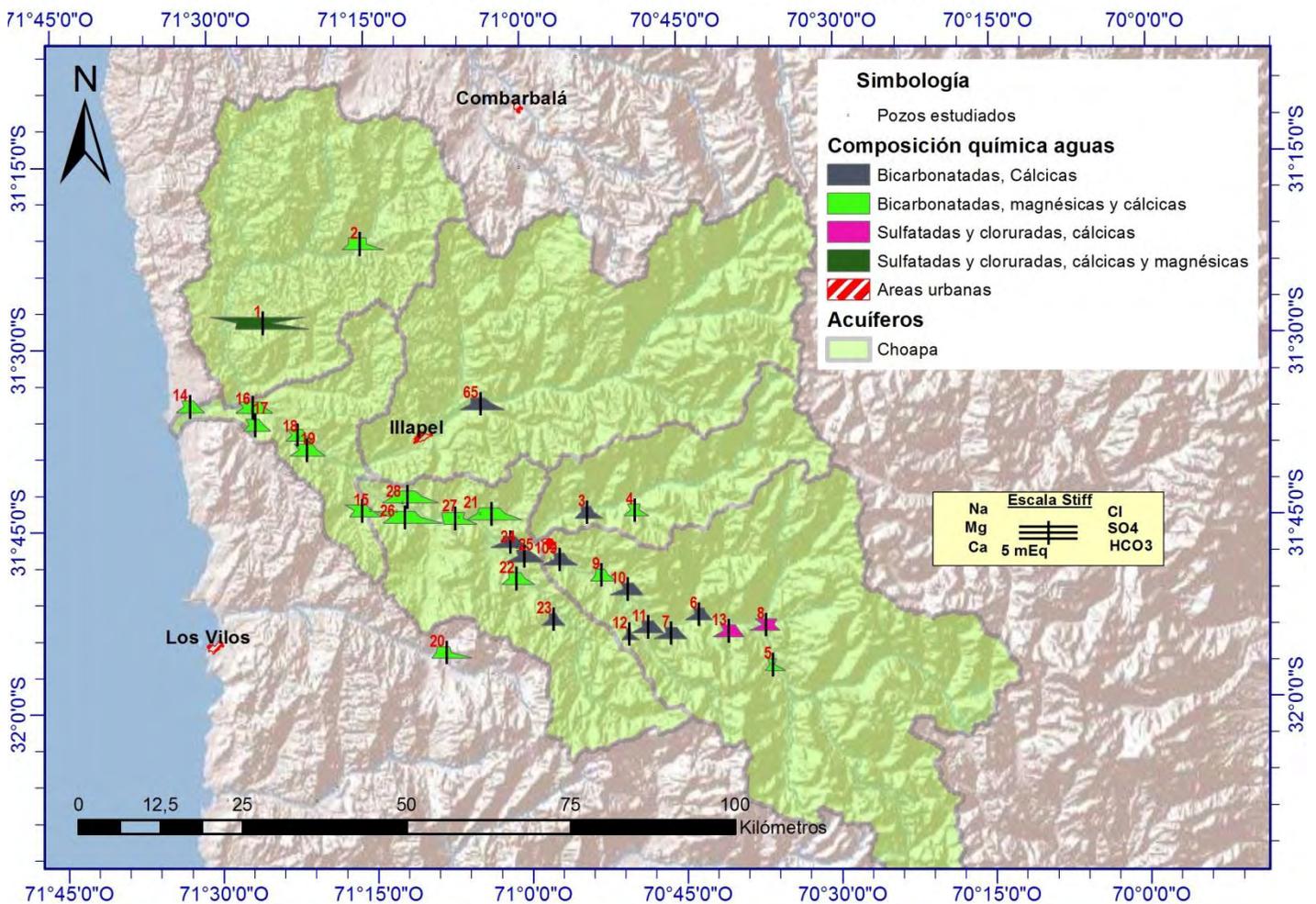


Figura 82: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Choapa ilustrado mediante diagramas de Stiff. Se incluye pozo 20-CAIMANES, que no se pertenece este acuífero.

En la Figura 81 se puede observar que la composición de las aguas del acuífero Choapa se presenta estrechamente agrupada, salvo excepciones, con composiciones bicarbonatadas, bicarbonatadas cálcicas, y en menor medida se suman mayores concentraciones de magnesio. En la Figura 82 se puede observar una secuencia natural de aguas de carácter bicarbonatadas calcinas aguas arriba de la cuenca con un enriquecimiento iónico progresivo aguas abajo con una presencia cada vez más importante de magnesio y otras sales. La profundidad de los niveles freáticos se mantienen relativamente homogéneos a lo largo de la cuenca con valores entre los 2 y 6 metros aprox, con excepción del pozo 21-CHUCHINI con un nivel estático de 13 metros aprox, lo cual se condice con una mayor carga iónica con respecto a los pozos aledaños.

El pozo 1-CARQUINDAÑO cuenta con una tendencia anómala, debido a una importante concentración de cloruro de sodio disuelto como bicarbonato y subordinadamente magnesio y calcio.

VI.4.6. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS DE ACUÍFERO QUILIMARÍ

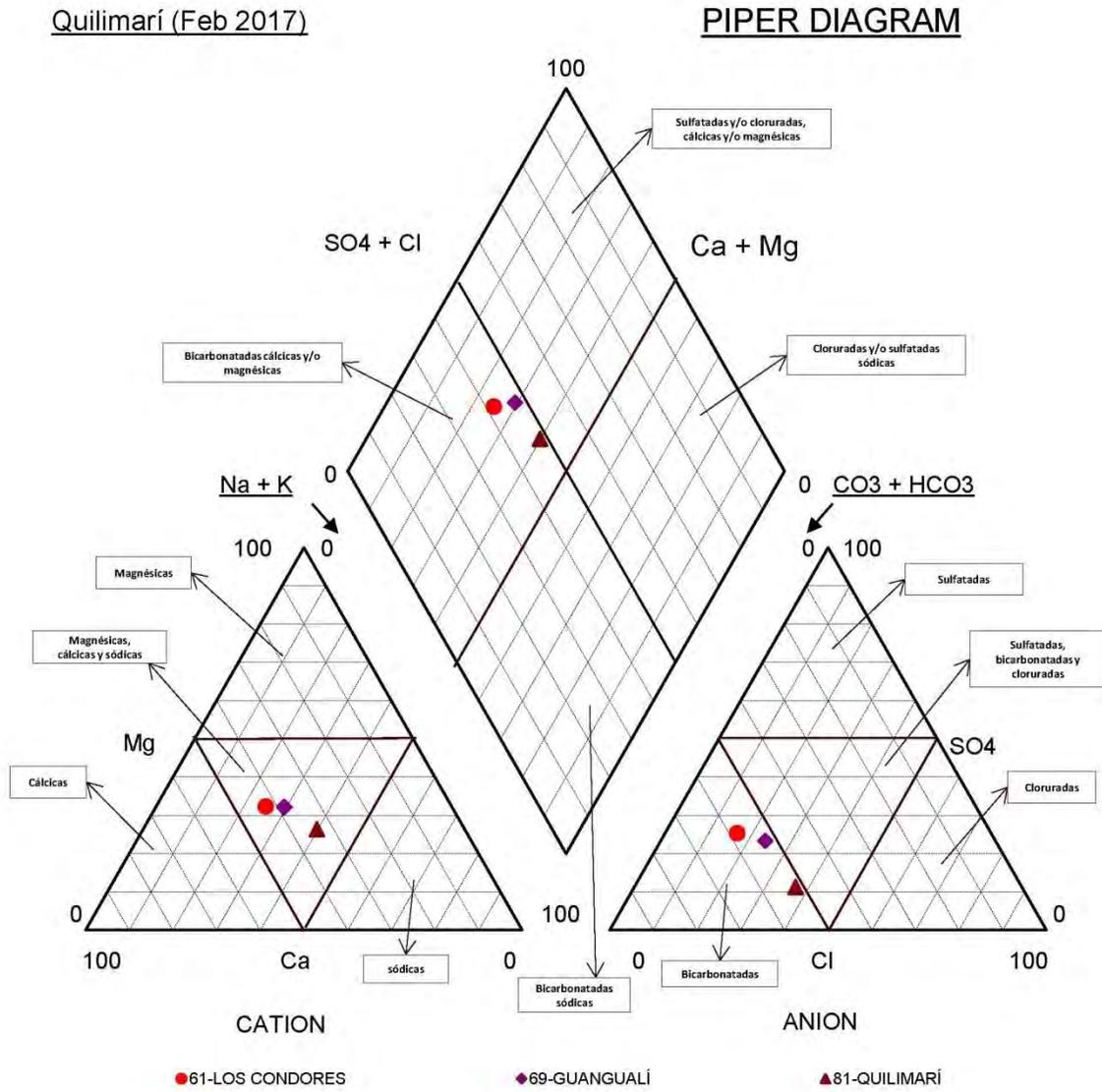


Figura 83: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados de acuífero Quilimarí.

Composición aguas acuífero Quilimarí

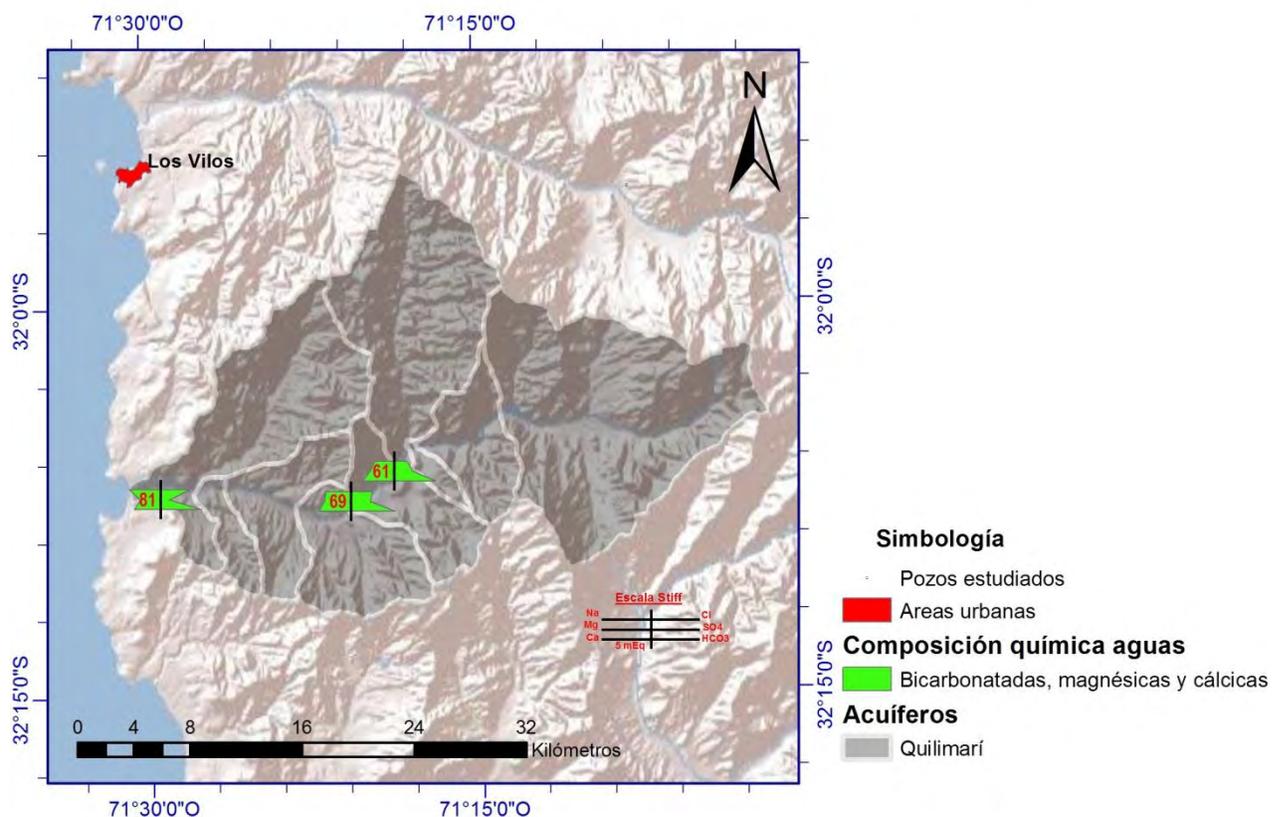


Figura 84: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Quilimarí ilustrado mediante diagramas de Stiff.

Se puede observar tanto en la Figura 83 como 84 que los 3 pozos muestreados del acuífero Quilimarí poseen una composición acotada a bicarbonatada, magnésica y cálcica, correspondiendo a tiempos de residencia bajos a intermedios y una carga salina no muy importante, salvo en el caso del pozo 81-QUILIMARÍ el cual presenta valores más elevados de cloruro de sodio disuelto probablemente relacionado a su cercanía a la costa.

VI.4.7. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS POZOS SIN ACUÍFERO DEFINIDO

Sin Acuífero (Feb 2017)

PIPER DIAGRAM

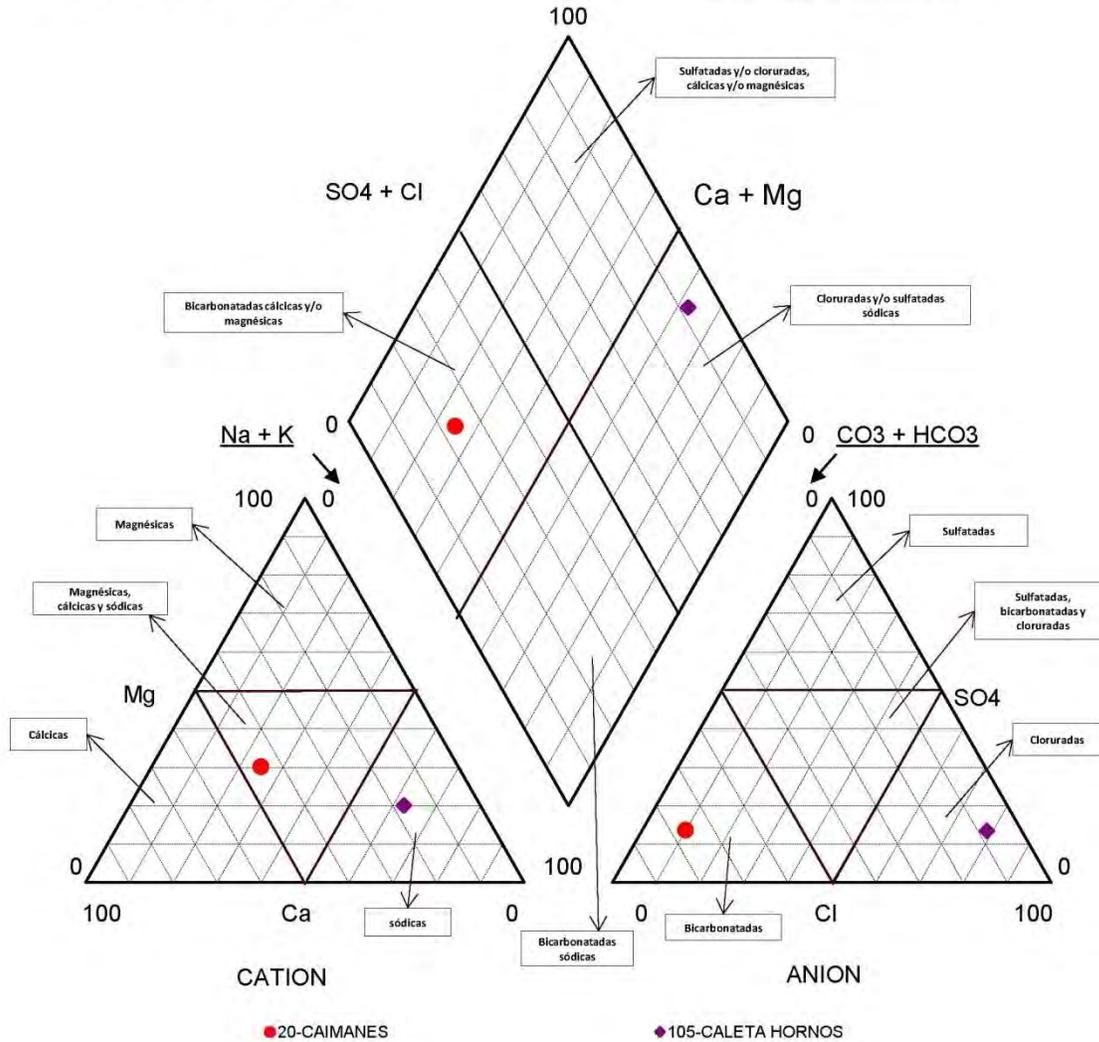


Figura 85: Diagrama de Piper, pozos APR estudiados sin acuífero definido.

Para el caso del pozo 20-CAIMANES, se puede observar que sigue el comportamiento de las aguas del acuífero Choapa próximos (figura 81), con una composición bicarbonatada cálcica y subordinadamente magnésica. Por otro lado el pozo 105-CALETA HORNOS presenta niveles extremos de salinidad con concentraciones de cloruro de 2267,3 [mg/L] y Sólidos Disueltos de 5617,0 [mg/L], así también niveles elevados de sulfato, nitrato y magnesio con concentraciones de 523,3, 51,9, 205,9 [mg/L] respectivamente. Esto evidenciaría, por un lado, una intrusión salina significativa en el acuífero costero (figura 73), y por otro un impacto por contaminación difusa de carácter antrópico desde la superficie dado los niveles de nitrato tan elevados.

VI.5. CONCENTRACIONES QUÍMICAS ESPECÍFICAS Y COMPARACIÓN CON NORMAS

VI.5.1. LÍMITES DE DETECCIÓN

Para analizar la calidad de las aguas se consideró un listado de parámetros, en total 22 analitos. Estos se indican en la Tabla 16, junto a sus respectivos límites de detección.

Tabla 16: Listado de parámetros químicos analizados para caracterizar las aguas y su límite de detección.

Analito		Límite de detección (mg/L)
Sulfato	(SO ₄ ⁻²)	< 0,1
Cloruro	(Cl ⁻)	< 0,1
Bicarbonato	(HCO ₃ ⁻¹)	< 1,0
Sodio	(Na ⁺)	< 0,2
Potasio	(K ⁺)	< 0,2
Calcio	(Ca ⁺²)	< 0,4
Magnesio	(Mg ⁺²)	< 0,1
Fosfato	(PO ₄ ⁻³)	< 0,1
Nitrato	(NO ₃ ⁻)	< 0,01
Solidos Disueltos Totales	(SDT)	< 5,0
Amonio	(NH ₄ ⁴⁺)	< 0,01
Arsénico	(As)	< 0,001
Cadmio	(Cd)	< 0,01
Cobalto	(Co)	< 0,04
Cobre	(Cu)	< 0,01
Hierro	(Fe)	< 0,02
Mercurio	(Hg)	< 0,002
Manganeso	(Mn)	< 0,01
Níquel	(Ni)	< 0,05
Plomo	(Pb)	< 0,02
Selenio	(Se)	< 0,001
Zinc	(Zn)	< 0,01

VI.5.2. RESUMEN DE RESULTADOS POR ACUÍFERO

A modo de referencia en el documento se incluyen las tablas 17 a la 22 a modo de resumen las cuales muestran los valores máximos, mínimos y promedio de todos los parámetros analizados, así como de los resultados de las mediciones in situ por cada acuífero.

Tabla 17: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Los Choros.

Los Choros						
	Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Parámetros de terreno	Temperatura	(°C)	20,0	22,1	20,8	0,9
	pH		7,5	8,0	7,8	0,2
	Conductividad	(µs/cm)	1013,0	1675,0	1329,0	272,6
	ORP	(mV)	168,0	188,0	180,8	9,2
Análisis por ANALAB	Cloruro		103,0	354,0	210,5	108,9
	Sodio		111,1	217,4	157,2	44,4
	Potasio		2,9	4,9	3,7	0,9
	Calcio		93,8	125,3	108,1	13,5
	Magnesio		19,9	40,2	30,6	8,8
	Nitrato		10,7	20,5	16,0	4,7
	Amonio		0,050	0,060	0,053	0,005
	Sulfato		206,2	242,1	227,6	15,6
	Bicarbonato		170,0	204,0	186,3	15,5
	Fosfato				< 0,1	
	Alcalinidad total		139,0	167,0	153,0	12,4
	SDT		659,0	1164,0	826,3	231,9
Análisis por LAGDA	Arsénico				< 0,001	
	Cadmio				< 0,01	
	Cobalto				< 0,04	
	Cobre				< 0,01	
	Hierro		<0,02	1,080	0,283	0,532
	Mercurio				< 0,002	
	Manganeso		<0,01	0,020	0,008	0,010
	Níquel				< 0,05	
	Plomo		<0,02	0,030	0,008	0,015
	Selenio				< 0,001	
	Zinc		0,050	0,300	0,163	0,118

Tabla 18: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Elqui.

Elqui						
	Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Parámetros de terreno	Temperatura	(°C)	17,2	23,3	19,8	1,6
	pH		7,2	8,2	7,7	0,2
	Conductividad	(μ s/cm)	199,0	1910,0	898,7	397,8
	ORP	(mV)	3,3	560,0	183,0	99,1
Análisis por ANALAB	Cloruro	(mg/L)	5,0	266,0	63,2	64,2
	Sodio		5,3	201,1	73,2	53,4
	Potasio		0,4	6,0	2,9	1,2
	Calcio		24,2	167,8	107,7	30,9
	Magnesio		4,4	65,8	23,0	13,2
	Nitrato		1,6	46,8	16,4	11,7
	Amonio		0,040	0,070	0,052	0,010
	Sulfato		11,0	598,9	237,8	113,1
	Bicarbonato		83,0	332,0	212,1	64,5
	Fosfato		0,000	0,100	0,009	0,029
	Alcalinidad total		67,0	272,0	171,3	56,5
	SDT		41,0	1438,0	643,1	313,7
Análisis por LADGA	Arsénico	(mg/L)	< 0,001			
	Cadmio		< 0,01			
	Cobalto		< 0,04			
	Cobre		<0,02	0,180	0,012	0,038
	Hierro		<0,01	6,540	0,461	1,394
	Mercurio		< 0,002			
	Manganeso		<0,01	0,360	0,021	0,075
	Níquel		< 0,05			
	Plomo		<0,02	0,030	0,004	0,010
	Selenio		< 0,001			
	Zinc		<0,01	1,150	0,236	0,248

Tabla 19: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Culebrón - Lagunillas.

Culebrón Lagunillas						
	Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Parámetros de terreno	Temperatura	(°C)	18,5	19,5	19,0	0,7
	pH		7,6	8,4	8,0	0,6
	Conductividad	(µs/cm)	951,0	960,0	955,5	6,4
	ORP	(mV)	174,0	210,0	192,0	25,5
Análisis por ANALAB	Cloruro	(mg/L)	43,0	90,0	66,5	33,2
	Sodio		63,8	203,3	133,6	98,6
	Potasio		0,6	4,2	2,4	2,5
	Calcio		13,7	76,6	45,2	44,5
	Magnesio		10,0	48,6	29,3	27,3
	Nitrato		31,8	48,4	40,1	11,7
	Amonio		0,050	0,060	0,055	0,007
	Sulfato		120,5	201,6	161,1	57,3
	Bicarbonato		258,0	307,0	282,5	34,6
	Fosfato		<0,1	0,100	0,050	0,071
	Alcalinidad total		212,0	251,0	231,5	27,6
	SDT		637,0	719,0	678,0	58,0
Análisis por LADGA	Arsénico	(mg/L)			< 0,001	
	Cadmio				< 0,01	
	Cobalto				< 0,04	
	Cobre				< 0,01	
	Hierro				< 0,02	
	Mercurio				< 0,002	
	Manganeso				< 0,01	
	Níquel				< 0,05	
	Plomo				< 0,02	
	Selenio				< 0,001	
	Zinc		0,110	0,110	0,110	0,000

Tabla 20: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Limarí.

Limarí							
	Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	
Parámetros de terreno	Temperatura	(°C)	13,4	26,0	19,2	1,9	
	pH		6,2	8,0	7,1	0,3	
	Conductividad	(µs/cm)	167,0	3999,0	991,5	843,9	
	ORP	(mV)	2,1	723,0	234,6	149,4	
Análisis por ANALAB	Cloruro		3,0	1529,6	140,0	273,9	
	Sodio		7,4	553,0	89,3	111,8	
	Potasio		0,9	10,2	2,7	2,1	
	Calcio		24,5	547,0	94,8	84,8	
	Magnesio		3,5	252,0	33,1	40,8	
	Nitrato	(mg/L)	0,0	36,8	10,7	10,8	
	Amonio		0,010	0,070	0,030	0,020	
	Sulfato		1,6	1066,2	152,5	173,0	
	Bicarbonato		89,0	378,0	231,7	70,8	
	Fosfato		<0,1	0,400	0,041	0,089	
	Alcalinidad total		73,0	310,0	188,4	57,1	
	SDT		108,0	5179,0	703,3	816,2	
Análisis por LADGA	Arsénico			<0,001	0,005	0,001	0,002
	Cadmio					< 0,01	
	Cobalto					< 0,04	
	Cobre			<0,02	0,060	0,005	0,013
	Hierro			<0,01	6,270	0,409	1,014
	Mercurio				< 0,002		
	Manganeso	(mg/L)	<0,01	0,610	0,049	0,131	
	Níquel					< 0,05	
	Plomo		<0,02	0,120	0,004	0,017	
	Selenio		<0,001	0,002	0,000	0,000	
	Zinc		<0,01	1,340	0,485	0,499	

Tabla 21: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Choapa.

