



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 LOS LAGOS

REALIZADO POR:

Departamento de Conservación y Protección de Recursos
Hídricos (DCPRH)

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

S.D.T. N° 435

SANTIAGO, mayo 2021

Autores

Diego San Miguel Cornejo, Jefe Área Desarrollo Ambiental Depto. de Conservación y Protección de Recursos Hídricos

Daniela Fredes Muñoz, Analista Área Desarrollo Ambiental Depto. de Conservación y Protección de Recursos Hídricos

Colaboradores:

Luciano Muñoz Hidalgo – Estudiante de Geología – Universidad de Concepción-

Tabla de contenidos

LISTADO DE FIGURAS	7
LISTADO DE TABLAS	11
I. RESUMEN	12
II. INTRODUCCIÓN	12
III. OBJETIVOS	13
III.1. OBJETIVO GENERAL	13
III.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
IV. ANTECEDENTES	14
IV.1. UBICACIÓN	15
IV.2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	15
IV.2.1. Geomorfología	15
IV.2.2. Geología	17
IV.2.2.1. Litologías	17
IV.2.2.2. Estructuras	20
IV.3. HIDROGRAFÍA.....	21
IV.3.1. Cuenca del río Bueno	23
IV.3.2. Cuencas e islas entre río Bueno y río Puelo	25
IV.3.3. Cuenca islas Chiloé y circundantes.....	27
IV.3.4. Cuencas surorientales	27
IV.4. CLIMA	30
IV.5. HIDROGEOLOGÍA.....	30
IV.5.1. Definición de acuíferos.....	34
IV.5.1.1. Acuífero //A1.....	37
IV.5.1.2. Sistema de acuíferos A2/A1	38
IV.5.1.3. Sistema de acuíferos A2//A1.....	38
IV.5.1.4. Sistema de acuíferos //A2/A1	38
IV.5.1.5. Acuífero //B1.....	39
IV.5.1.6. Acuífero B3.....	39
IV.5.1.7. Acuífero //B5.....	40
IV.5.1.8. Acuífero //B6.....	40
IV.5.1.9. Acuífero C1.....	40
IV.5.1.10. Acuífero C2	41
IV.5.1.11. Acuícludo D	41
IV.5.2. Características hidrogeológicas por cuenca.....	42

IV.5.2.1. Hidrogeología de la cuenca del río Bueno	42
IV.5.2.2. Hidrogeología de las cuencas e islas entre río Puelo y río Bueno.....	43
IV.5.2.3. Hidrogeología de la cuenca Islas Chiloé y Circundantes	45
IV.5.3. Vulnerabilidad de Acuíferos.....	46
IV.5.3.1. Métodos de estimación de la vulnerabilidad.....	46
IV.5.3.2. Mapas de vulnerabilidad.....	46
IV.5.3.3. Vulnerabilidad de acuíferos en la Región de Los Lagos	47
IV.6. NORMATIVAS DE CALIDAD DE AGUAS	49
IV.6.1. NCh N°409/1 Agua Potable	49
IV.6.2. NCh N°1333 Requisitos de calidad del agua para diferentes usos	50
V. METODOLOGÍA.....	51
V.1. SELECCIÓN DE POZOS PARA MUESTREO	51
V.2. UBICACIÓN Y CONTEXTO DE LOS POZOS APR.....	52
V.2.1. Ubicación.....	52
V.2.2. Contexto de los pozos	54
V.3. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS.....	59
V.4. USO DE EQUIPOS Y MATERIALES	59
V.4.1. Materiales de muestreo	59
V.4.2. Equipos.....	60
V.5. METODOLOGÍAS ANALÍTICAS.....	60
V.6. LÍMITES DE DETECCIÓN	62
V.7. PREPARACIÓN DEL TRABAJO EN TERRENO	63
V.8. TRABAJO EN TERRENO	63
V.8.1. Ubicación del punto a muestrear.....	63
V.8.2. Medición de profundidad de nivel freático	63
V.8.3. Toma de muestras y medición de parámetros in situ.....	64
V.8.4. Toma de muestras para análisis de laboratorio.....	64
V.8.5. Almacenamiento y transporte de muestras al laboratorio.....	65
V.9. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS QUÍMICOS.....	66
V.10. MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFERO SEGÚN ÍNDICE DE CALIDAD	67
V.10.1. Esquema general de la metodología.....	68
V.10.2. Cálculo del índice de calidad	69
V.10.2.1. Índice de calidad individual.....	71
V.10.2.2. Cálculo del IC general.....	73
VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES	74

VI.1.	DATOS REGISTRADOS EN TERRENO	74
VI.1.1.	Parámetros geométricos.....	74
VI.1.2.	Parámetros fisicoquímicos.....	76
VI.2.	CONFIABILIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS	82
VI.3.	CLASIFICACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	83
VI.3.1.	Cuenca del río Bueno	85
VI.3.2.	Cuencas e islas entre río Puelo y río Bueno	88
VI.3.3.	Cuenca islas Chiloé y Circundantes	91
VI.4.	CONCENTRACIONES ESPECÍFICAS Y COMPARACIÓN CON NORMA CHILENA	94
VI.4.1.	Componentes mayoritarios.....	94
VI.4.1.1.	Sodio.....	95
VI.4.1.2.	Potasio.....	100
VI.4.1.3.	Calcio	102
VI.4.1.4.	Magnesio.....	104
VI.4.1.5.	Amonio.....	107
VI.4.1.6.	Cloruro.....	111
VI.4.1.7.	Nitrato	114
VI.4.1.8.	Sulfato	118
VI.4.1.9.	Carbonato y bicarbonato	121
VI.4.2.	Otros componentes normados	123
VI.4.2.1.	Sólidos disueltos totales.....	125
VI.4.2.2.	Aluminio	128
VI.4.2.3.	Arsénico.....	131
VI.4.2.4.	Hierro	134
VI.4.2.5.	Manganeso.....	137
VI.4.2.6.	Molibdeno	141
VI.4.2.7.	Níquel	144
VI.4.2.8.	Plomo	147
VI.4.2.9.	Zinc	150
VI.4.3.	Resumen de comparación con normativas vigentes	153
VII.	CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	155
VII.1.	SELECCIÓN DE PARÁMETROS LOCALES.....	155
VII.2.	CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS.....	156
VIII.	CONCLUSIONES	159
IX.	RECOMENDACIONES	160

X. REFERENCIAS 164

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Mapa Político de la zona de estudio. Fuente: Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.	14
Figura 2: Mapa geomorfológico de la zona en estudio. Fuente: Börgel, 1983.	15
Figura 3: Mapa topográfico de la zona en estudio. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 4: Mapa geológico de la zona en estudio. Fuente: Fernández et al., 2018.	19
Figura 5: Mapa de división de cuencas y subcuencas (ver códigos en tabla 1) de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 6: Red hídrica de la cuenca del río Bueno. Fuente: Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2016.	24
Figura 7: Red hídrica de Cuencas e Islas entre Río Bueno y Río Puelo. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 8: Red hídrica de Cuenca Islas Chiloé y Circundantes. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 9: Red hídrica de Cuencas surorientales y Circundantes. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 10: Mapa de División de los sectores de acuíferos en la Región de Los Lagos, Fuente: Elaboración Propia.	31
Figura 11: Mapa hidrogeológico de la Región de Los Lagos (ver leyenda en Figura 12). Fuente: DGA, 1986a.	32
Figura 12: Leyenda general de Mapa Hidrogeológico de Chile escala 1: 1.000.000. Fuente: DGA, 1986a.	33
Figura 13: Hoja Hidrogeológica de Osorno. Acuíferos y zonas de especial interés a proteger e investigar. Fuente: SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008.	34
Figura 14: Hoja Hidrogeológica de Puerto Montt. Acuíferos y zonas de especial interés a proteger e investigar. Fuente: SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008.	35
Figura 15: Hoja Hidrogeológica de Castro. Acuíferos y zonas de especial interés a proteger e investigar. Fuente: SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008.	36
Figura 16: Mapa de Vulnerabilidad de la Región de los Lagos. Fuente: Wall et al., 2006.	48
Figura 17: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas. Fuente: DGA, 2017.	51
Figura 18: Mapa político de la zona de estudio, con límites provinciales y comunales (en línea delgada gris) y ubicación de pozos APR (ver numeración en Tabla 5). Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 19: Mapa geológico con ubicación de pozos APR (ver numeración en Tabla 5). Fuente: Modificado de Fernández et al., 2018.	55
Figura 20: Mapa con división de cuencas y subcuencas (ver numeración de subcuencas en Tabla 1) y ubicación de pozos APR (ver numeración en Tabla 5). Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 21: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos con posición de pozos APR muestreados (ver numeración en Tabla 6). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.	58
Figura 22: Ejemplo diagrama de Stiff con los iones considerados.	66
Figura 23: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.	67
Figura 24: Esquema y diagrama de flujo de metodología de cálculo del Índice de Calidad de aguas subterráneas Fuente: Modificado de DGA, 2009.	69
Figura 25: Cálculo del Índice de Calidad (IC) mediante interpolación lineal entre clases. Fuente: DGA, 2009.	71
Figura 26: Profundidad de pozos APR, con sus niveles estáticos y dinámicos. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 27: Mapa de distribución de pH en pozos de estudio (ver numeración en Tabla 19). Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 28: Mapa de distribución de Conductividad eléctrica en pozos de estudio (ver numeración en Tabla 19). Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 29: Mapa de distribución de Temperaturas en pozos de estudio (ver numeración en Tabla 19). Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 30: Mapa de distribución de potencial redox en pozos de estudio (ver numeración en Tabla 19). Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 31: Gráfico con los valores absolutos de los errores obtenidos en los pozos APR. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 32: Secuencia de Chevotareb. Fuente: Sánchez, 2012.	84
Figura 33: Diagrama Piper de pozos APR en la cuenca de río Bueno. Fuente: Elaboración propia.	86

Figura 34: Mapa con diagramas Stiff de la cuenca de río Bueno (ver numeración en Tabla 20). Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 35: Diagrama Piper de pozos APR en las cuencas e Islas entre río Puelo y río Bueno. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 36: Mapa con diagramas Stiff de las cuencas e islas entre río Puelo y río Bueno (ver numeración en Tabla 20). Fuente: Elaboración propia.	90
Figura 37: Diagrama Piper de pozos APR en la cuenca islas Chiloé y Circundantes. Fuente: Elaboración propia.	92
Figura 38: Mapa con diagramas Stiff de la cuenca islas Chiloé y circundantes (ver numeración en Tabla 20). Fuente: Elaboración propia.	93
Figura 39: Gráfico de concentraciones de sodio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	96
Figura 40: Gráfico de sodio porcentual en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	96
Figura 41: Mapa de distribución de concentraciones de sodio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.	97
Figura 42: Mapa de distribución de sodio porcentual en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.	98
Figura 43: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de sodio porcentual en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.	99
Figura 44: Gráfico de concentraciones de potasio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 45: Mapa de distribución de concentraciones de potasio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.	101
Figura 46: Gráfico de concentraciones de calcio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	102
Figura 47: Mapa de distribución de concentraciones de calcio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.	103
Figura 48: Gráfico de concentraciones de magnesio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	104
Figura 49: Mapa de distribución de concentraciones de magnesio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.	105
Figura 50: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de magnesio en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.	106
Figura 51: Gráfico de concentraciones de amonio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	107
Figura 52: Mapa de distribución de concentraciones de amonio (ver numeración en Tabla 23). Fuente: elaboración propia.	108
Figura 53: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución (ver numeración en Tabla 23). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.	109
Figura 54: Gráfico de concentraciones de cloruro en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	111
Figura 55: Mapa de distribución de concentraciones de cloruro en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 56: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de cloruro en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.	113
Figura 57: Gráfico de concentraciones de nitrato en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	115
Figura 58: Mapa de distribución de concentraciones de nitrato en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.	116
Figura 59: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de nitrato en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.	117
Figura 60: Gráfico de concentraciones de sulfato en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.	118

Figura 61: Mapa de distribución de concentraciones de sulfato en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.....	119
Figura 62: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de sulfato en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....	120
Figura 63: Gráfico de concentraciones de bicarbonato en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.....	121
Figura 64: Mapa de distribución de concentraciones de bicarbonato en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.....	122
Figura 65: Gráfico de concentraciones de sólidos totales disueltos en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.....	125
Figura 66: Mapa de distribución de concentraciones de SDT en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Elaboración propia.....	126
Figura 67: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de SDT en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....	127
Figura 68: Gráfico de concentraciones de aluminio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.....	128
Figura 69: Mapa de distribución de concentraciones de aluminio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Elaboración propia.....	129
Figura 70: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de aluminio en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....	130
Figura 71: Gráfico de concentraciones de arsénico en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.....	131
Figura 72: Mapa de distribución de concentraciones de arsénico en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Elaboración propia.....	132
Figura 73: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de arsénico en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....	133
Figura 74: Gráfico de concentraciones de hierro en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.....	134
Figura 75: Mapa de distribución de concentraciones de hierro en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Elaboración propia.....	135
Figura 76: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de hierro en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....	136
Figura 77: Gráfico de concentraciones de manganeso en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.....	138
Figura 78: Mapa de distribución de concentraciones de manganeso en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....	139
Figura 79: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de manganeso en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....	140
Figura 80: Gráfico de concentraciones de molibdeno en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.....	141
Figura 81: Mapa de distribución de concentraciones de molibdeno en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Elaboración propia.....	142
Figura 82: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de molibdeno en los pozos APR (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....	143
Figura 83: Gráfico de concentraciones de níquel en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.....	144
Figura 84: Mapa de distribución de concentraciones de níquel en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Elaboración propia.....	145
Figura 85: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de níquel en los pozos APR (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....	146
Figura 86: Gráfico de concentraciones de plomo en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.....	147

<i>Figura 87: Mapa de distribución de concentraciones de plomo en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 88: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de plomo en los pozos APR (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 89: Gráfico de concentraciones de zinc en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>150</i>
<i>Figura 90: Mapa de distribución de concentraciones de zinc en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 91: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de zinc en los pozos APR (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 92: Distribución de pozos APR en zona de estudio con sus índices de calidad. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>158</i>
<i>Figura 93: Mapa con ubicación de pozos que no pudieron ser muestreados. Fuente: Elaboración propia....</i>	<i>162</i>

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1: Catálogo de cuencas y subcuencas hidrográficas Región de los Lagos. Fuente: DGA, 2021.</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2: Límites de concentraciones para NCh N°409. Fuente: INN, 2005.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 3: Límites de concentraciones para NCh N°1333. Fuente: INN, 1987.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4: Clasificación de aguas de riego según su salinidad. Fuente: INN, 1987.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 5: Numeración, código BNA, nombre, provincia, comuna y coordenadas de los pozos APR del estudio.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 6: Cuencas, acuíferos y vulnerabilidad de los pozos APR del estudio.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 7: Listado de parámetros efectuados sobre las muestras de aguas subterráneas del presente estudio.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 8: Materiales de muestreo.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 9: Equipos para medición en terreno.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 10: Parámetros medidos y las respectivas metodologías utilizadas por el Laboratorio ALS Environmental.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 11: Parámetros medidos y las respectivas metodologías utilizadas por el Laboratorio Hidrolab.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 12: Límites de detección para los parámetros medidos del Laboratorio ALS Environmental a excepción de STD, medido por Hidrolab.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 13: Parámetros químicos utilizados en la metodología. Fuente: DGA, 2009.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 14: Parámetros a medir en caracterización química.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 15: Relación entre clases de calidad y valores de corte. Fuente: DGA, 2009.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 16: Valores de corte usados para el cálculo del IC de las aguas de este estudio.</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 17: Criterios para establecer el IC general. Fuente: DGA, 2009.</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 18: Profundidades de los pozos, niveles estáticos y dinámicos y altura de columna de agua. (S.I. = Sin información).</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 19: Parámetros fisicoquímicos de los pozos APR.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 20: Tabla de Balances iónicos de cada pozo. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 21: Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea. Fuente: Custodio y Llamas, 1976.</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 22: Concentraciones de elementos mayoritarios en pozos APR de estudio.</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 23: Concentraciones de amonio como mg/L de NH₄⁺ en pozos muestreados (En rojo el valor que supera la NCh N°409).</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 24: Concentraciones de SDT, Al, As, Cd, Co, Cu, Fe y Mn de los pozos APR muestreados. En color naranja los pozos que superan la NCh 1333, en rojo los que superan la NCh 409 y en morado aquellos que superan ambas normas.</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 25: Concentraciones de Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, Se y Zn de los pozos APR muestreados.</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 26: Resumen de parámetros medidos, los límites máximos permitidos por las normas chilenas de uso y la cantidad de pozos en la región con valores fuera de norma.</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 27: Clasificación de los pozos estudiados según su salinidad en base a la Norma NCh N°1333 para aguas de riego.</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 28: Pozos APR y parámetros que superaron al menos un límite de las normativas vigentes de uso (NCh 1333 y NCh 409). En naranja los que superan la NCh N°1333, en rojo los que superaron la NCh N°409 y en morado los que superaron ambas.</i>	<i>155</i>
<i>Tabla 29: Calidad de agua (IC individuales e IC general) de pozos APR de la Región de Los Lagos.</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 30: Resumen de pozos de seguimiento recomendados.</i>	<i>161</i>
<i>Tabla 31: Pozos APR que no pudieron ser muestreados, con sus coordenadas en UTM WGS 1984, Huso 18S.</i>	<i>161</i>

I. RESUMEN

Se informa sobre el análisis de las muestras obtenidas en agosto y septiembre del año 2020, desde los acuíferos que abastecen a 38 pozos APR (pertenecientes al programa de Agua Potable Rural del Ministerio de Obras Públicas).

El muestreo y análisis fue realizado por HGS SOLUTIONS Spa. A partir de la información de los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, conductividad eléctrica y potencial óxido reducción), de las concentraciones de iones mayoritarios y de los metales disueltos totales en las muestras de agua subterráneas previas a cualquier tratamiento de éstas, se realiza un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas y también se presenta una comparación respecto a las normativas de uso vigente, ésta es la Norma Chilena para agua potable (NCh N°409) y para agua de riego y otros usos (NCh N°1333), complementariamente se calcula el Indicador de Calidad de Aguas.

Se detectaron 25 pozos que tenían al menos un parámetro fuera de alguna de las normativas, 23 que incumplían la norma NCh N°409 y 22 la NCh N°1333, siendo los parámetros que más se sobrepasaban: el manganeso con 20 pozos (ambas normas), hierro con 17 pozos (NCh 409), sodio porcentual con 8 pozos (NCh 1333) y conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y cloruro con 2 pozos (NCh 1333 los primeros dos y ambas normativas en el cloruro). Siendo los pozos APR Trumao, Las Lumas y Caicaen los que más normativas superaban; el último por una posible intrusión salina.

Los índices de calidad dieron por resultado que 13 pozos (34,21%) tenían una calidad de agua "Excepcional", 3 pozos (7,89%) una calidad "Buena", 3 pozos una calidad "Regular" y 19 pozos (50%) clasificados como "Insuficiente", estos últimos entrando en esta clasificación por las altas concentraciones de manganeso en las aguas muestreadas.

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.

Este estudio forma parte de una serie de estudios de diagnóstico de calidad de agua subterránea realizados en las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, de Libertador Bernardo O'Higgins, del Maule, Biobío, Ñuble y de Los Ríos por la DGA desde el año 2015.

II. INTRODUCCIÓN

La Región de los Lagos se divide en cuatro provincias y 30 comunas, con una superficie de 48.544,5 km² y una población de 891.440 al 2020, siendo un cuarto de ésta rural (228.382 habitantes) (BCN, 2021). Aunque en la zona la cantidad de agua superficial es cuantiosa, por lo que gran parte de la población se puede abastecer de ésta, en ciertas zonas rurales se usa de manera importante el agua de origen subterráneo, por lo que el Ministerio de Obras Públicas ha desarrollado el programa de Agua Potable Rural (APR), por el cual se han generado numerosos pozos para extraer el recurso hídrico.

La Dirección General de Aguas (DGA), de acuerdo con las disposiciones establecidas en el art. 299, 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, así también es el organismo encargado de operar y mantener el Servicio Hidrométrico Nacional. La información obtenida deberá ser pública y deberá proporcionarse a quien la solicite.

En el presente informe se recopila la información obtenida para generar una caracterización de la calidad de agua en la Región de los Lagos, además busca aportar al cumplimiento de las atribuciones y funciones establecidas en el art. 299 del Código de Aguas, en específico con las labores de planificar el desarrollo del recurso en las fuentes naturales, con el fin de formular recomendaciones para su aprovechamiento; e investigar y medir el recurso, manteniendo y operando el servicio hidrométrico nacional y proporcionar y publicar la información correspondiente.

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, el presente estudio, el cual forma parte de una serie de diagnósticos de calidad de aguas subterráneas realizados por la DGA que abarcan, desde el año 2015 hasta la fecha, a las regiones de Coquimbo, de Valparaíso, Región Metropolitana, del Lib. Bernardo O’Higgins, del Maule y de los Ríos pretende dar cuenta de la calidad de las aguas subterráneas aprovechadas por pozos pertenecientes al programa de Agua Potable Rural (APR) previo a cualquier método de tratamiento, comparando diversos parámetros fisicoquímicos y de iones disueltos con respecto a normas de uso vigentes (NCh 409 y NCh 1333) así como también del cálculo del Índice de Calidad (IC) para cada uno de los pozos.

III. OBJETIVOS

III.1. OBJETIVO GENERAL

Generar un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la Región de los Lagos.

III.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Dar un contexto claro de la situación de las aguas, en especial las de origen subterráneo de la Región de los Lagos.
2. Caracterizar las condiciones fisicoquímicas y las concentraciones de los parámetros muestreados.
3. Comparar los resultados obtenidos con la normativa de uso vigente: NCh N°409 (para agua potable) y NCh N°1333 (agua para riego, para bebida de animales, para recreación, entre otras).
4. Determinar el Índice de Calidad de agua subterránea para cada pozo del cual se recopilaron datos.
5. Identificar potenciales fuentes de contaminación.
6. Proponer recomendaciones para el futuro.