Choapa						
	Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Parámetros de terreno	Temperatura	(°C)	13,3	20,0	17,5	1,3
	pH		6,4	7,9	6,9	0,3
	Conductividad	(µs/cm)	189,0	1606,0	540,0	254,9
	ORP	(mV)	47,0	564,0	235,2	125,3
Análisis por ANALAB	Cloruro	(mg/L)	5,0	253,0	35,8	43,4
	Sodio		11,4	205,0	42,1	37,3
	Potasio		0,3	3,7	1,6	0,8
	Calcio		26,6	92,4	53,3	16,6
	Magnesio		5,3	53,0	15,6	10,0
	Nitrato		0,2	28,1	6,2	6,0
	Amonio		0,010	0,090	0,042	0,019
	Sulfato		14,4	126,0	72,1	26,6
	Bicarbonato		102,6	476,0	198,8	83,1
	Fosfato		<0,1	0,400	0,041	0,082
	Alcalinidad total		82,0	390,0	163,0	68,2
	SDT		<5	988,0	329,2	194,9
Análisis por LAGDA	Arsénico	(mg/L)			< 0,001	
	Cadmio				< 0,01	
	Cobalto				< 0,04	
	Cobre		<0,02	0,020	0,002	0,005
	Hierro		<0,01	5,000	0,392	0,951
	Mercurio				< 0,002	
	Manganeso		<0,01	0,860	0,069	0,200
	Níquel				< 0,05	
	Plomo		<0,02	0,020	0,003	0,007
	Selenio				< 0,001	
	Zinc		0,230	1,150	0,793	0,238

Tabla 22: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para acuífero Quilimarí.

Quilimarí							
	Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	
Parámetros de terreno	Temperatura	(°C)	17,0	18,3	17,7	0,7	
	pH		6,8	7,2	7,0	0,2	
	Conductividad	(µs/cm)	668,0	773,0	725,3	53,2	
	ORP	(mV)	244,0	249,0	246,7	2,5	
Análisis por ANALAB	Cloruro		43,0	106,0	74,0	31,5	
	Sodio		43,6	72,0	57,6	14,2	
	Potasio		1,4	2,4	1,9	0,5	
	Calcio		53,1	64,8	60,7	6,6	
	Magnesio		25,1	32,8	29,1	3,9	
	Nitrato	(mg/L)	0,6	6,5	3,7	2,9	
	Amonio		0,030	0,050	0,040	0,0	
	Sulfato		43,8	96,0	76,3	28,3	
	Bicarbonato		255,0	276,0	263,3	11,2	
	Fosfato		<0,1	0,100	0,033	0,1	
	Alcalinidad total		209,0	226,0	216,0	8,9	
	SDT		380,0	511,0	430,3	70,6	
Análisis por LAGDA	Arsénico					< 0,001	
	Cadmio					< 0,01	
	Cobalto					< 0,04	
	Cobre					< 0,01	
	Hierro		(mg/L)	0,040	0,490	0,210	0,244
	Mercurio					< 0,002	
	Manganeso	<0,01		0,200	0,067	0,115	
	Níquel					< 0,05	
	Plomo	<0,02		0,040	0,020	0,020	
	Selenio					< 0,001	
	Zinc					< 0,01	

Tabla 23: Resumen de resultados de análisis, tanto de terreno como en laboratorio, de parámetros estudiados para pozos sin acuífero definido.

Sin Acuífero Definido						
	Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Parámetros de terreno	Temperatura	(°C)	17,4	21,5	19,5	2,9
	pH		7,3	7,9	7,6	0,4
	Conductividad	(µs/cm)	512,0	785,0	648,5	193,0
	ORP	(mV)	111,0	243,0	177,0	93,3
Análisis por ANALAB	Cloruro	(mg/L)	20,0	2267,3	1143,7	1589,1
	Sodio		32,2	1220,0	626,1	839,9
	Potasio		1,9	23,0	12,5	14,9
	Calcio		50,5	294,6	172,6	172,6
	Magnesio		20,5	205,9	113,2	131,1
	Nitrato		0,9	51,9	26,4	36,1
	Amonio		0,050	0,070	0,060	0,014
	Sulfato		37,5	523,3	280,4	343,5
	Bicarbonato		266,0	392,0	329,0	89,1
	Fosfato		<0,1	0,200	0,100	0,141
	Alcalinidad total		218,0	321,0	269,5	72,8
SDT	388,0	5617,0	3002,5	3697,5		
Análisis por LAGDA	Arsénico	(mg/L)			< 0,001	
	Cadmio				< 0,01	
	Cobalto				< 0,04	
	Cobre				< 0,01	
	Hierro		<0,01	0,290	0,145	0,205
	Mercurio				< 0,002	
	Manganeso				<0,01	
	Níquel				< 0,05	
	Plomo		<0,02	0,030	0,015	0,021
	Selenio				< 0,001	
	Zinc		0,190	0,190	0,190	0,000

VI.5.3. RESUMEN DE RESULTADOS COMPARADOS CON NORMAS NCh409 y NCh1333

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

En la Tabla 24 se presenta los límites máximos de cada parámetro permitidos tanto para Norma de Agua Potable NCh 409 así como para la Norma de Agua de Riego de NCh1333. También en la Tabla 25 se presenta los pozos que se encuentran en diferentes calidades de manejo según la concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Conductividad Eléctrica en base a la Norma de Agua de Riego de NCh1333.

Tabla 24: Número de pozos fuera de norma (NCh 409, NCh1333) por parámetro.

Parámetro	Unidad	Límite de detección	Límite Máximo para agua potable (NCh 409)	Límite Máximo para agua de riego (NCh 1333)	N° de pozos fuera de Norma NCh 409	N° de pozos fuera de Norma NCh 1333
pH	-	-	Rango admisible 6,5 - 8,5	Rango admisible 5,5 - 9,0	4	Ninguno
Sulfato	(SO ₄ ⁻²) (mg/L)	< 0,1	500	250	5	17
Cloruro	(Cl ⁻) (mg/L)	< 0,1	400	200	7	15
Sodio	(Na ⁺) (%)	< 0,2	No se incluye	35 (%) (*)	-	35
Magnesio	(Mg ⁺²) (mg/L)	< 0,1	125	No se incluye	3	-
Nitrato	(NO ₃ ⁻) (mg/L)	< 0,01	50	No se incluye	1	-
Sólidos Disueltos	(SDT) (mg/L)	< 5	1500	(**)	7	(**)
Arsénico	(As) (mg/L)	< 0,001	0,01	0,1	10	Ninguno
Cadmio	(Cd) (mg/L)	< 0,01	0,01	0,01	Ninguno	Ninguno
Cobalto	(Co) (mg/L)	< 0,04	No se incluye	0,05	-	Ninguno
Cobre	(Cu) (mg/L)	< 0,01	2	0,2	Ninguno	Ninguno
Hierro	(Fe) (mg/L)	< 0,02	0,3	5	26	2
Mercurio	(Hg) (mg/L)	< 0,002	0,001	0,001	Ninguno	Ninguno
Manganeso	(Mn) (mg/L)	< 0,01	0,1	0,2	14	9
Níquel	(Ni) (mg/L)	< 0,05	No se incluye	0,2	-	Ninguno
Plomo	(Pb) (mg/L)	< 0,02	0,05	5	1	Ninguno
Selenio	(Se) (mg/L)	< 0,001	0,01	0,02	Ninguno	Ninguno
Zinc	(Zn) (mg/L)	< 0,01	3	2	Ninguno	Ninguno
				Total(***)	51	48

(*) Límite máximo de Sodio para aguas de riego se calcula según el porcentaje de Sodio siendo e 100% la suma de todos los cationes (Na + Ca + Mg + K).

(**) Clasificación de aguas según salinidad (SDT y Conductividad eléctrica) según norma NCh1333 se presenta en Tabla 25.

(***) Total de pozos con uno o más parámetros fuera de norma.

Tabla 25: Clasificación de pozos estudiados según su salinidad en base a norma NCh1333 para aguas de riego.

Clasificación	Conductividad eléctrica (CE)		Solidos Disueltos Totales (SDT)	
	Rango [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	N° de Pozos	Rango [mg/l]	N° de Pozos
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	$\text{CE} \leq 750$	63	$\text{SDT} \leq 500$	67
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < \text{CE} \leq 1.500$	44	$500 < \text{SDT} \leq 1.000$	39
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso	$1.500 < \text{CE} \leq 3.000$	9	$1.000 < \text{SDT} \leq 2.000$	8
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadoso	$3.000 < \text{CE} \leq 7.500$	3	$2.000 < \text{SDT} \leq 5.000$	5

VI.5.4. NITRATO

El nitrato es un compuesto que guarda estrecha relación con la actividad agrícola, es por ello que, como regla general, encontrar concentraciones elevadas de este compuesto se atribuye a procesos de contaminación difusa. En el caso del presente estudio se consideran valores mayores de 30 [mg/L] como atribuibles a fuentes de contaminación difusa. En aguas no afectadas por las actividades humanas es esperable encontrar concentraciones menores a 10 [mg/L].

Como se puede observar en la Figura 86 los pozos que superan los 30 [mg/L] de Nitrato **son 105-CALETA HORNOS (acuíferos costeros) con sobre 50 [mg/L], por sobre la norma de agua potable NCh409**; pozos 104-EL ROMERO (40,0 mg/L) y 144- ISLON (46,8 mg/L), ambos en el acuífero en el acuífero Elqui cercanos a la ciudad de La Serena (sectores acuíferos Santa Gracia y Elqui Bajo); pozos 70-HUACHALALUME (31,8 mg/L) y 154-TAMBILLOS (48,4 mg/L) captando aguas del acuífero Culebrón-Lagunillas; y por último los pozos 44-ESTACION RECOLETA (32,2 mg/L), 46-LA TORRE (32,2 mg/L) y 110-LA PORTADA DE SOTAQUI (36,8 mg/L), los dos primeros ubicados en el sector Acuífero El Ingenio del acuífero Limarí y el tercero en el sector acuífero Río Limarí del acuífero Limarí.

A excepción del pozo 105, los pozos mencionados se ubican en sectores donde una de las principales presiones al sistema hídrico está dado tanto por la agricultura así como industria en general (Tabla 9), considerando también estos pozos alojados en sectores acuíferos de alta a muy alta vulnerabilidad en depósitos no consolidados, a excepción de los pozos del acuífero Culebrón Lagunillas donde la vulnerabilidad es de moderada a alta.

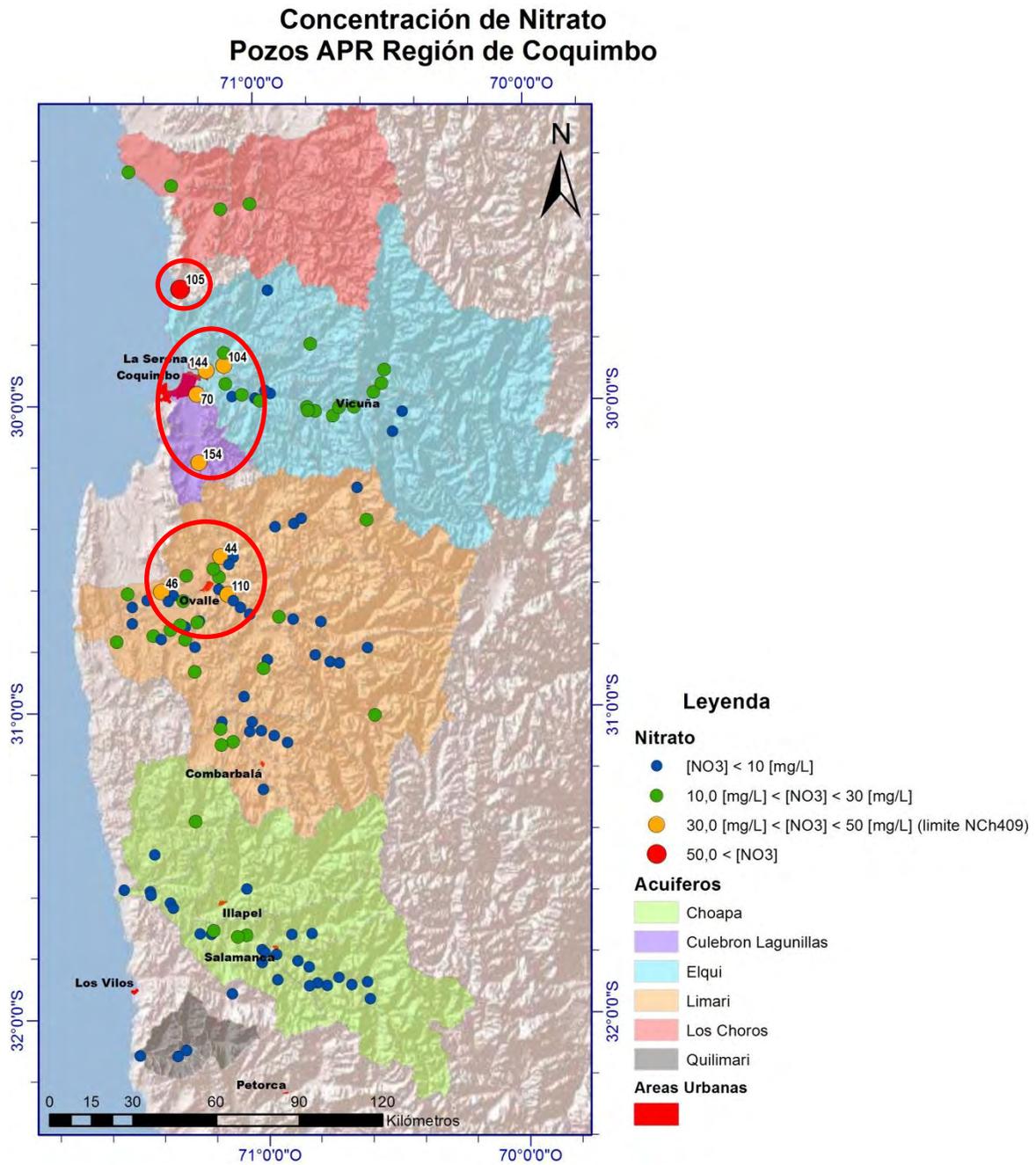


Figura 86: Concentración de Nitrato en pozos APR estudiados en Región de Coquimbo, Se destacan áreas con posible contaminación difusa.

VI.5.5. SULFATO

Como se observa en la Figura 87, al igual que el nitrato, el sulfato se concentra en los sectores bajos de los acuíferos Elqui y Limarí (áreas encerradas). Esta condición puede guardar correlación con la evolución misma de acuífero más aguas de mayor tiempo de residencia, y por ende más salinos, sumado a la intensa actividad agrícola e industrial de los sectores mencionados. Por otro lado, las concentraciones más elevadas de sulfato, de los pozos fuera de las zonas señaladas anteriormente, estarían dadas por condiciones locales específicas en torno a cada pozo, tanto condiciones naturales como antropogénicas.

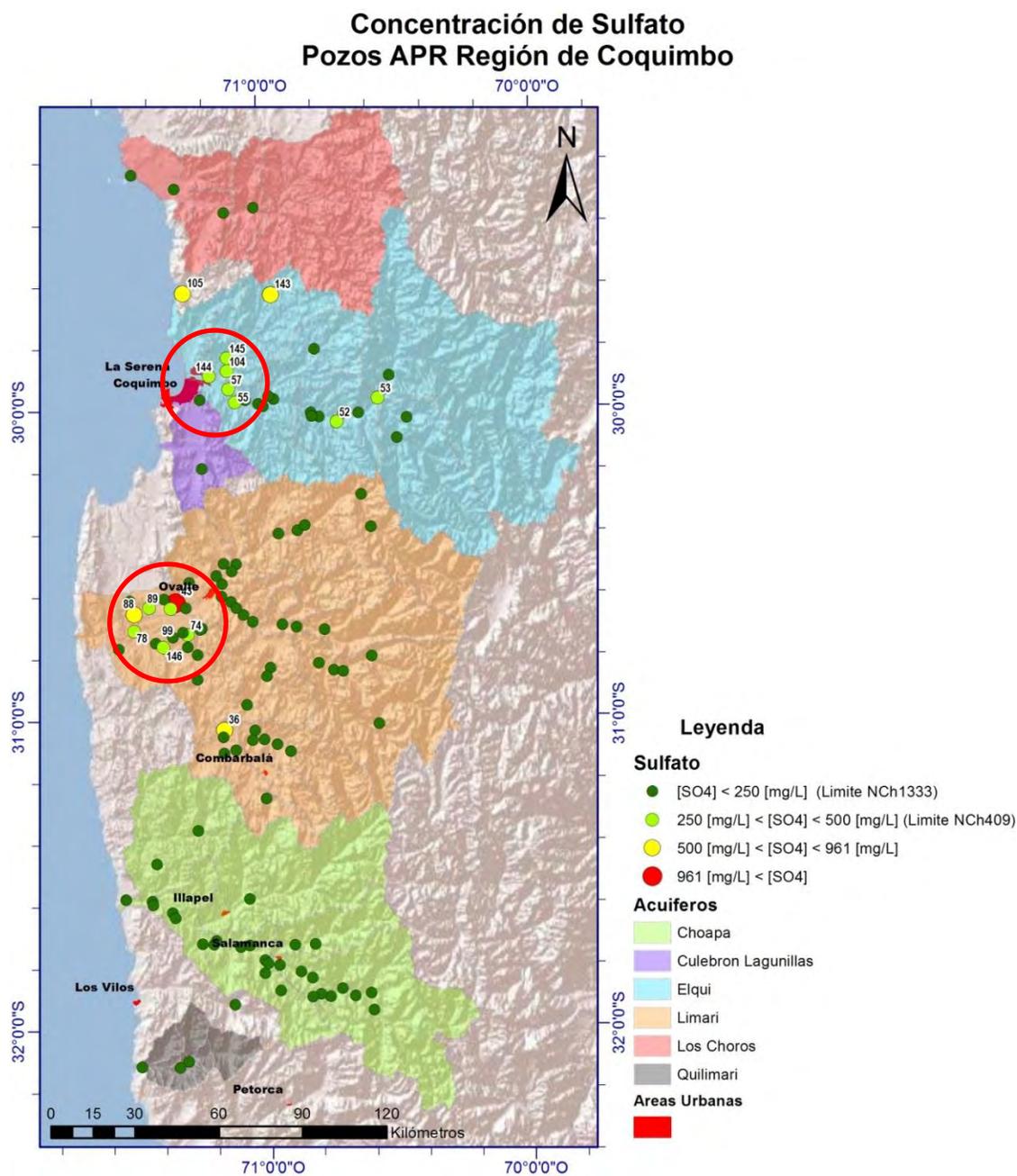


Figura 87: Concentración de sulfato su en pozos APR estudiados en Región de Coquimbo. Se destacan áreas con posible contaminación difusa.

VI.5.6. CLORURO

Siguiendo la tendencia mostrada por el nitrato y sulfato, el cloruro presenta una zona de concentración más elevada aguas abajo de Ovalle, en la acuífero Limarí, reforzando la idea de una contaminación por fuentes difusas desde superficie.(Figura 88).

Como caso particular se observa el pozo 105-CALETA HORNOS presentando una concentración extrema de Cloruro de 2267,3 [mg/L]. Como se puede observar en la tabla 26, este se ve excedido en varios parámetros, especialmente referentes a contaminación por intrusión salina, lo que dado su condición próxima a la costa es considerablemente probable.

Por otro lado, el pozo 71-PUNTA CHOROS muestra niveles considerables de cloruro con 354,0 [mg/L] así como sodio 217,4 [mg/L] lo cual evidenciaría algún grado de alteración por intrusión salina.

Concentración de Cloruro Pozos APR Región de Coquimbo

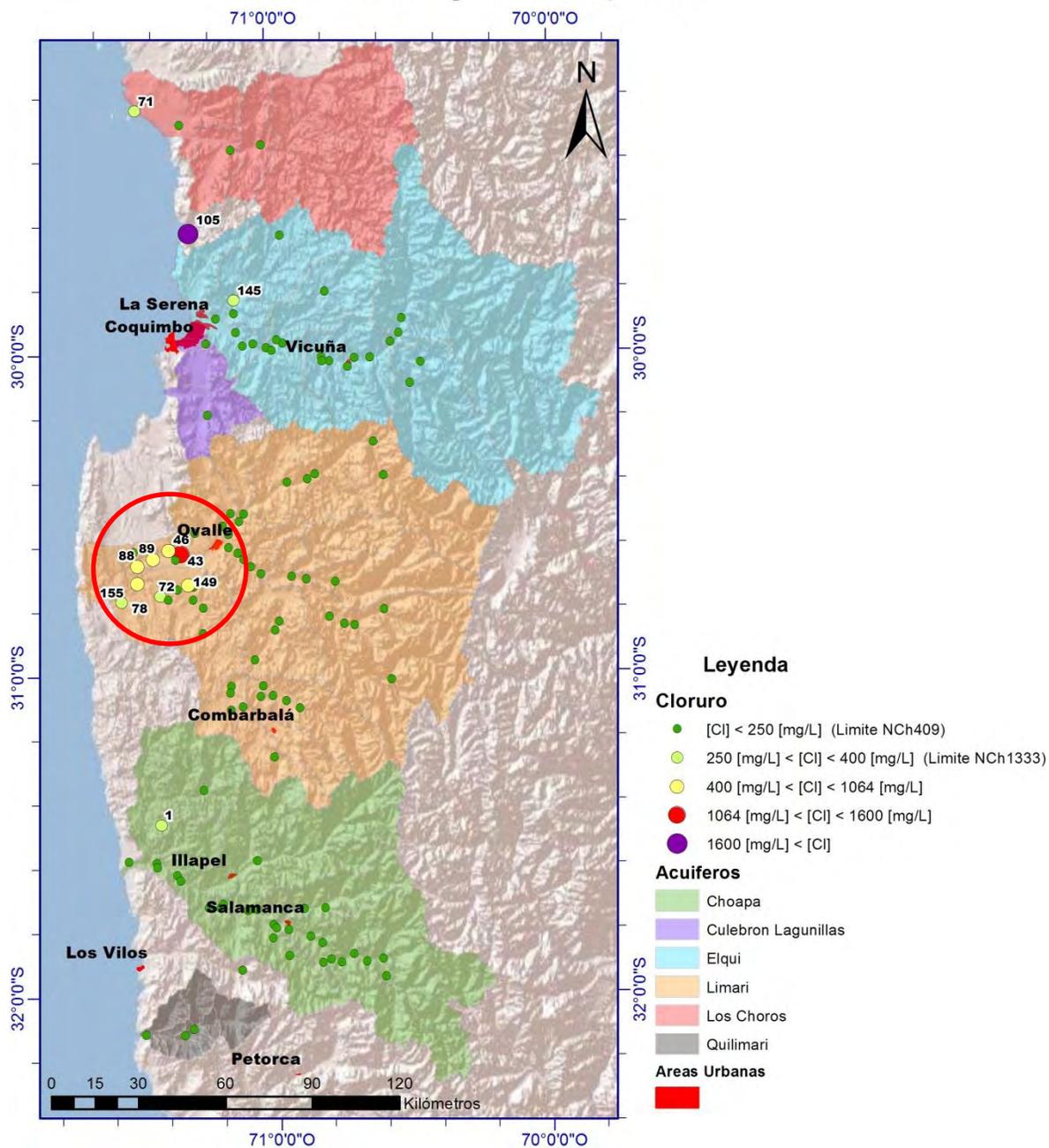


Figura 88: Concentración de cloruro su en pozos APR estudiados en Región de Coquimbo. Se destacan áreas con posible contaminación difusa

VI.5.7. CALCIO

Observando la Figura 89 podemos observar como nuevamente existe una concentración mayor respecto a su entorno aguas arriba, de calcio en el sector bajo del acuífero Limarí. Sumado a los paramentos anteriormente analizados, esta situación reafirma una posible contaminación por infiltración de aguas de riego hacia el acuífero, como lo señala la Tabla 7 gran parte del agua de recarga provendría de esta fuente.

En contraste, la situación que se puede observar al norte de la región, en los acuíferos Elqui y Los Choros vendría dada por una condición natural de aguas más duras en estos sectores. No obstante, el pozo 105-CALETA HORNOS, nuevamente evidenciaría influencia de una intrusión salina penetrante, sumado al nitrato, sulfato y magnesio, confirmando la posibilidad de una contaminación de carácter antropogénico desde la superficie.

Concentración de Calcio Pozos APR Región de Coquimbo

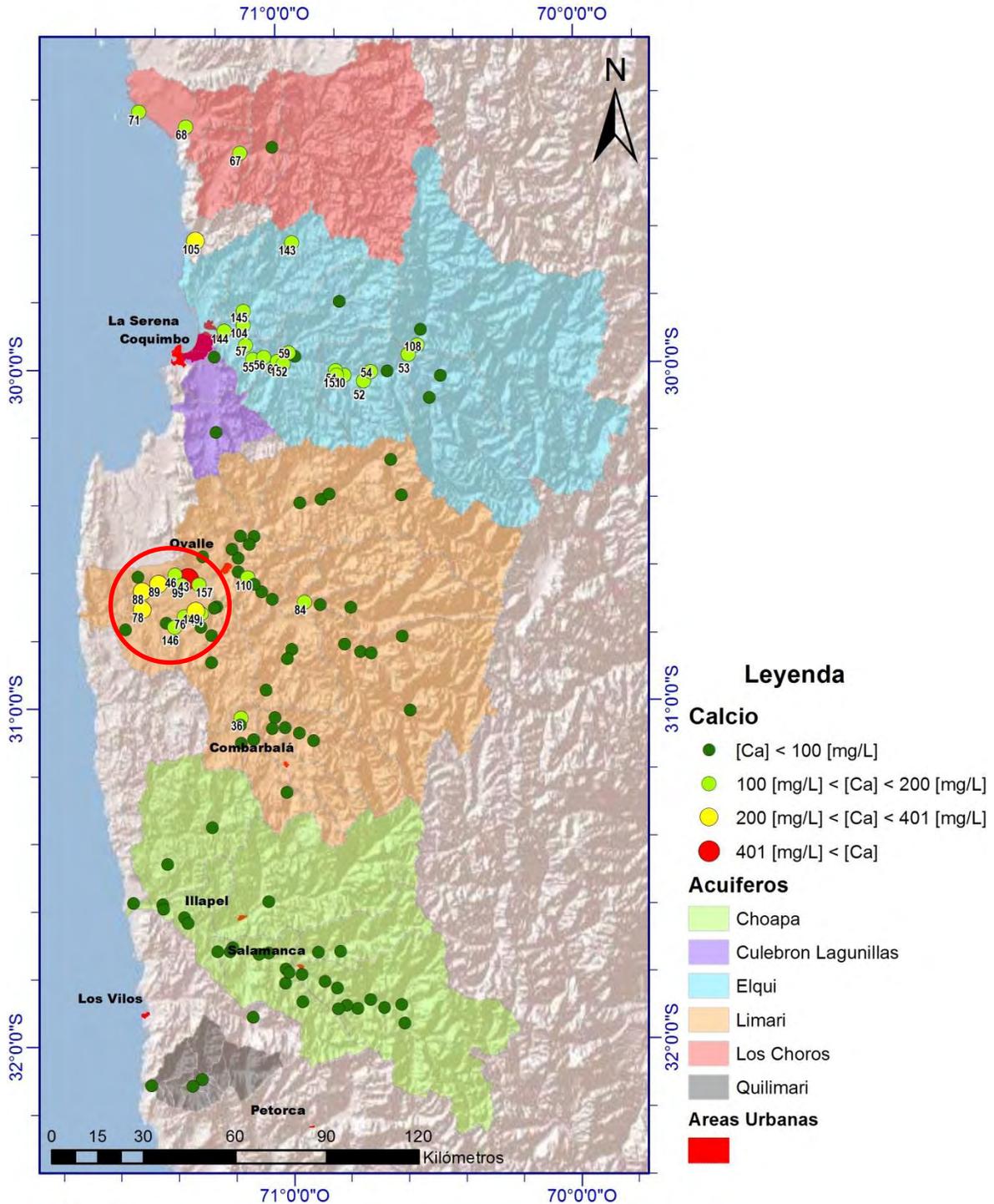


Figura 89: Concentración de Calcio en pozos APR estudiados de región de Coquimbo, Se encierra en una circunferencia las áreas con concentraciones elevadas

VI.5.8. MAGNESIO

En la Figura 90 se logra advertir una mayor concentración de magnesio en la aguas subterráneas de la parte baja de la cuenca del río Limarí lo cual suma como elemento contaminante desde una posible fuente de contaminación difusa. En el caso del APR 105-CALETA HORNOS, se atribuiría a los mismos procesos de contaminación difusa combinados a dilución de aguas proveniente de intrusión salina.

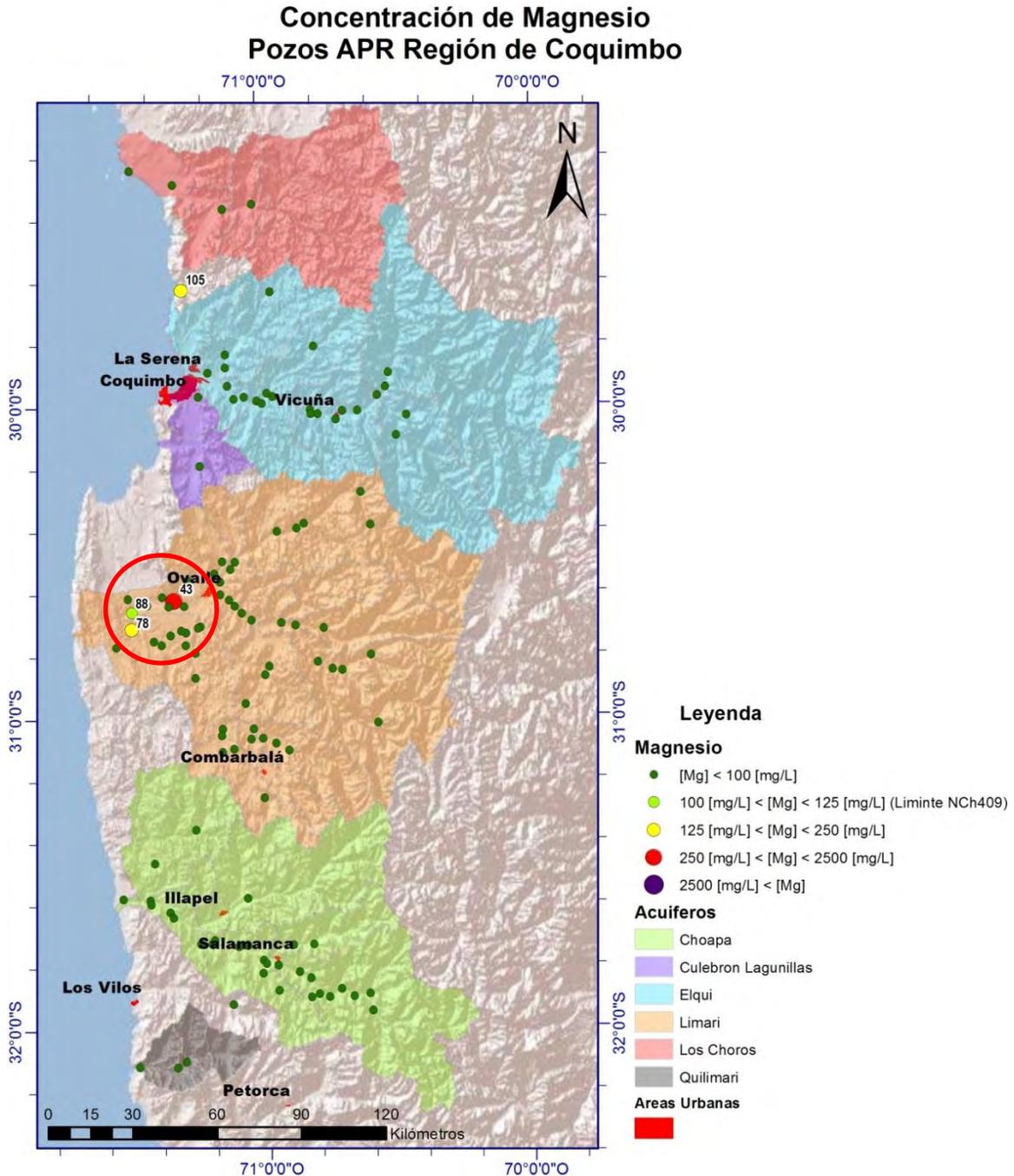


Figura 90: Concentración de Magnesio en pozos APR estudiados de región de Coquimbo, Se encierra en una circunferencia las áreas con concentraciones elevadas.

VI.5.9. SOLIDOS DISUELTOS TOTALES

Como se puede observar en las Figuras 91 y 92 se pueden ver las altas concentraciones de sales en el sector bajo de la cuenca del río Limarí, así como en el pozo 105-CALETA HORNOS, por un lado atribuible a fuentes de contaminación difusa desde superficie, y por otro lado, a una mezcla de aguas por intrusión salina cercano a la costa.

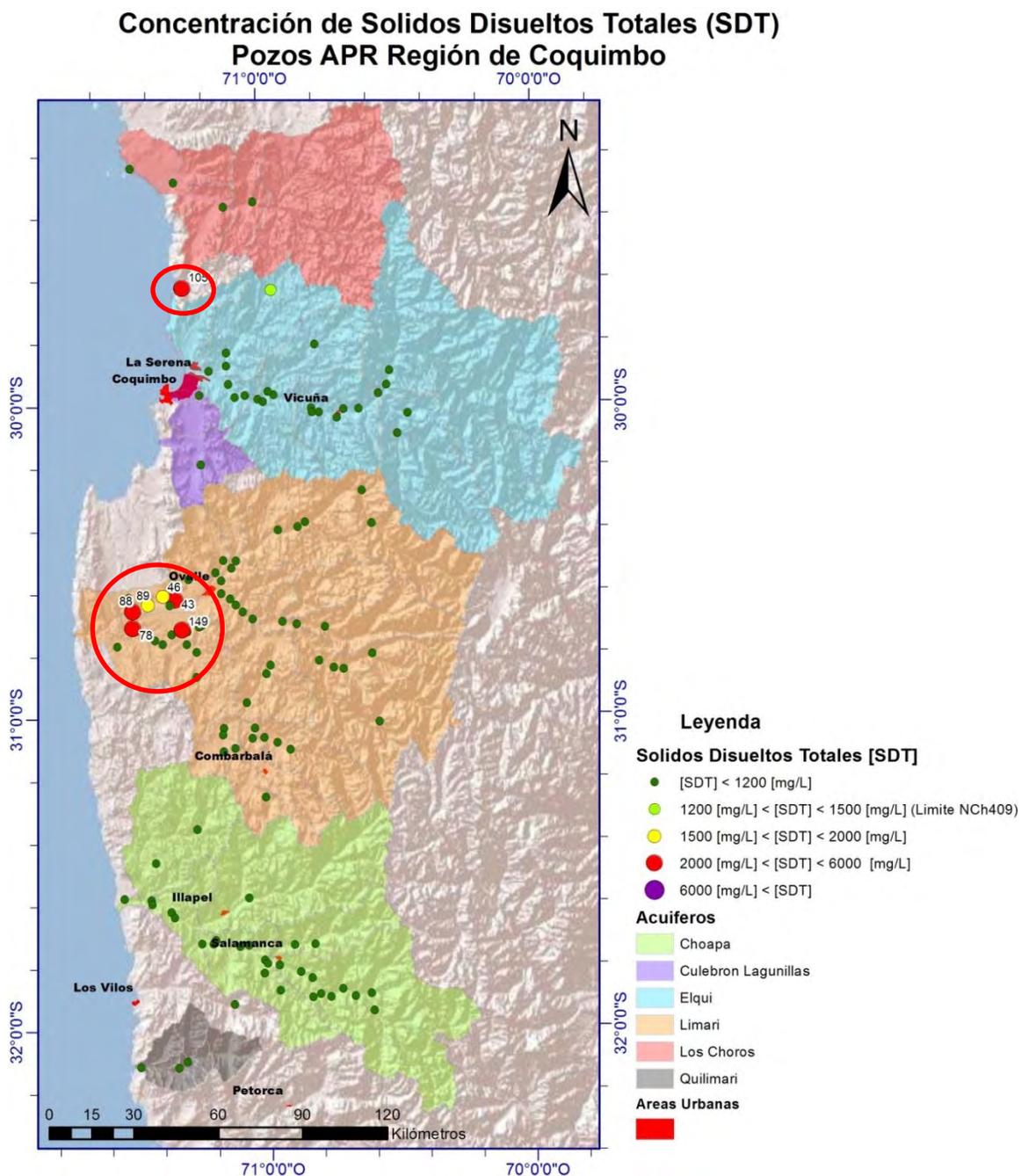


Figura 91: Concentración de Solidos Disueltos Totales en aguas crudas de pozos APR región de Coquimbo. Categorizado en base a clasificación de índice de calidad (ver más adelante).

En la Figura 92 se puede observar como en la parte baja de la cuenca del río Elqui se presentan aguas levemente más salinas que pueden guardar relación con fuentes de contaminación difusa evidenciadas por concentraciones elevadas de nitratos y otras sales.

Concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT) Pozos APR Región de Coquimbo

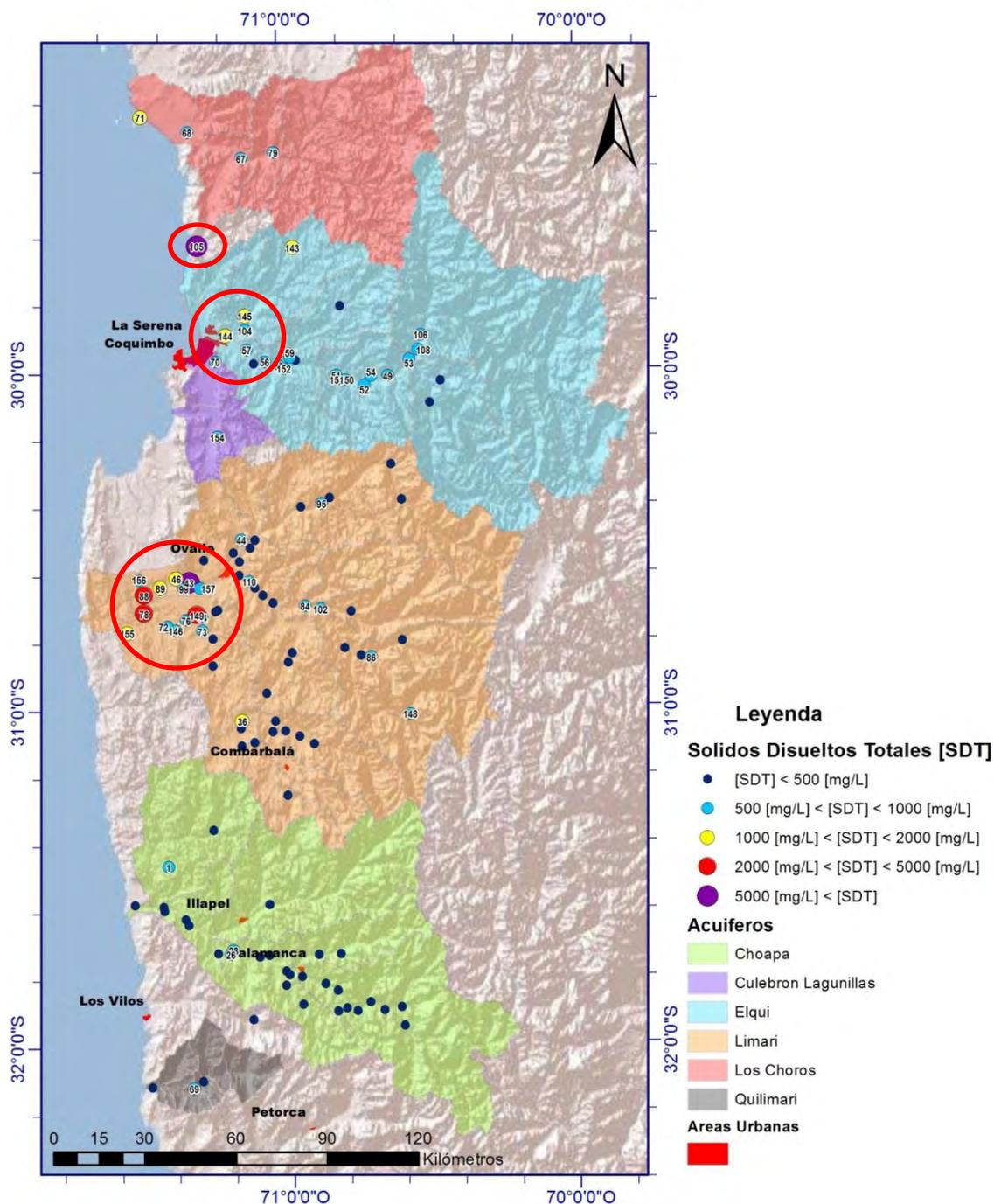


Figura 92: Concentración de Sólidos Disueltos Totales en aguas crudas de pozos APR región de Coquimbo. Categorized según rangos de salinidad de aguas en función de su manejo y usos descrito en norma NCh1333 para aguas de riego (ver más adelante)

VI.5.10. ARSÉNICO

En el presente estudio el número de pozos en el cual se detectó arsénico fue en 80 pozos de los cuales 10 sobrepasaron la norma de agua potable existe una zona donde se concentraron la mayores excedencias la cual corresponde a la zona baja de la cuenca del Elqui. (Figura 93)

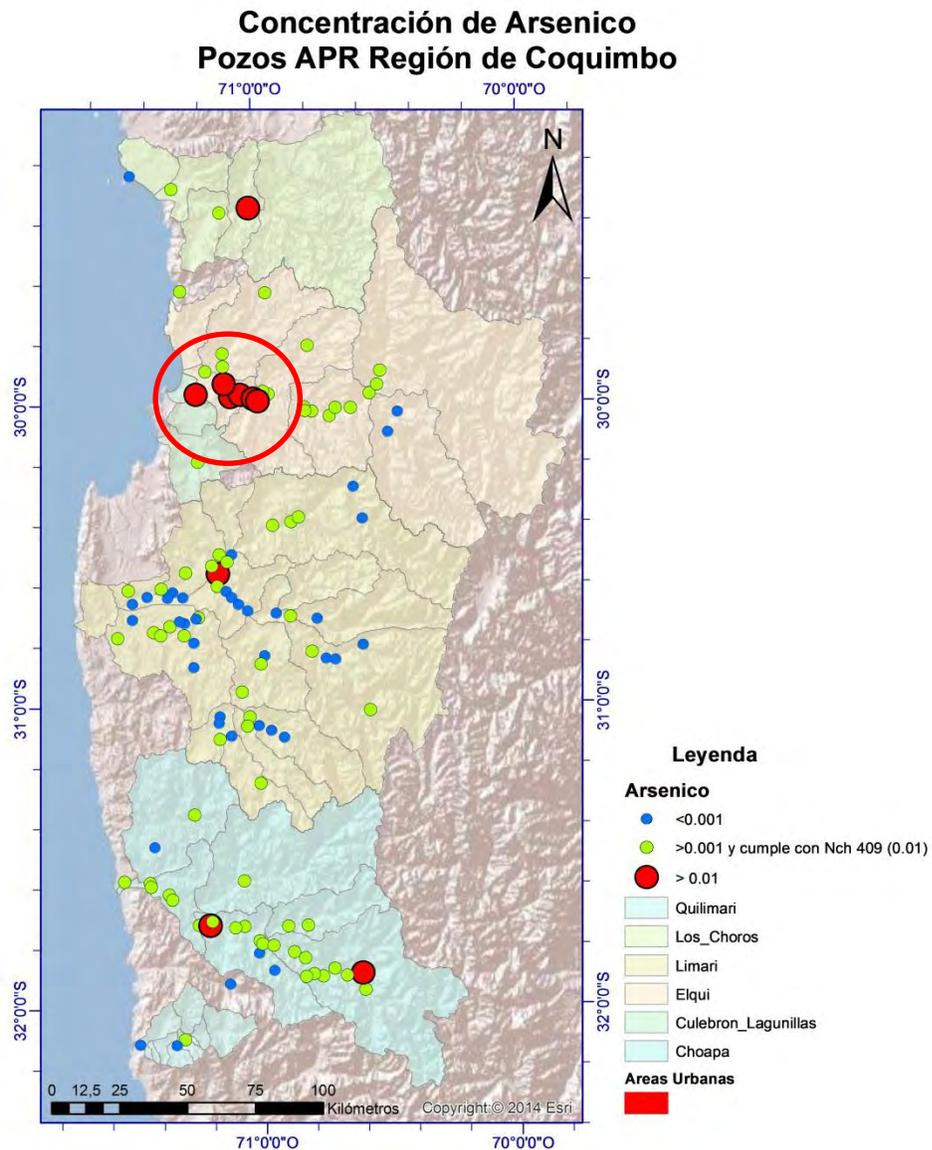


Figura 93: Concentraciones de Arsénico en aguas crudas de pozos APR, región de Coquimbo

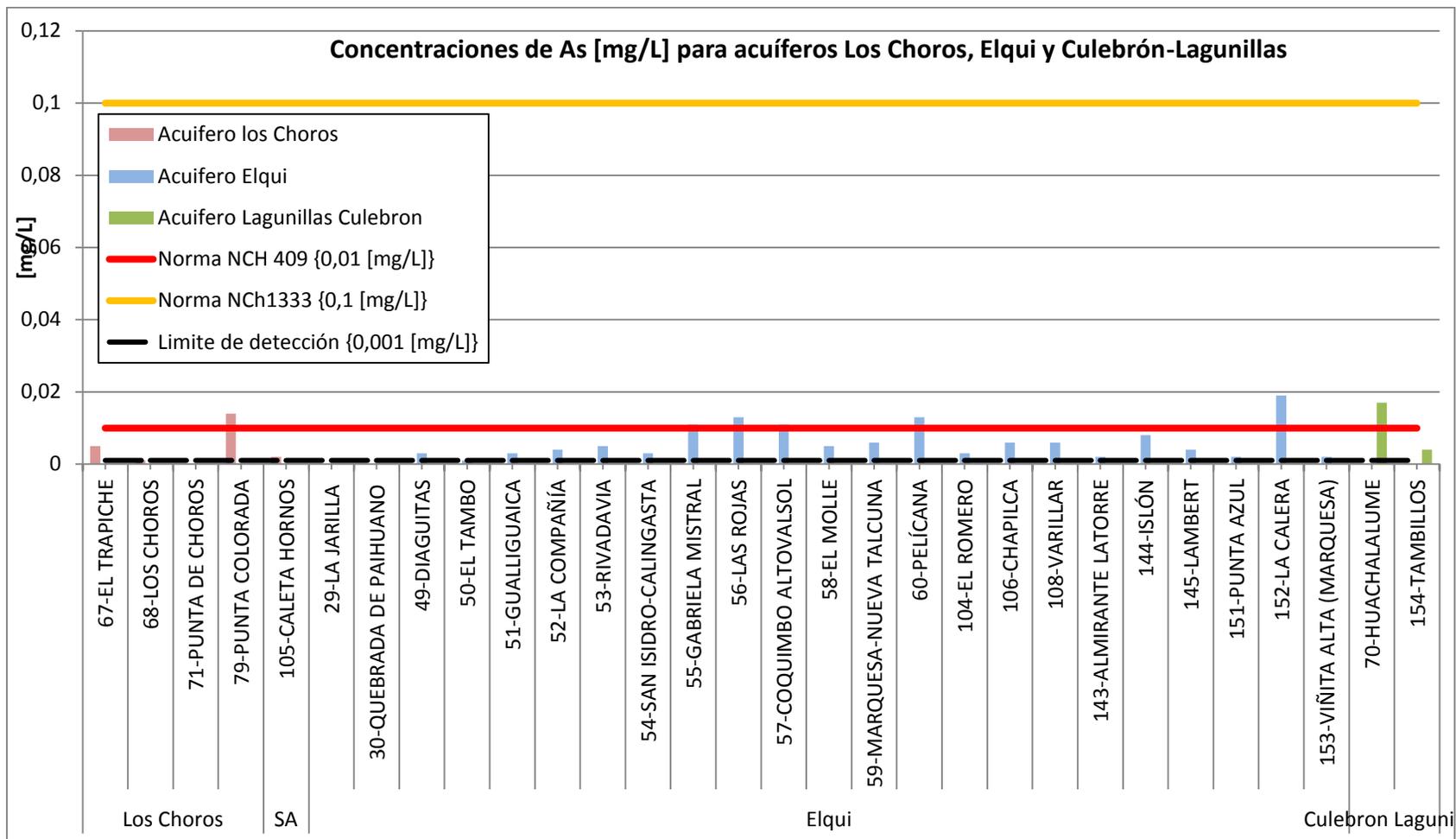


Figura 94: Concentraciones de As [mg/L] para acuíferos Los Choros, Elqui y Culebrón-Lagunillas

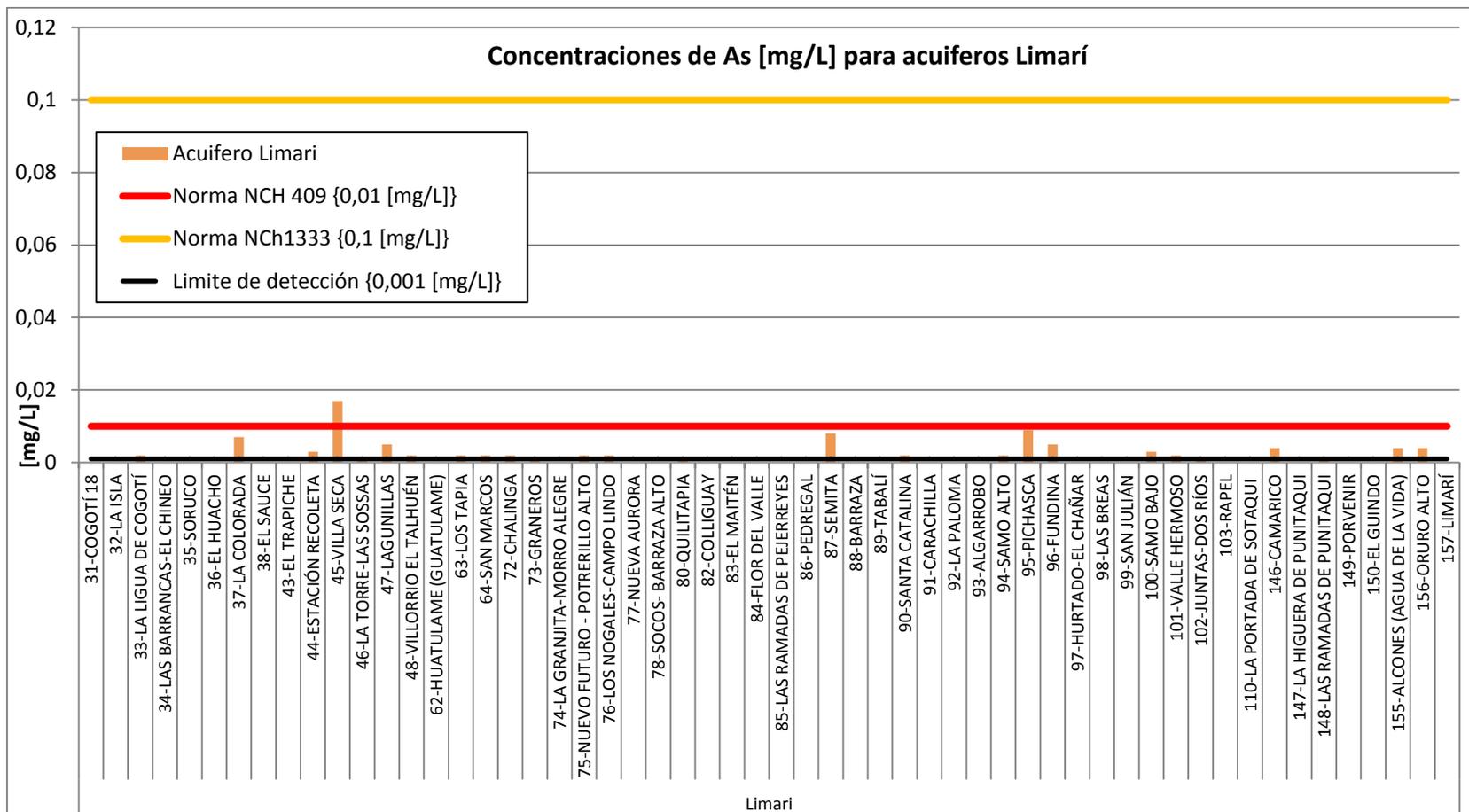


Figura 95: Concentraciones de As [mg/L] para acuífero Limarí

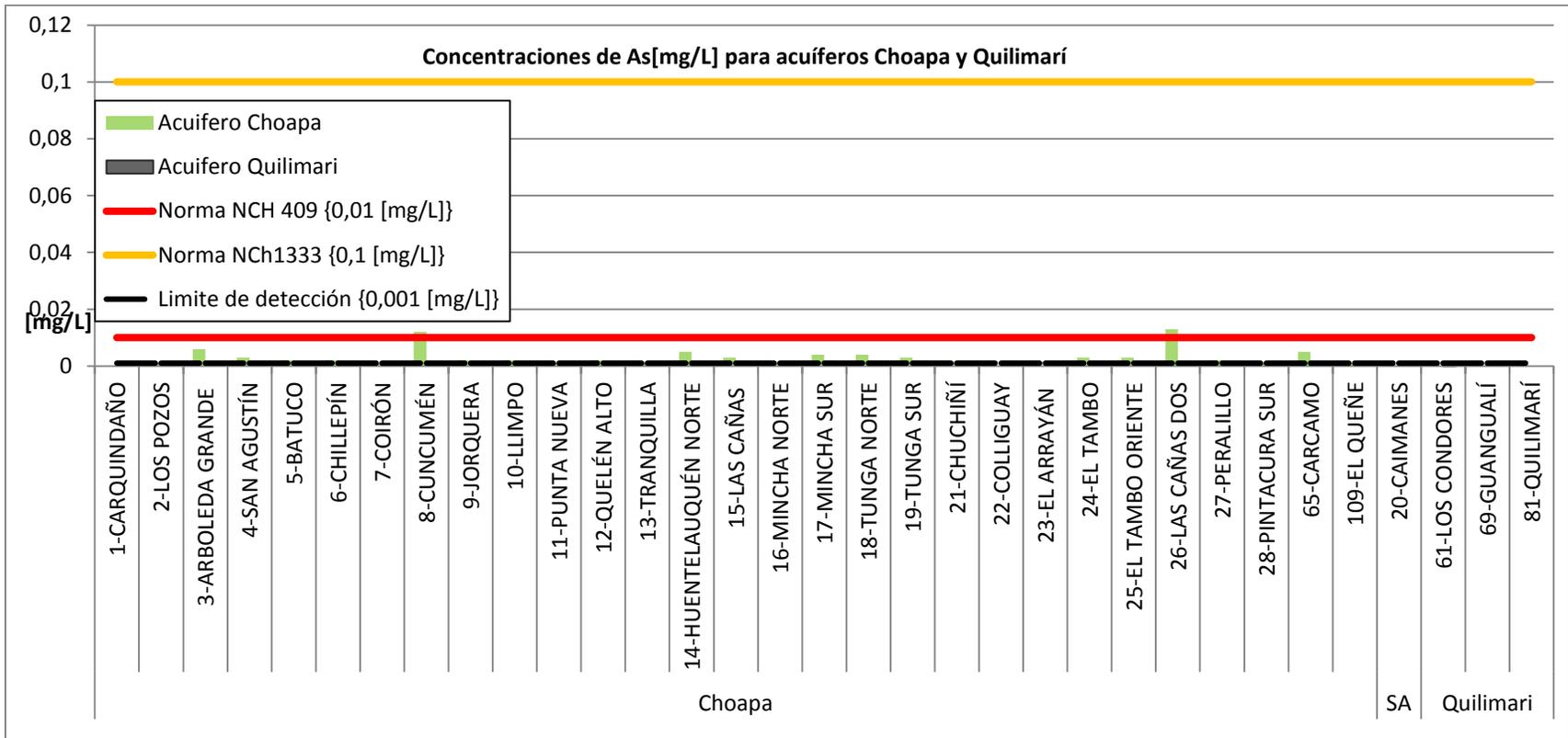


Figura 96: Concentraciones de As [mg/L] para acuífero Choapa Quilimari

VI.5.11. HIERRO

En la Figura 94 se puede observar como la distribución de pozos con valores elevados de Hierro es relativamente homogénea en la región, bajo la premisa de una región caracterizada por yacimientos metálicos enriquecidos en minerales constituidos con Hierro como elemento mayoritario (Sulfuros y óxidos de Hierro), resulta lógico pensar en que la situación señalada es consecuencia a la condición natural de la geología regional en donde, como se desarrolla en el acápite IV.4.3.-GEOLOGÍA ECONÓMICA REGIONAL, esta región se caracteriza por franjas metalogénicas enriquecidas en Hierro.