IV. ANTECEDENTES

La zona de estudio corresponde a la Región de los Lagos, que administrativamente se distribuye en cuatro provincias (Figura 1): Osorno, Llanquihue, Chiloé y Palena, las que a su vez se encuentran divididas en un total de 30 comunas.

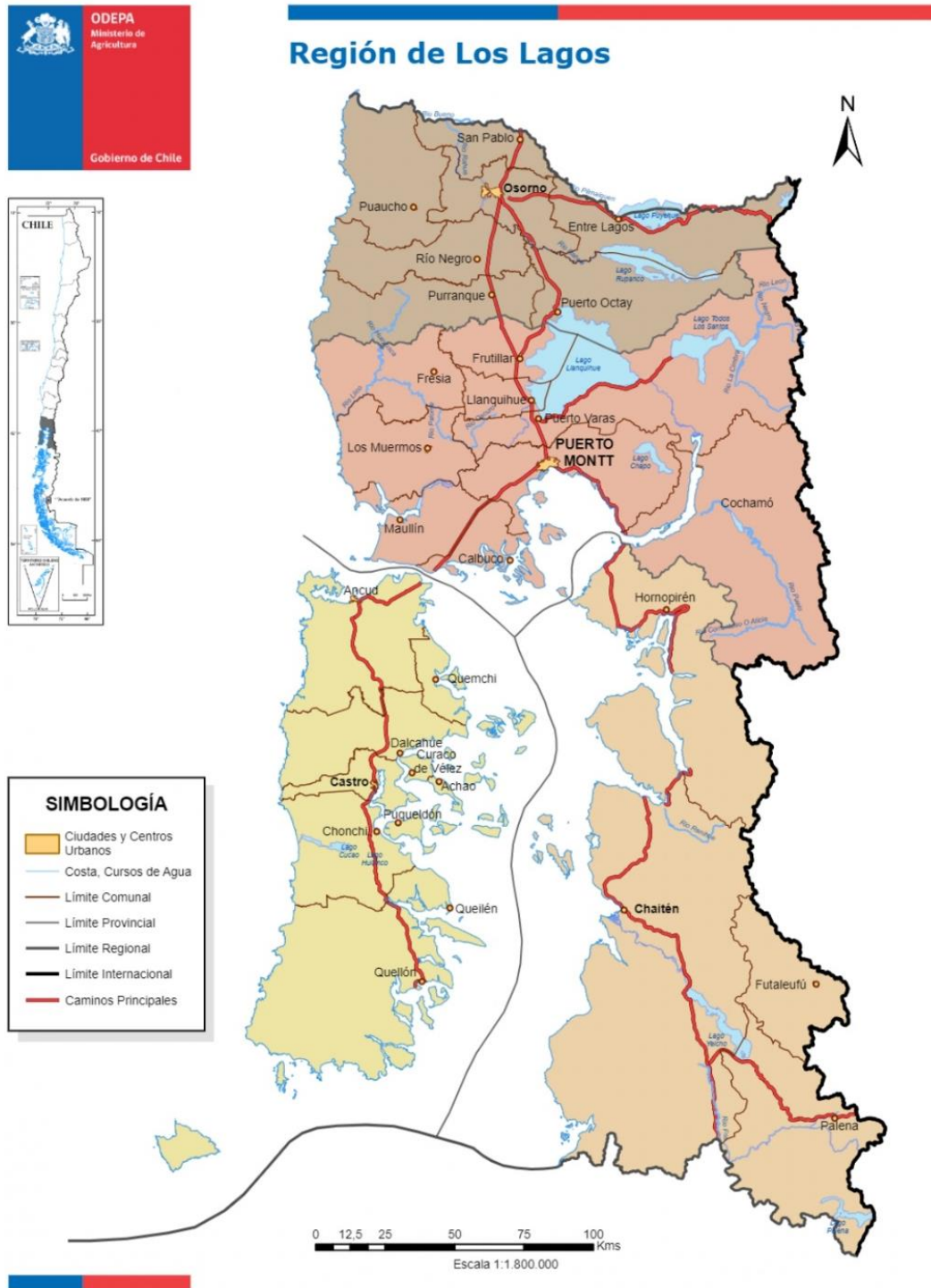


Figura 1: Mapa Político de la zona de estudio. Fuente: Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.

IV.1. UBICACIÓN

La Región de Los Lagos comprende un área de 48.544,5 km² y se ubica entre los paralelos 40°13' y el 44°3' de latitud Sur y entre las coordenadas 74°49' a 71°34' de Longitud O, abarcando desde el Océano Pacífico al oeste hasta la Cordillera de los Andes al este, limitando al norte con la Región de los Ríos y al sur con la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

IV.2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

IV.2.1. Geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico, existe una serie de elementos fisiográficos que se pueden identificar claramente.

Los grupos principales son: Planicie Litoral., Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia o Valle Central y la Cordillera de los Andes (Figura 2).

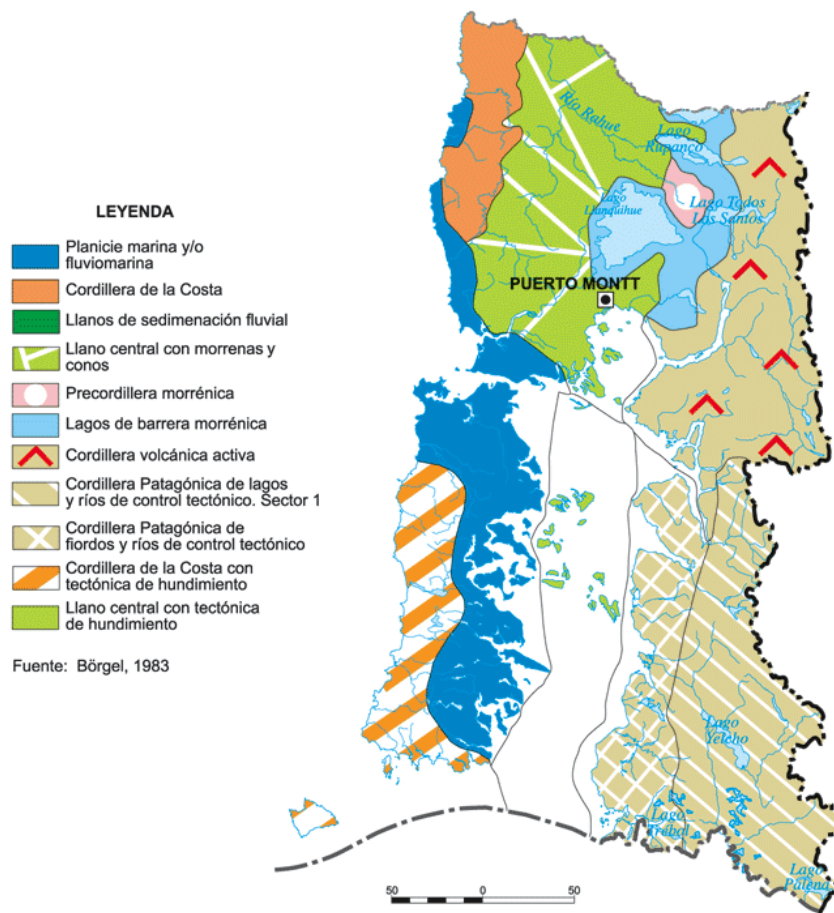


Figura 2: Mapa geomorfológico de la zona en estudio. Fuente: Börgel, 1983.

Planicie Litoral: se encuentra presente principalmente al norte de la desembocadura del río Maullín en donde alcanza su máximo desarrollo con una longitud aproximada de 60 km hundiéndose en el mar para posteriormente aparecer en la Isla de Chiloé, principalmente en el sector sur occidental y la Península de Taitao (MOP, 2012).

Cordillera de la Costa: se identifica en tres secciones y bajo tres nombres diferentes, que corresponden a Cordillera Pelada (a partir de la desembocadura del río Valdivia hasta la desembocadura del río Maullín), Cordillera del Zarao (se localiza en las cercanías del río Maullín) y Cordillera de Piuchén (al sur del Canal de Chacao en la isla de Chiloé, en el sector occidente, hasta el norte del lago Cucao) (MOP, 2012).

Depresión Intermedia o Valle Central: se manifiesta hasta la provincia de Llanquihue, en donde hacia el oeste se confunde con la planicie costera, presentando altitudes bajas y hacia el este, diversos lagos la colocan en contacto con la Cordillera de Los Andes hasta el seno de Reloncaví en donde se hunde, pero como rasgo estructural continúa sumergida en el mar (MOP, 2012).

Cordillera de Los Andes: corresponde a la zona con mayor relieve y zonas de mayor altitud (Figura 3), ésta se encuentra interrumpida por valles de origen glaciar, que, junto con materiales volcánicos, han originado relieves redondeados y suaves con alturas promedio de 1.000 m s.n.m.; las principales alturas corresponden a conos volcánicos. El cordón de lagos existentes en la región, fue producto del avance y retroceso de hielos en sentido oeste–este. En Palena, la cadena de lagos se transforma en valles, que son penetrados por el mar, dando origen a fiordos como los de Comau y Reñihue (MOP, 2012).

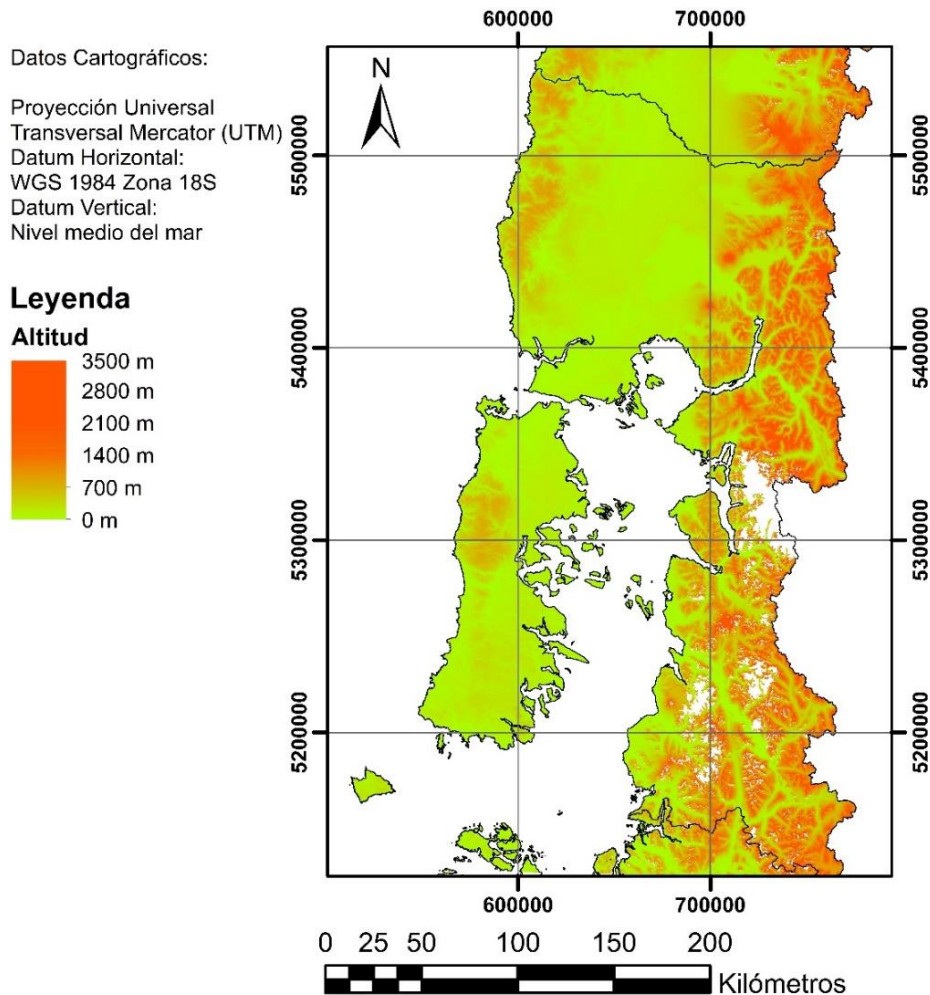


Figura 3: Mapa topográfico de la zona en estudio. Fuente: Elaboración propia.

IV.2.2. Geología

IV.2.2.1. Litologías

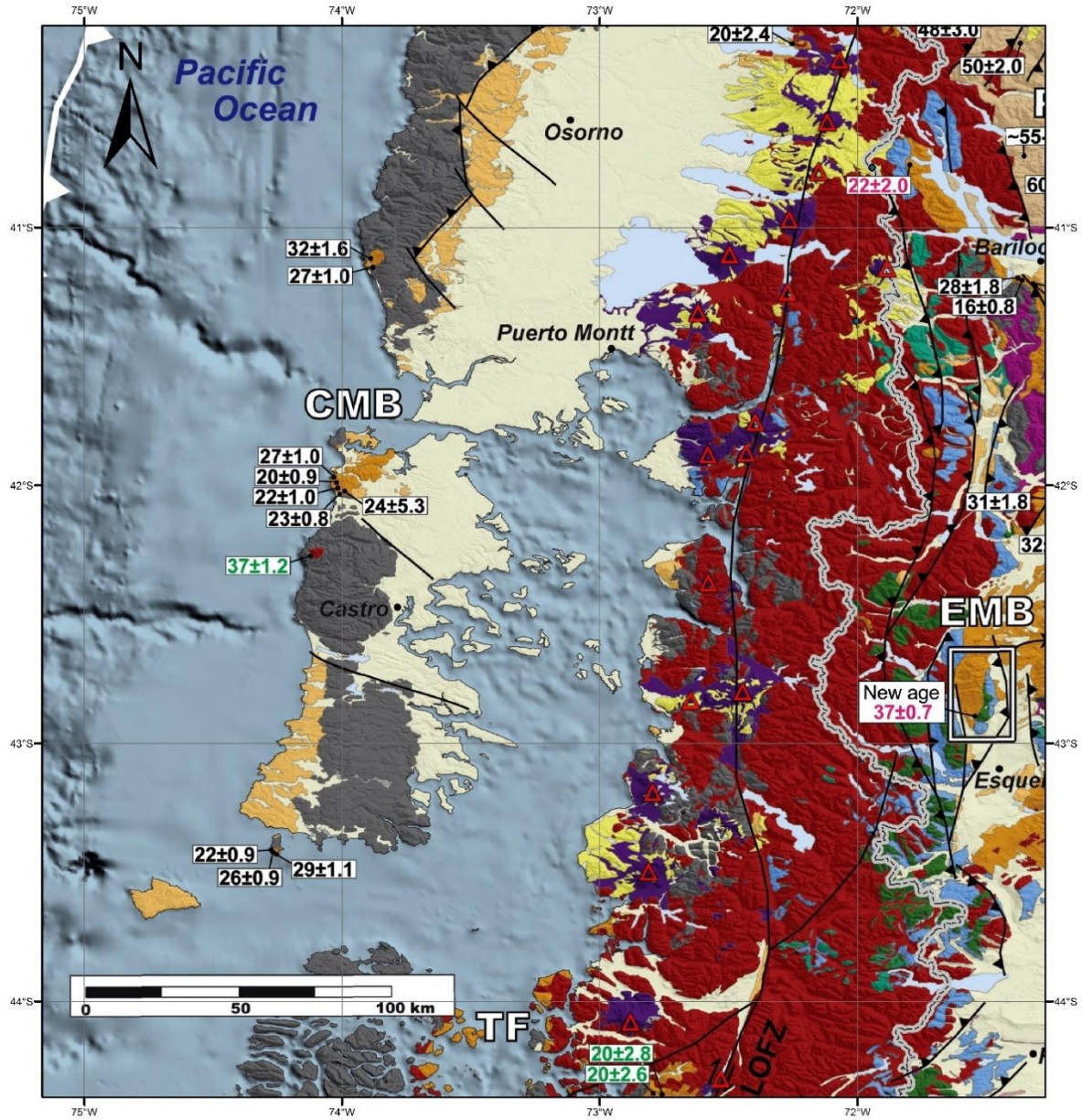
De acuerdo a la carta geológica elaborada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) el año 2003 (escala 1:1.000.000), en la Región de Los Lagos existen principalmente secuencias volcánicas y sedimentarias, esta última concentrándose en los sectores occidentales y Depresión intermedia, mientras que la primera en sectores cercanos a edificios volcánicos. Las glaciaciones Llanquihue, Santa María, Llico y Caracol contribuyeron a modelar la fisonomía de la región (Figura 4).

La Cordillera de la Costa está caracterizada por un basamento Paleozoico-Triásico interpretado como un prisma acrecionario antiguo (Duhart & Adriaola, 2008). Localmente sills y diques dacíticos, como stocks granodioríticos que intruyen al basamento metamórfico en la isla de Chiloé (Duhart & Adriaola, 2008). Una sucesión marina que contiene carbón llamada Formación Caleta Chonos (Eoceno? - Oligoceno?) aparece en una pequeña área del noroeste de Chiloé (Antinao et al., 2000). Rocas volcánicas y subvolcánicas del Oligoceno superior – Mioceno inferior del Complejo Volcánico Ancud aflora en el noroeste de Chiloé (Antinao et al., 2000). Estratos

marinos miocenos de la Formación Lacui y unidades equivalentes se extienden en la parte oeste de Chiloé y aparecen en alguna de las Islas Chonos hacia el sur (DeVries et al., 1984; Antinao et al., 2000; Nielsen & Glodny, 2009; Kiel and Nielsen, 2010; Nielsen & Encinas, 2014). Estratos marinos pliocenos (?) de la Formación Caleta Godoy afloran en la parte más al norte de Chiloé (Antinao et al., 2000). Depósitos pleistocenos de origen glacial principalmente y holocenos continentales y marinos constituyen los depósitos más jóvenes de la zona (Encinas et al., 2014).

La geología de la Depresión Intermedia no se conoce bien debido a los escasos afloramientos. Datos de subsuperficie del pozo de 4010 m de profundidad, Puerto Montt 1 de ENAP (Empresa Nacional del Petróleo) indican la presencia de 1) una intercalación de tobas y brechas volcanoclásticas de edad desconocida de 1480 m de potencia a la base; 2) 310 m de rocas marinas miocenas; 950 m de rocas sedimentarias; y 4) 1300 m de depósitos continentales y marinos pleistocenos, esencialmente de origen glacial, que también afloran en la mayor parte de la depresión intermedia emergida (Katz, 1965; Elgueta et al., 2000). Estratos marinos miocenos (?) también aparecen en algunas áreas limitadas en la costa este de Chiloé e islas aledañas (Quiroz et al., 2004), además de los alrededores de la ciudad de Osorno, donde afloran rocas de la Formación Santo Domingo del Mioceno inferior a medio (SERNAGEOMIN, 2000). Rocas volcano-sedimentarias marinas del Cretácico Superior y rocas plutónicas eocenas afloran en el flanco oeste de la Depresión Longitudinal y algunas de las Islas Chonos (Encinas et al. 2014).

Las rocas más antiguas de la cordillera principal son del Complejo Metamórfico Cordillerano de edad Paleozoico-Triásico, que se exponen en la parte más occidental de la cordillera. (Duhart, 2008). Plutones mesozoicos-cenozoicos del Batolito Norpatagónico se exponen ampliamente en la Cordillera de los Andes (Pankhust et al., 1992). Son principalmente del Cretácico Inferior y Mioceno, aunque también hay del Devónico, Eoceno, Oligoceno inferior, Plioceno (Duhart, 2008) y pliocenas-pleistocenas de la Formación Malleco que se evidencia entre los lagos Rupanco y Llanquihue (SERNAGEOMIN, 2003). En los flancos este y oeste de la cordillera aparecen rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias jurásicas, cretácicas, paleógenas y neógenas (Giacosa et al., 2005; Duhart, 2008; Ramos and Ghiglione, 2008).



Leyenda

- Depósitos Cuaternarios
- Volcanismo Cuaternarios
- Rocas volcánicas del Plioceno-Pleistoceno
- Rocas sedimentarias del Oligoceno superior-Mioceno
- Rocas volcánicas y sedimentarias del Oligoceno superior-Mioceno inferior (CF: Formación Traiguén)
- Rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno inferior (CMB: Cinturón Magmático Costero)
- Rocas volcánicas del Eoceno superior-Mioceno inferior (EMB: Cinturón El Maitén)
- Rocas volcánicas del Paleoceno-Eoceno

- Rocas Plutónicas del Jurásico-Neógeno (Batolito Norpatagónico)
- Rocas volcánicas de fines del Cretácico Inferior (Grupo Divisadero)
- Rocas volcánicas del Jurásico-Cretácico
- Rocas volcánicas del Jurásico (formaciones Lago La Plata - Lonco Trapial)
- Rocas plutónicas del Jurásico Inferior (Batolito subcordillerano)
- Rocas volcánicas y sedimentarias del Triásico
- Rocas cristalinas previas al Jurásico

Simbología









-  Faja corrida y plegada Norpatagónica
-  Zona de falla Liquiñe-Ofqui
-  Lineamiento
-  Localidad
-  Limite internacional
-  Lago
-  52 ± 2.0 Edad geocronológica (Ma)
K-Ar U-Pb Rb-Sr
-  Volcanes activos

Figura 4: Mapa geológico de la zona en estudio. Fuente: Fernández et al., 2018.

Los depósitos marinos cenozoicos incluyen 1) rocas marinas volcanosedimentarias del Oligoceno superior - Mioceno inferior de la Formación Traiguén en la parte occidental de los Andes y en el Valle Central hacia el sur (Hervé et al., 2001; Riffo et al., 2013); 2) Rocas sedimentarias marinas de las formaciones Ayacara y Río Foyel del Mioceno inferior en la parte oeste y este de la cordillera, respectivamente; 3) Rocas marinas de la Formación Puduhuapi del Eoceno? - Mioceno? cerca de Chaitén; 4) Rocas marinas de la Formación Vargas del Eoceno? en la parte central de la cordillera; y 5) rocas marinas eocenas? - miocenas? de la Formación Cascada en la parte este, cerca de Fuataleufú. Por último, las sucesiones más jóvenes de los Andes corresponden igualmente a rocas volcánicas, volcanoclásticas y depósitos glaciares del Pleistoceno y Holoceno (Encinas et al., 2014).

IV.2.2.2. Estructuras

La estructura dominante del sector cordillerano es el Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (Figura 4), esta estructura regional de edad neógena a cuaternaria (Lavenu & Cembrano, 1999; entre otros), de rumbo general variable entre N-S y N20°E y movimientos dextrales (Cembrano et al., 1996), afecta claramente a las unidades litológicas del Batolito Norpatagónico principalmente.

Las trazas principales, de desplazamiento del Sistema de Falla de Liquiñe-Ofqui ha controlado la localización de algunos de los centros del frente volcánico Plio-Cuaternario. Los volcanes activos de la región del Complejo Volcánico Antillanca, Punttiagudo, del Campo Volcánico Cayutué-La Viguería, Yate, Hornopirén y Michimahuida, se ubican claramente a lo largo de las trazas de falla principales, por lo que constituyen la última reactivación de un sistema de falla dúctil de edad mesozoica (Cembrano et al., 1996) que controla el emplazamiento del arco volcánico cuaternario y afecta al batolito patagónico desde el Mesozoico. A esta megaestructura se le asocia también, en el Holoceno, fallas extensionales de orientación NW y fallas compresionales de dirección NE relacionadas con movimientos transcurrentes.

Dichas trazas principales manifiestan, también durante el Plioceno-Cuaternario, un componente extensional, evidenciado por la existencia de cuencas neotectónica de orientación aproximada N-S, que constituirían el límite oriental de la Depresión Central.

Por otro lado, la Cordillera de la Costa está caracterizada por una deformación polifásica desde el mesozoico y el desarrollo de la extensión durante el Eoceno tardío – Oligoceno asociado con la cuenca marina de intrarco de Traiguén (Encinas et al., 2016).

Con análisis de imagen de radar en la Cordillera de la Costa y la depresión intermedia (Muñoz, 1997) se constatan lineamientos de rumbo noroeste que cruzan la Cordillera de la Costa y la Depresión Central que coinciden con trazas de fallas extensionales. Uno de los sistemas es extensional de rumbo noreste y otro es transcurrente de dirección noroeste, y estos habrían controlado la localización de los depocentros de las cuencas terciarias y la ubicación de cuencas neotectónicas en el borde occidental de la Depresión Central, representadas por las cuencas Osorno-Llanquihue. El autor relaciona ambos sistemas, y en particular las fallas extensionales habrían jugado un papel importante en el volcanismo del Cenozoico. Algunas de las fallas extensionales aparecen, en el sector sur del segmento estudiado, reactivadas en forma de fallas inversas (McDonough et al., 1997), durante la deformación compresional pos-extensión que afectó a las sucesiones sedimentarias. Muñoz (1997) interpreta al sistema transcurrente como un sistema estructural antiguo, penetrativo y regional, que ha afectado tempranamente al protolito de las rocas del basamento metamórfico, posiblemente en el Paleozoico superior-Triásico, y que ha tenido reactivaciones, al menos, durante el Terciario y Cuaternario.

Elgueta et al. (2000), en un estudio de la estratigrafía y sedimentología de las cuencas terciarias de la Región de los Lagos entre los 39° y 41°30'S, señala que la apertura y evolución de los depocentros de la Depresión Central, reflejan una combinación de eustasia y subsidencia tectónica controlada por fallas normales, donde la sedimentación se inició en el Oligoceno tardío, posiblemente en un periodo de 'lowstand' eustático en el cual se excavaron profundos valles fluviales en el basamento metamórfico. Elgueta et al. (2000) proponen que estos depocentros fueron posteriormente inundados por el mar durante una fase transgresiva que se inició alrededor de los 23,5 Ma y culminó en el Mioceno medio (15-10 Ma), cuando se produjo un drástico cambio en la fuente de aporte de detritos. En su base presentan litofacias de origen aluvial y fluvioestuarino de proveniencia del basamento metamórfico del Paleozoico-Triásico, mientras que las litofacias superiores marinas, de composición volcanoclástica, sugieren un aporte de detritos a partir de la erosión de rocas volcánicas. Finalmente, los autores interpretaron movimientos compresivos y transpresivos del Mioceno superior (entre 10 y 8 Ma) que produjeron el cierre e inversión tectónica de las cuencas y la imposición de condiciones de sedimentación continental en la Depresión Central.

IV.3. HIDROGRAFÍA

La región se caracteriza por presentar una gran cantidad de ríos de régimen mixto y con caudal constante mantenido por las precipitaciones permanentes. La mayoría de las veces en gran parte de sus cursos inferiores se hace posible la navegación por la presencia de lagos precordilleranos en su curso superior, los cuales regulan sus cursos de agua en forma natural y además son receptores de los sedimentos arrastrados desde las montañas. (BCN, 2021).

Esta región posee en total 8 cuencas (Tabla 1 y Figura 5), de norte a sur: Cuenca del Río Bueno, Cuencas e islas entre Río Puelo y Río Bueno, Cuenca del Río Puelo, Cuencas Costeras entre Río Puelo y Río Yelcho, Islas Chiloé y Circundantes, Cuenca del Río Yelcho, Cuencas Costeras entre Río Yelcho y límite regional y Río Palena y Costeras Límite regional. (DGA, 2021).

Tabla 1: Catálogo de cuencas y subcuencas hidrográficas Región de los Lagos. Fuente: DGA, 2021.

Código cuenca	Cuenca	Área de la cuenca km ²	TIPO	Región	% por región
Código subcuenca	Subcuenca	Área de la subcuenca km ²			
103	Río Bueno	15366,76	Exorreica	X - XIV	(50 - 50)%
1030	Afluentes Lago Ranco	3346,44			
1031	Río Bueno entre Lago Ranco y Río Pilmaiquén	1765,34			
1032	Río Pilmaiquén	2910,33			
1033	Río Bueno entre Río Pilmaiquén y Río Rahué	406,86			
1034	Río Rahué hasta antes junta Río Negro	2161,04			
1035	Río Negro	2576,46			
1036	R. Rahué Bajo	1485,32			
1037	R. Bueno Bajo	714,97			
104	Cuencas e Islas entre R.Bueno y R. Puelo	13507,84	Exorreica	X	100%
1040	Costeras entre Río Bueno y Río Maullín	3998,78			
1041	Río Maullín	3971,54			
1042	Costeras e Islas entre Río Maullín y Río Chamiza	1045,57			
1043	Río Chamiza	814,20			
1044	Costeras entre Río Chamiza y Río Petrohué	546,82			
1045	Río Petrohué	2703,84			
1046	Costeras entre Río Petrohué y Río Puelo	427,10			
105	Río Puelo	3094,45	Exorreica	X	100%
1050	Río Manso	809,80			
1051	R. Puelo Alto	1618,01			
1052	R. Puelo Bajo	666,64			
106	Costeras entre R.Puelo y R.Yelcho	6248,95	Exorreica	X	100%
1060	Costeras entre Río Puelo y Punta Trentelhué	568,69			
1061	Costeras Entre Pta Tentelhué y Río Negro	590,30			
1062	Islas Pelada y Llancahué	69,41			
1063	Costeras entre Río Negro y Río Vodudahué	1031,60			
1064	Río Vodudahué	879,38			
1065	Península Huequi	896,99			
1066	R. Reñihué	573,20			
1067	Costeras Entre R. Reñihué y R. Negro	379,00			
1068	Costeras Entre R. Negro y R. Yelcho	847,13			
1069	Archipiélago Desertores	413,24			
107	Río Yelcho	4084,66	Exorreica	X	100%
1070	Río Futaleufú	1922,26			
1071	Río Yelcho	2162,40			
108	Costeras entre R.Yelcho y límite Regional	2709,26	Exorreica	X	100%
1080	Costeras entre Río Yelcho y Río Corcovado	452,26			
1081	Río Corcovado	895,67			
1082	Costeras entre Río Corcovado y Límite Región	1361,32			
109	Islas Chiloé y Circundantes	9964,17	Exorreica	X	100%
1090	Isla Chiloé	8400,97			
1091	Islas al Este de Quenchi	316,79			
1092	Islas entre Punta Chillidque y Punta Ahoni	780,73			
1093	Isla Tranqui	159,68			
1094	Islas frente a Quellón	79,63			
1095	Islas al Sur de Chiloé	22,73			
1096	Isla Guafo	203,65			
110	Río Palena y Costeras Límite Décima Región	7732,64	Exorreica	X - XI	(33 - 67)%
1100	Costeras entre Límite Décima Región y Río Palena	578,84			
1101	Lago Palena	347,22			
1102	Río Palena entre Frontera y Río Rosselot	2674,43			
1103	Río Rosselot	2852,87			
1104	R. Palena Bajo	1279,29			

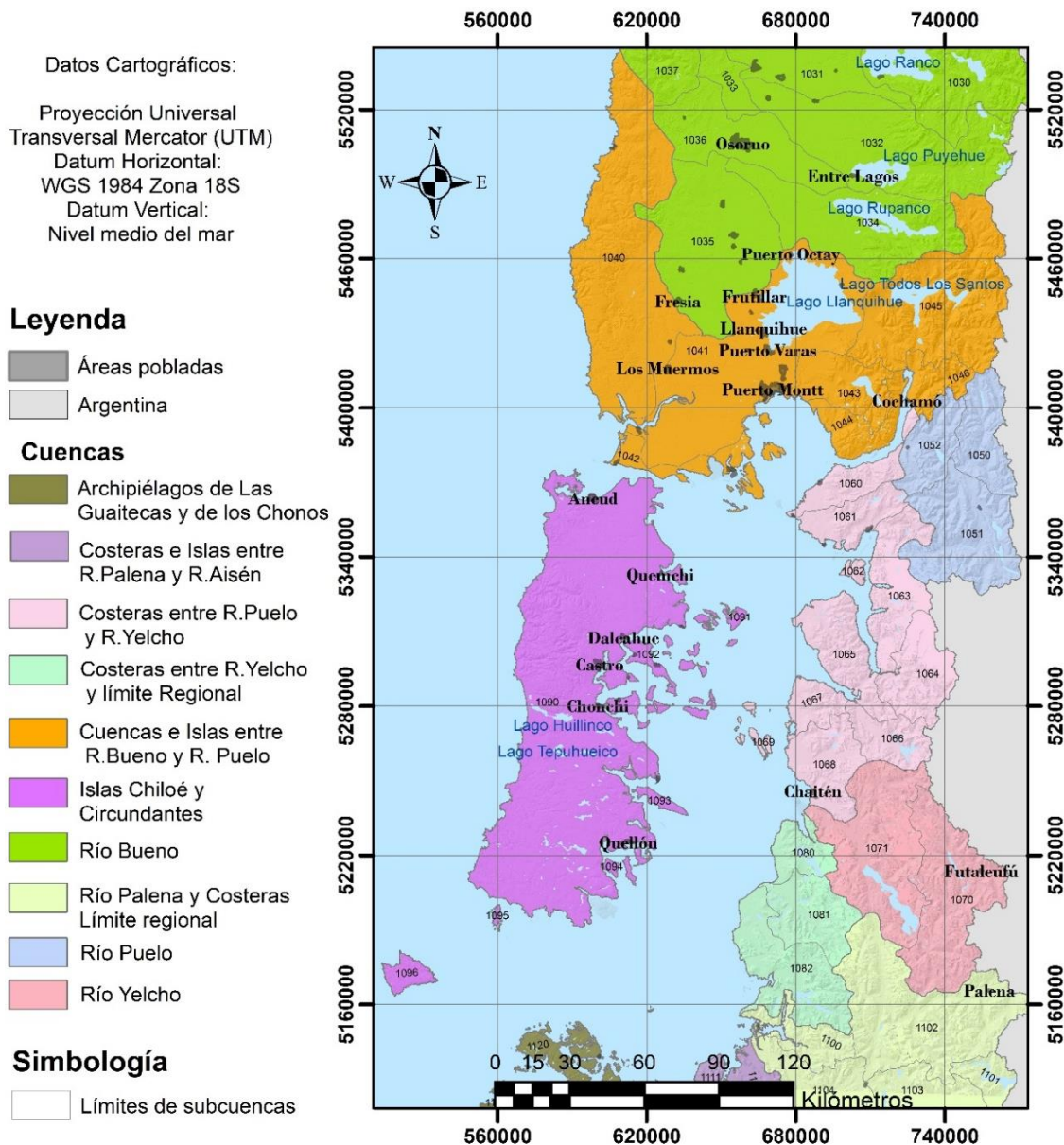


Figura 5: Mapa de división de cuencas y subcuencas (ver códigos en tabla 1) de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

IV.3.1. Cuenca del río Bueno

La cuenca del río Bueno se encuentra en la Región de Los Ríos y en la Región de Los Lagos, entre los paralelos 39°50' y 41°05' de latitud sur, al sur de la cuenca del río Valdivia. Abarcando una superficie de 15.367 km² (DGA & CADE IDEPE Consultores en Ingeniería, 2004).

La cuenca hidrográfica es la quinta en tamaño a nivel nacional. Contiene a tres grandes lagos, el lago Ranco (70 m s.n.m.), el lago Puyehue (212 m s.n.m.) y el lago Rupanco (141 m s.n.m.). De éstos, el lago Ranco es el de mayor envergadura, su principal afluente es el río Calcurrupe el cual desagua al lago Maihue, el río Nilahue junto con el río Caunahue también son afluentes importantes del lago (Figura 6) (DGA & CADE IDEPE Consultores en Ingeniería, 2004).

caudales bajos entre enero y abril. En cambio, en años normales y secos, los mayores caudales se concentran entre julio y agosto, y los menores caudales entre marzo y abril (DGA & CADE IDEPE Consultores en Ingeniería, 2004).

La sección alta de la cuenca, en donde se encuentran los afluentes de los lagos y el río Coihueco, presenta un régimen pluvio-nival, registrándose los mayores caudales en invierno y primavera. En años húmedos las lluvias de invierno hacen que los mayores caudales se concentren desde junio hasta agosto, y producto de los deshielos los caudales incrementan entre octubre y diciembre, ya en febrero-marzo se concentran los menores caudales. En cambio, en años secos, los menores caudales se concentran entre enero y mayo (Villarroel, 2014; DGA & CADE IDEPE Consultores en Ingeniería, 2004). En los años húmedos, los caudales máximos se concentran entre junio y agosto, y van disminuyendo paulatinamente hasta sus magnitudes más bajas, entre enero y marzo.

La parte media y baja de la cuenca presentan un régimen pluvial, registrándose los máximos caudales en invierno y los mínimos caudales en verano. En los años húmedos los caudales máximos se concentran entre junio y agosto, y los caudales bajos entre enero y abril. En cambio, en años normales y secos, los mayores caudales se concentran entre julio y agosto, y los menores caudales entre marzo y abril (DGA & CADE IDEPE Consultores en Ingeniería, 2004).

IV.3.2. Cuencas e islas entre río Bueno y río Puelo

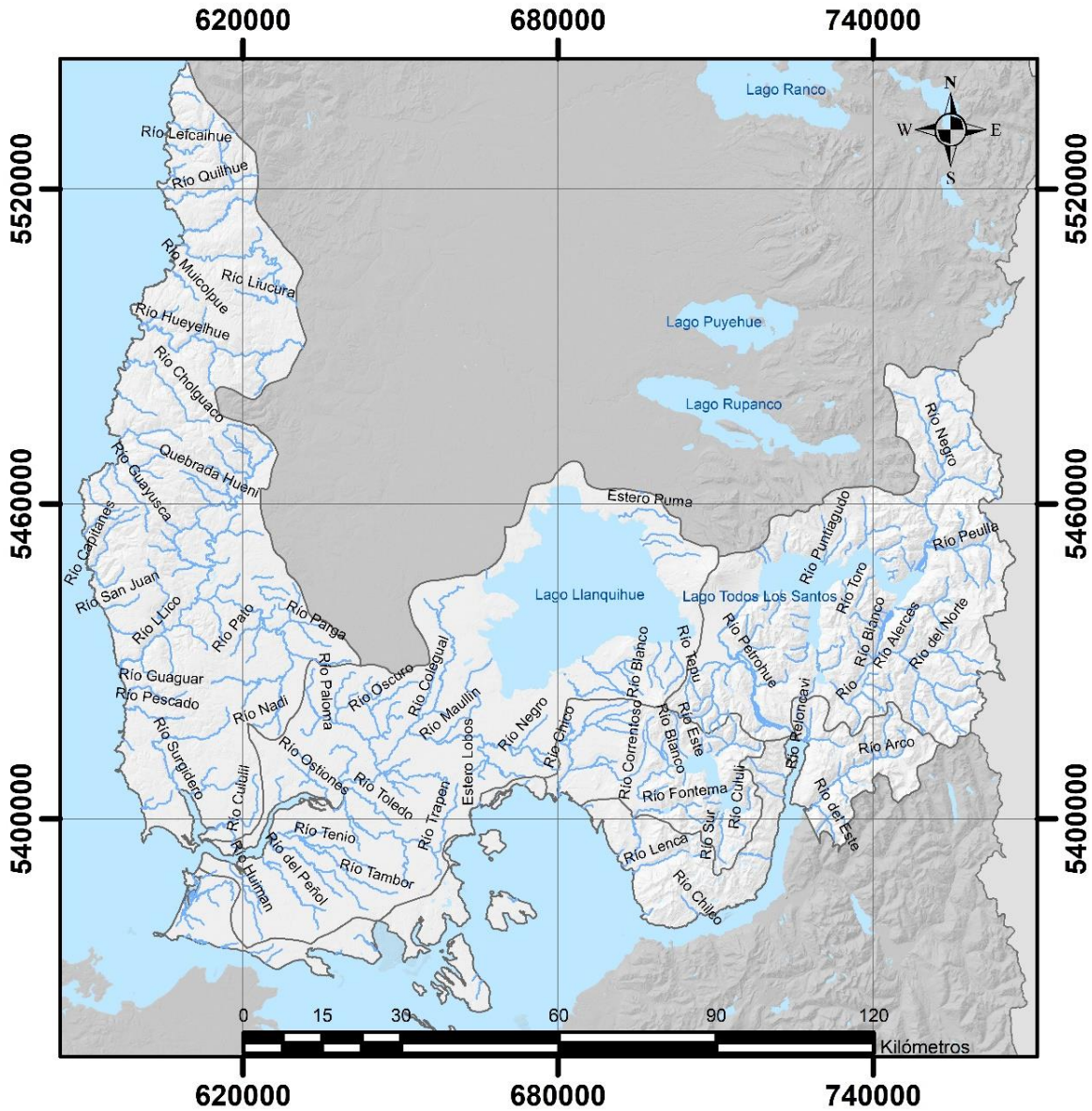
Esta cuenca se encuentra en su totalidad en la Región de Los Lagos, la superficie de esta zona es de aproximadamente 13.500 km² y se ubica entre los 40° 45' y 42° de latitud sur. Su límite norte corresponde a la cuenca del río Bueno, mientras que por el sur limita con el Canal de Chacao, el Golfo de Ancud y la cuenca del río Negro. (Ayala, Cabrera y asociados LTDA. AC Ingenieros Consultores LTDA., 2003).

Contiene a 2 grandes lagos, el lago de Todos Los Santos y el Llanquihue, y sus ríos más importantes son los Maullín, Petrohué y Chamiza (Figura 7). (Ayala, Cabrera y asociados LTDA. AC Ingenieros Consultores LTDA., 2003).

El río Maullín, que nace a los 41° 15' de latitud sur, posee una longitud de 85 km. Su caudal medio es de 100 m³/s, y un régimen de alimentación netamente pluvial. Nace en el lago Llanquihue y desemboca en la amplia bahía de Maullín, y sólo es navegable en su curso inferior por naves de poco calado. (BCN, 2021).

El río Petrohué nace en el Lago Todos los Santos y desagua en el mar, al fondo del estuario de Reloncaví. Está situada entre los 40° 45' y 41° 30' de latitud sur. Las precipitaciones en esta cuenca, especialmente en las partes más altas y cordilleranas, son notablemente mayores que en sus vecinas del Maullín y río Bueno. (Ayala, Cabrera y asociados LTDA. AC Ingenieros Consultores LTDA., 2003).

El río Chamiza, desagüe del lago Chapo, está ubicado entre los 41° 15' y 41° 45' de latitud sur y entre los 72° 15' y 73° de longitud oeste. Se encuentra rodeada por las hoyas de los ríos Maullín y Petrohué y por el seno de Reloncaví. Las precipitaciones son bastante cuantiosas en esta pequeña hoya, con valores sobre los 2.000 mm/año. (Ayala, Cabrera y asociados LTDA. AC Ingenieros Consultores LTDA., 2003).



Leyenda

- Cuencas e Islas entre Río Bueno y Río Puelo
- Otras cuencas
- Argentina

Simbología

- Red Hidrográfica
- Límites de subcuencas

Datos Cartográficos:

Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)

Datum Horizontal: WGS 1984 Zona 18S

Datum Vertical: Nivel medio del mar

Figura 7: Red hídrica de Cuencas e Islas entre Río Bueno y Río Puelo. Fuente: Elaboración propia.

IV.3.3. Cuenca islas Chiloé y circundantes

Esta cuenca se encuentra en su totalidad en la Región de Los Lagos, la superficie de esta zona es de aproximadamente 9.960 km² y se ubica entre los 41° 45' y los 43° 30' de latitud sur. (Ayala, Cabrera y asociados LTDA. AC Ingenieros Consultores LTDA., 2003).

Esta zona está formada principalmente por la isla grande de Chiloé y un sinnúmero de pequeñas islas que la circundan. Los ríos de esta zona son muy pequeños y desaguan directamente al mar (Figura 8). Aunque la pluviosidad de la zona es alta, unos 2.500 mm/año, los caudales de los ríos no son muy importantes. A modo de ejemplo, en la estación Carihueico en Piruquina se tienen 28,3 m³/s, y el Natri en desagüe Lago Natri 2,9 m³/s. (Ayala, Cabrera y asociados LTDA. AC Ingenieros Consultores LTDA., 2003).

IV.3.4. Cuencas surorientales

Esta zona abarca las cuencas de los ríos Puelo, Yelcho, Costeras entre río Puelo y río Yelcho, Costeras entre río Yelcho y límite regional y río Palena y costeras con límite de Décima Región, con superficies en el territorio chileno de 3.094, 4.085, 6.249, 2.079 y 7.733 km² respectivamente, aunque varias de estas también incluyen territorio argentino. Se ubican entre los 41°45' y 44° latitud sur y los 73° y 71°20' de longitud oeste.