A diferencia de los parámetros anteriormente descritos, cabe señalar como la distribución de las concentraciones de hierro en las aguas no sigue los patrones descritos para iones mayoritarios como el cloruro, sulfato, calcio o magnesio. Es así como se puede observar en la Figura 94 que los pozos del sector sur de la región, correspondiente a los acuíferos Choapa y Quilimarí, presentan valores elevados de hierro análogamente a los pozos de los acuíferos más al norte, situación que no ocurre para el resto de los iones mencionados.

Excepciones a lo anteriormente expuesto se pueden reconocer en aguas abajo del embalse Puclaro en el río Elqui, en donde el pozo 152- LA CALERA, presenta una concentración de Hierro de 6,54 [mg/L] significativamente por sobre la media, y cercano a este el pozo 60-PELICANA con una concentración de 2,1 [mg/L]. Estos se encuentran próximos a relaves mineros de menor envergadura (pequeña minería) y el relave de la faena minera Linderos de mayor envergadura (ver Anexo 4). Esta situación evidenciaría una posible contaminación de carácter antrópico desde aquellas faenas, pero cuya veracidad debe ser confirmada por estudios más acabados.

Situación similar se observa en el pozo 95-PICHASCA es cual presenta niveles de Hierro de 6,27 [mg/L], y el pozo cercano 96-FUNDINA presenta 2,14[mg/L] de Hierro. El primero adyacente a l tranque de relaves perteneciente a faena Las Palmas, en el río Hurtado (cuenca del Limarí) (consultar Anexo 4)

Análogamente en el sector de El Tambo los pozos 22, 24 y 25 presentan valores de Fe en torno a 1 [mg/L] y aguas arriba por estero camisas, próximo a embalse Corrales, el pozo 23-EL ARRAYAN presenta una concentración de 5,0 [mg/L].En este sector se registra presencia de relaves mineros, sin ser significativamente intensa.

Es preciso señalar que diversos sistemas de bombeo de pozos rurales son confeccionados con piezas de hierro que pueden sufrir corrosión en su funcionamiento como así puede ser en sistemas de exclusas en sistemas de regulación de caudal como lo son los embalses.

Frente a los resultados obtenidos para Hierro en los pozos en estudio, existen casos donde no es posible afirmar con certeza que los niveles de Hierro encontrados correspondan a una forma natural o bien a una contaminación antrópica ya sea por la fuente como por el sistema de bombeo

Considerando lo señalado, es recomendable realizar estudios hidrogeoquímicos específicos con tal de dilucidar estas u otras problemáticas.

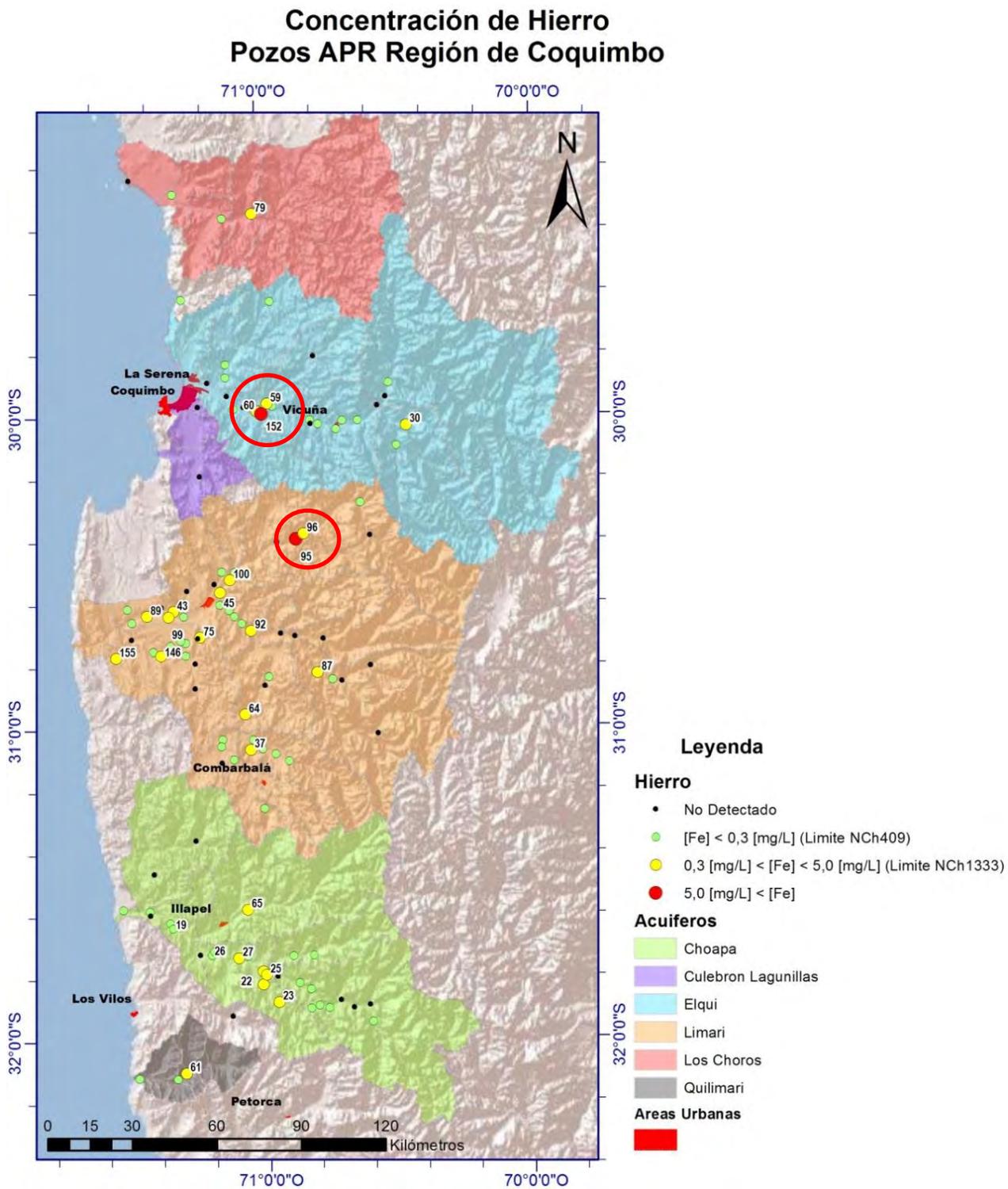


Figura 97: Concentración de Hierro en aguas crudas de APR de región de Coquimbo. Se encierran sectores con altas concentraciones.

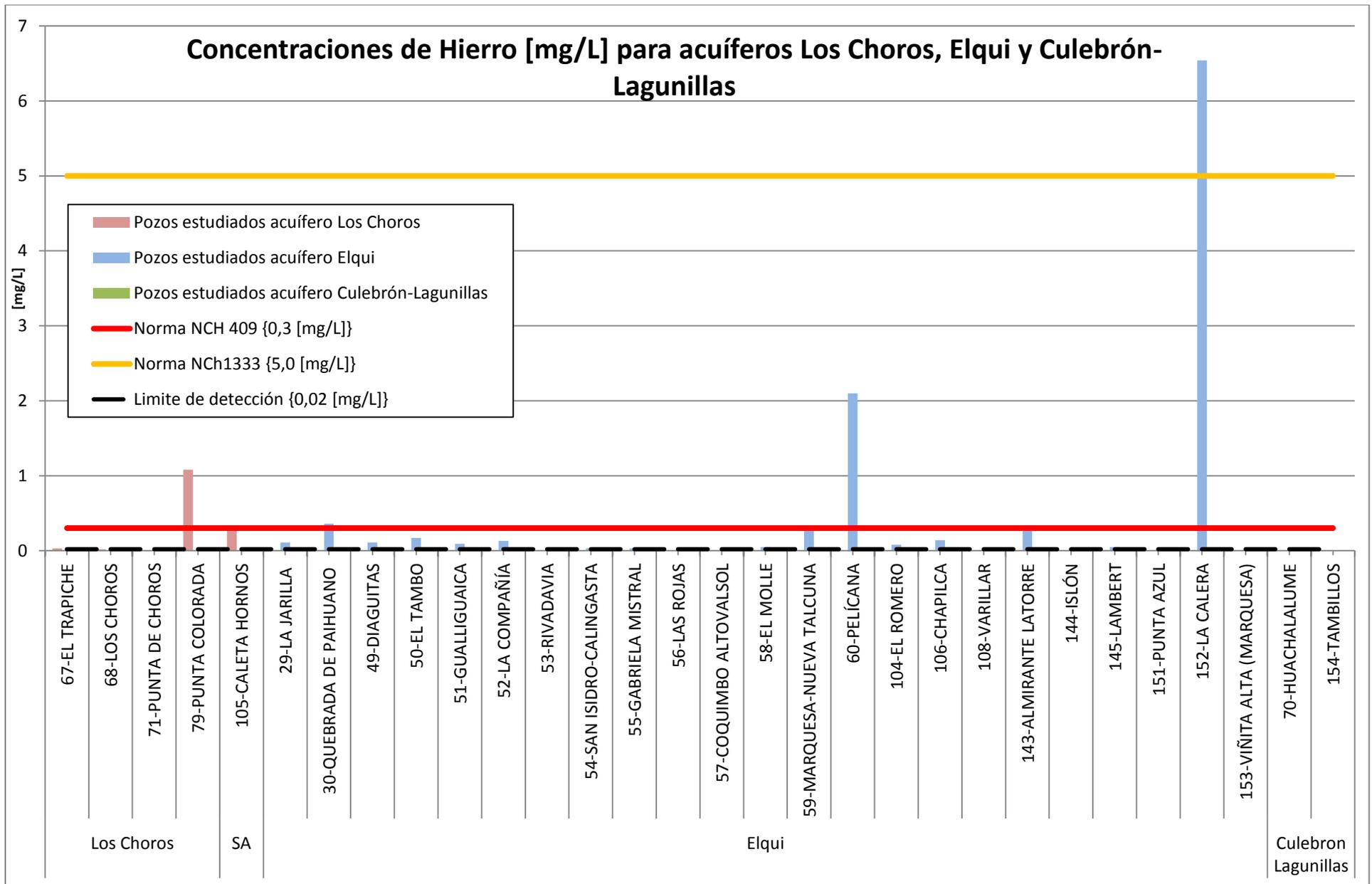


Figura 98: Concentraciones de Hierro [mg/L] para acuíferos Los Choros, Elqui y Culebrón-Lagunillas

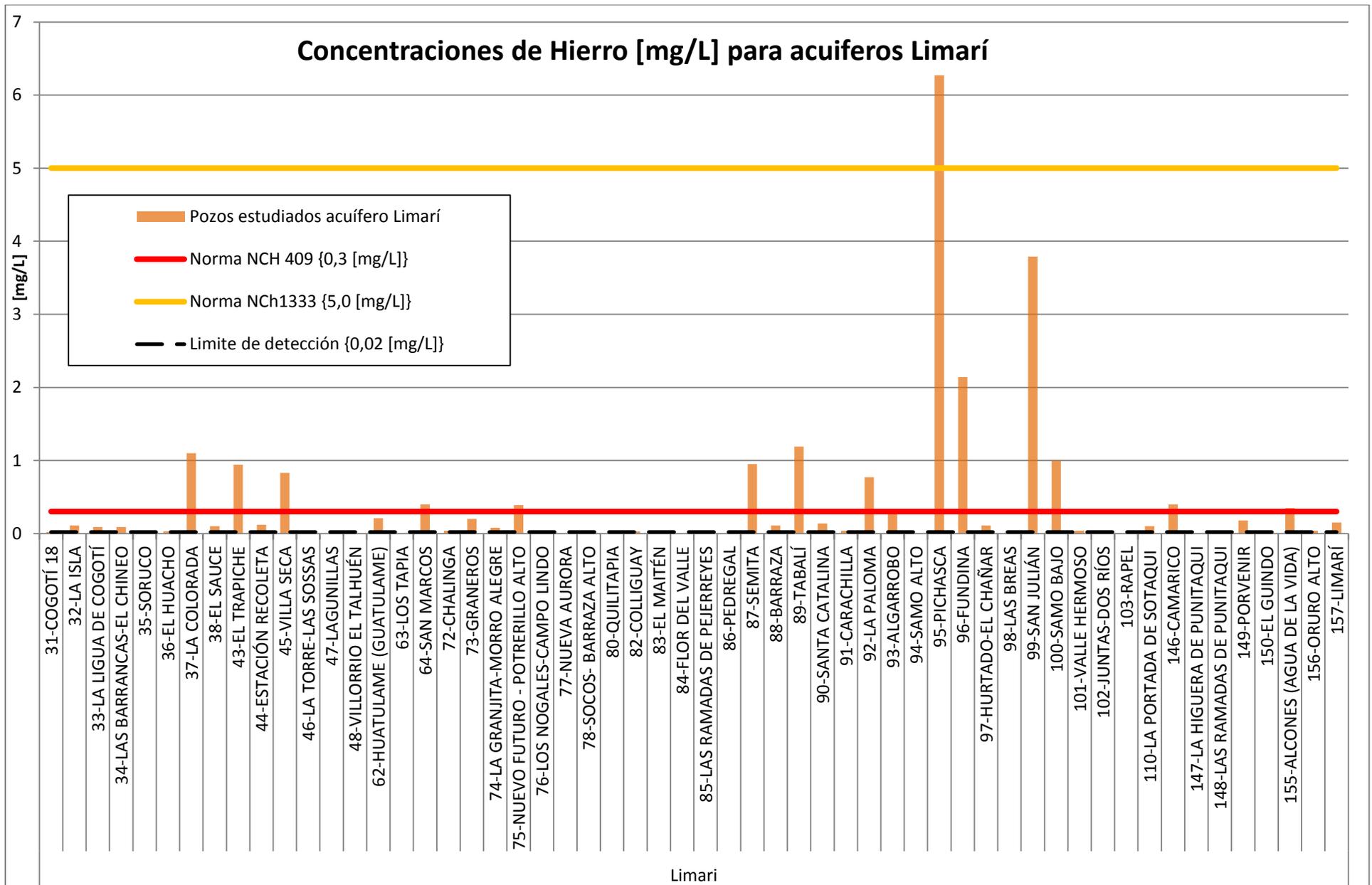


Figura 99: Concentraciones de Hierro [mg/L] para acuífero Limarí.

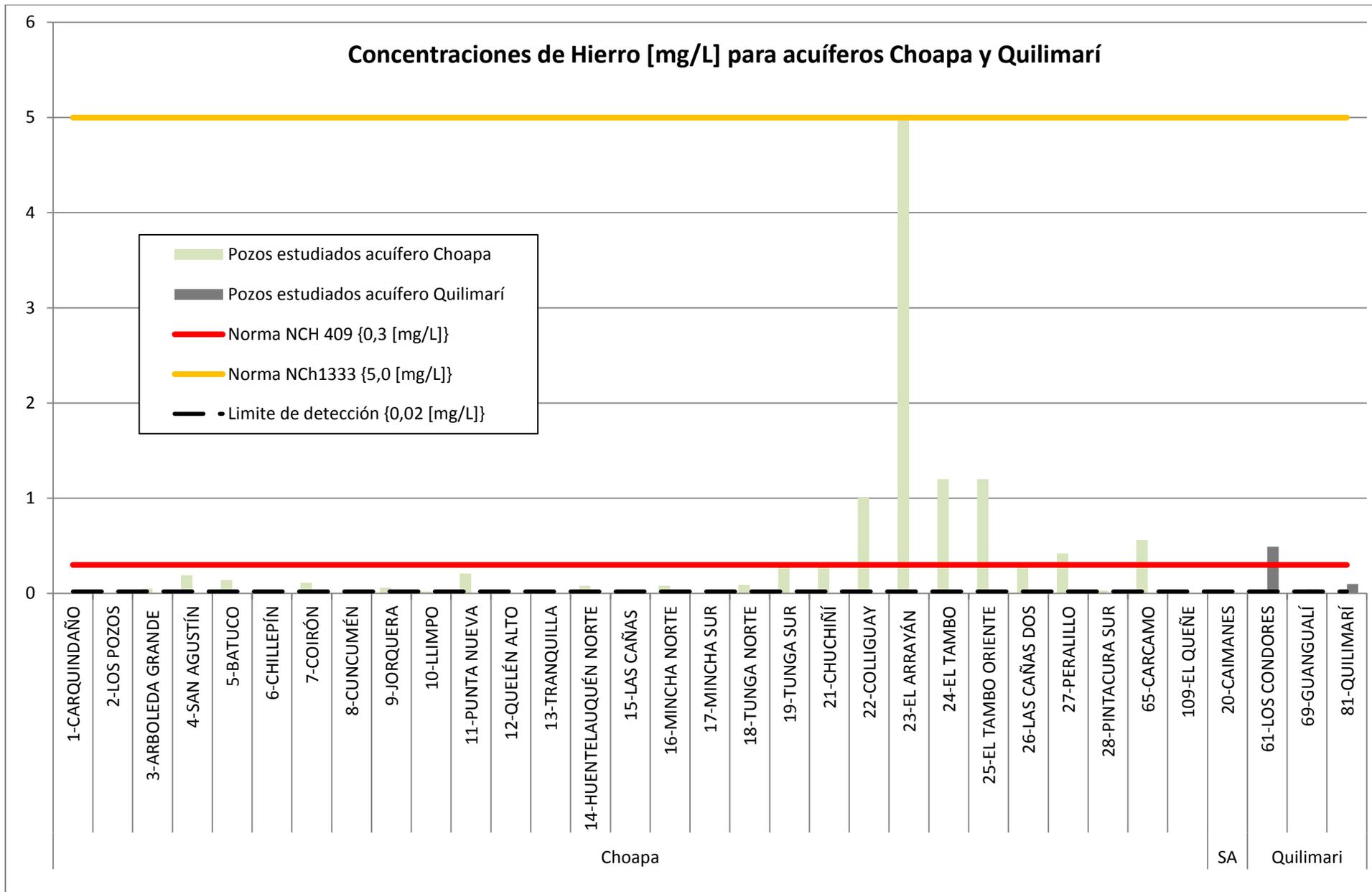


Figura 100: Concentraciones de Hierro [mg/L] para acuíferos Choapa y Quilimarí.

VI.5.12. MANGANESO

El manganeso se presenta naturalmente en minerales asociados paragénicamente a minerales de hierro, el más común de ellos es la Pirolusita generalmente formado en ambientes lacustres y depósitos marinos superficiales, o en fracturas de rocas como precipitado químico a partir de infiltración (pirolusita arborescente). Por otro lado, como se puede verificar en la Tabla 30, fuentes comunes de contaminación antropogénica relativas a manganeso son los agroquímicos y pesticidas.

Bajo estas premisas, se puede observar en la Figura 98 como las concentraciones elevadas de manganeso se encuentran heterogéneamente distribuidas en la región en donde algunas coincidencias con respecto a distribución de altas concentraciones de otros elementos pueden ser percibidas.

Una de estas coincidencias, corresponde a un grupo de pozos con altos niveles de Mn agua abajo de Ovalle, en donde anteriormente diversos parámetros, como Nitrato, Calcio y Sulfato, indican contaminación difusa por infiltración de aguas superficiales. Este sería el caso del pozo 43-EL TRAPICHE, pero no así los pozos 99-SAN JULIAN y 146-CAMARICO en donde se presentan elevadas sólo las concentraciones de Hierro y Manganeso, los cuales se encuentran ligados geoquímicamente. Es por ello que, en la ausencia de cualquier otra fuente contaminante antrópico en el sector, se puede inferir que los altos niveles de Mn y Fe estarían asociados a una condición natural.

De igual forma ocurre en el pozo 60-PELICANA que anteriormente presentó niveles elevados en la concentración de Hierro. Como fue señalado para aquel elemento, las concentraciones elevadas de estos metales pueden estar sujetas a una contaminación de carácter antrópico desde depósitos de relaves adyacentes o por una posible concentración anómala debido condiciones geológicas naturales.

Características similares a lo señalado en los párrafos anteriores se presentan en los pozos 64-SAN MARCOS y 92-LA PALOMA, ambos en el acuífero Limarí, en los cuales tanto el Fe y Mn se encuentran enriquecidos, no evidenciado fuentes de contaminación antrópica directa. La misma situación se puede verificar para los pozos 31, 37, 96 y 155 también alojados en el acuífero Limarí.

Por otro lado, en los pozos de acuífero Choapa 5-BATUCO, 26-LAS CAÑAS DOS Y 14-HUENTELAUQUEN NORTE, presentan niveles levados de Manganeso exclusivamente. En los casos de los Pozos 5 y 26, existen posibles fuentes antropogénicas de contaminación, pero estas son distales y no directamente correlacionales con tranques de relaves y faenas mineras (ver Anexo 4). En el caso del pozo 14, se encuentra adyacente a una formación de rocas metamórficas (ver Anexo 1), así como la costa, por lo cual se puede inferir que la concentración de manganeso para este pozo se puede deber al lavado de sedimentos marinos y/o rocas metamórficas enriquecidas en Manganeso. Misma condición ocurre para pozo 81 cercano a la desembocadura del acuífero Quilimarí.