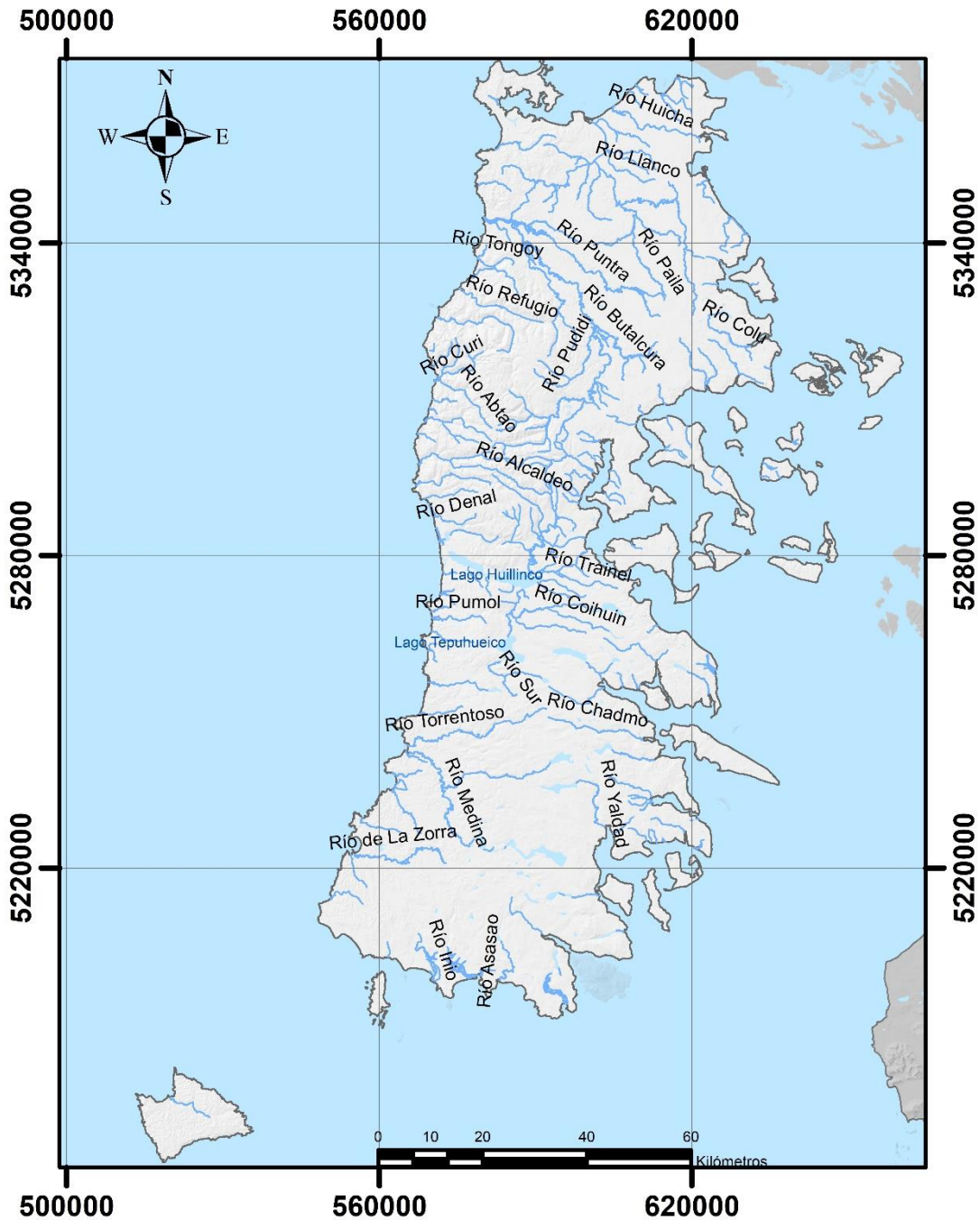
Esta zona está conformada por pequeñas cuencas de ríos que nacen en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes vertiendo sus aguas al mar, en los golfos de Ancud y Corcovado (Figura 9). Presentan caudales de cierta importancia debido a la alta pluviosidad de la zona. (Ayala, Cabrera y asociados LTDA. AC Ingenieros Consultores LTDA., 2003).

Los registros hidrológicos al interior de la cuenca presentan un marcado régimen pluvial en los años húmedos, donde los meses de mayor caudal corresponden a invernales, con algunas excepciones como el río Futaleufú que tiene un régimen nivo-pluvial, es decir, que presenta sus mayores caudales en primavera debido a los deshielos cordilleranos (Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2016).

Dentro de estas cuencas los cauces más destacables son:

Río Puelo: Nace en el lago Puelo y desemboca en el estuario de Reloncaví después de recorrer 120 km. Tiene un régimen de alimentación pluvial y su caudal medio es de 670 m³/s. Sus aguas se utilizan en la producción de energía hidroeléctrica en la central Puelo. (BCN, 2021).

Río Yelcho: Nace en el lago Yelcho y desemboca en la ensenada de Chaitén en el golfo de Corcovado. Es alimentado por los ríos Futaleufú, Correntoso, Cascada, Enredadera y Malito. Tiene una extensión de 246 km y una hoya hidrográfica transandina de 11.000 km². Su régimen de alimentación es pluvial y su caudal medio es de 360 m³/s. Es navegable a excepción de su desembocadura. (BCN, 2021).



Legenda

- Cuenca Islas Chiloé y Circundantes
- Otras cuencas

Simbología

- Red Hidrográfica

Datos Cartográficos:

Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)
 Datum Horizontal: WGS 1984 Zona 18S
 Datum Vertical: Nivel medio del mar

Figura 8: Red hídrica de Cuenca Islas Chiloé y Circundantes. Fuente: Elaboración propia.

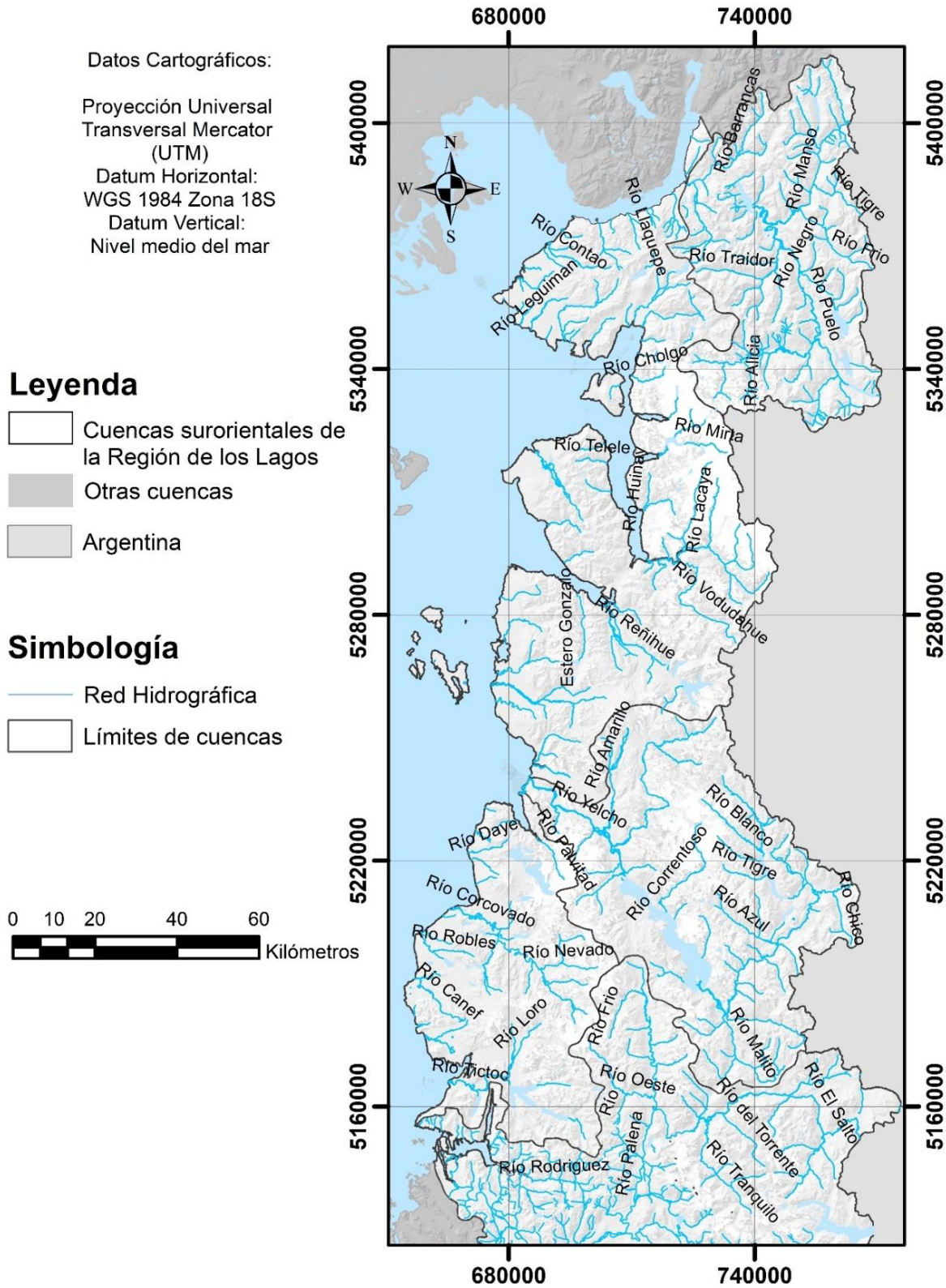


Figura 9: Red hídrica de Cuencas surorientales y Circundantes. Fuente: Elaboración propia.

IV.4. CLIMA

El clima de la región es de tipo templado oceánico lluvioso, existiendo dos subtipos de climas templados. Clima templado lluvioso con influencia mediterránea: se desarrolla preferentemente en la zona del Valle Longitudinal, hasta el tercio superior de la Isla de Chiloé presentando temperaturas promedio de 11°C y con precipitaciones promedio entre los 1.300 a 1.800 mm anuales. Clima templado frío de costa occidental con máximo invernal de lluvias: se desarrolla en el sector centro y sur de la Isla de Chiloé y en su extensión en el territorio continental (provincia de Palena). Las temperaturas promedio bordean los 10°C como media anual, variando de acuerdo a los vientos predominantes y su exposición, con precipitaciones promedio de 2.100 mm anuales concentrándose principalmente en invierno (MOP, 2012).

IV.5. HIDROGEOLOGÍA

En el 2008 el SERNAGEOMIN y el GORE de la región de los Lagos llevó a cabo un levantamiento hidrogeológico de la zona, aparte de este estudio, existe una sectorización de acuíferos hecha por la DGA en el año 2016 de manera preliminar con fines administrativos (Figura 10), además de un mapa hidrogeológico de Chile, realizado por la DGA en 1986 (Figura 11), y aunque este no hace una división de acuíferos en el sentido estricto de lo que el término significa, como sí lo hace SERNAGEOMIN y el GORE en el 2008, sí es útil para dar las principales características hidrogeológicas de la zona.

Hay una correlación bastante clara entre las características geológicas con las hidrogeológicas (ver Figura 4 y Figura 11), donde la importancia hidrogeológica relativa alta a media se corresponde con los depósitos que se pueden encontrar principalmente en la depresión intermedia y en las planicies litorales del flanco occidental de la isla de Chiloé. Éstos son principalmente depósitos cuaternarios no consolidados, tanto de origen continental (esencialmente de origen glacial) y estratos marinos.

Tanto la Cordillera de la Costa, como en la de los Andes, son de una importancia hidrogeológica de muy baja a nula, esto debido a que en la primera las unidades geológicas expuestas corresponden principalmente a rocas cristalinas previas al Jurásico y rocas volcánicas y sedimentarias oligocenas – miocenas, mientras que la Cordillera de los Andes predomina la presencia del Batolito Norpatagónico, además de rocas volcánicas del Plioceno al reciente y ninguna de las unidades antes mencionadas se caracteriza por tener propiedades características de un acuífero explotable en el sentido de que no tienen ni una buena porosidad ni permeabilidad.

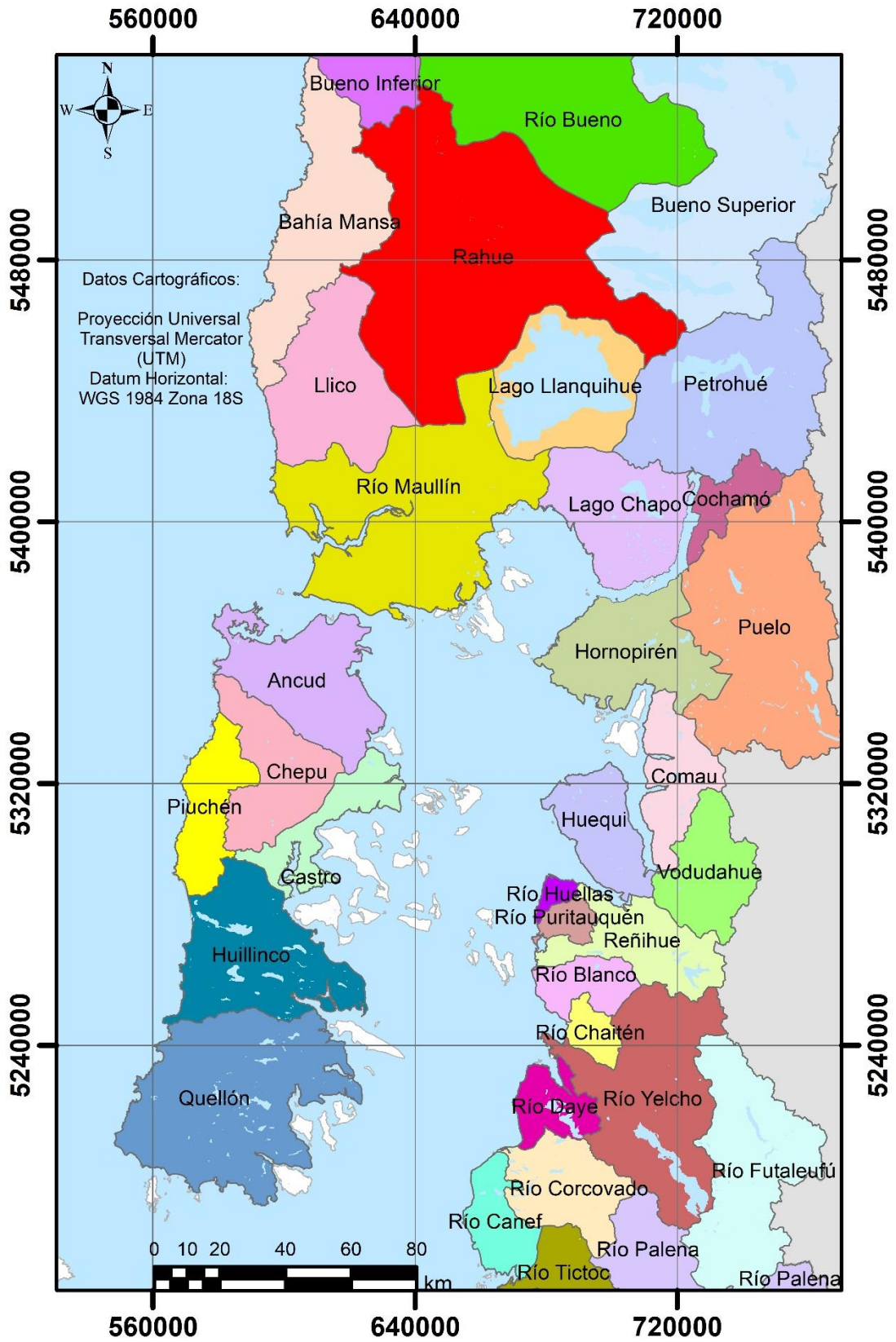


Figura 10: Mapa de División de los sectores de acuíferos en la Región de Los Lagos, Fuente: Elaboración Propia.

MAPA HIDROGEOLÓGICO

LEYENDA GENERAL

I HIDROGEOLÓGIA

1. OCURRENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.			
TIPO PERMEABILIDAD	SÍMBOLO	IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA RELATIVA	PRINCIPALES FORMACIONES
PRIMARIA. (En formación porosa)		ALTA A MEDIA	Q Qv T
		BAJA	T
SECUNDARIA. (En roca)		MEDIA	T
		ALTA A BAJA	TQ T Cz
MUY BAJA A AUSENTE. (En roca)		MUY BAJA	Qv TQ T Cz J K
		MUY BAJA	TQ T KT K M J PzM
		NULA	Tg Jtg Jg Ktg Pzg Kg Mg
		NULA	Pz
	?		SIN INFORMACIÓN

2. PRODUCTIVIDAD DE LOS POZOS. (m ³ /h/m).	
	> 10 m ³ /h/m. Muy elevada.
	4 - 10 m ³ /h/m. Elevada.
	1 - 4 m ³ /h/m. Elevada a media.
	0.13 - 1 m ³ /h/m. Media a baja.
	< 0.13 m ³ /h/m. Muy baja.
	Sin información.

3. DATOS DE POZOS.	
	1. Unidad acuífera captada.
	2. Profundidad del pozo en m.
	3. Profundidad del nivel estático en m.
	4. Productividad en m ³ /h/m.
	5. Calidad del agua subterránea TSD mg/l.

4. PERFILES HIDROGEOLÓGICOS ESQUEMÁTICOS.	
	Identificación de los estratos atravesados. Se agrega características específicas.
	Espeesor de los estratos atravesados en m.

5. INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA GENERAL.	
	Limite entre provincias hidrogeológicas.
	Limite entre subprovincias hidrogeológicas.
	Sentido de escurrimiento de las aguas subterráneas.
	Zona de aguas surgentes.
	Zona de explotación intensiva a crítica.

II INFORMACIÓN REFERENCIAL

1. DATOS GEOGRÁFICOS	2. DATOS HIDROGRÁFICOS	3. GEOLOGÍA
	Limite entre cuencas hidrográficas.	----- Líneas de contacto entre formaciones.
	Cursos permanentes.	----- Fallas importantes.
	Cursos permanentes salados.	Q Cuaternario no consolidado.
	Cursos intermitentes.	Qv Cuaternario volcánico.
	Lagos, Lagunas.	TQg Terciario-Cuaternario, generalmente volcánico.
	Salares.	T Terciario sedimentario volcánico.
	Glaciares.	Cz Cenozoico volcánico.
	Embalses.	Tg Terciario plutónico.
	Zonas pantanosas o sujetas a frecuentes inundaciones.	K Cretácico mixto sedimentario y volcánico.
	Vertiente fría.	KT Cretácico-Terciario mixto sedimentario-volcánico.
	Vertiente caliente.	Kg Cretácico plutónico.
	Geysir.	KTg Cretácico-Terciario plutónico.
		J Jurásico mixto sedimentario-volcánico.
		Jg Jurásico plutónico.
		Jtg Jurásico-Cretácico plutónico.
		Jtg Terciario-Terciario plutónico.
		M Mesozoico volcánico-sedimentario.
		Mg Mesozoico plutónico.
		Pzg Paleozoico plutónico.
		Pz Paleozoico metamórfico.
		PzM Paleozoico mesozoico mixto sedimentario-volcánico.

Base Cartográfica: MAPA ESCALA 1:1.000.000
Fuente: INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
Base Geológica: MAPA GEOLÓGICO NACIONAL
Fuente: SERNAGEOMIN

Figura 12: Leyenda general de Mapa Hidrogeológico de Chile escala 1: 1.000.000. Fuente: DGA, 1986a.

IV.5.1. Definición de acuíferos

El siguiente subcapítulo se extrajo de SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008. Esta investigación se realizó con la información geológica y los datos recopilados y recolectados de 2.209 captaciones de agua subterránea en la Región. Los datos de las captaciones incluyen antecedentes del propietario, ubicación, descripción litológica de la estratigrafía, pruebas de bombeo, análisis químicos y fisicoquímicos, entre otros. Del total de captaciones registradas, 307 son del área de la Hoja Valdivia, 989 son del área de la Hoja Osorno, 669 son del área de la Hoja Puerto Montt y 244 son de la isla de Chiloé. La distribución de las unidades determinadas se muestra en la Figura 13, Figura 14, Figura 15 y en los subcapítulos siguientes, respecto a éstos cabe destacar que la clasificación usada ordena de la “A” a la “D” los acuíferos de mayor importancia hidrogeológica hasta los acuícludos respectivamente, mientras que los “/” se refieren a una barrera permeable y los “//” a barreras impermeables que definen acuíferos confinados.

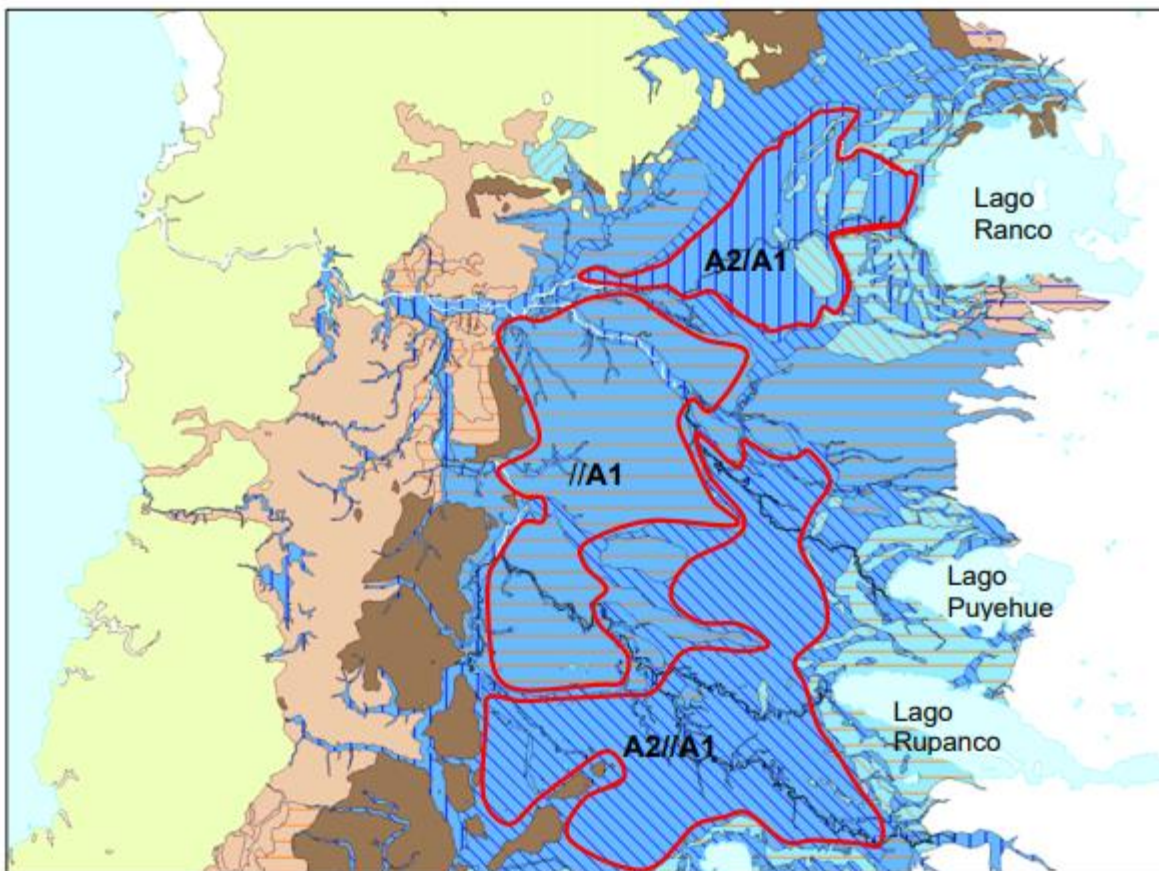


Figura 13: Hoja Hidrogeológica de Osorno. Acuíferos y zonas de especial interés a proteger e investigar. Fuente: SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008.

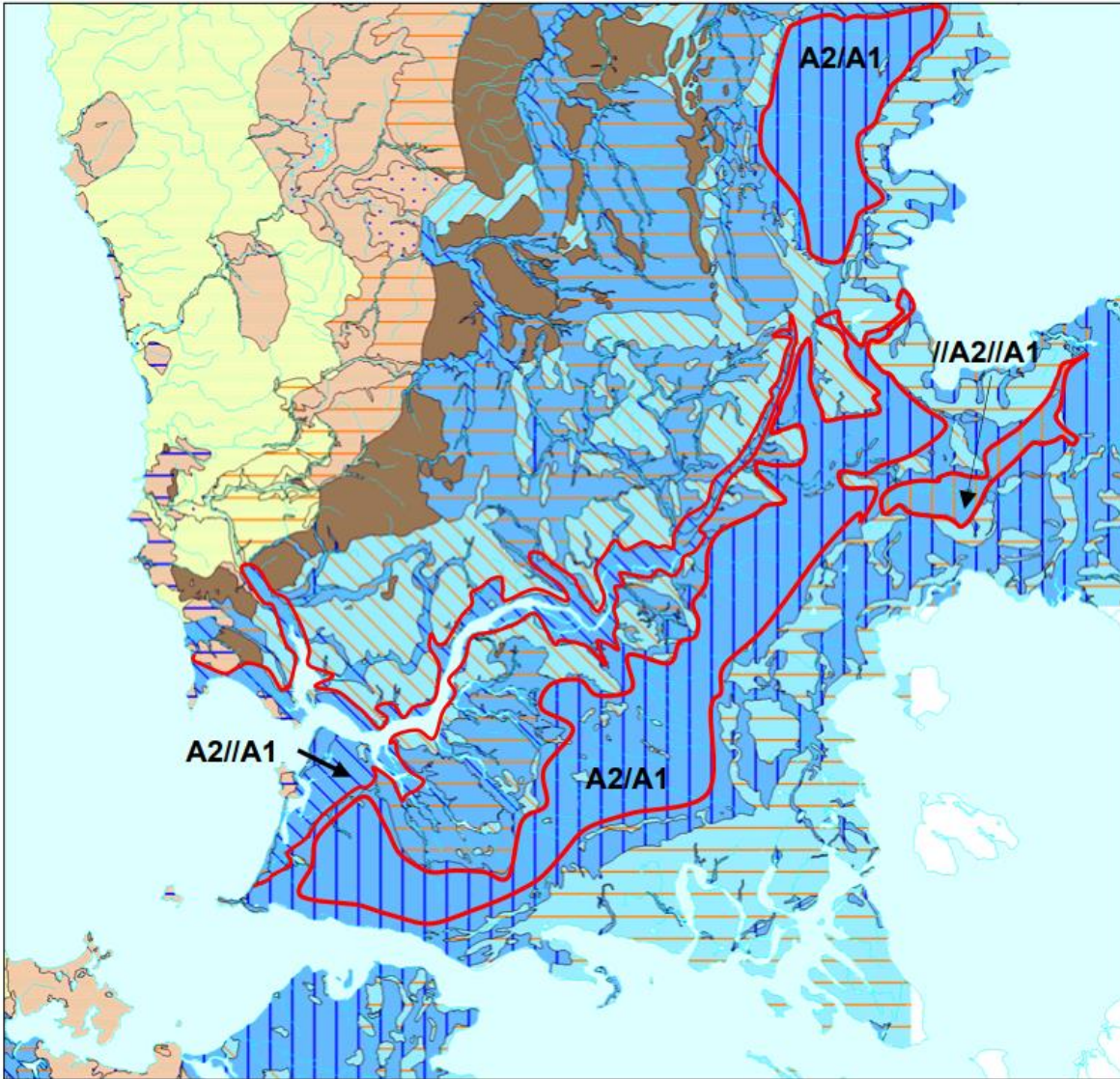


Figura 14: Hoja Hidrogeológica de Puerto Montt. Acuíferos y zonas de especial interés a proteger e investigar. Fuente: SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008.



Figura 15: Hoja Hidrogeológica de Castro. Acuíferos y zonas de especial interés a proteger e investigar. Fuente: SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008.

VI.5.1.2. Acuífero //A1

Acuífero confinado, semiconfinado o libre cubierto en depósitos glaciofluviales. En el entorno de las ciudades de Osorno, San Pablo y Río Bueno, el acuífero está cubierto por depósitos de permeabilidad baja a muy baja de la Secuencia piroclástica-epiclástica San Pablo. Hacia el sur, en la Hoja Puerto Montt (Figura 13) este acuífero se encuentra cubierto por limos, arcillas y arenas finas laminadas de los depósitos glaciolacustre y en partes por los depósitos morrénicos de bloques de la glaciación Santa María.

Constituye un acuífero importante, tanto por su extensión areal, como por su productividad y calidad del agua. Abastece el 95% de los pozos profundos y tiene conexión hidráulica con los ríos principales. Incluye arenas y gravas, con intercalaciones de arcillas y limos, y forma estratos y cuerpos lenticulares con extensiones laterales limitadas de 20 m a 1 km. Debido al frecuente cambio de facies, las propiedades hidrogeológicas varían de pozo a pozo.

En el sector de San Pablo, donde el nivel piezométrico se encuentra por encima de la superficie del terreno, el acuífero confinado se convierte en artesiano y las perforaciones que alcanzan al acuífero se convierten en pozos artesianos o surgentes. En zonas con mayor fracturamiento de la cubierta impermeable y en áreas en que la cubierta contiene intercalaciones gruesas que aumentan su permeabilidad, el acuífero principal es semiconfinado. En esta situación, el agua mantiene su presión, pero en algunos sectores su nivel sube hacia el interior de la cobertura. Cerca de los escarpes que acompañan los valles de los ríos mayores (Bueno, Pilmaiquén, Chirre, Rahue, Negro, Damas), el nivel piezométrico desciende hacia el nivel del río y deja una zona no saturada entre la superficie del acuífero y la base de la cubierta impermeable, situación conocida como 'libre cubierto'.

Los valores de transmisividad para este acuífero varían entre 50 y 2.000 m²/d, correspondiente a una transmisividad baja a muy alta. Los valores de la permeabilidad fluctúan entre 1×10^{-5} y 1×10^{-3} m/s, lo que indica una permeabilidad media a alta, equivalente a la de un depósito de arena. La distribución espacial de estos valores indica un aumento de la permeabilidad hacia el este, que corresponde con el aumento de la fracción gruesa de los sedimentos glaciofluviales. La transmisividad aumenta, generalmente, hacia el norte, debido al aumento del espesor del acuífero en esta dirección. Los niveles estáticos varían entre los 7 y 43 m b.n.t. (metros bajo el nivel del terreno), se sitúa a una profundidad variable entre los 10 y 77 m y posee un espesor superior a los 10 m.

Los caudales específicos varían entre 0,2 y 2,9 (L/s)/m. La relación esperable entre los caudales específicos, transmisividades y espesores del acuífero en los pozos construidos, debería ser una correlación próxima a 1, ya que el espesor define la transmisividad y ésta, a su vez, define el caudal específico. Sin embargo, la correlación obtenida no es óptima, lo que sugiere que no existe una relación o dependencia matemática entre dichas variables. Esto se debe, probablemente, a que la calidad de la construcción de los pozos profundos influye en el caudal específico, aumentando este en aquellos pozos mejor construidos. Los caudales máximos de pozos operativos se encuentran entre 5 y 63 L/s. Varios de estos pozos no alcanzan caudales óptimos, debido a diversos errores de diseño como pueden ser la extensión y posición de la zona captante (puede generar una captación parcial del acuífero), material de la criba o filtro (puede provocar obstrucciones en las ranuras por precipitación de Fe o daños por corrosión), características de la grava del "prefiltro", tiempo y método del "desarrollo", etc.

IV.5.1.2. Sistema de acuíferos A2/A1

Corresponde a los depósitos de gravas y arenas glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue y Santa María, que en su conjunto constituyen un acuífero libre. Se presenta en los márgenes de valles profundos de los ríos principales, como el Pilmaiquén, Negro, Rahue y Blanco, donde los depósitos glaciofluviales de Santa María subyacen directamente a depósitos fluviales y glaciofluviales de Llanquihue, los cuales en su conjunto constituyen un acuífero libre con conexión a la red fluvial local.

En las zonas de Puerto Montt y Castro se extiende ampliamente en el sector oriental y en forma reducida y discontinua en el lado occidental. Tanto en Puerto Montt como en Chiloé las gravas y arenas, con escasos limos y arcillas glaciofluviales de Santa María subyacen a las gravas y arenas glaciofluviales Llanquihue, fluviales, litorales, bloques, gravas y arenas coluviales y/o gravas, arenas y limos aluviales o estuarinos. Localmente, se encuentran intercalaciones de arcilla entre los depósitos glaciofluviales. En ambas hojas los niveles estáticos se sitúan a mayor profundidad alcanzando los 69 m b.n.t. Este sistema a nivel regional posee transmisividades bajas a muy altas (T: 50 a 3000 m²/d), permeabilidades bajas a altas (K: 10⁻⁵ a 10⁻³ m/s), caudales de explotación variables entre 1 y 80 L/s y específicos entre 0,11 y 18,75 (L/s)/m.

IV.5.1.3. Sistema de acuíferos A2//A1

Formado por un acuífero superior libre (A2) constituido por gravas y arena de los depósitos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue y/o fluviales, litorales, eólicos y arenas y limos estuarinos, que se disponen sobre un acuífero confinado (//A1) en depósitos del mismo tipo, correspondientes a la Glaciación Santa María.

El acuífero //A1 es confinado por depósitos de cenizas, lapillis, gravas, arenas y arcillas piroclásticas-epiclásticas, limos, arcillas y arenas finas glaciolacustres, o localmente por limos, arcillas, arenas finas, gravas y bloques morrénicos.

En el sector sureste de Osorno, al oeste de los Lagos Puyehue y Rupanco, y extendiéndose hacia los valles de la parte central, los depósitos glaciofluviales y fluviales constituyen un acuífero libre (A2), que abastece mayoritariamente norias y yace sobre los depósitos de la Secuencia piroclástica-epiclástica San Pablo, que a su vez yace sobre el acuífero de alta importancia //A1. La misma situación ocurre al noroeste del lago Ranco, en los alrededores de Paillaco. En tanto, en la hoja Puerto Montt (Figura 14) se extienden al oeste del lago Llanquihue hacia los valles de la parte central, teniendo su mayor exposición en el valle del río Maullín.

El acuífero A1, a nivel regional, posee transmisividades bajas a media-alta (T: 50 a 400 m²/d), permeabilidades bajas a altas (K: 10⁻⁵ a 10⁻³ m/s), caudales de explotación variables entre 2 y 15 L/s y específicos inferiores a 1,98 (L/s)/m. El espesor de los depósitos saturados con agua es inferior a los 10 m y el nivel freático se encuentra entre 1 y 5 m bajo la superficie del terreno.

IV.5.1.4. Sistema de acuíferos //A2/A1

Corresponde a un sistema similar al anterior en cuanto a las formaciones permeables que lo integran y su disposición estratigráfica, pero que se encuentra en condición de confinamiento o semiconfinamiento, al estar cubierto por gravas y bloques en matriz de arenas y limos de origen volcánico.

Este sistema que se extiende en la ribera sur del lago Llanquihue y entre las ciudades de Puerto Montt y Puerto Varas, a una profundidad variable entre los 12 y 73 m, con niveles estáticos entre 6 y 17 m bajo la superficie del terreno, con un espesor superior a los 20 m, posee transmisividades bajas a muy altas (T : 100 a 15000 m^2/d), permeabilidades bajas a altas (K : 10^{-5} a 10^{-3} m/s), caudales de explotación variables entre 5 y 50 L/s y específicos entre 0,53 y 4,54 (L/s)/m.

IV.5.1.5. Acuífero //B1

Acuífero libre cubierto, semiconfinado o confinado en bloques, gravas y arenas gruesas a finas, con arcilla o arcilla limosa en algunos niveles e intercalaciones de estratos de arcilla limosa pertenecientes a depósitos morrénicos de la Glaciación Llanquihue que se intercalan y gradan lateralmente con gravas y arenas de los depósitos glaciofluviales de la misma glaciación y que se distribuye en el sector frontal de los lagos Puyehue, Rupanco y Llanquihue y en la parte occidental de la isla de Chiloé. En sectores, estos depósitos se encuentran cubiertos por arcillas y limos laminados glaciolacustres y/o limos, arcillas y arenas finas estuarinas. Cuando el acuífero es libre cubierto, los niveles estáticos se encuentran entre 28,9 y 74,3 m, si es confinado se registra un nivel de 6 m, y en la situación de semiconfinado los niveles varían entre 10,7 y 71,8 m bajo la superficie del terreno. Regionalmente, posee transmisividades bajas a alta (T : 50 a 1.000 m^2/d), caudales de explotación variables entre 1 y 50 L/s y específicos entre 0,85 y 3,14 (L/s)/m. El espesor conocido del acuífero varía entre 4 y 115 m y se sitúa entre los 28,9 y 74,3 m (libre cubierto) y entre los 1 y 96 m (semiconfinado y confinado) de profundidad. Los estratos semiconfinantes se componen principalmente de bloque, gravas, arena fina y arcilla-limo. En la isla de Chiloé la granulometría más gruesa corresponde a las gravas que se encuentra en un porcentaje inferior al 10%.

IV.5.1.6. Acuífero B3

Corresponde al acuífero en roca fisurada del Complejo Metamórfico Bahía Mansa, que se extiende ampliamente en la región, formando la Cordillera de la Costa. Presenta las siguientes situaciones:

- **B3a.** Acuífero libre en esquistos pelíticos a semipelíticos, localmente cubiertos por sedimentos permeables de gravas y arenas de playa, fluviales, glaciofluviales, bloques, gravas y arenas coluviales, arenas eólicas o arenas finas y limos estuarina, con espesores promedio de 5 m, en el margen costero y en ríos secundarios.
- **//B3.** Acuífero confinado o libre cubierto en esquistos pelíticos a semipelíticos, cubierto por estratos impermeables a semipermeables de areniscas y arcillolitas sedimentarias, bloques y gravas en matriz de limo y arcilla, bloques y gravas en matriz arena, limo y/o arcilla morrénicos, arenas arcillosas consolidadas fluvioestuarinos o arenas arcillosas fluviales.

Se registran caudales variables entre 0,1 y 3,5 L/s en vertientes. Si este acuífero se encuentra libre, la superficie del agua se situaría entre 0 y 10 m de profundidad. Si se encuentra libre cubierto o confinado el agua se localiza entre los 5 y 25 m de profundidad. La recarga se da por la infiltración de las precipitaciones, a través de las fracturas y por el aporte de los esteros en zonas de estructuras, que favorecen la infiltración. El volumen de agua almacenada en el acuífero disminuye en profundidad, debido al cierre de las fracturas por el aumento de la presión confinante.

IV.5.1.7. Acuífero //B5

Acuífero confinado en bloques y gravas, en matriz de limo, arcilla y/o arena gruesa a fina, compacta y cementada, con óxidos de Fe y Mn, pertenecientes a depósitos morrénicos de la glaciación Santa María que se intercalan y gradan lateralmente con gravas y arenas de depósitos glaciofluviales de la glaciación Santa María, presentes en forma discontinua al oeste de los lagos Puyehue, Rupanco y Llanquihue y en la parte norte y centro de la isla de Chiloé.

Este acuífero que se encuentra cubierto principalmente por arcillas y gravas pertenecientes a depósitos morrénicos, posee niveles estáticos entre los 9,9 y 29,0 m bajo la superficie del terreno, transmisividades bajas a alta (T: 100 a 750 m²/d), permeabilidad baja (8×10^{-5} m/s), caudales de explotación variables entre 0,01 y 7 L/s y específicos entre 0,08 y 1,5 (L/s)/m. El espesor del acuífero varía entre 5 y 41 m y se sitúa entre los de 24 y 57 m de profundidad.

IV.5.1.8. Acuífero //B6

Acuífero semiconfinado en bloques y gravas, en matriz de arena y/o arcilla, con intercalaciones de arenas y óxidos de Fe y Mn correspondientes a los depósitos glaciofluviales de la glaciación río Llico. Se sitúa entre los 50 y 60 m de profundidad, encontrándose cubierto principalmente por gravas y arcillas pertenecientes a los depósitos glaciofluviales y, en sectores, cubiertas irregularmente por depósitos morrénicos de poco espesor de la misma glaciación. Posee niveles estáticos entre los 3 y 33 m bajo la superficie del terreno, caudales de explotación variables entre 0,5 y 3,6 L/s y específicos 0,06 (L/s)/m y un espesor de 10 m.

IV.5.1.9. Acuífero C1

Acuífero en roca fisurada de origen sedimentario, volcanosedimentario y volcánico, de edades oligocenas-miocenas que se extiende ampliamente en la región, formando parte de la Cordillera de la Costa. Este acuífero presenta los siguientes tipos:

- **C1.** Acuífero libre en areniscas, arcillolitas, conglomerados, tobas, limolitas, basaltos y/o andesitas basálticas fisuradas. En el sector central-oeste de la provincia de Osorno, las areniscas, conglomerados y limolitas, se encuentra libre y con conexión a la red fluvial. El agua percola a través de fracturas y emerge en vertientes y norias, para abastecimiento domiciliario. Posee un espesor superior a los 5 m, niveles estáticos entre 1,7 y 24,70 m bajo la superficie del terreno, caudales de vertiente y pozo profundo >5 L/s y 6 L/s, respectivamente, caudal específico de 0,08 (L/s)/m y se sitúa a una profundidad variable entre los 1,7 y 24,7 m.
- **C1a.** Acuífero libre en areniscas, arcillolitas, conglomerados, tobas, limolitas, basaltos y/o andesitas basálticas fisuradas, localmente cubiertos por depósitos permeables de gravas y arenas glaciofluviales y litorales, arenas eólicas o arenas limosas fluviales y estuarianas, de baja importancia como acuífero y como cubierta protectora del acuífero en roca fisurada. Destacan los acuíferos de los valles de los ríos Hueyusca y Llico debido a que los depósitos de gravas y arenas fluviales que lo cubren poseen un espesor variable entre 1 y 10 m.
- **//C1.** Acuífero confinado, semiconfinado o libre cubierto en areniscas, arcillolitas, conglomerados, tobas, limolitas, basaltos y/o andesitas basálticas, localmente cubiertas por estratos impermeables a semipermeables de bloques y gravas en matriz arena, limo

y/o arcilla morrénicos, cenizas, lapillis, gravas, arenas y arcillas piroclásticas-epiclásticas, arenas arcillosas fluviales o arenas arcillosas consolidadas fluvioestuarinas. Se ubican principalmente en valles del flanco este de la Cordillera de la Costa. Posee un espesor superior a los 5 m, niveles estáticos entre 7 y 15,4 m bajo la superficie del terreno, caudales de vertientes inferiores a 5 L/s y se sitúa a una profundidad variable entre los 8 y 50 m.

Aunque las areniscas poseen cemento arcilloso que impide el paso del agua a través de los poros, ellas se encuentran fracturadas, aumentando su permeabilidad secundaria. Los niveles arcillosos carecen de permeabilidad secundaria por fisuras, por lo que son totalmente impermeables. Existen escasas norias, vertientes y pozos profundos. Las vertientes situadas en zonas muy fracturadas o en el contacto litológico entre niveles arcillosos y arenosos, poseen caudales del orden de 1 L/s.

En sectores, donde las areniscas, conglomerados y limolitas fisuradas, están cubiertas por depósitos morrénicos y piroclásticos-epiclásticos, aunque no se ha comprobado, se infiere en ellas la presencia de un acuífero confinado. Localmente, es libre cubierto en altos topográficos, bajo depósitos morrénicos, y semiconfinado en valles, bajo depósitos piroclásticos-epiclásticos.