Concentración de Manganeso Pozos APR Región de Coquimbo

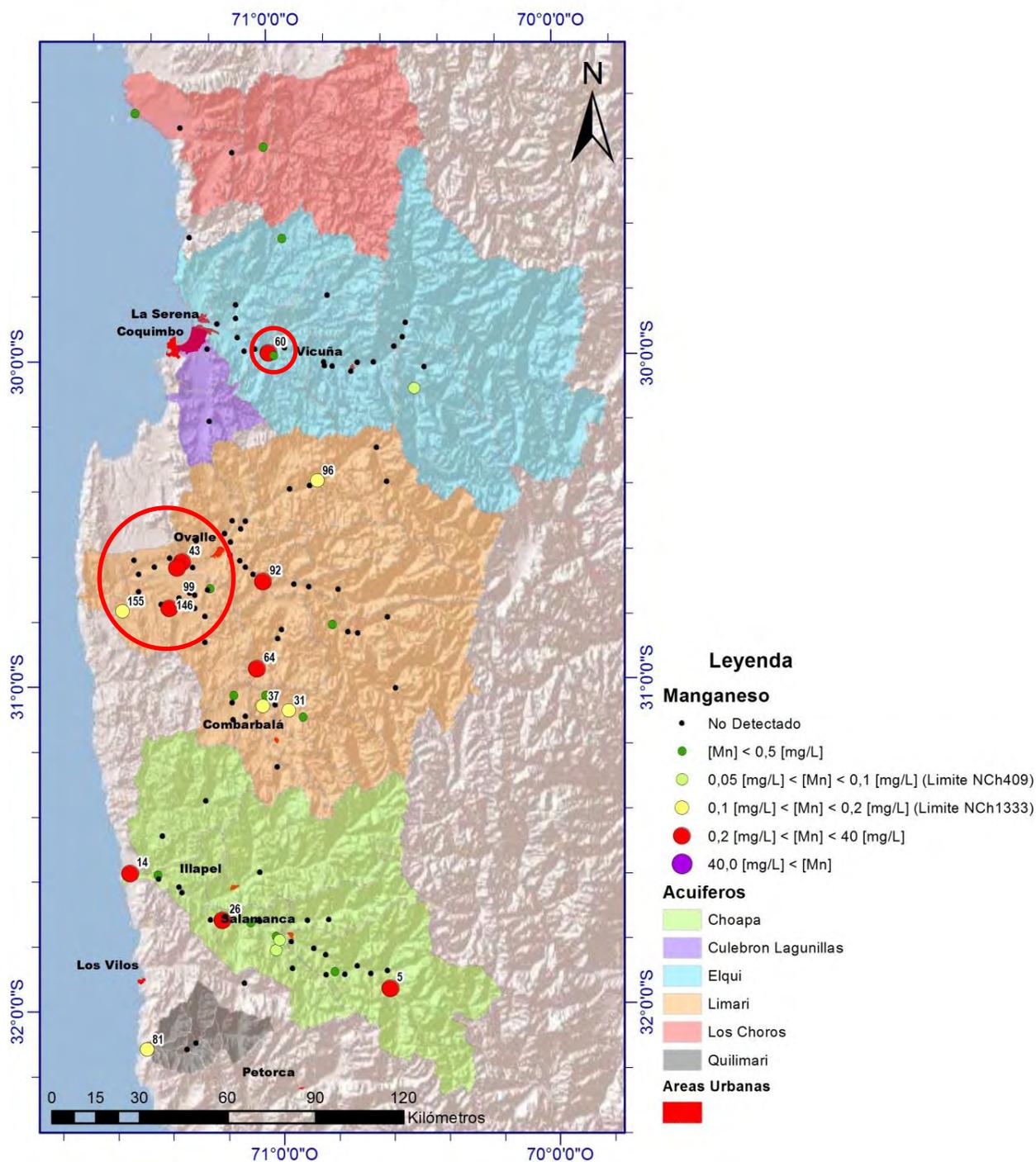


Figura 101: Concentración de Manganeso en aguas crudas de APR de región de Coquimbo. Se encierran sectores con alta concentración.

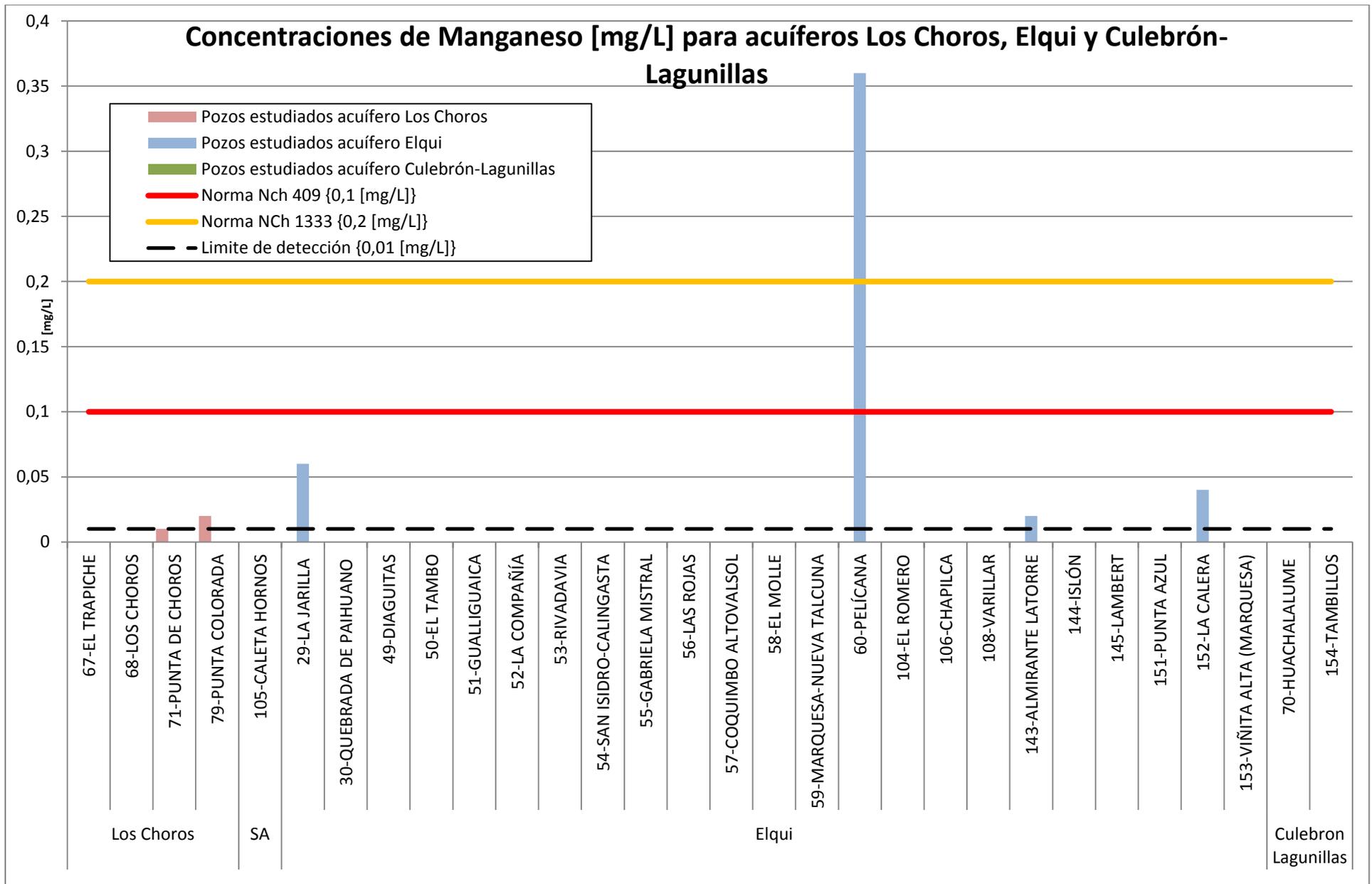


Figura 102: Concentraciones de Manganeso [mg/L] para acuíferos Los Choros, Elqui y Culebrón-Lagunillas

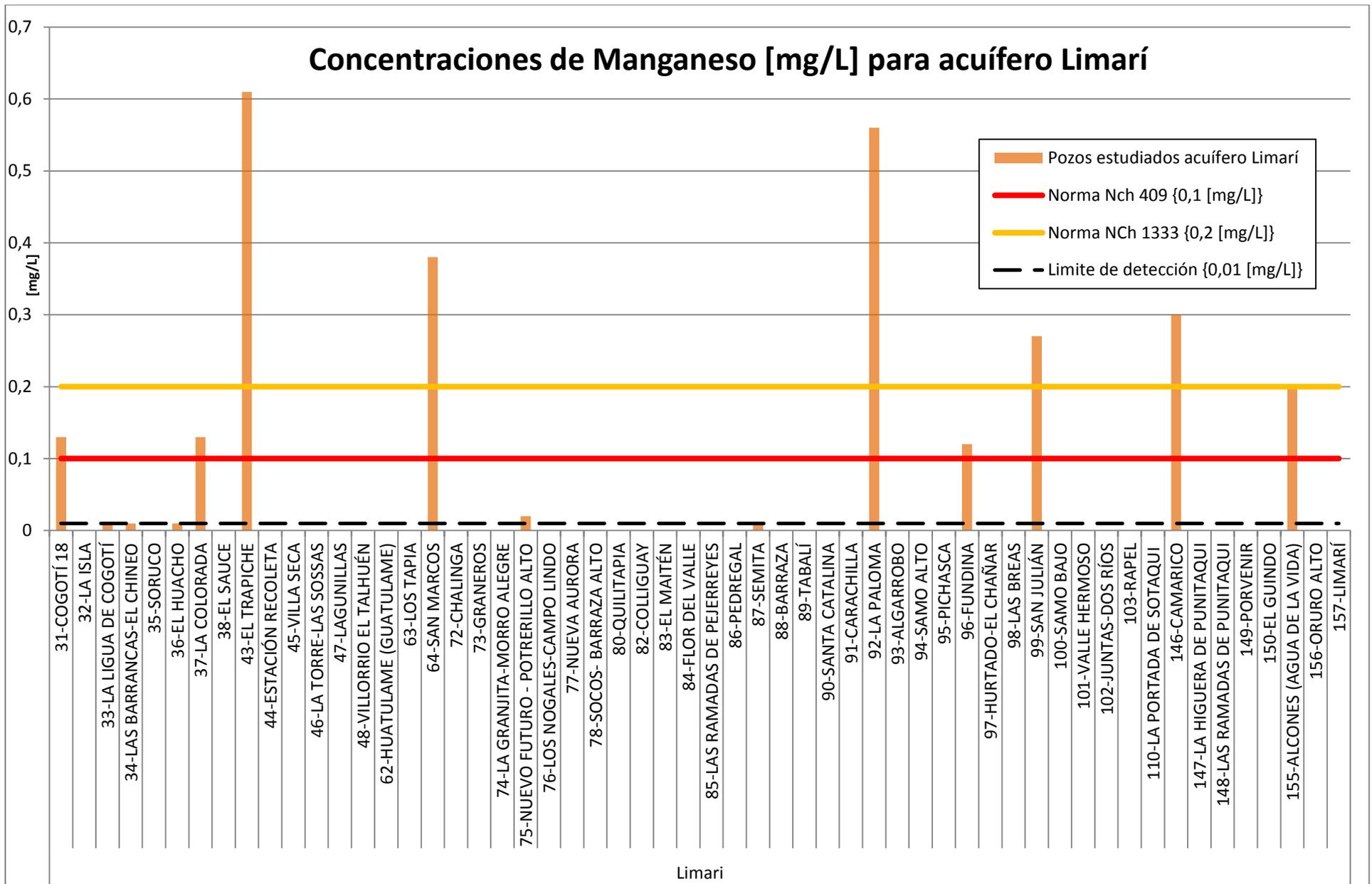


Figura 103: Concentraciones de Manganeso [mg/L] para acuífero Limarí.

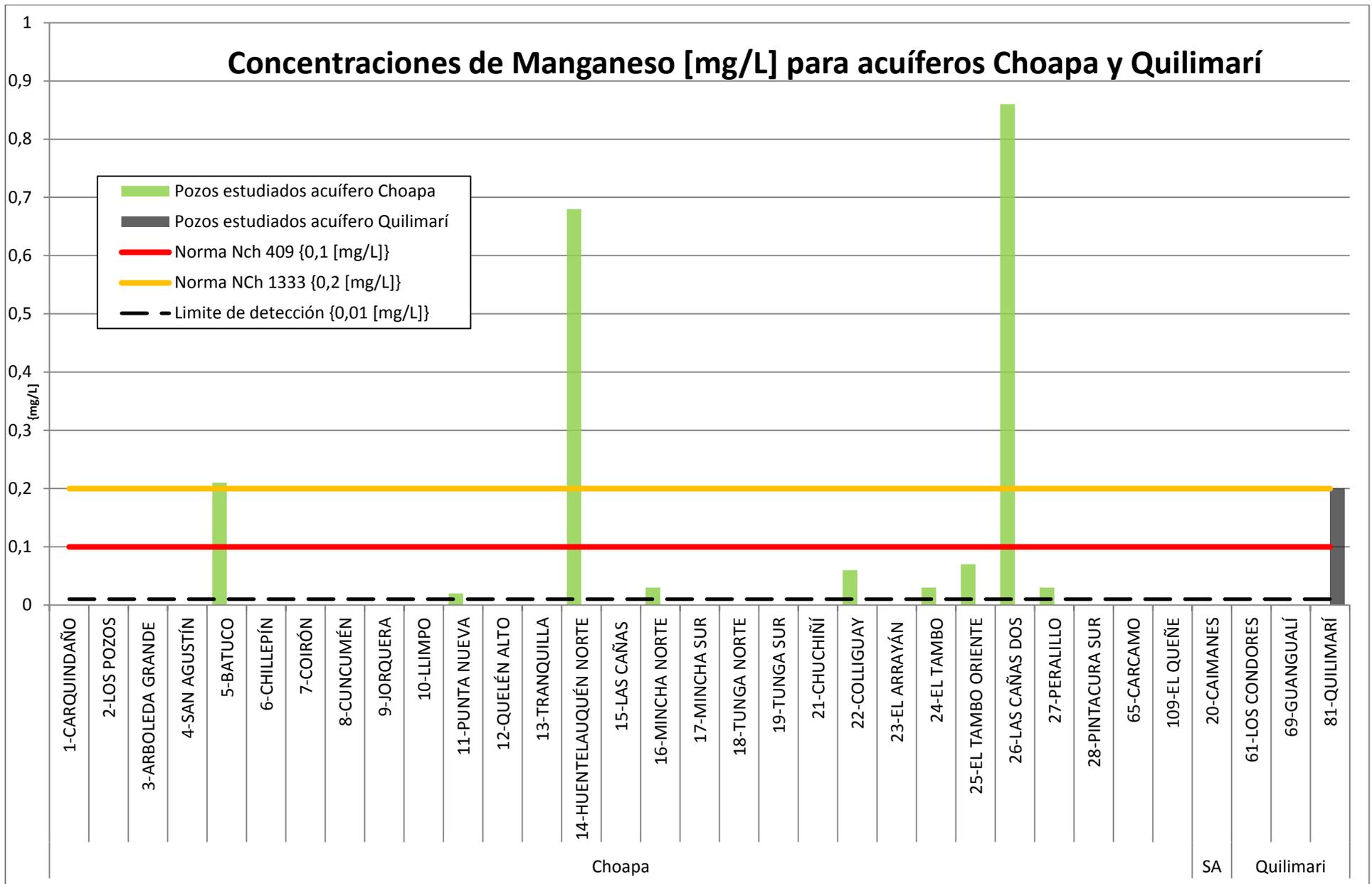


Figura 104: Concentraciones de Manganeso [mg/L] para acuíferos Choapa y Quilimarí.

VI.5.13. PLOMO

El mineral más común de Plomo que se puede encontrar en el país es la Galena (PbS), un sulfuro de plomo asociado piritita, cuarzo y siderita en filones hidrotermales y vetillas mineralizadas generalmente en niveles volcánicos (lavas) siendo una ganga común. Por otro lado, como lo muestra la Tabla 30, el plomo puede estar asociado a una diversidad de fuentes de contaminación antropogénica, tales como industria metalúrgica, del papel, textil y agroquímicos, fertilizantes, pesticidas, aguas servidas y rellenos sanitarios.

En la Figura 102 se destaca el pozo 110-LA PORTADA DE SOTAQUÍ el cual presenta una concentración de 0,12 [mg/L] de plomo. Por otro lado los diferentes pozos que presentan presencia de plomo se distribuyen heterogéneamente en la región. No existe un patrón observable que dé pie a relacionar directamente las concentraciones de plomo con alguna fuente de contaminación antrópica específica (comparar figuras 101 con Anexo 4). Esto hace pensar que las concentraciones más elevadas de Plomo puede estar dada por una condición geológica natural por lixiviación de sulfuro de hierro y plomo (Galena), como bien puede ser en algunos sectores por fuentes de contaminación difusa en pozos que anteriormente se le haya atribuido dicha condición.

Se recomienda realizar un remuestreo pozo 110-LA PORTADA DE SOTAQUÍ para ratificar la concentración detectada.

Concentración de Plomo Pozos APR Región de Coquimbo

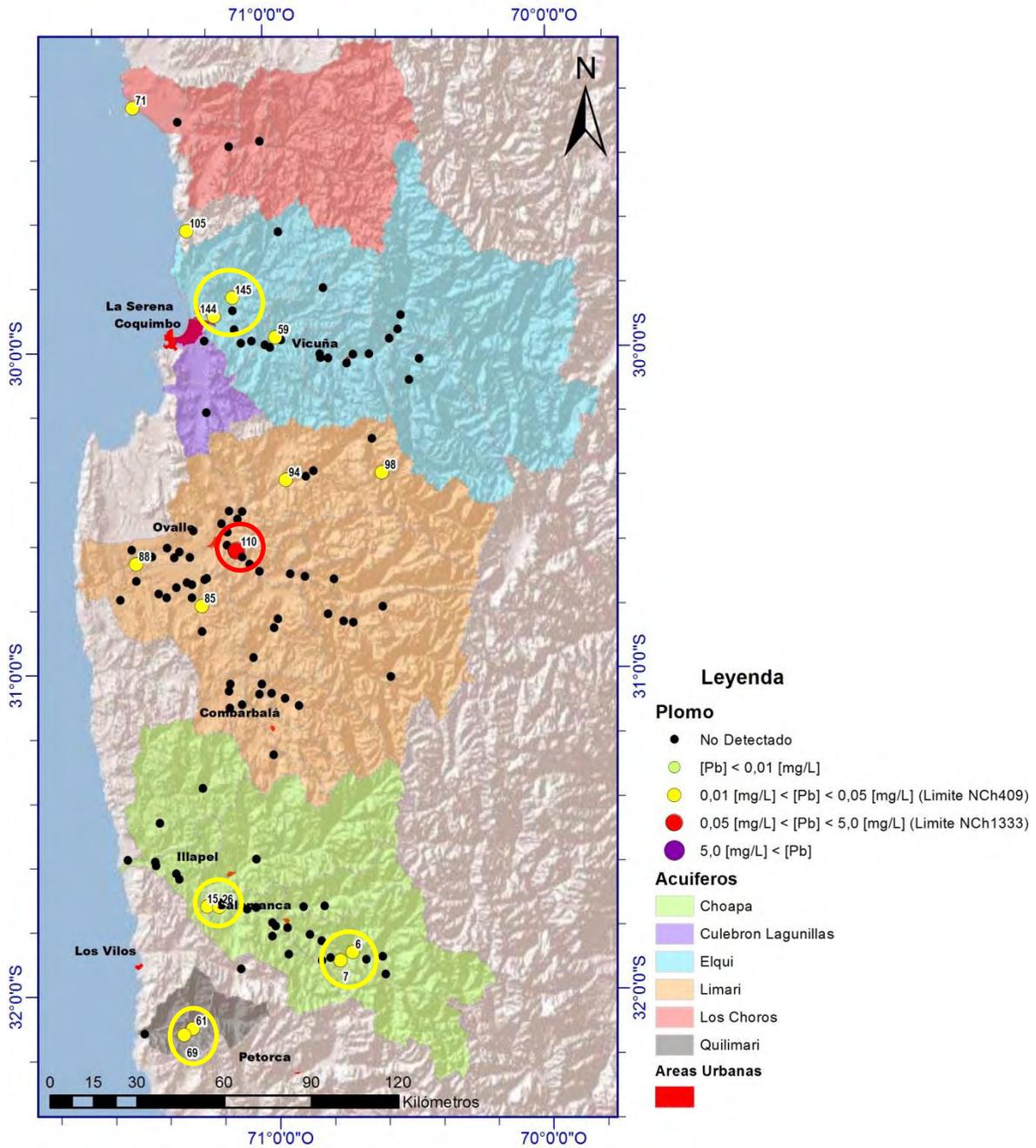


Figura 105: Concentración de Plomo en aguas crudas de APR de región de Coquimbo. Se destaca (circunferencia roja) pozo 110-PORTADA DE SOTAQUÍ que excede norma de agua potable NCh409. También se encierran sectores con concentraciones relativamente elevadas (circunferencias amarillas).

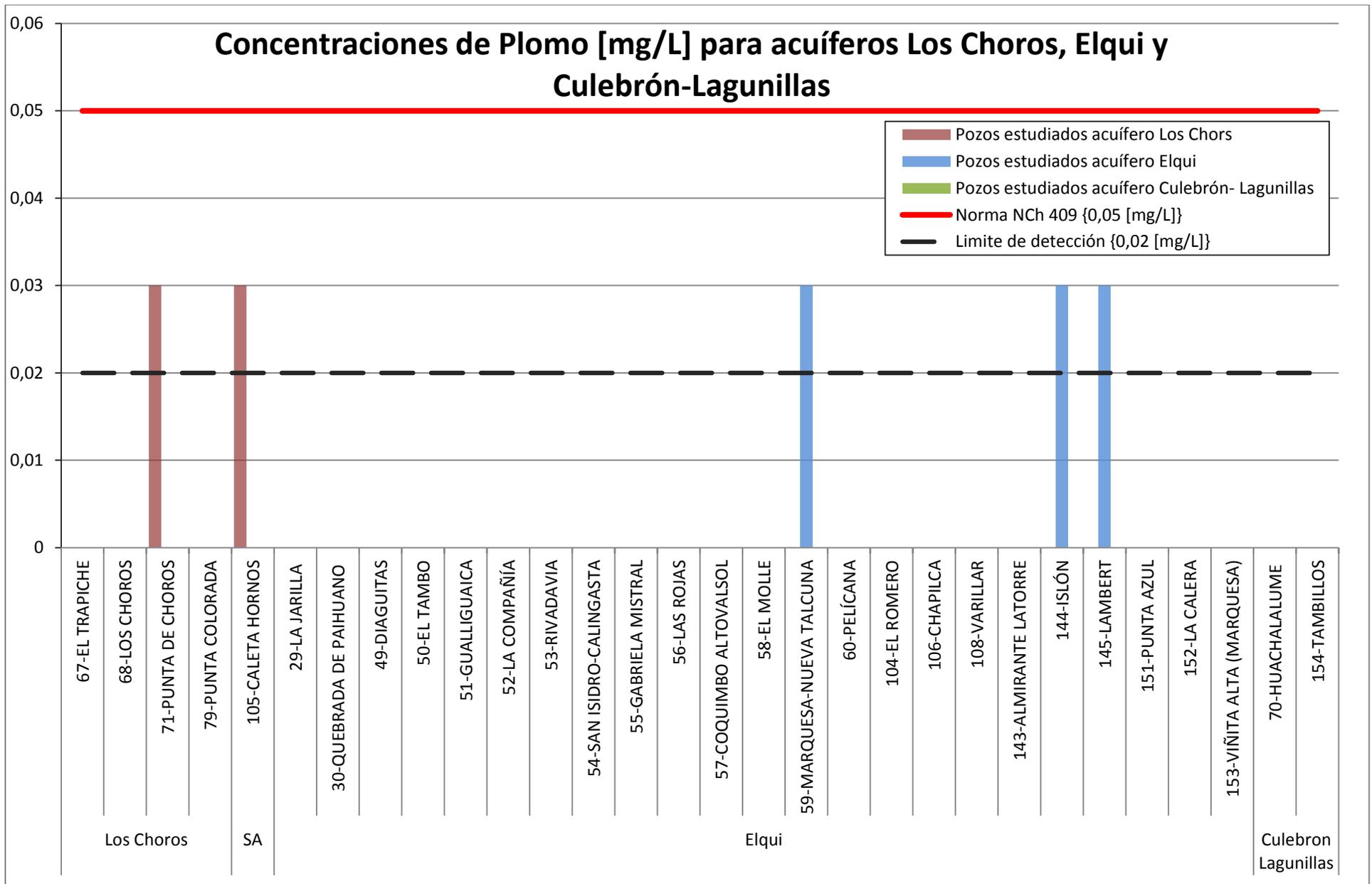


Figura 106: Concentraciones de Plomo [mg/L] para acuíferos Los Choros, Elqui y Culebrón-Lagunillas. Ningún pozo supera el límite dado para aguas de riego dado por la norma NCh 1333.

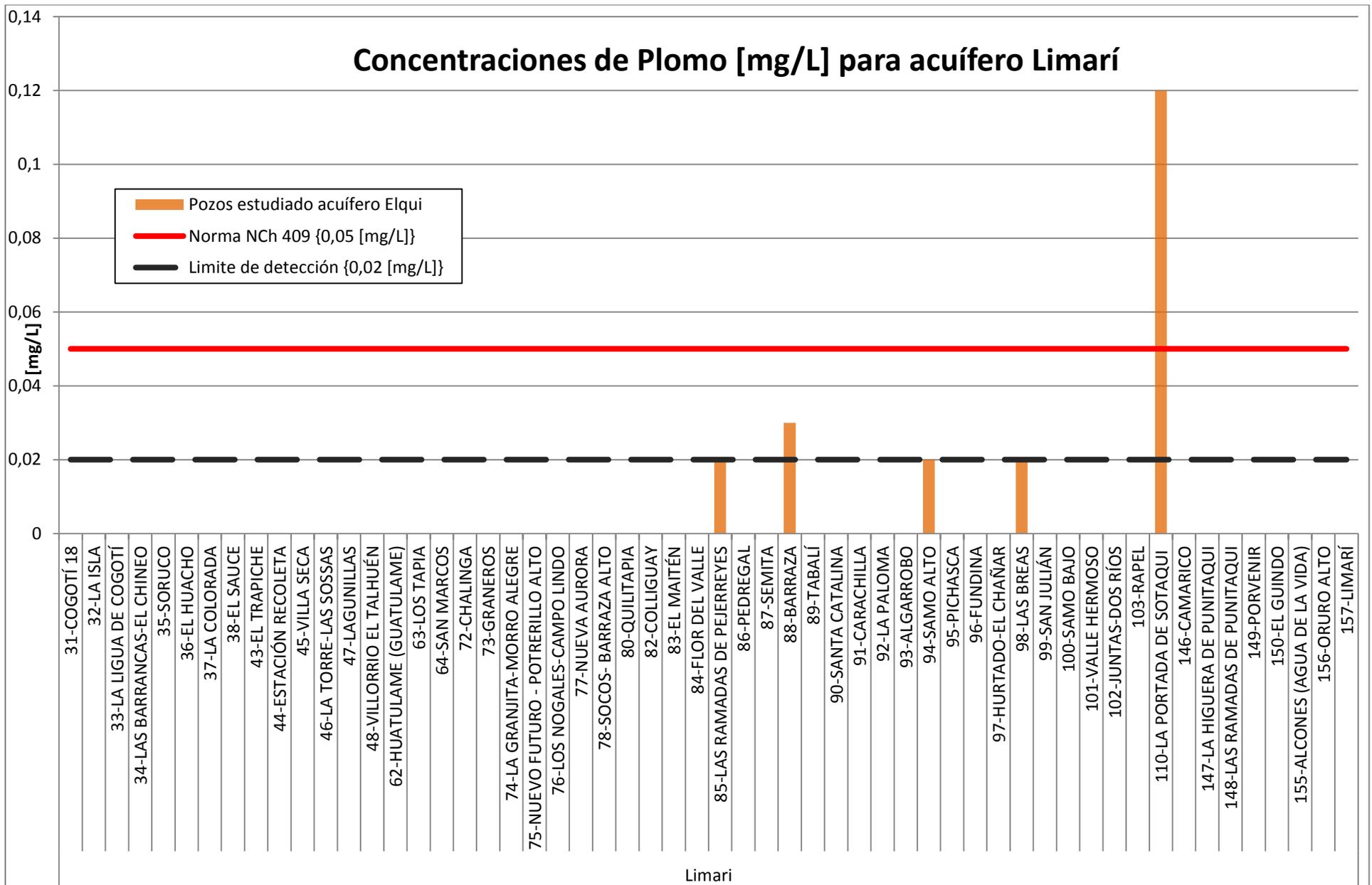


Figura 107: Concentraciones de Plomo [mg/L] para acuífero Limarí. Ningún pozo supera el límite dado para aguas de riego dado por la norma NCh 1333.