IV.5.1.10. Acuífero C2

Acuífero libre en rocas fisuradas de las secuencias sedimentarias y volcánicas de los Estratos de Pitreño y Formación Caleta Godoy. Se localiza en el sector sur de la ciudad Lago Ranco y en la Cordillera de la Costa, específicamente en el área cordillera de Zrao-Río Llico y en la parte norte de la isla de Chiloé. Este acuífero presenta los siguientes tipos:

- **C2.** Acuífero libre en conglomerados, brechas y lavas andesíticas, fuertemente alteradas y conglomerados, tobas y areniscas. El agua percola a través de fracturas y emerge en vertientes y norias para abastecimiento domiciliario. Posee un espesor superior a los 5 m, niveles estáticos entre 1 y 5 m bajo la superficie del terreno y se sitúa a una profundidad variable entre 1 y 5 m.
- **C2a.** Acuífero libre en conglomerados, brechas y lavas andesíticas, fuertemente alteradas del Mioceno-Plioceno y conglomerados, tobas y areniscas pliocenas, cubiertos localmente por depósitos permeables de gravas y arenas fluviales y litorales.
- **//C2.** Acuífero confinado en conglomerados, brechas y lavas andesíticas miocenas-pliocenas, fuertemente alteradas y conglomerados, tobas y areniscas pliocenas, localmente cubiertos por depósitos morrénicos de bloques y gravas en matriz limo, arcilla y arena fina. Se infiere un espesor para este acuífero superior a los 5 m.

IV.5.1.11. Acuicludo D

En la región, se distinguen como acuicludos, es decir, depósitos que no constituyen acuífero, los depósitos morrénicos de gravas y bloques con matriz de arcilla y limo de la glaciación Tegualda, depósitos morrénicos de gravas en matriz de arcilla, limo y arenas finas de la glaciación río Llico, depósitos fluviales y glaciofluviales antiguos de gravas con matriz de arcillas, muy meteorizadas, depósitos glaciolacustres de arcillas y limos laminados y la secuencia piroclástica-epiclástica San Pablo, que por su alto contenido de arcilla y/o meteorización intensa presentan baja a muy baja permeabilidad.

Desde el punto de vista hidrogeológico no son aptos para la construcción de captaciones de aguas subterráneas, ya que no permiten la circulación del agua a través de ellos. Localmente, los depósitos morrénicos están cubiertos por depósitos fluviales de poco espesor y limitada extensión, que tampoco constituyen acuíferos de importancia.

IV.5.2. Características hidrogeológicas por cuenca

En esta sección se darán las características hidrogeológicas principales de las 3 cuencas de las cuales se disponen datos para el presente estudio.

IV.5.2.1. Hidrogeología de la cuenca del río Bueno

Los resultados de un estudio geofísico indica que los rellenos sedimentarios que posibilitan los acuíferos de la cuenca poseen un espesor mínimo de unos 200 m, lo cual se confirma con los antecedentes estratigráficos disponibles. En efecto, de las más de 100 columnas estratigráficas obtenidas durante el desarrollo del estudio (DGA, 2010), de las cuales la más profunda alcanza los 155 m de profundidad, ninguna detectó el basamento rocoso.

En general, los acuíferos de la cuenca del río Bueno están limitados superiormente por un estrato impermeable o muy poco permeable, con excepción del sector de San Pablo y el extremo sur de la cuenca (Frutillar - Pellines); estos acuíferos se ubican a profundidades variables, estando los más superficiales a corta distancia del nivel de terreno, y se encuentran intercalados por estratos impermeables o semipermeables de espesor variable. Dado el gran espesor de los sedimentos cuaternarios en la zona de la cuenca del río Bueno ubicada en la Depresión Intermedia, es esperable que bajo los 130 m de profundidad existan más acuíferos, aunque probablemente cuenten con mayor cantidad de finos, dados los mecanismos de formación de esos rellenos, y, por lo tanto, resulten menos atractivos para ser explotados (DGA, 2010).

Los sistemas A2/A1, A2//A1 y //A1, son los acuíferos de mayor importancia, siendo un importante recurso de agua subterránea en el sector noreste, central y sureste, respectivamente. Se indica que, en general, las aguas subterráneas de éstos son captadas a profundidades inferiores a 100 m, con caudales entre 5 y 47 L/s. Siendo el acuífero principal //A1, de alta producción y gran extensión. En el sector noroeste, donde se encuentran los mayores problemas de abastecimiento de agua, existe un acuífero en roca fisurada C1 de la Formación Santo Domingo, donde el agua percola a través de fracturas y es captada por vertientes o norias, para el abastecimiento domiciliario (ver Figura 13). (SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008).

En la cabecera del río Coihueco el espesor del relleno sedimentario superaría los 1000 m de profundidad. Por sobre la cota 90 m s.n.m. se encuentran sedimentos glaciofluviales granulares tipo grava y arena de buena permeabilidad, mientras que bajo la cota antes indicada y hasta los 50 m s.n.m. existirían estratos limosos impermeables. De lo anterior se deduce que en los primeros 30 m de hondura es posible encontrar acuíferos libres, potentes. Ya en el río Rahue, aguas abajo de la confluencia con el Coihueco, la potencia del relleno disminuye a valores próximos a los 500 m, observándose niveles aterrizados del valle, con sedimentos recientes en el cauce y rellenos antiguos en las terrazas; éstos presentan estratos impermeables limosos los primeros 20 a 25 m de profundidad y acarreo glaciofluviales con acuíferos confinados a mayor profundidad. Hacia aguas abajo, en la zona de la confluencia con el río Negro, y de la ciudad de Osorno se observa un estrato superior areno-limoso de baja permeabilidad y espesor medio de alrededor 10 m, para posteriormente encontrar material granular grueso como gravas, arenas y balones, de espesor

muy potente con acuíferos libres a semiconfinados, hasta bajo los 50 m de profundidad (DGA, 1986b).

En la zona del río Damas, se constata un relleno aluvial reciente en los primeros 10 m de profundidad. Luego, con espesores de aproximadamente 30 m, se encontraría material fino de origen glaciolacustre, con pocas posibilidades de alojar acuíferos; a mayor hondura, se encontraría depósitos glaciofluviales con intercalaciones permeables, que mantienen acuíferos importantes algo confinados (DGA,1986b).

En la cabecera del río Toro el espesor total del relleno supera los 500 m, ocurriendo hasta los 90 m s.n.m. sedimentos glaciofluviales muy descompuestos en los primeros 25 m de profundidad, con bajas permeabilidades y confinantes de acuíferos más profundos. A mayor profundidad estos depósitos se ven menos alterados y más permeables. Finalmente, bajo estos materiales se ubican sedimentos glaciolacustres. Avanzando hacia aguas abajo la potencia del relleno disminuye a valores entre 300 y 400 m, pero manteniéndose las características del relleno, es decir, en los primeros 40 m de profundidad se ubican depósitos glaciofluviales descompuestos muy arcillizados; el límite inferior de este estrato estaría dado por la cota 90 m s.n.m. Entre la cota 90 y los 50 m s.n.m. se encuentran sedimentos limosos impermeables glaciolacustres y finalmente bajo esta cota y hasta el nivel del mar, aparecen nuevamente sedimentos glaciofluviales menos descompuestos, con intercalaciones más frecuentes de estratos permeables, que alojan acuíferos confinados (DGA, 1986b).

En el río López, nuevamente el relleno cuaternario supera los 500 m, correspondiendo los primeros 10 m a depósitos glaciofluviales descompuestos con mucha arcilla e impermeables. A mayor profundidad, y hasta los 50 m, el relleno muestra material glaciolacustre poco permeable con intercalaciones lenticulares de granulometría gruesa. Finalmente, los niveles inferiores consisten en acumulaciones granulares gruesas, con acuíferos potentes y confinados. Esta situación también se observa en la localidad de Purranque, en la cabecera del río Negro, donde el relleno alcanza potencias no mayores de 400 m y además el estrato permeable antes descrito ubicado bajo los 50 m se encontraría limitado inferiormente a 70 m de profundidad por un estrato arcilloso no reconocido en todo su espesor. En la cabecera del valle del río Forrahue, en la localidad de Puerto Octay, las características del relleno varían, encontrándose en los primeros 20 m de profundidad una formación arcillosa, confinante de napas ubicadas en estratos permeables de granulometría gruesa que se ubican bajo esa cota (DGA, 1986b).

IV.5.2.2. Hidrogeología de las cuencas e islas entre río Puelo y río Bueno

Los sistemas A2/A1 y //A2/A1, que constituyen un acuífero libre y confinado, respectivamente, cuentan con un importante recurso de agua subterránea, poseen transmisividades, permeabilidades y caudales de explotación altos, una buena capacidad de almacenamiento y baja población. De éstos, A2/A1 es el de mayor espesor y distribución, lo cual lo caracteriza como la unidad hidrogeológica más importante, en la Hoja Puerto Montt. Además de estos dos, pero en menor medida, el acuífero //A2 también tiene una amplia extensión en la zona. Un potencial más pequeño de agua subterránea se encuentra en los acuíferos confinados //B1, //B5 y //B6 correspondiente a depósitos morrénicos. Aquí la porosidad es muy restringida y la composición del material varía de manera notable tanto vertical como lateralmente. (Ver Figura 14). (SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008).

En la zona de la Cordillera de la Costa, hacia al norte, en los sedimentos fluviales de los ríos Contaco y Muicolpué se observan acuíferos freáticos de pequeña envergadura y permeabilidad regular, formados por material fino, tales como arenas embebidas en matrices limo-arcillosas. En la zona de la desembocadura, el relleno está fuertemente contaminado con depósitos marinos de playa. La potencia del acuífero en el valle del Contaco no supera probablemente los 5 a 8 m y en el valle del Muicolpué no tiene un espesor superior a los 5 m. Aquí, dada las permeabilidades regulares del acuífero y su escaso espesor, se esperan transmisibilidades muy bajas (DGA, 1986b).

Más al sur, en el sector del río Llico, el espesor del relleno cuaternario supera los 400 m, en las cercanías de la localidad de Los Muermos, incluyendo en los primeros 100 a 150 m de profundidad 2 unidades sedimentarias. La primera desde la superficie hasta el nivel del mar, contiene sedimentos glaciofluviales, caracterizados por mezclas diversas de gravas sin bolones, con mucha arena e intercalaciones limosas y arcillosas. A partir de la cota del nivel del mar se presentan alteraciones de sedimentos glaciolacustres impermeables que forman la segunda unidad reconocida (DGA, 1986b).

Hacia aguas abajo la potencia del relleno cuaternario disminuye fuertemente, no siendo superior a los 30 m, esto se debe a que hay en ese sector sedimentos terciarios que restringen el cuaternario al cauce del río donde existen materiales gruesos con distintos grados de descomposición y por ende, de porcentajes de arena y limos arcillosos (DGA, 1986b).

En el valle del río Hueyusca también afloran sedimentos terciarios antes de los 20 m de profundidad bajo cubiertas cuaternarias de dos tipos, una antigua a baja permeabilidad, ubicada por sobre el fondo del valle del río y otra más reciente, en potencias no mayores a 15 m, en niveles aterrazados a lo largo del río, consistente en gravas, arenas y algo de fino, de buena permeabilidad (DGA, 1986b).

Ya en la subcuenca del río Maullín se reconocen formaciones regionales bastante claras. Es así como la potencia máxima del relleno varía aumentando de norte a sur midiéndose en Puerto Montt casi 1000 m relleno cuaternario, mientras que al norte en la zona de Llanquihue el relleno alcanza valores algo mayores que 500 m solamente. Entre la superficie del terreno que se considere más o menos la cota 35 m s.n.m., los acuíferos se ubican sobre los 90 m s.n.m., encontrándose materiales gruesos que aumentan su descomposición en profundidad, conteniendo napas libres. Bajo la cota 35 m s.n.m. y hasta la cota del nivel del mar aparecen sedimentos gruesos con acuíferos confinados por el estrato impermeable ubicado entre la cota 35 m y la 90 m. Finalmente, entre la cota 0 y la 100 m se alternan sedimentos finos y estratos gruesos permeables, estos últimos con acuíferos confinados. El relleno en la desembocadura del Maullín contiene arenas y limos de poco espesor (DGA, 1986b).

En la subcuenca del río Chamiza la potencia máxima del relleno es de 40 a 50 m, conteniendo entre los 10 a 30 primeros metros sedimentos recientes apoyados sobre otros más antiguos. El sedimento reciente es de origen glaciofluvial y posiblemente lahárico, de granulometría gruesa con alto contenido de bolones (DGA, 1986b).

En la zona de Puerto Montt, el rasgo morfológico fundamental que condiciona la ubicación de los estratos permeables es la existencia de distintos niveles de terrazas, ubicadas a las cotas 5, 40 y 100 m s.n.m. aproximadamente, que tendrían su origen en la acción de las olas sobre material morrénico depositado por el avance y retroceso de glaciares en el período cuaternario (DGA, 1986b).

Debido a este aterrazamiento del relleno, la cuenca de aguas subterráneas no coincide con la de los cauces superficiales que se desarrollan a lo largo de las zonas deprimidas de estas terrazas, siendo bastante mayor que la de estos últimos (DGA, 1986b).

Las formaciones acuíferas principales, que dan origen a napas freáticas, o semiconfinadas en algunos casos, se encuentran a diferentes profundidades en cada sector, pero si se considera la cota de terreno correspondiente, se obtiene que los principales estratos permeables se encuentran desde la cota 50 m.s.n.m. hacia abajo. Dichos estratos están formados por arenas gruesas, grava, arena fina, bolones y ocasionalmente arcilla (DGA, 1986b).

Debido a que la recarga de la napa proviene en gran parte de infiltraciones de la precipitación, los niveles estáticos están fuertemente relacionados a la pluviosidad de la zona, sobre todo en consideración a la elevada explotación de los recursos de aguas subterráneas existentes (DGA, 1986b).

La profundidad de los niveles estáticos, debido al sistema de terrazas existente, varía considerablemente de un punto a otro, en circunstancia de que su cota debe ser aproximadamente constante en toda el área. En todo caso, dichas profundidades para un año de precipitación media, oscilan entre 30 y 50 m excepto en la zona de Las Quemadas, donde puede llegar hasta los 60 m, aproximadamente. Además, debido al aterrazamiento antes indicado, en algunos sectores se produce un afloramiento de la napa, a una cota aproximada de 40 m.s.n.m. (DGA, 1986b).

Por último, en el extremo sur de la cuenca, en los sectores de Pargua y Calbuco, desde la superficie y hasta la cota del nivel del mar se encuentran sedimentos glaciales con frecuentes bloques, de permeabilidad mediana a baja entre los cuales se intercalan, en forma habitual, pero lenticularmente sedimentos glaciofluviales de mejor permeabilidad, y que se hacen más frecuentes al adentrarse en el continente. Bajo la cota del nivel de mar y con espesor estimado en 50 m se encuentran sedimentos finos impermeables de origen glaciolacustre. Bajo este estrato aparecen sedimentos gruesos, con características regionales, de 70 m de espesor con acuíferos confinados, dulces, ya que el estrato confinante es muy potente e impermeable (DGA, 1986b).

IV.5.2.3. Hidrogeología de la cuenca Islas Chiloé y Circundantes

En general en el cauce mismo de los valles se encuentran rellenos cuaternarios recientes de unos pocos metros de espesor consistentes en gravas y arenas. El resto de los valles presentan sedimentos antiguos que mantienen acuíferos bajo la cota 40 m.s.n.m. y también sobre la cota 100 m.s.n.m. el relleno tendría una potencia máxima de alrededor de 500 m (DGA, 1986b).

Al igual que en la cuenca anterior, el sistema de mayor importancia corresponde a A2/A1, mientras que el sistema A2//A1 es prácticamente inexistente y el //A2 se restringe al norte de la isla. Menores potenciales hidrogeológicos se encuentran en //B1, //B5 y //B6, además, el acuífero libre en roca fisurada C1, areniscas, litoarenitas cuarzosas y litograuvacas, expuestas irregularmente en la zona oriental de Chiloé insular, específicamente en el borde costero a lo largo del canal de Yal, tanto en isla Lemuy como al sur de Chonchi, y en punta Peuque del estero Castro y, más al sur, en el estero Compu, constituyen un acuífero de media importancia en la isla, donde posee un registro de un nivel estático de 10,6 m.b.n.t. y un caudal de explotación de 6 L/s. Las reservas de agua subterránea se reducen a napas limitadas localmente. (Ver Figura 15). (SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008).

IV.5.3. Vulnerabilidad de Acuíferos

La vulnerabilidad de un sistema se define como éste reacciona ante cierta acción que pueda causar en él un perjuicio (daño, deterioro o degradación). La vulnerabilidad sería una medida cualitativa o cuantitativa, en general expresada mediante un índice sin dimensiones, de la mayor o menor facilidad con que se puede infligir ese perjuicio.

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 este frente a impactos humanos o naturales. Se usa el término *vulnerabilidad intrínseca* como aquella definida solamente como una función de factores hidrogeológicos característicos de un acuífero, del suelo y de los materiales geológicos que lo sobreyacen.

Cuando se quiere agregar a las propiedades intrínsecas impactos específicos inducidos por usos del territorio o por contaminantes, se usa el concepto de *vulnerabilidad específica*.

IV.5.3.1. Métodos de estimación de la vulnerabilidad

De acuerdo con las condiciones geológicas, climáticas y la información disponible, se aplican distintos métodos para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. En este caso se utiliza el Método GOD para la estimación.

Método GOD (Foster, 1987)

El método GOD estima la vulnerabilidad de un acuífero multiplicando tres parámetros que representan tres tipos de información espacial:

- G:** Tipo de acuífero o modo de ocurrencia del agua subterránea (Groundwater occurrence)
- O:** Litología de la zona no saturada (Overlying lithology)
- D:** Profundidad del agua subterránea (Depth to groundwater)

IV.5.3.2. Mapas de vulnerabilidad

Es un mapa que muestra la capacidad del medio subsuperficial para proteger el agua subterránea, en particular, la calidad del agua. Los mapas de vulnerabilidad dependen de las variaciones de los niveles estáticos en el tiempo y de la cantidad de información, por lo tanto, estos requieren de una constante actualización. Las categorías de vulnerabilidad se definen de la siguiente manera, Según Foster et al. (2002):

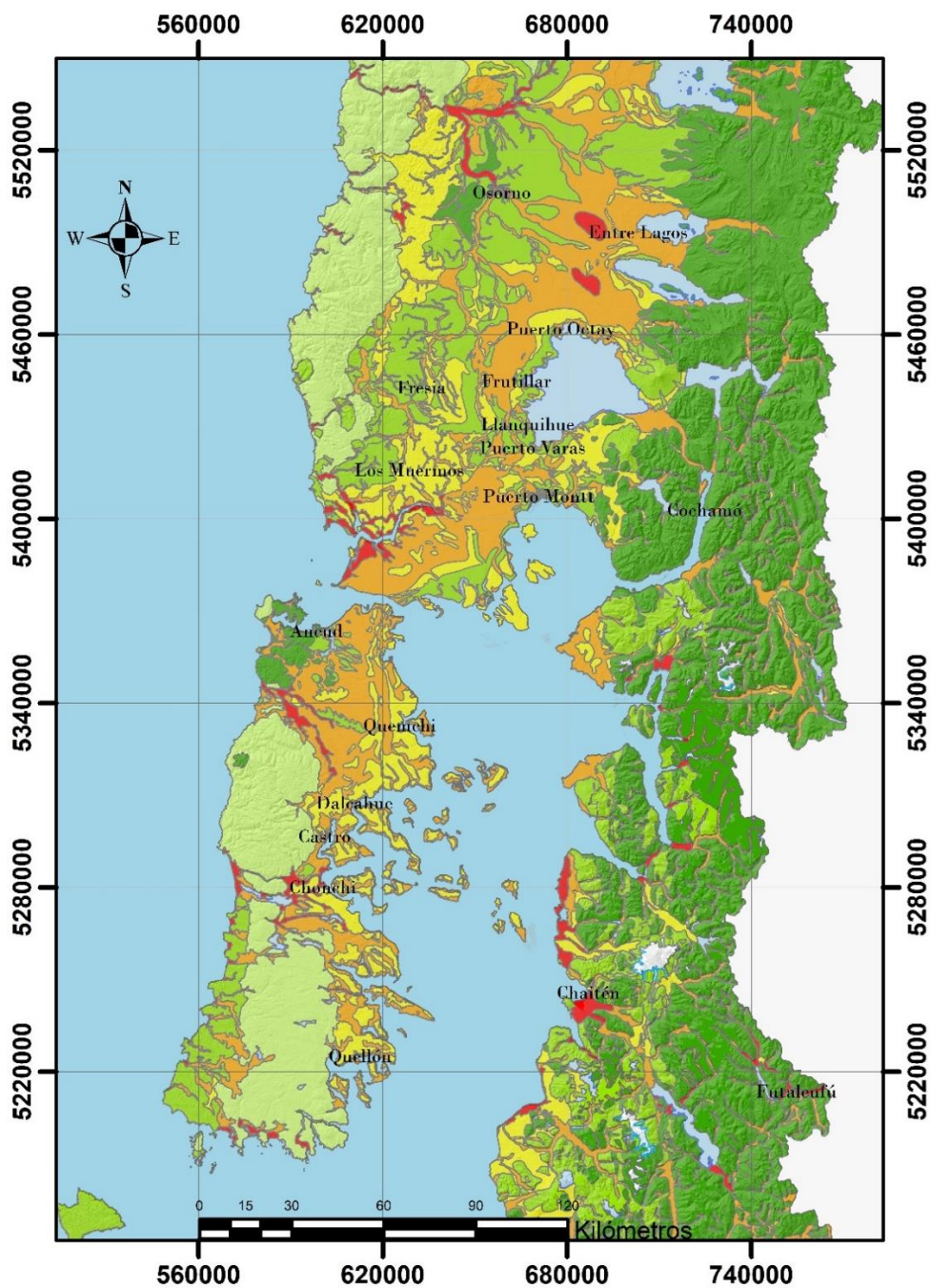
- **Muy alta o Extrema:** vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua, con impacto rápido en muchos escenarios de polución.
- **Alta:** vulnerable a muchos contaminantes (a excepción de aquellos fuertemente absorbidos o rápidamente transformados) en muchos escenarios de polución.
- **Moderada:**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

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 (Wall et al., 2006).

IV.5.3.3. Vulnerabilidad de acuíferos en la Región de Los Lagos

En la región generalmente hay cierta correspondencia entre una alta vulnerabilidad de los acuíferos con las unidades hidrogeológicas de alta importancia, esto debido a que en parte la vulnerabilidad es dependiente de la permeabilidad de éste, por lo que no es de extrañar que las mayores vulnerabilidades se localicen en la Depresión Intermedia, y que la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes muestren una baja vulnerabilidad.

Las zonas de vulnerabilidad “Muy alta extrema” corresponden principalmente a los valles fluviales del río Rahue, zona más preocupante en este sentido por la alta densidad de población de allí (cercanías de Osorno), algunos valles fluviales en Chiloé, la desembocadura del río Maullín y algunas zonas costeras de las provincias Chiloé y Palena. Las partes de vulnerabilidad alta son la mayoría del Valle Longitudinal y Planicies Litorales de Chiloé, además de varias zonas costeras, en especial de islas y algunos valles. La vulnerabilidad moderada se le distribuye principalmente en islas, costas, valles y algunas unidades sedimentarias. Por último, las zonas de las categorías más bajas de vulnerabilidad se les atribuyen a rocas de basamento y volcánicas (Figura 16).



Legenda

Vulnerabilidad

- Muy Alta Extrema
- Alta
- Moderada
- Baja Moderada
- Baja
- Muy Baja Despreciable

- Lagos
- Glaciares
- Áreas pobladas
- Argentina

Datos Cartográficos:
 Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)
 Datum Horizontal: WGS 1984 Zona 18S
 Datum Vertical: Nivel medio del mar

Figura 16: Mapa de Vulnerabilidad de la Región de los Lagos. Fuente: Wall et al., 2006.

IV.6. NORMATIVAS DE CALIDAD DE AGUAS

En Chile existen las normativas respecto a calidad del agua, son el DS 143 para actividades de recreación con contacto directo, la norma chilena NCh N°409/1 de 2005 de agua potable y la norma chilena NCh N°1333 de 1978 modificada en 1987 de requisitos de calidad de agua para diferentes usos. De estas tres normas se utilizarán las últimas dos como referencia para caracterizar la calidad del agua subterránea. Es necesario mencionar que la comparación con estas normas es de carácter referencial pues en el caso de la NCh 1333 sólo otorga recomendaciones (no es fiscalizable) y la NCh 409 debe verificarse posterior a la potabilización de un agua.

IV.6.1. NCh N°409/1 Agua Potable

Establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua para que sea considerada potable, es decir, que cumpla con todos los requisitos físicos, químicos, bacteriológicos y de desinfección establecidos en la Norma NCh 409/1, que aseguran su inocuidad y aptitud para el consumo humano (INN, 2005)

Los parámetros para definir los requisitos de calidad se agrupan en los tipos siguientes: I) Parámetros microbiológicos y de turbiedad, II) elementos o sustancias químicas de importancia para la salud, III) elementos radioactivos, IV) parámetros relativos a las características organolépticas y V) parámetros de desinfección (Tabla 2). La norma se aplica al agua potable proveniente de cualquier servicio de abastecimiento. Como referencias, señala un conjunto de otros documentos normativos que constituyen requisitos de la norma: NCh409/2 Agua potable – Parte 2: Muestreo; NCh410 Calidad del agua – Vocabulario; NCh1620/1 Agua potable – Determinación de bacterias coliformes totales – Parte 1: Método de los tubos múltiples; NCh1620/2 Agua potable – Determinación de bacterias coliformes totales – Parte 2: Método de filtración por membrana; NCh2043 Aguas – Método de determinación simultánea de bacterias coliformes totales y *Escherichia coli* mediante la técnica del sustrato cromogénico. Esta norma anula y reemplaza a la Norma NCh409/1 Of 84 Agua potable – Parte 1: Requisitos.

Tabla 2: Límites de concentraciones para NCh N°409. Fuente: INN, 2005.

Parámetro		Unidad	Límite Máximo para agua potable (NCh N°409)
pH		-	6,5<pH<8,5
Sulfato	(SO ₄ ⁻²)	mg/L	500
Cloruro	(Cl ⁻)	mg/L	400
Fluoruro	(F ⁻)	mg/L	1,5
Magnesio	(Mg ⁺²)	mg/L	125
Nitrato	(NO ₃ ⁻¹)	mg/L	50
Amonio	(NH ₄ ⁺)	mg/L	1,5
Sólidos Disueltos Totales	(SDT)	mg/L	1500
Arsénico	(As)	mg/L	0,01
Cadmio	(Cd)	mg/L	0,01
Cobre	(Cu)	mg/L	2,0
Hierro	(Fe)	mg/L	0,3
Mercurio	(Hg)	mg/L	0,001
Manganeso	(Mn)	mg/L	0,1
Plomo	(Pb)	mg/L	0,05

Selenio	(Se)	mg/L	0,01
Zinc	(Zn)	mg/L	3,0

IV.6.2. NCh N°1333 Requisitos de calidad del agua para diferentes usos

Establece los requisitos de calidad del agua de acuerdo a su uso, incluyendo los usos siguientes: consumo humano, bebida de animales, riego, recreación y estética (estética, recreación con contacto directo, recreación sin contacto directo) y vida acuática. La norma fija un criterio de calidad del agua de acuerdo a requerimientos científico referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos, según el uso determinado. Señala que dichos criterios tienen por objetivo proteger y preservar la calidad de las aguas que se destinen a usos específicos, de la degradación producida por contaminación con residuos de cualquier tipo y origen (INN, 1987).

En ésta se detallan claramente los límites de concentración para agua de riego, que se muestran en la Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3: Límites de concentraciones para NCh N°1333. Fuente: INN, 1987.

Parámetro		Unidad	Límite Máximo para agua de riego (NCh N°1333)
pH		-	5,5<pH<9,0
Sulfato	(SO ₄ ⁻²)	mg/L	250,00
Cloruro	(Cl ⁻)	mg/L	200,00
Fluoruro	(F ⁻)	mg/L	1,00
Sodio*	(Na ⁺)	%	35,00
Arsénico	(As)	mg/L	0,10
Cadmio	(Cd)	mg/L	0,01
Cobalto	(Co)	mg/L	0,05
Cobre	(Cu)	mg/L	0,20
Hierro	(Fe)	mg/L	5,00
Mercurio	(Hg)	mg/L	0,001
Manganeso	(Mn)	mg/L	0,20
Níquel	(Ni)	mg/L	0,20
Plomo	(Pb)	mg/L	5,00
Selenio	(Se)	mg/L	0,020
Zinc	(Zn)	mg/L	2,00
Molibdeno	(Mo)	mg/L	0,010
Plata	(Ag)	mg/L	0,20
Aluminio	(Al)	mg/L	5,00

* Límite máximo de Sodio para aguas de riego se calcula según el porcentaje de Sodio (en mEq/L) respecto al total de cationes (Na + Ca + Mg + K).

Tabla 4: Clasificación de aguas de riego según su salinidad. Fuente: INN, 1987.

Clasificación	Conductividad específica, c , μ mhos/cm a 25°C	Sólidos disueltos totales, s , mg/l a 105°C
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	$c \leq 750$	$s \leq 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < c \leq 1\ 500$	$500 < s \leq 1\ 000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	$1\ 500 < c \leq 3\ 000$	$1\ 000 < s \leq 2\ 000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3\ 000 < c \leq 7\ 500$	$2\ 000 < s \leq 5\ 000$

V. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en la realización del presente estudio fue diseñada por la Dirección General de Aguas (DGA, 2009) para los diagnósticos de calidad de aguas subterráneas a nivel regional que comenzaron a realizarse el año 2016 y se han replicado anualmente, avanzando de norte a sur.

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 17. Además, se consideró la elección de pozos que sean continuamente usados y cuenten con posibilidad de acceso.

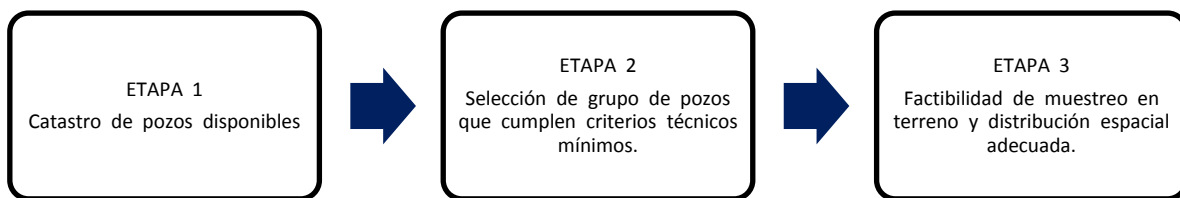


Figura 17: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas. Fuente: DGA, 2017.

En la Etapa 1 se realizó un catastro de los pozos con disponibilidad para obtener muestras, considerando prioritario una distribución espacial que permita abarcar la mayor parte de la región.

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 38 pozos, basada en la factibilidad de ejecutar el muestreo en terreno de forma expedita y para disponer de muestras representativas. Los criterios para su selección fueron los siguientes:

- 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 38 pozos APR en la zona de estudio.

V.2. UBICACIÓN Y CONTEXTO DE LOS POZOS APR

V.2.1. Ubicación

Se muestrearon en total 38 pozos APR, de los cuales 37 se encuentran en la Región de Los Lagos y uno de ellos (pozo Buenaventura) se encuentra en la región de Los Ríos, casi en el límite con la Región de los Lagos. 10 corresponden a la provincia de Osorno, 20 a la de Llanquihue, 7 a Chiloé y 1 a Ranco, es decir no se muestrearon pozos de la provincia de Palena. El nombre de los pozos (ordenados de norte a sur), la provincia, comuna a la que pertenecen y sus coordenadas UTM WGS 1984 (huso 18) se detallan en la Tabla 5 y se puede observar la ubicación gráficamente en la Figura 18.

Tabla 5: Numeración, código BNA, nombre, provincia, comuna y coordenadas de los pozos APR del estudio.

N°	DATOS POZOS APR					
	BNA	Nombre del Pozo	Provincia	Comuna	UTM_E_WGS84_H18	UTM_N_WGS84_H18
1	10330003-7	Quilacahuín	Osorno	San Pablo	648424	5531045
2	10330002-9	Trumao	Osorno	San Pablo	655946	5530505
3	10325003-K	Buenaventura	Ranco	Río Bueno	693066	5509306
4	10362006-6	Las Lumas	Osorno	Osorno	673591	5504626
5	10344006-8	Las Quemadas Bajo	Osorno	Osorno	664310	5497401
6	10344005-K	Rincón Chahuilco	Osorno	Río Negro	658764	5493080
7	10356002-0	Quisquelefun	Osorno	Río Negro	657768	5488036
8	10344007-6	Cancura	Osorno	Osorno	671748	5486221

N°	DATOS POZOS APR					
	BNA	Nombre del Pozo	Provincia	Comuna	UTM_E_WGS84_H18	UTM_N_WGS84_H18
9	10354002-K	Tres Esteros	Osorno	Río Negro	644647	5483101
10	10344008-4	Chan-Chan	Osorno	Río Negro	669569	5479897
11	10351002-3	Estación Concordia	Osorno	Purranque	643597	5459197
12	10352000-2	Colonia La Radio	Llanquihue	Frutillar	661528	5447967
13	10350003-6	Los Polizones	Llanquihue	Fresia	636660	5445519
14	10410022-8	Ensenada	Llanquihue	Puerto Varas	704024	5433356
15	10412000-8	Nueva Braunau	Llanquihue	Puerto Varas	661089	5423374
16	10413000-3	Paraguay Chico	Llanquihue	Los Muermos	643025	5411239
17	10411012-6	Alto Bonito	Llanquihue	Puerto Montt	665457	5405355
18	10414002-5	Las Quemadas San Antonio	Llanquihue	Puerto Montt	657155	5403951
19	10415000-4	Trapen Chiquihue Paitao	Llanquihue	Puerto Montt	658862	5401135
20	10407000-0	Coyán	Llanquihue	Mauñín	619081	5397210
21	10417002-1	Lolcura	Llanquihue	Mauñín	620653	5394872
22	10417003-K	Lepihue - La Pasada	Llanquihue	Mauñín	617622	5393379
23	10420000-1	Amortajado	Llanquihue	Mauñín	611260	5389206
24	10422001-0	El Yale	Llanquihue	Calbuco	650430	5382297
25	10421000-7	El Peñasco	Llanquihue	Calbuco	644024	5379288
26	10420001-K	Caremapu	Llanquihue	Mauñín	608751	5379026
27	10423004-0	Yaco Alto y Bajo	Llanquihue	Calbuco	647669	5376571
28	10422000-2	Puntilla San Rafael	Llanquihue	Calbuco	652331	5374051
29	10423002-4	Punta Machil	Llanquihue	Calbuco	659611	5372761
30	10423001-6	Caicaen	Llanquihue	Calbuco	652616	5370675
31	10423003-2	Chauquear Alto	Llanquihue	Calbuco	663244	5370458
32	10903007-4	Pugueñún	Chiloé	Ancud	609161	5368153
33	10903006-6	Curamó	Chiloé	Ancud	604493	5363985
34	10903005-8	El Quitral	Chiloé	Ancud	613195	5357842
35	10901005-7	Rauco Alto	Chiloé	Chonchi	598194	5287807
36	10921000-5	Puqueldón	Chiloé	Puqueldón	609283	5282708
37	10906008-9	Tara	Chiloé	Chonchi	598735	5272954
38	10902006-0	Natri	Chiloé	Chonchi	600068	5260917

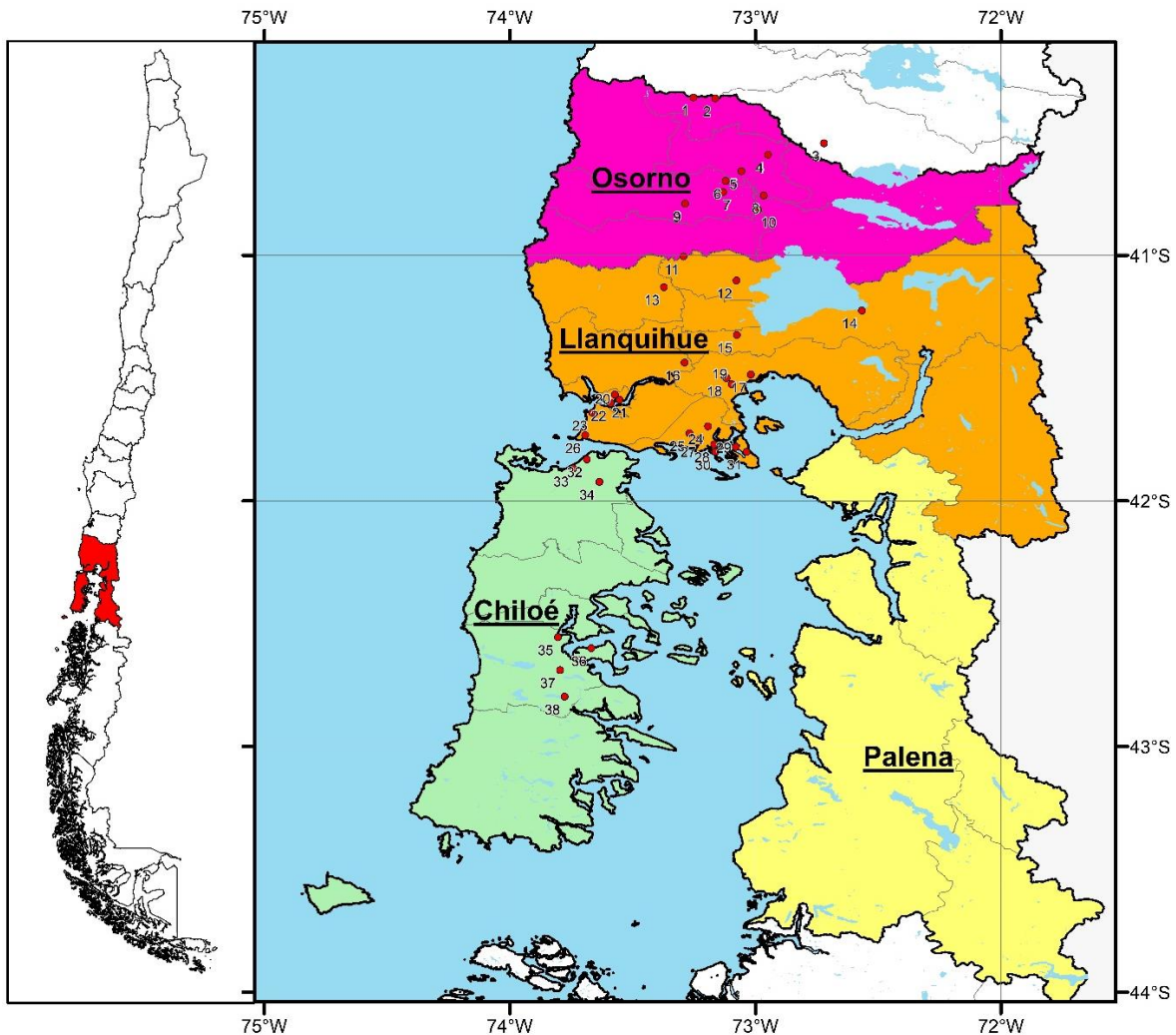


Figura 18: Mapa político de la zona de estudio, con límites provinciales y comunales (en línea delgada gris) y ubicación de pozos APR (ver numeración en Tabla 5). Fuente: Elaboración propia.

V.2.2. Contexto de los pozos

La mayoría de los pozos se hallan en el Valle Central o en las Planicies Litorales, con el agua almacenada en depósitos cuaternarios, a excepción del pozo de Ensenada que se ubica en un intrusivo según el mapa de Fernández et al., 2018 (Figura 19), aunque lo más probable es que igual se ubique en depósitos cuaternarios lacustres del lago Llanquihue que no se aprecian en el mapa por la escala de mapeo. En cuanto a las cuencas, 13 pozos se encuentran en la cuenca del río Bueno, 18 en Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno y 7 en Islas Chiloé y Circundantes (Figura 20). Respecto a los acuíferos a los que pertenecen administrativamente, estos se detallan en la Tabla 6, en tanto a la hidrogeología, según el mapa de la Figura 11, todos los pozos tienen una importancia hidrogeológica alta a media a excepción del pozo Natri de más al sur, que según este mismo mapa debiese estar en una zona de importancia hidrogeológica nula, aunque al igual como pasa con el pozo de Ensenada en el mapa geológico, lo más probable es que por el detalle del mapa no se aprecia que el pozo Natri guarda relación con una zona de importancia hidrogeológica alta a media, lo cual concuerda con que se ubique geológicamente en depósitos cuaternarios (ver Figura 19).

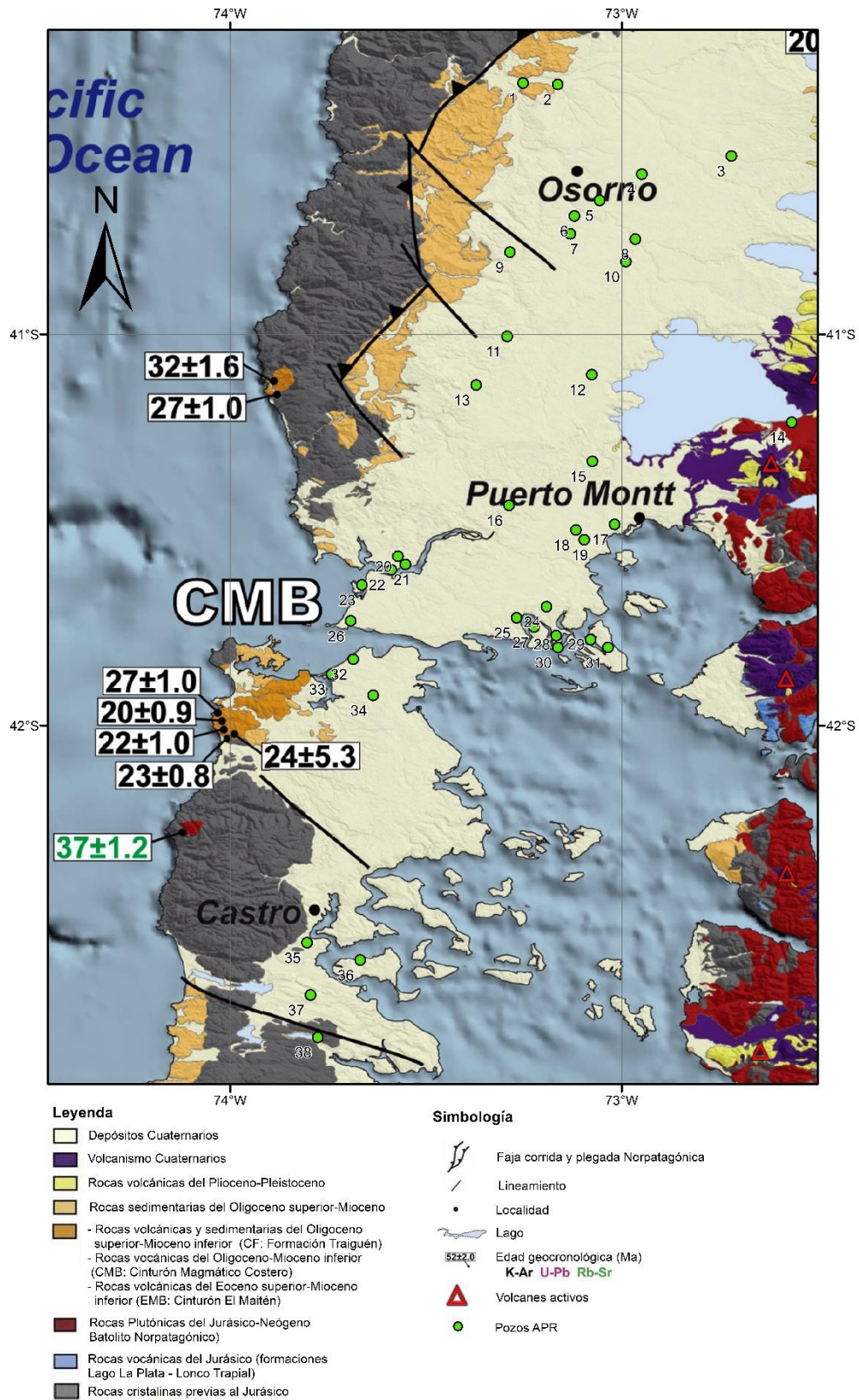


Figura 19: Mapa geológico con ubicación de pozos APR (ver numeración en Tabla 5). Fuente: Modificado de Fernández et al., 2018.