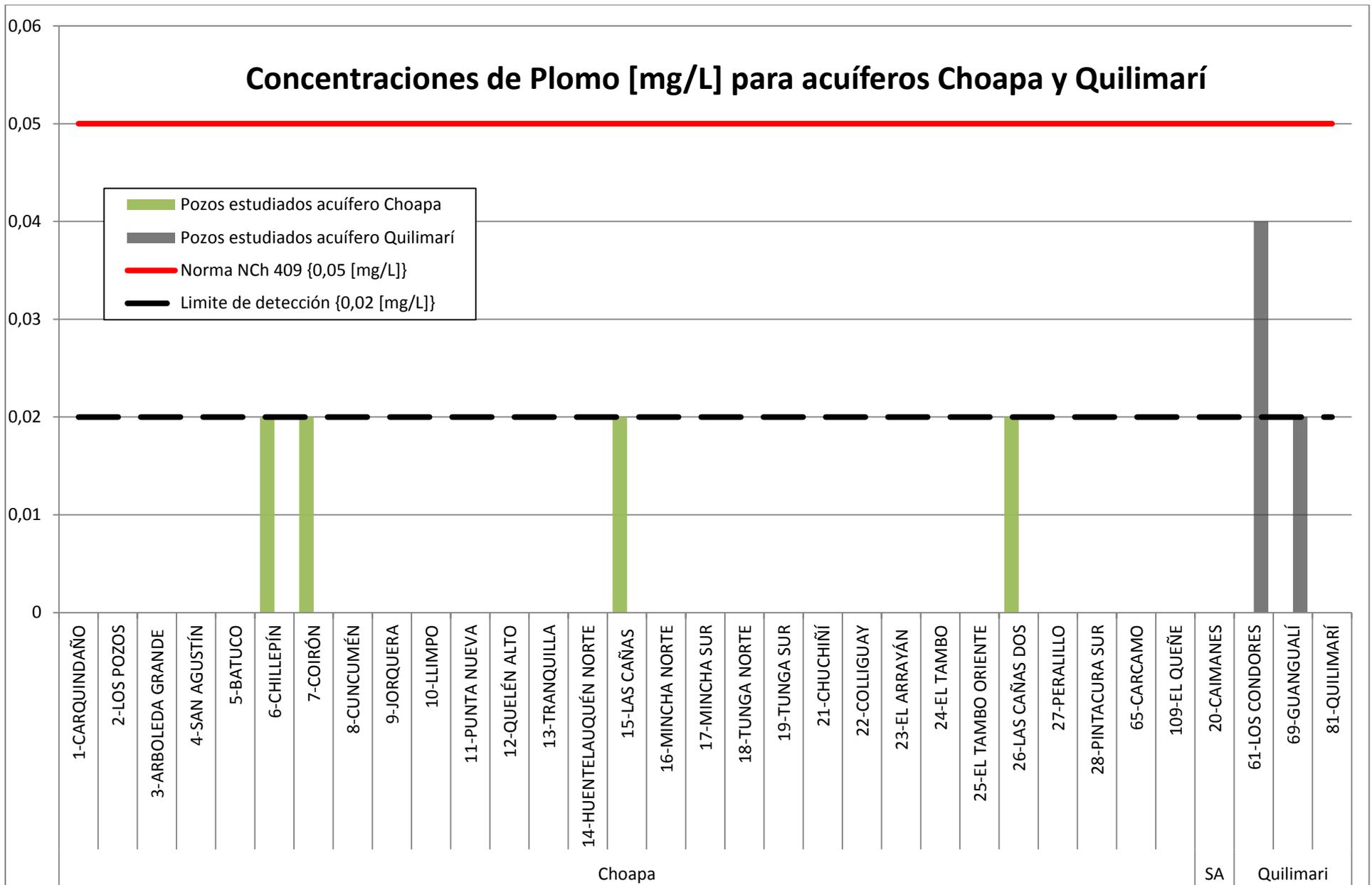


Figura 108: Concentraciones de Plomo [mg/L] para acuíferos Choapa y Quilimarí. Ningún pozo supera el límite dado para aguas de riego dado por la norma NCh 1333.

VI.5.14. COMPARACIÓN CON NORMA NCh 409 (AGUA POTABLE)

Como se señaló anteriormente la comparación con la NCh 409 es sólo de referencia ya que la muestra de agua fue tomada previo cualquier tratamiento, como se muestra en la Tabla 24, el hierro es el parámetro que presentó más valores por sobre la norma de agua potable NCh409 con 26 pozos por sobre el límite de 0,3 [mg/L] para este elemento. En la misma línea, el manganeso presenta 14 pozos por sobre el límite de 0,1 [mg/L] para aquel elemento. Estos dos metales suelen estar correlacionados geoquímicamente a reservorios en la corteza terrestre comunes. Esta cualidad es posible observar en la Tabla 26, en base a niveles elevados según la norma. No obstante es necesario realizar un estudio estadístico más acabado, específicamente empleando matrices y diagramas de correlación, de manera de confirmar fehacientemente esta situación, la cual sería coherente ante una geología regional con alta presencia de material volcánico de composición intermedia a básica, enriquecida en minerales ferromagnesianos, así como también una significativa presencia de depósitos metálicos con mineralización de sulfuros de hierro y manganeso y óxidos de hierro.

Similar situación debe ser verificada con elementos como el magnesio y plomo, así como arsénico y zinc los cuales fueron parcialmente analizados, como también debe ser analizado con mayor detalle los casos puntuales en que las concentraciones de estos elementos son significativamente más elevados, revisando la geología local de cada uno de estos casos y las diferentes posibles fuentes contaminantes de carácter antrópico, análisis que escapa al enfoque regional del presente trabajo.

Por otro lado, un patrón similar al anteriormente señalado se puede observar en iones tales como cloruro y sulfato, y los Sólidos Disueltos Totales. Estos parámetros, en conjunto, suman 9 pozos por sobre el límite de norma de agua potable. Elevados valores de estos, como se indica en el análisis realizado para cada elemento, puede deberse a intrusiones salinas en pozos adyacentes a la costa como es evidente en el pozo 105-CALETA HORNOS, o bien por contaminación difusa desde superficie, como es observable en el sector aguas abajo de Ovalle en el acuífero Limarí, o bien condiciones naturales elevadas, como puede ser en el caso contacto de aguas subterráneas con niveles de yeso y/o sales presenten en la estratificación.

Tabla 26: Pozos que presentan uno o más parámetros sobre límites de norma NCh409 de agua potable. Si un pozo supera la norma se señala el valor obtenido para aquel parámetro. No se incluyen parámetros no detectados o que ningún pozo haya superado la norma.

N°	Nombre del Pozo	Acuífero	Comuna	pH	SO ₄ ⁻² (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SDT (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	As (mg/L)
5	BATUCO	Choapa	Salamanca	-	-	-	-	-	-	-	0,21	-	-
8	CUNCUMEN	Choapa	Salamanca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,012
14	HUENTELAUQUÉN NORTE	Choapa	Canela	-	-	-	-	-	-	-	0,68	-	-
21	CHUCHIÑÍ	Choapa	Salamanca	6,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	COLLIGUAY	Choapa	Salamanca	-	-	-	-	-	-	1,01	-	-	-
23	EL ARRAYÁN	Choapa	Salamanca	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-
24	EL TAMBO	Choapa	Salamanca	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-
25	EL TAMBO ORIENTE	Choapa	Salamanca	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-
26	LAS CAÑAS DOS	Choapa	Illapel	-	-	-	-	-	-	-	0,86	-	0,013
27	PERALILLO	Choapa	Illapel	-	-	-	-	-	-	0,42	-	-	-
30	QUEBRADA DE PAIHUANO	Elqui	Paiguano	-	-	-	-	-	-	0,36	-	-	-
31	COGOTÍ 18	Limarí	Combarbalá	6,36	-	-	-	-	-	-	0,13	-	-
34	LAS BARRANCAS-EL CHINEO	Limarí	Combarbalá	6,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	EL HUACHO	Limarí	Combarbalá	-	528,4	-	-	-	-	-	-	-	-
37	LA COLORADA	Limarí	Combarbalá	-	-	-	-	-	-	1,1	0,13	-	-
43	EL TRAPICHE	Limarí	Ovalle	-	1066,2	1529,6	252	-	5179	0,94	0,61	-	-
45	VILLA SECA	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	-	-	0,83	-	-	0,017
46	LA TORRE-LAS SOSSAS	Limarí	Ovalle	-	-	482,4	-	-	1790	-	-	-	-
55	GABRIELA MISTRAL (GABRIELA MISTRAL EL ROSARIO)	Elqui	La Serena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,011
56	LAS ROJAS (LAS ROJAS PUNTA DE PIEDRA)	Elqui	La Serena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,013
57	COQUIMBO ALTOVALSOL (COQUIMBO HACIENDA LORETO-ALTOVALSOL)	Elqui	La Serena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,011
59	MARQUESA-NUEVA TALCUNA	Elqui	Vicuña	-	-	-	-	-	-	0,34	-	-	-
60	PELÍCANA	Elqui	La Serena	-	-	-	-	-	-	2,1	0,36	-	0,013

N°	Nombre del Pozo	Acuífero	Comuna	pH	SO ₄ ⁻² (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SDT (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	As (mg/L)
61	LOS CÓNDORES	Quilimarí	Los Vilos	-	-	-	-	-	-	0,49	-	-	-
64	SAN MARCOS	Limarí	Combarbalá	-	-	-	-	-	-	0,4	0,38	-	-
65	CARCAMO	Choapa	Illapel	6,46	-	-	-	-	-	0,56	-	-	-
70	HUACHALALUME (GUACHALALUME)	Culebron- Lagunilla	La Serena	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,017
75	NUEVO FUTURO - POTRERILLO ALTO	Limarí	Punitaqui	-	-	-	-	-	-	0,39	-	-	-
78	SOCOS- BARRAZA ALTO	Limarí	Ovalle	-	-	854,6	147	-	2545	-	-	-	-
79	PUNTA COLORADA	Los Choros	La Higuera	-	-	-	-	-	-	1,08	-	-	0,014
81	QUILIMARÍ	Quilimarí	Los Vilos	-	-	-	-	-	-	-	0,2	-	-
87	SEMITA	Limarí	Monte Patria	-	-	-	-	-	-	0,95	-	-	-
88	BARRAZA	Limarí	Ovalle	-	528,7	739,5	-	-	2321	-	-	-	-
89	TABALÍ	Limarí	Ovalle	-	-	529,1	-	-	1704	1,19	-	-	-
92	LA PALOMA	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	-	-	0,77	0,56	-	-
95	PICHASCA	Limarí	Río Hurtado	-	-	-	-	-	-	6,27	-	-	-
96	FUNDINA	Limarí	Río Hurtado	-	-	-	-	-	-	2,14	0,12	-	-
99	SAN JULIÁN	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	-	-	3,79	0,27	-	-
100	SAMO BAJO	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
105	CALETA HORNOS	Sin acuífero	Caleta de Hornos	-	523,3	2267, 3	205,9	51,9	5617	-	-	-	-
110	LA PORTADA DE SOTAQUI	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	-	-	-	-	0,12	-
143	ALMIRANTE LATORRE	Elqui	La Serena	-	598,9	-	-	-	-	-	-	-	-
146	CAMARICO	Limarí	Punitaqui	-	-	-	-	-	-	0,4	0,3	-	-
149	PORVENIR	Limarí	Ovalle	-	-	800	-	-	2441	-	-	-	-
152	LA CALERA	Elqui	Vicuña	-	-	-	-	-	-	6,54	-	-	0,019
155	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	-	-	0,35	0,2	-	-

VI.5.15. COMPARACIÓN CON NORMA NCh 1333 (AGUA DE RIEGO)

Si bien las aguas analizadas en el presente estudio son principalmente destinadas a consumo de agua potable rural, resulta adecuado comparar los resultados obtenidos con los límites determinados por la norma de agua de riego NCh1333.

Cabe considerar que las aguas de origen subterráneo empleadas para riego probablemente son obtenidas de captaciones cercanas a los pozos estudiados APR, y por ende aguas del mismo reservorio (acuífero). Por otro lado, al presentar la Norma de riego límites menos exigentes por lo general, ciertos pozos que sobrepasen esta norma requerirían un grado mayor de atención, así como representarían condiciones particulares para cada pozo o sector.

La Norma de riego NCh1333 suele ser más exigente para parámetros correspondiente a sales, dado que estos, al ser incorporados a los suelos, son perjudiciales para diversos cultivos. A diferencia de la Norma NCh409 la cual es más exigente para parámetros correspondientes a metales pesados, no así la norma NCh1333.

El sodio presenta 35 pozos que sobrepasan la norma y lo siguen el sulfato con 17 casos y cloruro con 14 casos. Por otro lado, en la Tabla 28 se presenta la clasificación de cada pozo según su salinidad en base a lo indicado por la norma. En esta clasificación se emplean, en paralelo, la Conductividad Eléctrica, registrada en terreno, y los Sólidos Disueltos Totales, analizados por ANALAB.

Tabla 27: Pozos que presentan uno o más parámetros sobre límites de norma NCh1333 para agua de riego. Si un pozo supera la norma se señala el valor obtenido para aquel parámetro. No se incluyen parámetros no detectados o que ningún pozo haya superado la norma.

N°	Nombre del Pozo	Acuífero	Comuna	SO ₄ ⁻² (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (%)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)
1	CARQUINDAÑO	Choapa	Canela	-	253,0	49,9	-	-
08	CUNCUMÉN	Choapa	Salamanca	-	-	35,6	-	-
14	HUENTELAUQUÉN NORTE	Choapa	Canela	-	-	-	-	0,68
15	LAS CAÑAS	Choapa	Illapel	-	-	46,5	-	-
18	TUNGA NORTE	Choapa	Illapel	-	-	36,9	-	-
26	LAS CAÑAS DOS	Choapa	Illapel	-	-	45,8	-	0,86
27	PERALILLO	Choapa	Illapel	-	-	35,6	-	-
36	EL HUACHO	Limarí	Combarbalá	528,4	-	-	-	-
38	EL SAUCE	Limarí	Combarbalá	-	-	44,2	-	-
43	EL TRAPICHE	Limarí	Ovalle	1066,2	1529,6	-	-	0,61
44	ESTACIÓN RECOLETA	Limarí	Ovalle	-	-	37,5	-	-
46	LA TORRE-LAS SOSSAS	Limarí	Ovalle	-	482,4	44,3	-	-
48	VILLORRIO EL TALHUÉN	Limarí	Ovalle	-	-	41,4	-	-
52	LA COMPAÑÍA	Elqui	Vicuña	269,3	-	-	-	-
53	RIVADAVIA	Elqui	Vicuña	267,0	-	-	-	-
55	GABRIELA MISTRAL	Elqui	La Serena	405,5	-	44,7	-	-
57	COQUIMBO ALTOVALSOL	Elqui	La Serena	269,4	-	39,2	-	-
60	PELÍCANA	Elqui	La Serena	-	-	-	-	0,36
64	SAN MARCOS	Limarí	Combarbalá	-	-	-	-	0,38
67	EL TRAPICHE	Los Choros	La Higuera	-	-	46,0	-	-
68	LOS CHOROS	Los Choros	La Higuera	-	229,9	44,6	-	-
70	HUACHALALUME (GUACHALALUME)	Culebron Lagunillas	La Serena	-	-	84,7	-	-
71	PUNTA DE CHOROS	Los Choros	La Higuera	-	354,0	49,7	-	-
72	CHALINGA	Limarí	Ovalle	-	253,0	60,5	-	-
73	GRANEROS	Limarí	Punitaqui	-	-	38,3	-	-
74	LA GRANJITA-MORRO ALEGRE	Limarí	Punitaqui	257,2	-	-	-	-

N°	Nombre del Pozo	Acuífero	Comuna	SO ₄ ⁻² (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (%)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)
75	NUEVO FUTURO - POTRERILLO ALTO	Limarí	Punitaqui	-	-	40,0	-	-
76	LOS NOGALES-CAMPO LINDO	Limarí	Ovalle	-	-	47,1	-	-
78	SOCOS- BARRAZA ALTO	Limarí	Ovalle	458,7	854,6	40,3	-	-
79	PUNTA COLORADA	Los Choros	La Higuera	-	-	43,3	-	-
80	QUILITAPIA	Limarí	Combarbalá	-	-	36,2	-	-
81	QUILIMARÍ	Quilimarí	Los Vilos	-	-	40,0	-	-
88	BARRAZA	Limarí	Ovalle	528,7	739,5	40,0	-	-
89	TABALÍ	Limarí	Ovalle	457,8	529,1	44,3	-	-
92	LA PALOMA	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	0,56
95	PICHASCA	Limarí	Río Hurtado	-	-	-	6,27	-
99	SAN JULIÁN	Limarí	Ovalle	278,9	-	42,0	-	-
104	EL ROMERO	Elqui	La Serena	264,3	-	37,6	-	-
105	CALETA HORNOS	Sin acuífero	Caleta de Hornos	523,3	2267,3	62,5	-	-
143	ALMIRANTE LATORRE	Elqui	La Serena	598,9	-	-	-	-
144	ISLÓN	Elqui	La Serena	322,6	-	53,0	-	-
145	LAMBERT	Elqui	La Serena	262,8	266,0	41,7	-	-
146	CAMARICO	Limarí	Punitaqui	281,5	230,0	43,7	-	-
149	PORVENIR	Limarí	Ovalle	-	800,0	-	-	-
152	LA CALERA	Elqui	Vicuña	-	-	-	6,54	-
155	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	Limarí	Ovalle	-	371,0	61,6	-	-
156	ORURO ALTO	Limarí	Ovalle	-	203,0	61,2	-	-
157	LIMARÍ	Limarí	Ovalle	-	-	39,9	-	-

Tabla 28: Clasificación de pozos a partir de salinidad, en base a norma NCh1333 para aguas de riego. Se omiten los pozos clasificados como "Aguas con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales". (*) Medición por sobre límite de medición del dispositivo empleado. (**) SDT por sobre los límites indicados por la norma. Observación: Conductividad eléctrica es medida en terreno mediante equipo marca Hanna, modelo HI-98129, por su lado los Solidos Disueltos Totales son obtenido por medio del Método gravimétrico (ME – 31 – 2007. Manual SISS) realizado por laboratorio ANALAB (externo).

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Comuna	Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles		Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso		Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadoso	
				Conductividad eléctrica (CE) [µS/cm]	Solidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [µS/cm]	Solidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [µS/cm]	Solidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]
				750 < CE ≤ 1.500	500 < SDT ≤ 1.000	1.500 < CE ≤ 3.000	1.000 < SDT ≤ 2.000	3.000 < CE ≤ 7.500	2.000 < SDT ≤ 5.000
1	CARQUINDAÑO	Choapa	Canela	-	988	1606	-	-	-
21	CHUCHIÑÍ	Choapa	Salamanca	761	-	-	-	-	-
26	LAS CAÑAS DOS	Choapa	Illapel	936	642	-	-	-	-
28	PINTACURA SUR	Choapa	Illapel	789	582	-	-	-	-
36	EL HUACHO	Limarí	Combarbalá	1345	-	-	1109	-	-
43	EL TRAPICHE	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	3999 (*) < CE	5179(**)
44	ESTACIÓN RECOLETA	Limarí	Ovalle	804	536	-	-	-	-
46	LA TORRE-LAS SOSSAS	Limarí	Ovalle	-	-	2471	1790	-	-
47	LAGUNILLAS	Limarí	Ovalle	1015	-	-	-	-	-
48	VILLORRIO EL TALHUÉN	Limarí	Ovalle	840	-	-	-	-	-
49	DIAGUITAS	Elqui	Vicuña	-	660	-	-	-	-
50	EL TAMBO	Elqui	Vicuña	755	704	-	-	-	-
51	GUALLIGUAICA	Elqui	Vicuña	795	613	-	-	-	-
52	LA COMPAÑÍA	Elqui	Vicuña	1018	764	-	-	-	-
53	RIVADAVIA	Elqui	Vicuña	876	631	-	-	-	-
54	SAN ISIDRO-CALINGASTA	Elqui	Vicuña	769	552	-	-	-	-

				Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles		Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso		Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadoso	
N°	Nombre Pozo	Acuífero	Comuna	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]
				750 < CE ≤ 1.500	500 < SDT ≤ 1.000	1.500 < CE ≤ 3.000	1.000 < SDT ≤ 2.000	3.000 < CE ≤ 7.500	2.000 < SDT ≤ 5.000
55	GABRIELA MISTRAL	Elqui	La Serena	1300	-	-	-	-	-
56	LAS ROJAS	Elqui	La Serena	760	660	-	-	-	-
57	COQUIMBO ALTOVALSOL	Elqui	La Serena	1119	882	-	-	-	-
58	EL MOLLE	Elqui	Vicuña	764	-	-	-	-	-
59	MARQUESA-NUEVA TALCUNA	Elqui	Vicuña	772	526	-	-	-	-
60	PELÍCANA	Elqui	La Serena	-	540	-	-	-	-
63	LOS TAPIA	Limarí	Monte Patria	758	-	-	-	-	-
67	EL TRAPICHE	Los Choros	La Higuera	1276	692	-	-	-	-
68	LOS CHOROS	Los Choros	La Higuera	1352	790	-	-	-	-
69	GUANGUALÍ	Quilimarí	Los Vilos	773	511	-	-	-	-
70	HUACHALALUM E (GUACHALALUME)	Culebron Lagunillas	La Serena	960	637	-	-	-	-
71	PUNTA DE CHOROS	Los Choros	La Higuera	-	-	1675	1164	-	-
72	CHALINGA	Limarí	Ovalle	1261	740	-	-	-	-
73	GRANEROS	Limarí	Punitaqui	1033	581	-	-	-	-
74	LA GRANJITA-	Limarí	Punitaqui	1038	683	-	-	-	-

				Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles		Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso		Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadoso	
N°	Nombre Pozo	Acuífero	Comuna	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]
				750 < CE ≤ 1.500	500 < SDT ≤ 1.000	1.500 < CE ≤ 3.000	1.000 < SDT ≤ 2.000	3.000 < CE ≤ 7.500	2.000 < SDT ≤ 5.000
MORRO ALEGRE									
76	LOS NOGALES-CAMPO LINDO	Limarí	Ovalle	1490	916	-	-	-	-
78	SOCOS-BARRAZA ALTO	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	3594	2545,2
79	PUNTA COLORADA	Los Choros	La Higuera	1013	659	-	-	-	-
82	COLLIGUAY	Limarí	Monte Patria	785	-	-	-	-	-
83	EL MAITÉN	Limarí	Monte Patria	821	-	-	-	-	-
84	FLOR DEL VALLE	Limarí	Monte Patria	850	562	-	-	-	-
86	PEDREGAL	Limarí	Monte Patria	-	603	-	-	-	-
88	BARRAZA	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	3467	2321,6
89	TABALÍ	Limarí	Ovalle	-	-	2828	1704,8	-	-
95	PICHASCA	Limarí	Río Hurtado	-	504	-	-	-	-
96	FUNDINA	Limarí	Río Hurtado	-	-	-	-	-	-
97	HURTADO-EL CHAÑAR	Limarí	Río Hurtado	-	-	-	-	-	-
98	LAS BREAS	Limarí	Río Hurtado	934	-	-	-	-	-
99	SAN JULIÁN	Limarí	Ovalle	1470	992	-	-	-	-
100	SAMO BAJO	Limarí	Ovalle	-	-	-	-	-	-
101	VALLE HERMOSO	Limarí	Combarbalá	-	-	-	-	-	-
102	JUNTAS-DOS RÍOS	Limarí	Monte Patria	-	548	-	-	-	-

				Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles		Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso		Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadoso	
N°	Nombre Pozo	Acuífero	Comuna	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]
				750 < CE ≤ 1.500	500 < SDT ≤ 1.000	1.500 < CE ≤ 3.000	1.000 < SDT ≤ 2.000	3.000 < CE ≤ 7.500	2.000 < SDT ≤ 5.000
103	RAPEL	Limarí	Monte Patria	-	-	-	-	-	-
104	EL ROMERO	Elqui	La Serena	1141	834	-	-	-	-
105	CALETA HORNOS	Sin acuífero	Caleta de Hornos	785	-	-	-	-	5617(**)
106	CHAPILCA	Elqui	Vicuña	-	516	-	-	-	-
108	VARILLAR	Elqui	Vicuña	785	557	-	-	-	-
109	EL QUEÑE	Choapa	Salamanca	-	-	-	-	-	-
110	LA PORTADA DE SOTAQUI	Limarí	Ovalle	887	519	-	-	-	-
143	ALMIRANTE LATORRE	Elqui	La Serena	-	-	1910	1438	-	-
144	ISLÓN	Elqui	La Serena	1489	-	-	1033	-	-
145	LAMBERT	Elqui	La Serena	-	-	1535	1077	-	-
146	CAMARICO	Limarí	Punitaqui	-	882	1540	-	-	-
147	LA HIGUERA DE PUNITAQUI	Limarí	Punitaqui	950	-	-	-	-	-
148	LAS RAMADAS DE PUNITAQUI	Limarí	Punitaqui	804	545,2	-	-	-	-
149	PORVENIR	Limarí	Ovalle	-	-	2018	-	-	2441
150	EL GUINDO	Limarí	Ovalle	764	-	-	-	-	-
151	PUNTA AZUL	Elqui	Vicuña	-	674	-	-	-	-
152	LA CALERA	Elqui	Vicuña	1112	914	-	-	-	-
153	VIÑITA ALTA (MARQUESA)	Elqui	Vicuña	-	-	-	-	-	-

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Comuna	Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles		Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso		Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadoso	
				Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]	Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]	Sólidos Disueltos Totales (SDT) [mg/L]
				750 < CE ≤ 1.500	500 < SDT ≤ 1.000	1.500 < CE ≤ 3.000	1.000 < SDT ≤ 2.000	3.000 < CE ≤ 7.500	2.000 < SDT ≤ 5.000
154	TAMBILLOS	Culebrón Lagunillas	Coquimbo	951	719	-	-	-	-
155	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	Limarí	Ovalle	-	-	1970	1104	-	-
156	ORURO ALTO	Limarí	Ovalle	1420	771	-	-	-	-
157	LIMARÍ	Limarí	Ovalle	1033	588	-	-	-	-

(*) Medición por sobre límite de medición del dispositivo empleado.

(**) SDT por sobre los límites indicados por la norma. Observación: Conductividad eléctrica es medida en terreno mediante equipo marca Hanna, modelo HI-98129, por su lado los Sólidos Disueltos Totales son obtenido por medio del Método gravimétrico (ME – 31 – 2007. Manual SISS) realizado por laboratorio ANALAB (externo).

VII. CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS

VII.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS LOCALES

La elección de parámetros locales para el cálculo de índice de calidad, lo cuales se suma a los parámetros fijos (SDT, cloruros, sodio, fosfatos, magnesio, sulfato, calcio y nitratos), requiere del análisis de diferentes condiciones locales. Estos parámetros dan cuenta de la calidad química del acuífero en cuanto a las características hidrogeoquímicas de ocurrencia natural o de actividades locales que se desarrollen en el acuífero. La elección de los parámetros químicos locales se realizó siguiendo los siguientes pasos mencionados por la DGA (2009), en su estudio “Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos”. Estos son:

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

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

VII.1.1. OCURRENCIA NATURAL CARACTERIZACIÓN DE POSIBLES CONTAMINANTES DE ORIGEN NATURAL

La calidad físico química depende principalmente de la composición del agua de recarga, las interacciones entre el agua-suelo, suelo-gas y las rocas con las cuales se encuentra en contacto en la zona no saturada, tiempo de residencia y de las distintas reacciones que se producen en el sector acuífero. Por lo tanto, la calidad puede ser variable incluso en una misma área si existen rocas de distinta composición y solubilidad (DGA, 2009).

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

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

En la Tabla 29 se presentan los principales posibles parámetros contaminantes de origen natural (según DGA, 2009). En esta Tabla se observa, que la Región Metropolitana de Santiago, lugar de estudio, los contaminantes naturales típicos para uso de Agua Potable corresponden a las concentraciones de Hierro, tanto en aguas superficiales como subterráneas.

Tabla 29: Contaminantes naturales típicos de aguas superficiales y subterráneas de Chile (DGA, 2009).

Región	Considerados en NCh409/1	No considerados en NCh409/1
XV y I	Cl, SO ₄ , SDT, As, Mn	Al, B, Li, Mo, Ag, Ba, Asbesto, Sb, Na, U
II	As, Cl	Al, B, Li, Mo, Ag, Be, Ba, Sb, Na, U
III	SO ₄ , SDT	Al, B, Li, Mo, Va, Ag, Ba, Sb, Na, U
IV	-	Mo, V, Ag, Ba, Asbesto, Sb, U
V	Fe, Mn	Al, Mo, Ba
RM	Fe	Al, Mo, Ba
VI	-	Al, Mo, Sb, U
VII	Fe	Al, Li, V, Asbesto
VIII	Fe, Mn	Al, Ni, Asbesto
IX	Fe, Mn	Al, Mo, Ni, Asbesto
XIV y X	-	Al, Ni, Asbesto, Sb
XI	Fe	Mo, Ag, U
XII	-	Sb

VII.1.2. CARACTERIZACIÓN DE POSIBLES CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTRÓPICO

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

La Tabla 30 muestra un resumen con los metales pesados asociados a distintas actividades antrópicas realizadas en la Cuenca de Santiago, y parámetros químicos que pudieran estar relacionados a estas actividades.

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

Tabla 30: Metales y parámetros químicos asociados a distintos tipos de actividad antrópica (DGA, 2009)

Actividad	Tipo de Actividad	Metales Asociados
Industria	Metalúrgica	As, Be, Bi, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, V, Zn
	Química	Ba, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Sn, V, Zn
	Papel	Cr, Cu, Pb, Hg, Ni
	Textiles	As, Ba, Cd, Cu, Pb, Hg, Ni
	Agroquímicos	As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Mn, Ni, Zn
Agricultura	Impurezas en fertilizantes	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn
	Pesticidas	Cu, As, Hg, Pb, Mn, Zn
	Abonos	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn
	Líquidos percolados	Cd, Ni, Cu, Pb, Zn
Otros	Preservantes de la madera y corrosión de objetos metálicos	As, Cu, Zn, Cd
Residuos Urbanos	Aguas Servidas	Pb, Cu, Zn, Cr
	Rellenos Sanitarios	Cd, Cu, Pb, Sn, Cr, Hg, Co

VII.1.3. PARÁMETROS LOCALES POR ACUÍFERO

Bajo el análisis de los diferentes parámetros no incluidos como parámetros fijos para el cálculo de índice de calidad, se puede observar en la Tabla 24 que los parámetros que más frecuentemente exceden al norma son el Hierro (26) Manganeso (14) Arsénico (10) y Plomo (1), siendo este último de especial cuidado al ser altamente peligro para la salud humana incluso en bajas concentraciones.

Por otro lado, bajo la interpretación de la disposición de los pozos en el espacio y su relación con la geología regional, es posible inferir una relación con un concentración natural tanto de Hierro como de Manganeso, dado posiblemente la lixiviación de sulfuro de hierro (pirita, calcopirita, etc.) presenten en altas concentraciones en zonas de enriquecimientos de yacimientos minerales propios de la franja Metalogénica del cretácico inferior y el correspondiente batolito mineralizar.

Tabla 31: Criterios de Selección de parámetros locales según metodología descrita en DGA (2009)

Criterios de selección parámetros locales	Hierro	Plomo	Manganeso
i) Parámetros más abundantes con respecto a una de las normas consideradas.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ii) Parámetros más riesgosos para la salud.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iii) Parámetros minoritarios de mayor concentración.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
iv) Parámetros no correlacionados y representativos de actividades antrópicas distintas.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Como la distribución de pozos con concentraciones por sobre la norma NCh409 de hierro y manganeso son relativamente homogénea en la región, se opta por calcular el índice de calidad considerando estos como parámetros locales. En paralelo, y sólo par el acuífero Limarí, también se calcula el índice de calidad considerando el plomo, en lugar del manganeso, como parámetro local junto al hierro, esto ya que en el APR 10 –LA PORTADA DE SOTAQUÍ, excede la norma NCh409.

1.1.1.1. HIERRO

Como lo muestra la Tabla 31, el hierro es uno de los parámetros más abundantes por sobre la norma, con 26 casos por sobre el límite de la norma NCh409, y 2 caso por sobre la norma NCh1333. Siendo también uno de los parámetros minoritarios de mayor concentración, en casos por sobre los 6 [mg/L].

En la gran mayoría de los casos su concentración por sobre la norma podría corresponder a una condición natural, como se ha señalado en los acápite anteriores, salvo en algunas excepciones en los cuales es plausible pensar en algún tipo de contaminación de carácter antrópico, dado actividades mineras cercanas. Cabe también considerar procedencia de este elemento en las aguas por efecto de desgaste de los materiales empleados para la construcción de los pozos APR, pero se desestima en cierto grado este factor pensando en pozos con un suministro continuo y por ende sistemas lavados.

Por lo anteriormente expuesto se decide incluir al Hierro como un parámetro local para el cálculo de Índice de Calidad por pozo en el presente estudio

1.1.1.2. MANGANESO

Seguido al Hierro, el manganeso presenta una significativa abundancia de pozos por sobre la norma, con 14 casos sobre el límite de la norma NCh409, y 3 casos por sobre el límite de la norma NCh1333.

Las concentraciones elevadas de este elemento podrían estar vinculadas a diversos factores, tanto geológicos, como contaminación de carácter antropogénico. Por un lado, su distribución heterogénea con niveles elevados en la región podría enmascarar una condición natural, el cual podría ser evidenciado por la aparente correlación con el hierro, elementos afines geoquímicamente. En cambio, en algunos puntos específicos puede ser presumida una posible contaminación por actividad minera específicamente depósitos de relaves, o bien por contaminación difusa a partir de pesticidas empleados en la agricultura local.

Por lo anterior, se consideró al Manganeso como parámetro local para el cálculo del Índice de Calidad por pozo en el presente estudio.

1.1.1.3. PLOMO

El plomo representa uno de los parámetros más riesgosos para la salud encontrándose por sobre alguna norma sólo en 1 caso: el pozo 110-LA PORTADA DE SOTAQUÍ, con 0,12 [mg/L], poco más del doble al límite de la norma NCh409. En la mayoría de los pozos este elemento no fue detectado y en lo que si lo fue, sus niveles no superan la norma.

Por lo anterior no se considera el plomo como parámetro local para el cálculo de Índice de Calidad por pozo. No obstante se recomienda un estudio más acabado seguimiento a pozos que mostraron presencia de este elemento, especialmente en el pozo 110.

VII.2. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD POR APR

Como se señala en el apartado anterior, los parámetros empleados para el cálculo de Índice de Calidad por pozo son el Hierro y Manganeseo. En la Tabla 32 se muestran los valores de corte que determinan cada nivel de calidad según lo señalado en la metodología. Así mismo, en las Figuras 106 y 107 se muestra la distribución y los casos y porcentajes de los pozos según su Índice de Calidad. La Tabla 33 muestra la distribución de pozos según su índice de calidad, y sus porcentajes asociados, para cada acuífero.

Tabla 32: Valores de Corte (VC) para clasificación de índice de calidad por parámetro. Valores son los señalados en estudio DGA (2009). Parámetros locales (a) fueron empleados en todos los acuíferos. Parámetros locales (b) fue empleado en acuífero Limarí.

Parámetro	Unidad	VC1	VC2	VC3	VC4	
Parámetros Fijos	SDT	(mg/L)	1.200	1.500	2.000	6.000
	Cloruro	(mg/L)	250	400	1.064	1.600
	Sulfato	(mg/L)	250	500	961	10.000
	Calcio	(mg/L)	100	200	401	4.000
	Sodio	(mg/L)	200	200	920	6.000
	Magnesio	(mg/L)	100	125	250	2.500
	Nitratos	(mg/L)	10	50	133	200
Parámetros Locales (a)	Hierro	(mg/L)	0,3	0,3	5	200
	Manganeseo	(mg/L)	0,05	0,1	0,2	40

Índice de Calidad por APR Región de Coquimbo (Parámetros Locales: Hierro-Manganeso)

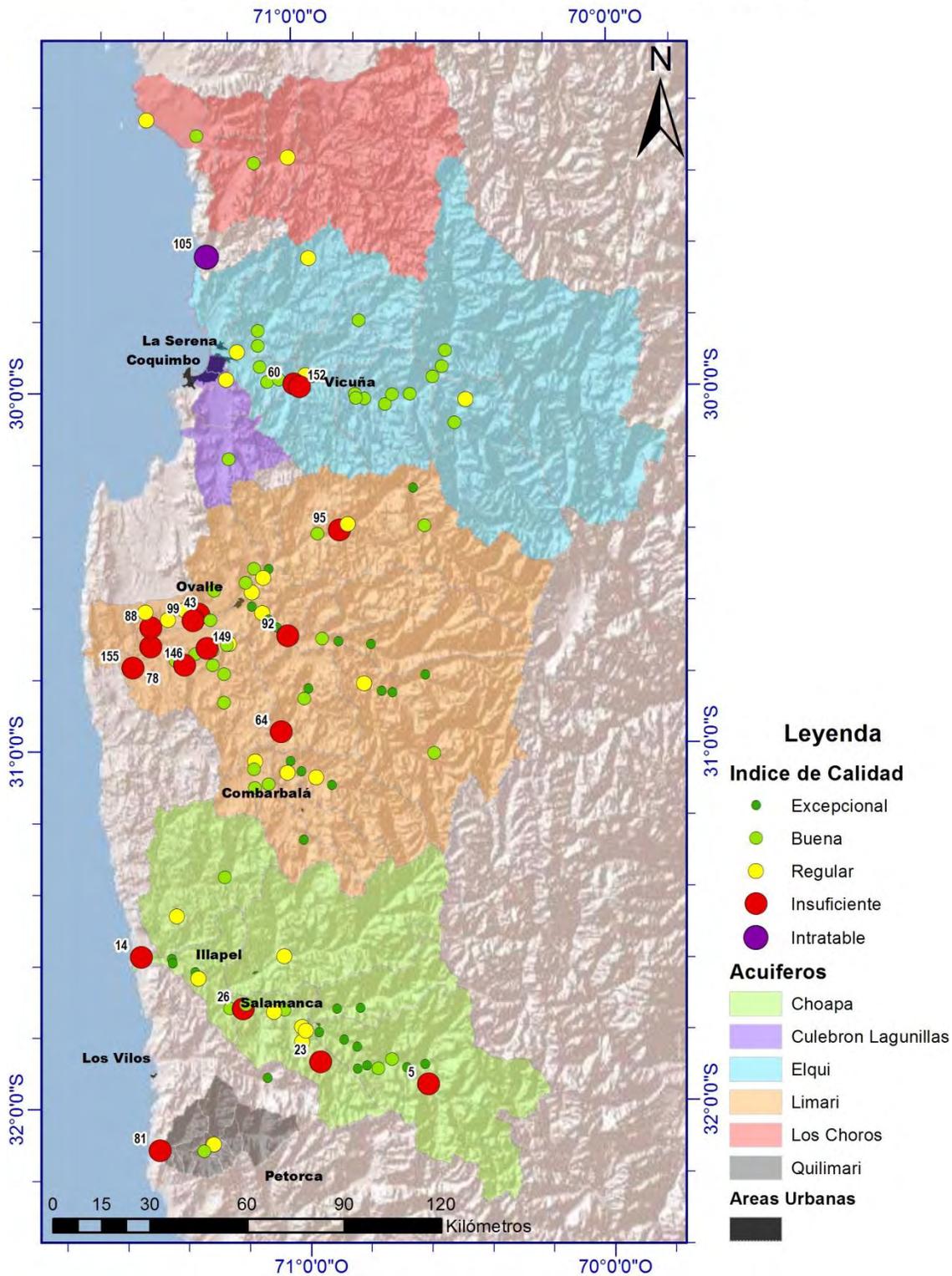


Figura 109: Índice de Calidad por pozo APR, región de Coquimbo. Parámetros Locales: Hierro y Manganeso.

Pozos APR según su Índice de Calidad año 2016, Región de Coquimbo (TOTAL: 119 pozos)

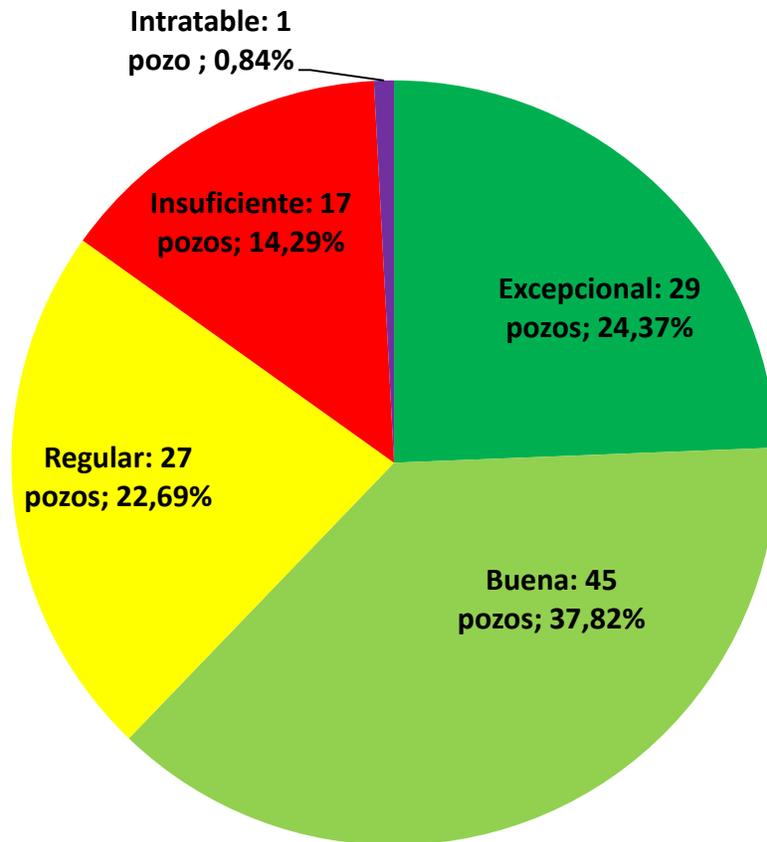


Figura 110: Pozos APR según índice de calidades calculadas considerando parámetros locales el hierro y manganeso.

Tabla 33: Número de casos y porcentajes asociados de pozos según su Índice de Calidad para cada acuífero.

Calidad	Total					Los Choros				
	Excepcional	Buena	Regular	Insuficiente	Intratable	Excepcional	Buena	Regular	Insuficiente	Intratable
N° de pozos	29	45	27	17	1	0	2	2	0	0
%	24,4	37,8	22,7	14,3	0,8	0,0	50,0	50,0	0,0	0,0
Calidad	Elqui					Culebrón Lagunillas				
	Excepcional	Buena	Regular	Insuficiente	Intratable	Excepcional	Buena	Regular	Insuficiente	Intratable
N° de pozos	1	16	4	2	0	0	1	1	0	0
%	4,3	69,6	17,4	8,7	0,0	0,0	50,0	50,0	0,0	0,0
Calidad	Limarí					Choapa				
	Excepcional	Buena	Regular	Insuficiente	Intratable	Excepcional	Buena	Regular	Insuficiente	Intratable
N° de pozos	15	19	12	10	0	12	6	7	4	0
%	26,8	33,9	21,4	17,9	0,0	41,4	20,7	24,1	13,8	0,0
Calidad	Quilimarí					Sin Acuífero				
	Excepcional	Buena	Regular	Insuficiente	Intratable	Excepcional	Buena	Regular	Insuficiente	Intratable
N° de pozos	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
%	0,0	33,3	33,3	33,3	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	50,0

VII.2.1. ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO LOS CHOROS

Ningún pozo del acuífero Los Choros presenta un IC Insuficiente o Intratable. Los parámetros con mayor influencia en el IC son el sodio, en un eventual efecto de intrusión salina en el pozo 71-PUNTA CHORES, y Hierro En el pozo 79-PUNTA COLORADA.

Tabla 34: Índice de Calidad por APR de acuífero Los Choros. Parámetros locales: Hierro y manganeso.

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
67	EL TRAPICHE	Los Choros	Los Choros Altos	Elqui	La Higuera	1,51	Buena	Ca,NO3
68	LOS CHOROS	Los Choros	Los Choros Bajos	Elqui	La Higuera	1,56	Buena	Ca,NO3
71	PUNTA DE CHOROS	Los Choros	Playa Los Choros	Elqui	La Higuera	2,24	Regular	Na
79	PUNTA COLORADA	Los Choros	Punta Colorada	Elqui	La Higuera	2,22	Regular	Fe

VII.2.2. ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO ELQUI

Dos pozos del acuífero Elqui presentan un IC Insuficiente, estos son el pozo 60-PELICANA, por elevados niveles de manganeso, y 152-LA CALERA, con niveles elevados de hierro. Estos dos pozos son cercanos entre sí, y pueden estar influenciados por la presencia de relaves mineros adyacentes.

Tabla 35: Índice de Calidad por APR de acuífero Elqui. Parámetros locales: Hierro y manganeso.

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
29	LA JARILLA	Elqui	Claro	Elqui	Paiguano	1,60	Buena	Mn
30	QUEBRADA DE PAIHUANO	Elqui	Claro	Elqui	Paiguano	2,07	Regular	Fe
49	DIACUITAS	Elqui	Elqui Alto	Elqui	Vicuña	1,27	Buena	NO3
50	EL TAMBO	Elqui	Elqui Alto	Elqui	Vicuña	1,51	Buena	Ca,NO3
51	GUALLIGUAICA	Elqui	Elqui Alto	Elqui	Vicuña	1,55	Buena	Ca,NO3
52	LA COMPAÑÍA	Elqui	Elqui Alto	Elqui	Vicuña	1,74	Buena	SO4, Ca,NO3
53	RIVADAVIA	Elqui	Elqui Alto	Elqui	Vicuña	1,62	Buena	SO4, Ca,NO3
54	SAN ISIDRO-CALINGASTA	Elqui	Elqui Alto	Elqui	Vicuña	1,53	Buena	Ca,NO3
55	GABRIELA MISTRAL	Elqui	Elqui Bajo	Elqui	La Serena	1,81	Buena	SO4, Ca
56	LAS ROJAS	Elqui	Elqui Bajo	Elqui	La Serena	1,54	Buena	Ca,NO3
57	COQUIMBO ALTOVALSOL	Elqui	Elqui Bajo	Elqui	La Serena	1,61	Buena	SO4, Ca,NO3
58	EL MOLLE	Elqui	Elqui Medio	Elqui	Vicuña	0,36	Excepcional	
59	MARQUESA-NUEVA TALCUNA	Elqui	Elqui Medio	Elqui	Vicuña	2,07	Regular	Fe
60	PELÍCANA	Elqui	Elqui Medio	Elqui	La Serena	3,01	Insuficiente	Mn
104	EL ROMERO	Elqui	Santa Gracia	Elqui	La Serena	1,80	Buena	SO4, Ca,NO3
106	CHAPILCA	Elqui	Turbio	Elqui	Vicuña	1,25	Buena	NO3
108	VARILLAR	Elqui	Turbio	Elqui	Vicuña	1,51	Buena	Ca,NO3
143	ALMIRANTE LATORRE	Elqui	Santa Gracia	Elqui	La Serena	2,62	Regular	SO4
144	ISLÓN	Elqui	Santa Gracia	Elqui	La Serena	2,22	Regular	Na
145	LAMBERT	Elqui	Santa Gracia	Elqui	La Serena	1,67	Buena	Cl, SO4, Ca,NO3, Pb
151	PUNTA AZUL	Elqui	Elqui Alto	Elqui	Vicuña	1,59	Buena	Ca,NO3
152	LA CALERA	Elqui	Elqui Medio	Elqui	Vicuña	3,03	Insuficiente	Fe
153	VIÑITA ALTA (MARQUESA)	Elqui	Elqui Medio	Elqui	Vicuña	1,37	Buena	NO3

VII.2.3. ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO CULEBRÓN-LAGUNILLAS

Ningún pozo del acuífero Culebrón-Lagunillas presenta un IC Insuficiente o intratable, no obstante los únicos dos pozos estudiados para este acuífero poder ser no representativos del estado del acuífero, el cual puede estar afectado, en algún grado, por contaminación difusa de carácter antrópico. Se recomienda extender los pozos monitoreados en este acuífero a al menos el doble.

Tabla 36: Índice de Calidad por APR de acuífero Culebrón-Lagunillas. Parámetros locales: Hierro y manganeso.

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
154	TAMBILLOS	Culebron Lagunillas	Lagunillas	Elqui	Coquimbo	1,97	Buena	NO3
70	HUACHALALUME (GUACHALALUME)	Culebron Lagunillas	Peñuelas	Elqui	La Serena	2,22	Regular	Na

VII.2.4. ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO LIMARÍ

Para el acuífero Limarí se obtuvo un total de 10 pozos con un IC de Insuficiente, y ningún pozo en condición Intratable. No obstante cabe señalar que el pozo 43-ELTRAPICHE presenta un IC cuantitativo de 3,96 (Tabla 37) lo que significa, como lo indica la metodología, que es un pozo ad portas de ser clasificado como Intratable (llegando a IC 4,0 se considera Intratable).

Los parámetros que otorgan calidades Insuficiente son por un lado los iones y macromoléculas tales como Cloruros, sulfatos y Nitratos, y Sólidos Disueltos Totales, en especial en sectores de alta vulnerabilidad de acuífero y que a su vez evidencian recargas superficiales por aguas de riego, como lo es aguas abajo de Ovalle. Por otro lado, El Hierro y Manganeso son parámetros recurrentes en otorgar calidad insuficiente, pero estos poseen una distribución más dispersa en comparación a las macromoléculas.

Tabla 37: Índice de Calidad por APR de acuífero Limarí.

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
31	COGOTÍ 18	Limarí	Cogoti	Limarí	Combarbalá	2,65	Regular	Mn
32	LA ISLA	Limarí	Cogoti	Limarí	Combarbalá	0,13	Excepcional	
33	LA LIGUA DE COGOTÍ	Limarí	Cogoti	Limarí	Combarbalá	0,15	Excepcional	
34	LAS BARRANCAS-EL CHINEO	Limarí	Cogoti	Limarí	Combarbalá	0,12	Excepcional	
35	SORUCO	Limarí	Rio Pama	Limarí	Combarbalá	1,27	Buena	NO3
36	EL HUACHO	Limarí	Quebrada Grande	Limarí	Combarbalá	2,55	Regular	SO4
37	LA COLORADA	Limarí	Combarbala	Limarí	Combarbalá	2,65	Regular	Fe, Mn
38	EL SAUCE	Limarí	Quebrada Grande	Limarí	Combarbalá	1,27	Buena	NO3
43	EL TRAPICHE	Limarí	El Ingenio	Limarí	Ovalle	3,96	Insuficiente	SDT, Cl, SO4, Ca, Mg, Mn
44	ESTACIÓN RECOLETA	Limarí	El Ingenio	Limarí	Ovalle	1,65	Buena	NO3
45	VILLA SECA	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	2,17	Regular	Fe
46	LA TORRE-LAS SOSSAS	Limarí	El Ingenio	Limarí	Ovalle	2,90	Regular	SDT, Cl, Na
47	LACUNILLAS	Limarí	El Ingenio	Limarí	Ovalle	1,28	Buena	NO3
48	VILLORRIO EL TALHUÉN	Limarí	El Ingenio	Limarí	Ovalle	1,35	Buena	NO3
62	HUATULAME (GUATULAME)	Limarí	Guatulame	Limarí	Monte Patria	0,28	Excepcional	
63	LOS TAPIA	Limarí	Guatulame	Limarí	Monte Patria	1,44	Buena	NO3
64	SAN MARCOS	Limarí	Guatulame	Limarí	Combarbalá	3,01	Insuficiente	Mn
72	CHALINGA	Limarí	Punitaqui	Limarí	Ovalle	1,63	Buena	Cl, NO3

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
73	GRANEROS	Limarí	Punitaqui	Limarí	Punitaqui	1,50	Buena	NO3
74	LA GRANJITA-MORRO ALEGRE	Limarí	Punitaqui	Limarí	Punitaqui	1,51	Buena	SO4, Ca
75	NUEVO FUTURO - POTRERILLO ALTO	Limarí	Punitaqui	Limarí	Punitaqui	2,08	Regular	Fe
76	LOS NOGALES-CAMPO LINDO	Limarí	Punitaqui	Limarí	Ovalle	1,55	Buena	Ca, NO3
77	NUEVA AURORA	Limarí	Punitaqui	Limarí	Ovalle	1,41	Buena	NO3
78	SOCOS- BARRAZA ALTO	Limarí	Punitaqui	Limarí	Ovalle	3,42	Insuficiente	SDT
80	QUILITAPIA	Limarí	Quebrada Grande	Limarí	Combarbalá	1,44	Buena	NO3
82	COLLIGUAY	Limarí	Rio Grande	Limarí	Monte Patria	0,18	Excepcional	
83	EL MAITÉN	Limarí	Rio Grande	Limarí	Monte Patria	0,21	Excepcional	
84	FLOR DEL VALLE	Limarí	Rio Grande	Limarí	Monte Patria	1,58	Buena	Ca, NO3
85	LAS RAMADAS DE PEJERREYES	Limarí	Punitaqui	Limarí	Monte Patria	1,40	Buena	Pb
86	PEDREGAL	Limarí	Rio Grande	Limarí	Monte Patria	0,36	Excepcional	
87	SEMITA	Limarí	Rio Grande	Limarí	Monte Patria	2,19	Regular	Fe
88	BARRAZA	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	3,39	Insuficiente	SDT
89	TABALÍ	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	2,85	Regular	

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
90	SANTA CATALINA	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	0,27	Excepcional	
91	CARACHILLA	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	0,18	Excepcional	
92	LA PALOMA	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	3,01	Insuficiente	Mn
93	ALGARROBO	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	0,37	Excepcional	
94	SAMO ALTO	Limarí	Rio Hurtado	Limarí	Río Hurtado	1,40	Buena	Mn
95	PICHASCA	Limarí	Rio Hurtado	Limarí	Río Hurtado	3,03	Insuficiente	Fe
96	FUNDINA	Limarí	Rio Hurtado	Limarí	Río Hurtado	2,60	Regular	Fe, Mn
97	HURTADO-EL CHAÑAR	Limarí	Rio Hurtado	Limarí	Río Hurtado	0,24	Excepcional	
98	LAS BREAS	Limarí	Rio Hurtado	Limarí	Río Hurtado	1,40	Buena	NO3, Pb
99	SAN JULIÁN	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	3,01	Insuficiente	Mn
100	SAMO BAJO	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	2,20	Regular	Fe
101	VALLE HERMOSO	Limarí	Rio Pama	Limarí	Combarbalá	0,15	Excepcional	
102	JUNTAS-DOS RÍOS	Limarí	Rio Rapel	Limarí	Monte Patria	0,29	Excepcional	
103	RAPEL	Limarí	Rio Rapel	Limarí	Monte Patria	0,28	Excepcional	
110	LA PORTADA DE SOTAQUI	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	2,02	Regular	Pb
146	CAMARICO	Limarí	Punitaqui	Limarí	Punitaqui	3,01	Insuficiente	Mn
147	LA HIGUERA DE PUNITAQUI	Limarí	Punitaqui	Limarí	Punitaqui	1,27	Buena	NO3
148	LAS RAMADAS DE PUNITAQUI	Limarí	Rio Grande	Limarí	Punitaqui	1,57	Buena	NO3
149	PORVENIR	Limarí	Punitaqui	Limarí	Ovalle	3,41	Insuficiente	SDT

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
150	EL GUIINDO	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	0,33	Excepcional	
155	ALCONES (ACUA DE LA VIDA)	Limarí	Punitaqui	Limarí	Ovalle	3,01	Insuficiente	Mn
156	ORURO ALTO	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	2,23	Regular	Na
157	LIMARÍ	Limarí	Rio Limarí	Limarí	Ovalle	1,53	Buena	Ca, NO3

VII.2.5. ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO CHOAPA

Cuatro pozos del acuífero Choapa presentan un IC Insuficiente, todos ellos por algún metal tal como el Hierro o Manganeso. En términos generales los pozos del acuífero Choapa no evidencian contaminación difusa de carácter antrópico desde actividades superficiales como agricultura e industria en general.

Tabla 38: Índice de Calidad por APR de acuífero Choapa. Parámetros locales: Hierro y manganeso.

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
1	CARQUINDAÑO	Choapa	Canela	Choapa	Canela	2,22	Regular	Na
2	LOS POZOS	Choapa	Canela	Choapa	Canela	1,29	Buena	NO3
3	ARBOLEDA GRANDE	Choapa	Chalinga	Choapa	Salamanca	0,18	Excepcional	
4	SAN ACUSTÍN	Choapa	Chalinga	Choapa	Salamanca	0,24	Excepcional	
5	BATUCO	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	3,01	Insuficiente	Mn
6	CHILLEPÍN	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	1,40	Buena	Pb
7	COIRÓN	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	1,40	Buena	Pb
8	CUNCUMÉN	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	0,21	Excepcional	
9	JORQUERA	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	0,19	Excepcional	
10	LLIMPO	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	0,26	Excepcional	
11	PUNTA NUEVA	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	0,35	Excepcional	
12	QUELÉN ALTO	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	0,07	Excepcional	
13	TRANQUILLA	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	0,24	Excepcional	
14	HUENTELAUQUÉN NORTE	Choapa	Choapa Bajo	Choapa	Canela	3,02	Insuficiente	Mn
15	LAS CAÑAS	Choapa	Choapa Bajo	Choapa	Illapel	1,40	Buena	Pb
16	MINCHA NORTE	Choapa	Choapa Bajo	Choapa	Canela	0,30	Excepcional	
17	MINCHA SUR	Choapa	Choapa Bajo	Choapa	Canela	0,18	Excepcional	
18	TUNGA NORTE	Choapa	Choapa Bajo	Choapa	Illapel	0,19	Excepcional	
19	TUNGA SUR	Choapa	Choapa	Choapa	Illapel	2,06	Regular	Fe

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
			Bajo					
21	CHUCHIÑÍ	Choapa	Choapa Medio	Choapa	Salamanca	1,37	Buena	NO3
22	COLLIGUAY	Choapa	Choapa Medio	Choapa	Salamanca	2,20	Regular	Fe
23	EL ARRAYÁN	Choapa	Choapa Medio	Choapa	Salamanca	3,03	Insuficiente	Fe
24	EL TAMBO	Choapa	Choapa Medio	Choapa	Salamanca	2,24	Regular	Fe
25	EL TAMBO ORIENTE	Choapa	Choapa Medio	Choapa	Salamanca	2,24	Regular	Fe
26	LAS CAÑAS DOS	Choapa	Choapa Medio	Choapa	Illapel	3,02	Insuficiente	Mn
27	PERALILLO	Choapa	Choapa Medio	Choapa	Illapel	2,08	Regular	Fe
28	PINTACURA SUR	Choapa	Choapa Medio	Choapa	Illapel	1,26	Buena	NO3
65	CARCAMO	Choapa	Illapel	Choapa	Illapel	2,11	Regular	Fe
109	EL QUEÑE	Choapa	Choapa Alto	Choapa	Salamanca	0,20	Excepcional	

VII.2.6. ÍNDICE DE CALIDAD POZOS DE ACUÍFERO QUILIMARÍ

El acuífero Quilimarí presenta un pozo con IC Insuficiente siendo este el pozo 81-QUILIMARÍ cuyo IC está dado por una elevada concentración de Manganeseo. Cabe señalar que este pozo se encuentra cercano a la costa.

Tabla 39: Índice de Calidad por APR de acuífero Quilimarí. Parámetros locales: Hierro y manganeso.

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
61	LOS CONDORES	Quilimarí	Los Cóndores	Choapa	Los Vilos	2,10	Regular	Fe
69	GUANGUALÍ	Quilimarí	Guangualí	Choapa	Los Vilos	1,40	Buena	Pb
81	QUILIMARÍ	Quilimarí	Quilimarí	Choapa	Los Vilos	3,01	Insuficiente	Mn

VII.2.7. ÍNDICE DE CALIDAD POZOS SIN ACUÍFERO DEFINIDO

De los pozos que no fue posible asignar un acuífero delimitado, el pozo 105-CALETA HORNOS es de especial interés presentando un IC Intratable. Es relevante considerar que si bien el parámetro que le otorga la calidad de intratable es el cloruro, existen otros parámetros que por sí solos presentan valores elevados con Índices de Calidad Individuales en el rango de Insuficiente, como lo son los Sólidos Disueltos Totales y el Sodio, otros en calidad regular como sulfato, calcio, magnesio y nitrato. Lo anterior daría cuenta de un pozo, que dada su ubicación próximo a la costa, estaría intensamente afectado por una Intrusión salina y posiblemente se le suma contaminación antrópica difusa desde superficie. Se recomienda remuestrear este pozo y realizar un seguimiento para determinar alguna tendencia, así también dar aviso a la DOH y Servicio de Salud para que corroboren la calidad de la agua potable que se distribuye.

Tabla 40: Índice de Calidad por APR sin acuífero definido. Parámetros locales: Hierro y manganeso.

N°	Nombre Pozo	Acuífero	Sector Acuífero	Provincia	Comuna	Índice de calidad General por Pozo (parámetros Locales: Fe y Mn)		Parámetros que otorgan clasificación
						IC (cuantitativo)	IC (cualitativo)	
20	CAIMANES	Sin acuífero definido	S/acuífero	Choapa	Los Vilos	0,17	Excepcional	
105	CALETA HORNOS	Sin acuífero definido	S/acuífero	Elqui	Caleta de Hornos	5,00	Intratable	Cl

VIII. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió conocer la condición actual (primavera 2016) de calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos definidos para la Región de Coquimbo, los que corresponde a los acuíferos Los Choros, Elqui, Culebrón-Lagunillas, Limarí, Choapa y Quilimarí.

En términos generales las aguas de los diferentes acuíferos presentan una evolución química, en términos de macromoléculas normal. Aguas arriba se presentan pozos Bicarbonatadas y/o Cállicas con relativas bajas concentraciones de iones, y en la medida que evolucionan, aguas abajo presentan una mayor carga iónica y son progresivamente más salinas (cloruradas, sulfatadas y/o sódicas). Destacan sectores y pozos con niveles significativamente elevados de macroelementos, los cuales escaparían de una condición natural. En estos casos se observa, por un lado, posible contaminación difusa por actividades antrópicas en superficie, es especial agricultura, en sectores de acuífero de moderada, alta y muy alta vulnerabilidad, o bien afectados intrusiones salinas marinas en caso de ser pozos próximos a la costa.

En términos de micro elementos se constatan abundantes pozos con niveles elevados de Hierro y Manganeso, los cuales pueden estar relacionados con una condición geológica de la región, donde existen abundantes formaciones de volcánicas de composición intermedia a básica ricas en minerales ferromagnesianos, así como diversos cuerpos mineralizados tales como pórfidos, vetas, fracturas, y otros, con menas y gangas de Hierro (y posiblemente Manganeso) como los son Sulfuros y Óxidos de Hierro y/o Manganeso, y en casos particulares Plomo. Esta condición natural es relativamente clara para el caso del Hierro, mostrando su concentración una distribución homogénea de pozos con niveles elevados y en algunos casos niveles significativamente elevados que podrían estar relacionados con alguna fuente de contaminación antrópica. Por otro lado, en el caso del Manganeso esta condición natural no es tan fácilmente interpretable. Si bien es un elemento directamente relacionado con el hierro dado sus comportamientos geoquímicos y paragénesis mineral, el manganeso posee un rango mayor de fuentes de enriquecimiento y contaminación antrópica.

Para el caso de nitrato se destaca que sólo un pozo se encuentra sobre 50 mg/lit. Sin embargo, se evidenció que 7 pozos están por sobre 30 mg/lit (6% de los pozos estudiados) condición de alerta que requiere ser evaluada en el tiempo.

A partir de los análisis químicos realizados se logró identificar sectores y pozos específicos con Índices de Calidad Insuficientes (17 pozos, 14% aprox.) e incluso Intratables (1 pozo, 1% aprox.), los cuales revisten de especial cuidado en su manejo, y 27 pozos (23% aprox.) con un Índice de calidad Regular. Destacan los pozos 105-CALETA HORNOS con un Índice de Calidad Intratable, y 43-EL TRAPICHE, con un Índice de Calidad Insuficiente, pero muy cercano a ser catalogado como Intratable.

Junto con lo anterior se identifican sectores con mayor posibilidad de contaminación de carácter antrópico, como sector de El Ingenio, Río Limarí y Punitaqui, aguas abajo de Ovalle en el acuífero Limarí. En menor medida los sectores Elqui Medio, Elqui Bajo y Santa Clara, aguas abajo del embalse Puclaro en el Río Elqui, y un grupo acotado de pozos que pueden estar afectados por actividad minera como los Pozos 60-PELICANA y 152-LA CALERA en la cuenca de Elqui.

IX. RECOMENDACIONES

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

Tabla 41 Resumen pozos a incorporar en el seguimiento por parte de la DGA.

Pozo APR	Sector Acuífero	Comuna
BATUCO	Choapa	Salamanca
CUNCUMEN	Choapa	Salamanca
HUENTELAUQUÉN NORTE	Choapa	Canela
CHUCHIÑÍ	Choapa	Salamanca
COLLIGUAY	Choapa	Salamanca
EL ARRAYÁN	Choapa	Salamanca
EL TAMBO	Choapa	Salamanca
EL TAMBO ORIENTE	Choapa	Salamanca
LAS CAÑAS DOS	Choapa	Illapel
PERALILLO	Choapa	Illapel
QUEBRADA DE PAIHUANO	Elqui	Paiguano
COGOTÍ 18	Limarí	Combarbalá
LAS BARRANCAS-EL CHINEO	Limarí	Combarbalá
EL HUACHO	Limarí	Combarbalá
LA COLORADA	Limarí	Combarbalá
EL TRAPICHE	Limarí	Ovalle
VILLA SECA	Limarí	Ovalle
LA TORRE-LAS SOSSAS	Limarí	Ovalle
GABRIELA MISTRAL (GABRIELA MISTRAL EL ROSARIO)	Elqui	La Serena
LAS ROJAS (LAS ROJAS PUNTA DE PIEDRA)	Elqui	La Serena
COQUIMBO ALTOVALSOL (COQUIMBO HACIENDA LORETO-ALTOVALSOL)	Elqui	La Serena

MARQUESA-NUEVA TALCUNA	Elqui	Vicuña
PELÍCANA	Elqui	La Serena
LOS CONDORES	Quilimarí	Los Vilos
SAN MARCOS	Limarí	Combarbalá
CARCAMO	Choapa	Illapel
HUACHALALUME (GUACHALALUME)	Culebron-Lagunilla	La Serena
NUEVO FUTURO - POTRERILLO ALTO	Limarí	Punitaqui
SOCOS- BARRAZA ALTO	Limarí	Ovalle
PUNTA COLORADA	Los Choros	La Higuera
QUILIMARÍ	Quilimarí	Los Vilos
SEMITA	Limarí	Monte Patria
BARRAZA	Limarí	Ovalle
TABALÍ	Limarí	Ovalle
LA PALOMA	Limarí	Ovalle
PICHASCA	Limarí	Río Hurtado
FUNDINA	Limarí	Río Hurtado
SAN JULIÁN	Limarí	Ovalle
SAMO BAJO	Limarí	Ovalle
CALETA HORNOS	Sin acuífero	Caleta de Hornos
LA PORTADA DE SOTAQUI	Limarí	Ovalle
ALMIRANTE LATORRE	Elqui	La Serena
CAMARICO	Limarí	Punitaqui
PORVENIR	Limarí	Ovalle
LA CALERA	Elqui	Vicuña
ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	Limarí	Ovalle

Los parámetros a medir *in situ* son: Cond Eléctrica, pH, Temperatura, ORP.

Metales: As, Fe, Mn, Cu, Zn, Hg y Pb.

Nutrientes: Nitrato, Amonio y Fosfato.

Macroelementos: Sulfato, Cloruro, Calcio, Magnesio, sodio, Potasio, Bicarbonato.

La frecuencia de medición corresponderá a 2 veces por año.

✓ Como se describe anteriormente hay una condición de alerta en aquellos sectores acuíferos que posean una concentración de Nitrato > 30 mg/lit, por lo que se recomienda su observación y así detectar posibles alzas: Los pozos APR corresponden a: Estación Recoleta, Guachulame, El Romero, Caleta Hornos, Islon, Tambillos, La torre Sossas.

- ✓ Profundizar el análisis de los resultados, especialmente en cuanto a la detección de posibles relaciones entre el origen de los contaminantes y la calidad del agua subterránea. En esta línea, resulta relevante considerar antecedentes de los usos de suelo, tipología de cultivos agrícolas, existencia de redes de canales de riego, antecedentes de prácticas de riego, tipología y ubicación de industrias y la cartografía de vulnerabilidad de acuíferos.
- ✓ Para asegurar la calidad de los datos generados, se recomienda seguir llevando a cabo los muestreos de acuerdo con los estándares de la Norma chilena NCh 411/11 (Guía para el muestreo de aguas subterráneas) y realizar los análisis en un laboratorio acreditado bajo la norma chilena NCh-ISO 17.025. Esto permite reducir la incertidumbre de los resultados y contar con datos representativos de la condición del acuífero.
- ✓ Como un criterio general, se recomienda enfocar los muestreos en pozos con la menor profundidad posible y que se encuentren ubicado en sectores que tengan una vulnerabilidad media, alta o extrema de acuerdo a mapa Sernageomin por ser éstos más sensibles a modificaciones por fuentes de contaminación puntual o difusa existentes en la zona.
- ✓ En cuanto a los parámetros, se recomienda llevar a cabo análisis químicos diferenciados según la ubicación de los pozos, es decir, definir un conjunto de parámetros comunes para toda la red de pozos y realizar análisis específicos (por ejemplo: pesticidas, nitratos o determinados metales) en aquellas zonas con mayor riesgo de alteración por efectos antrópicos.
- ✓ En cuanto a la frecuencia de monitoreo, se debe evaluar la factibilidad de realizar un seguimiento periódico que permita comprender los cambios en la calidad del agua en los acuíferos. En este sentido, resulta esperable que los mayores cambios ocurran en zonas con mayor vulnerabilidad a la contaminación. En principio, los monitoreos podrían realizarse con una periodicidad anual y evaluarse el incremento de esta frecuencia (por ejemplo, estacional) según las necesidades de información y las capacidades técnicas y económicas existentes.
- ✓ Ampliar la red de monitoreo de pozos APR en acuíferos menormente estudiados, como los son acuífero Culebrón Lagunillas, que pese a reducida área respecto a otras, es un acuífero con una intensa actividad agrícola e industrial dada su cercanía al sector metropolitano de Coquimbo-La Serena. Así también para acuífero Los Choros, y en menor medida el acuífero Quilimarí. Para este último se recomienda en específico incorporar un pozo de monitoreo aguas arriba de embalse Culimo.
- ✓ Para mejorar el seguimiento de los datos y resultados obtenidos y así aprovechar de mejor manera estos, el presente trabajo puede ser complementado con la realización de un estudio estadístico más acabado, específicamente empleando matrices y diagramas de correlación, de manera de dilucidar y/o descartar (1) patrones geoquímicos posibles y (2) posibilidad de contaminación antrópica, la cual sería coherente ante una geología regional y las actividades que ahí se realizan.
- ✓ Realizar un estudio Hidrogeoquímico ambiental a nivel regional, que por medio de criterio experto, herramientas matemáticas y estadísticas, y metodologías analíticas, permita dilucidar condiciones naturales a nivel regional como local de los diversos paramentos estudiados, en

especial parámetros elevados más abundantes (Cloruro, Sulfato, Sodio, SDT, Hierro y Manganeso), definir líneas bases ambientales y factores contaminantes específicos

✓ Realizar estudios hidrogeoquímicos en acuíferos de roca, no estudiados hasta el momento, en la medida que las condiciones naturales de muestreo y toma de datos lo permitan. Es recomendable esta acción considerando que los acuíferos de rojas alojan variados cuerpos mineralizados que al ser afectar por aguas de infiltración en fracturas pueden lixiviar elementos que condicionan la calidad de acuíferos sedimentarios a los cuales se transmiten los flujos subterráneos.

✓ Por otro lado, se recomienda incorporar el uso de nuevas tecnologías de captación de contaminantes orgánicos, como por ejemplo aquellos relacionados con las actividades agro-industriales, de manera de incluir estos al análisis de calidad de las aguas subterráneas.

✓ Incorporar estudios isotópicos o hidrogeológicos que entreguen información más detallada respecto de los flujos direccionales y los volúmenes involucrados.

✓ Se recomienda difundir los resultados con Servicios relevantes en materias de Recursos Hídricos como son la DOH y Servicio de salud, dando a conocer los resultados de aquellos pozos que presentan problemas de la calidad de las aguas

X. BIBLIOGRAFÍA

- Dirección General de Aguas (DGA). 1986a; Mapa hidrogeológico Escalas 1:1000.000, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- Dirección General de Aguas (DGA). 1986b; Mapa hidrogeológico de Chile: texto explicativo, escala 1:2.500.000; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Series: SEB; No. 3
- Dirección General de Aguas (DGA).1998a; Control y evaluación De recursos hídricos subterráneos IV región. Volumen 1: Estudio y modelo hidrogeológico valle pan de azúcar; Dirección General de Aguas, Departamento de estudios y planificación, AC – Ingenieros consultores Ltda.; Series: SIT; No. 50
- Dirección General de Aguas (DGA). 1998b; Control y evaluación De recursos hídricos subterráneos IV región. Volumen 2: Estudio hidrogeológico y balance hídrico valle Quilimarí; Dirección General de Aguas, Departamento de estudios y planificación, AC – Ingenieros consultores Ltda.; Series: SIT; No. 50
- Dirección General de Aguas (DGA). 2003; Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Elqui, IV región: informe técnico; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Series: SDT; No. 161
- Dirección General de Aguas (DGA). 2004; Modelo de simulación Quebrada Los Choros: evaluación de los recursos hídricos en la Quebrada Los Choros, IV región Coquimbo; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación. Series: SIT; 96
- Dirección General de Aguas (DGA). 2004b. Aplicación del modelo hidrogeológico valle pan de azúcar; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación. Series: SDT; No. 176
- Dirección General de Aguas (DGA). 2005. Estudio de intrusión salina en acuíferos costeros: sector costa Quebrada Los Choros, IV región / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Series: SIT; No. 109
- Dirección General de Aguas (DGA). 2007. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del Choapa: informe técnico; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Series: SDT; No. 248

- Dirección General de Aguas (DGA). 2008. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Limarí: informe técnico; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Series: S.D.T. N° 268
- Dirección General de Aguas (DGA). 2012. Investigación recarga artificial de acuíferos cuencas del río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; AC Ingenieros Consultores Ltda.; Series: S.I.T. N°292
- Espinoza, C. PRACTICA 2005. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la Región de Coquimbo. (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, 30 p., 1 mapa en dos hojas, escala 1:250.000.
- Gana, F. 1991. Mapa geológico de la cordillera de la costa entre La Serena y Quebrada El Teniente: Región de Coquimbo.
- Infraestructura y Ecología S. A. (INFRAECO) 2014. Análisis crítico de la red de calidad de aguas superficiales y subterráneas de la DGA, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos SIT: No. 337.
- Jorquera, R.; Pizarro, N.; Vogel, S.; Díaz, A.; Vivallo, W. 2011. Yacimientos Metalíferos del Área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos (32): 32 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Jorquera, R.; Vivallo, W.; Carrasco, R.; Pizarro, N.; Pineda, G.; Vogel, S. 2012. Yacimientos Metalíferos del Área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos (33): 41 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Maksaev, J. V. 2001. Reseña Metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. Santiago.
- Moscoso, R., Nasi, C., & Salinas, P. 1982. Hoja Vallenar y parte norte de La Serena: regiones de Atacama y Coquimbo, escala 1: 250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta geológica de Chile (55)
- Mpodozis, C., & Cornejo, P. 1988. Hoja Pisco-Elqui. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. Carta Geológica de Chile, (68).
- Nasi, C., Moscoso, R., & Maksaev, V. 1990. Hoja Guanta: regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio nacional de geología y minería.
- Rivano, S., & Sepulveda, P. 1991. Hoja Illapel, escala 1: 250000; Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile. Carta Geológica de Chile (69).

Rivano, S. 1996. Geología de las Hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería (Informe Inédito).

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). 2003. Mapa Geológico de Chile [versión digital]. Subdirección Nacional de Geología. Escala 1:1.000.000.

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). 2014 Avance del Mapa de Yacimientos Metalíferos y de Rocas y Minerales Industriales de la región de Coquimbo, Escala 1:500.000, Unidad de Recursos Minerales

Wall, R.; Espinoza, C.; Huerta, S. 2006. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y sitios prioritarios para la conservación de la Biodiversidad: identificación de zonas críticas (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, 5 p., 10 mapas, escala 1:500.000.