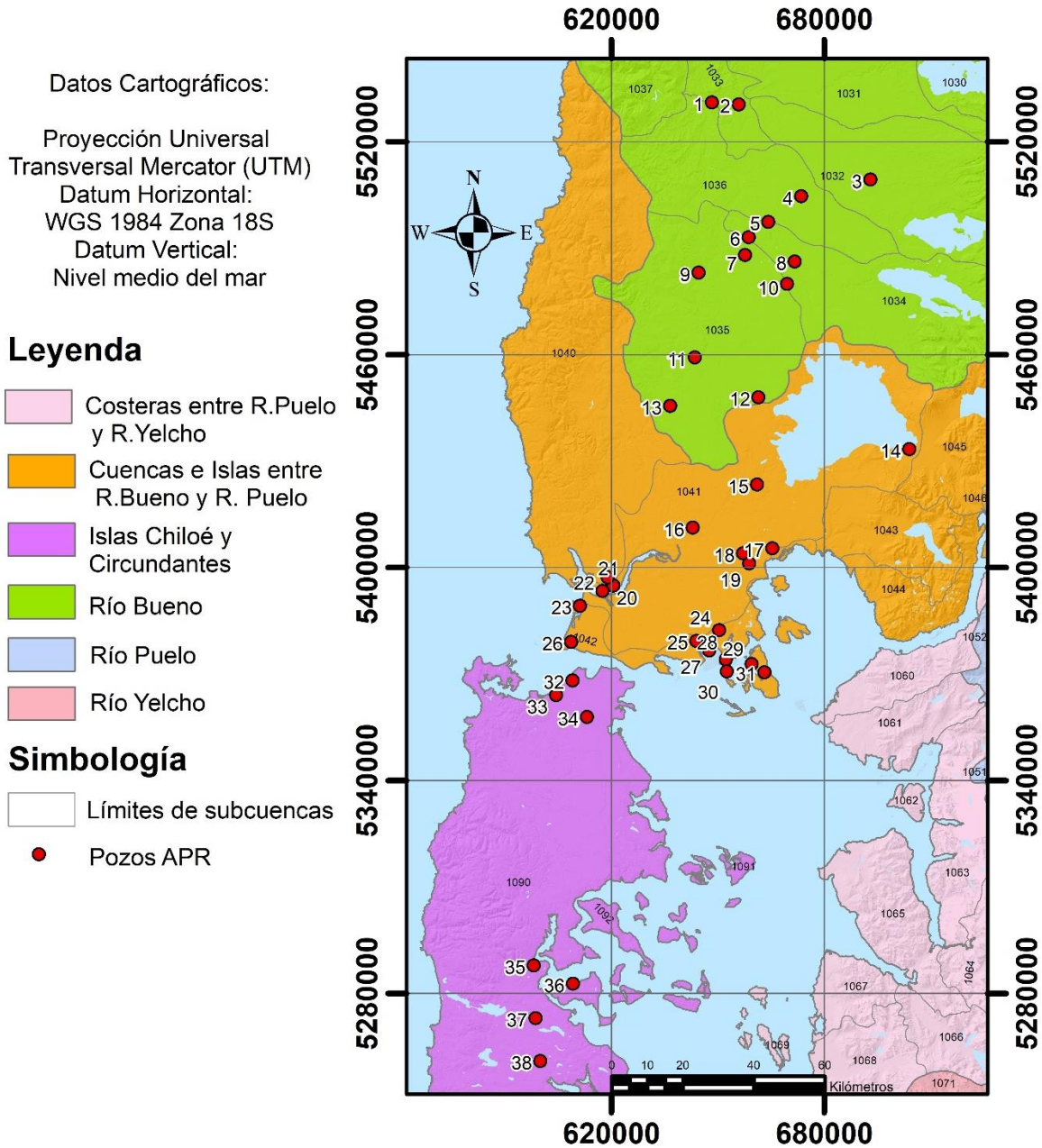


Figura 20: Mapa con división de cuencas y subcuencas (ver numeración de subcuencas en Tabla 1) y ubicación de pozos APR (ver numeración en Tabla 5). Fuente: Elaboración propia.

La vulnerabilidad de los pozos APR también se muestra en la Tabla 6, y se puede observar en la Figura 21. Aunque no hay patrón de distribución de los pozos respecto a su vulnerabilidad, en general se puede decir que hacia la costa y riberas de ríos ésta aumenta. También, cabe destacar que ningún pozo tienen una vulnerabilidad “Muy Baja Despreciable”, por lo que el continuo monitoreo es importante.

Tabla 6: Cuencas, acuíferos y vulnerabilidad de los pozos APR del estudio.

N° de Pozo	Nombre	Cuenca	Acuífero	Vulnerabilidad
1	Quilacahuín	Río Bueno	Río Bueno	Baja
2	Trumao	Río Bueno	Río Bueno	Baja
3	Buenaventura	Río Bueno	Río Bueno	Alta
4	Las Lumas	Río Bueno	Río Bueno	Alta
5	Las Quemadas Bajo	Río Bueno	Rahue	Baja
6	Rincón Chahuilco	Río Bueno	Rahue	Baja
7	Quisquelefun	Río Bueno	Rahue	Baja
8	Cancura	Río Bueno	Rahue	Alta
9	Tres Esteros	Río Bueno	Rahue	Baja
10	Chan-Chan	Río Bueno	Rahue	Alta
11	Estación Concordia	Río Bueno	Rahue	Alta
12	Colonia La Radio	Río Bueno	Rahue	Alta
13	Los Polizones	Río Bueno	Rahue	Alta
14	Ensenada	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Lago Llanquihue	Alta
15	Nueva Braunau	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Baja
16	Paraguay Chico	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Moderada
17	Alto Bonito	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Moderada
18	Las Quemadas San Antonio	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Alta
19	Trapen Chiquihue Paitao	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Alta
20	Coyán	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Moderada
21	Lolcura	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Muy alta extrema
22	Lepihue - La Pasada	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Muy alta extrema
23	Amortajado	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Muy alta extrema
24	El Yale	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Baja
25	El Peñasco	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Baja
26	Caremapu	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Alta
27	Yaco Alto y Bajo	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Moderada
28	Puntilla San Rafael	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Río Maullín	Alta
29	Punta Machil	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Sin información	Moderada
30	Caicaen	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Sin información	Moderada
31	Chauquear Alto	Cuencas e Islas entre Río Puelo y Río Bueno	Sin información	Moderada
32	Puqueñún	Islas Chiloé y Circundantes	Ancud	Alta
33	Curamó	Islas Chiloé y Circundantes	Ancud	Alta
34	El Quitral	Islas Chiloé y Circundantes	Ancud	Alta
35	Rauco Alto	Islas Chiloé y Circundantes	Castro	Alta
36	Puqueldón	Islas Chiloé y Circundantes	Sin información	Alta
37	Tara	Islas Chiloé y Circundantes	Huillinco	Moderada
38	Natri	Islas Chiloé y Circundantes	Huillinco	Alta

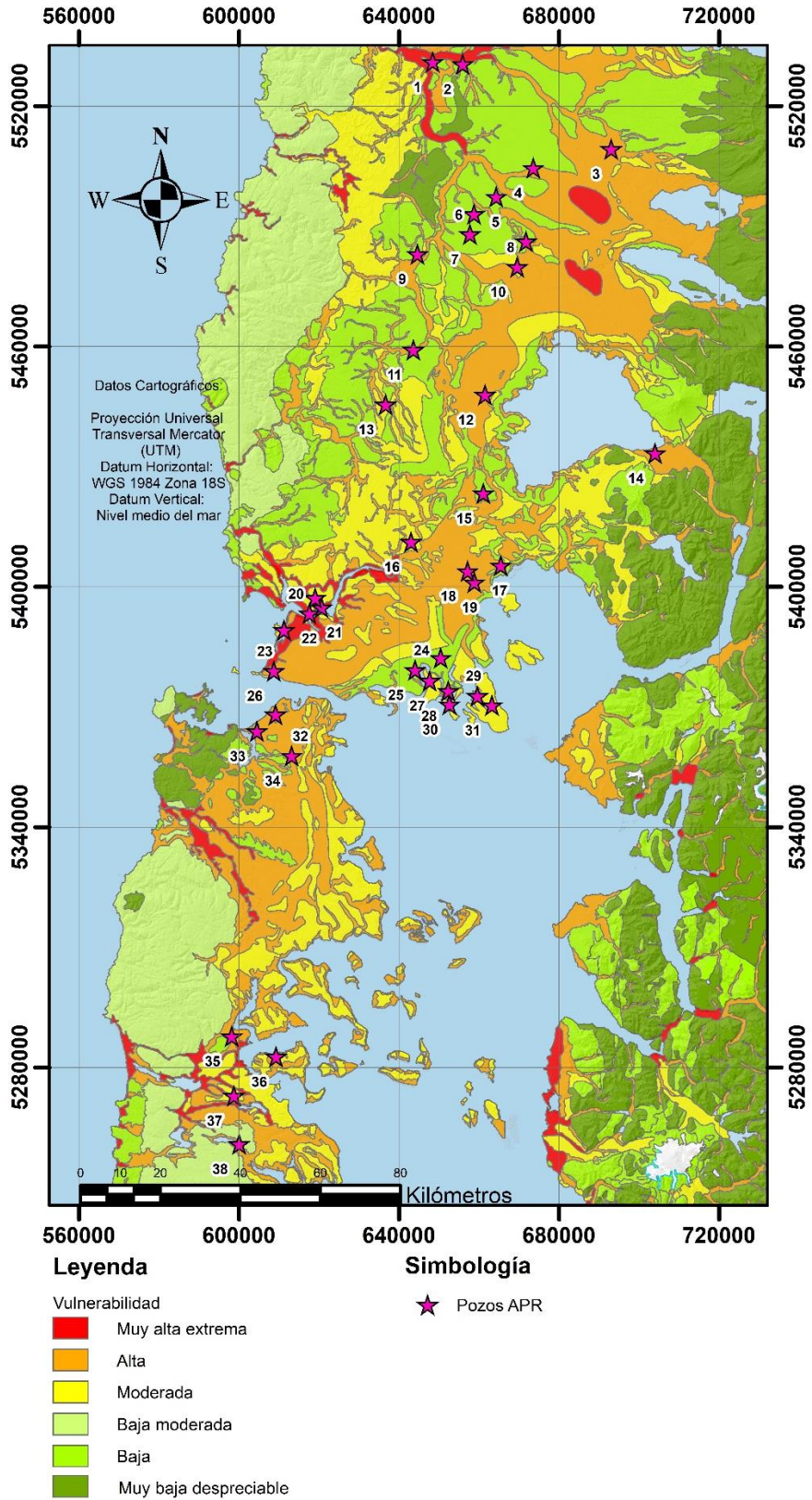


Figura 21: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos con posición de pozos APR muestreados (ver numeración en Tabla 6).
 Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

V.3. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS

Con el objetivo de determinar la actual condición fisicoquímica de las aguas subterráneas en la Región de los Lagos. Se seleccionaron 3 conjuntos de parámetros a medir: fisicoquímicos, componentes mayoritarios y concentración total de elementos traza (Tabla 7). Además, durante la campaña de muestreo se obtiene la profundidad de los niveles estáticos y dinámicos de cada pozo muestreado.

Tabla 7: Listado de parámetros efectuados sobre las muestras de aguas subterráneas del presente estudio.

Categoría	N° de parámetros medidos	Parámetros
Fisicoquímico (análisis en terreno)	5	Temperatura, pH, conductividad eléctrica, potencial de óxido reducción.
Componentes mayoritarios (análisis en laboratorio ALS e Hidrolab (sólo para TSD))	12	Alcalinidad Total (CaCO ₃), Bicarbonato (HCO ₃ ⁻), Calcio (Ca ²⁺), Cloruro (Cl ⁻), Fosfato (PO ₄ ³⁻), Magnesio (Mg ²⁺), Nitrato (NO ₃ ⁻), Nitrógeno Amoniacal (NH ₄ ⁺), Potasio (K ⁺), Sodio (Na ⁺), Solidos disueltos totales (SDT) y Sulfato (SO ₄ ²⁻).
Elementos traza (análisis en laboratorio ALS)	15	Flúor (F), Plata (Ag), Aluminio (Al), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Mercurio (Hg), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Selenio (Se), Zinc (Zn).

Los análisis de iones mayoritarios fueron realizados por un laboratorio externo (ALS Environmental) contratado mediante licitación pública ID N° 1019-41-LE20. El trabajo contratado para este estudio incluyó la visita a terreno de 38 pozos, 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.4. USO DE EQUIPOS Y MATERIALES

V.4.1. Materiales de muestreo

Los materiales para cada muestreo y medición in situ fueron provistos por HgH Solutions SpA. y los envases necesarios se preparan de acuerdo con los parámetros establecidos en la normativa vigente en sus diferentes tipos y tamaños (Tabla 8).

Tabla 8: Materiales de muestreo.

Material Muestreo	
Guantes	Mascarillas
Botellas plásticas de 500 mL (8 por pozo)	Adhesivos (para rotular)
Plumones	Cajas de Coolers
Delantal de polietileno	Guantes de vinilo

V.4.2. Equipos

Para el presente estudio se utilizaron los equipos de la Tabla 9 para el monitoreo de los pozos, correspondientes a una sonda multiparamétrica y un pozómetro.

Tabla 9: Equipos para medición en terreno.

Equipo	Marca	Modelo	Parámetro	Rango de Lectura	Precisión del sensor
Sonda Multiparamétrica	Hanna	HI98194	pH	0.0 a 14.0 pH/ ±600 mV	±0.02 pH/ ± 0.5 mV
			ORP	±2000,0 mV	± 1.0 mV
			C.E.	0 a 200 mS/cm (C.E absoluta a 400 mS/cm)	± 1%/ ± 1 µS/cm
			SDT	0.0 a 400.0 ppt	± 1%
			Salinidad	0.0 a 70.0 PSU	± 2%
			Oxígeno disuelto	0.0 a 50.0 mg/L	±1.5%
			Temperatura	-5 a 55 °C	±0.15 °C
Pozómetro	Salinst	102	Profundidad	150 m	Milimétrica

V.5. METODOLOGÍAS ANALÍTICAS

Las metodologías utilizadas por ALS Environmental e Hidrolab de los diferentes parámetros, se presentan las tablas a continuación (Tabla 10 y Tabla 11, respectivamente).

Tabla 10: Parámetros medidos y las respectivas metodologías utilizadas por el Laboratorio ALS Environmental.

Parámetro	Metodología de análisis
Aniones (Cl, F, NO ₃ , SO ₄ y PO ₄)	Aniones por Cromatografía Iónica (EPA 300.1) INN/SMA
Alcalinidad total	Alcalinidad Total (SM 2320-A) INN/SMA
Bicarbonato	Alcalinidad Bicarbonato (SM 2320-A) INN/SMA
Amonio (N-NH ₃)	NH ₃ (4500 -NH ₃ D) INN/SMA
Metales disueltos (Ca, Mg, K y Na)	Metales Disueltos ICP-MS (EPA) INN/SMA
Metales traza totales (Al, As, Cd, Co, Cu, Fe, Pb, Mn, Hg, Mo, Ni Se, Ag y Zn)	Metal Total ICP-MS (EPA) INN/SMA

Tabla 11: Parámetros medidos y las respectivas metodologías utilizadas por el Laboratorio Hidrolab.

Parámetro	Metodología de análisis
pH	Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, 23 th Edition 2017. 4500HB.
Conductividad	Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, 23 th Edition 2017. 2510 B.
Sólidos disueltos totales	Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, 23 th Edition 2017. 2540 C.

V.6. LÍMITES DE DETECCIÓN

Los límites de detección para los parámetros analizados se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12: Límites de detección para los parámetros medidos del Laboratorio ALS Environmental a excepción de STD, medido por Hidrolab.

Parámetro		Límite de detección (mg/L)
Fluoruro	(F ⁻)	< 0,06*
Alcalinidad Total	(CaCO ₃)	< 1
Sulfato	(SO ₄ ⁻²)	< 0,12*
Cloruro	(Cl ⁻)	< 0,008*
Bicarbonato	(HCO ₃ ⁻)**	< 1
Sodio disuelto	(Na ⁺)	< 0,01*
Potasio disuelto	(K ⁺)	< 0,009*
Calcio disuelto	(Ca ⁺²)	< 0,06*
Magnesio disuelto	(Mg ⁺²)	< 0,005*
Fosfato	(PO ₄ ⁻³ ***)	< 0,13*
Nitrato	(NO ₃ ⁻)	< 0,22*
Amonio	(NH ₄ ⁺ ****)	< 0,03
Sólidos Totales Disueltos	(SDT)	< 5
Arsénico total	(As)	< 0,0003
Cadmio total	(Cd)	< 0,00002
Cobalto total	(Co)	< 0,0001
Cobre total	(Cu)	< 0,0005
Hierro total	(Fe)	< 0,006
Mercurio total	(Hg)	< 0,0001
Manganeso total	(Mn)	< 0,0001
Níquel total	(Ni)	< 0,0001
Plomo total	(Pb)	< 0,0004
Selenio total	(Se)	< 0,0003
Zinc total	(Zn)	< 0,0007
Molibdeno total	(Mo)	< 0,0002
Plata total	(Ag)	< 0,00002
Aluminio total	(Al)	< 0,01

* Límite de cuantificación en vez de límite de detección.

** Medido como mg/L de carbonato de calcio.

*** Medido como mg/L fósforo en forma de fosfato.

**** Medido como mg/L de nitrógeno amoniacal.

V.7. 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 de la Región de los Lagos.
- 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.

V.8. TRABAJO EN TERRENO

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).

Para la realización de los monitoreos solicitados por DGA, HGH Solutions SpA, aplicó el instructivo definido en su Sistema Gestión Integral (SGI) “Muestreo aguas subterráneas” (Código: I-ENV.OI-005).

Este constó de:

V.8.1. Ubicación del punto a muestrear

- Registro de hora de llegada.
- Registro de coordenadas exactas del pozo donde se tomarán las medidas. Se utilizará coordenadas UTM y DATUM WGS 84.
- Completar formulario con referencias y características del pozo.
- Registro fotográfico. Al menos 4 fotografías que incluyan:
 - La llave o válvula de muestreo
 - Caseta donde se tomó la muestra.
 - Imagen referencial del lugar de muestreo
 - Punto de medición del nivel estático

V.8.2. Medición de profundidad de nivel freático

Se pondrá especial cuidado en establecer un punto fijo (o seguir el establecido) y permanente en el tiempo para la boca del pozo dejando un buen registro fotográfico del punto de medición.

- Medición y anotación de la distancia entre punto de medición y nivel del suelo (nivel muerto).
- Medición y anotación del nivel estático en registro tipo DGA.

V.8.3. Toma de muestras y medición de parámetros in situ

La sonda multiparámetros contará con soluciones calibradoras para pH y conductividad, y será necesario calibrarlo al menos una vez por día, pudiendo también calibrarse cada vez que se requiera.

La metodología de medición de parámetros in situ paso a paso consiste en:

- Verificar que el equipo cuenta con su calibración diaria realizada.
- Para asegurar representatividad del acuífero y no del pozo, abrir la válvula de muestreo y dejar escurrir un volumen de agua equivalente a 3 volúmenes interiores del pozo. Si no se cuenta con la información de habilitación del pozo, se esperará un mínimo de 5 minutos.
- Verificar que no exista condiciones anómalas que podrían afectar la representatividad de las muestras (agua turbia, acarreo de sedimentos o elementos ajenos al agua como residuos de la bomba o del pozo).
- Ambientar 3 veces balde de muestreo ubicándolo debajo de la válvula todo el tiempo de purga.
- Insertar sonda multiparámetro con el sensor completamente sumergido en el balde y esperar hasta que cada uno de los parámetros se estabilice para registrar el dato. Repetir para la temperatura (T°), el pH, la conductividad específica a 25°C (E_c) y el potencial de óxido-reducción (ORP).
- Completar datos fisicoquímicos de terreno en la ficha del inventario.
- Todo el material utilizado para el muestreo de aguas en terreno, incluida la sonda, será lavado con abundante agua desionizada y destilada después de cada pozo muestreado, minimizando así el riesgo de contaminación al momento de extraer el agua.

V.8.4. Toma de muestras para análisis de laboratorio

En cada pozo las siguientes actividades:

- Verificar que no exista condiciones anómalas que pudieran afectar la representatividad de las muestras (agua turbia, acarreo de sedimentos o elementos ajenos al agua como residuos de la bomba o del pozo).
- Verificar que la válvula de muestreo esté correctamente ubicada y no exista intervención química (ej: cloración) en un punto anterior al muestreo.
- Ambientar botellas de muestreo enjuagándolas con agua del pozo tres veces, asegurando enjuagar tanto la botella como la tapa. Aquellas botellas que vengan con los preservantes incluidos no deberán ser ambientadas con agua. Deberán ser ambientadas a la atmósfera por 5 minutos antes de tomar la muestra.
- Usando siempre los EPP (Guantes, lentes y mascarilla), llenar los frascos correspondientes a cada análisis.
- Toda vez que se termina de llenar una botella, inmediatamente se completa autoadhesivo con la información de:
 - Número de muestra
 - Pozo de muestreo
 - Fecha y hora del muestreo.

- Para el muestreo de alcalinidad: Llenar una botella de 500cc especialmente provista por el laboratorio y que no incluye preservantes. Se ambienta enjuagando tres veces con agua lista y preparada para el muestreo antes de tomar la muestra.
- Para el muestreo de sólidos disueltos totales: Llenar una botella de 500cc especialmente provista por el laboratorio y que no incluye preservantes. Se ambienta enjuagando tres veces con agua lista y preparada para el muestreo antes de tomar la muestra.
- Para el muestreo de cationes disueltos (Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio): Llenar una botella de 500cc especialmente provista por el laboratorio y que incluye la preservación con ácido nítrico. Se ambienta atmosféricamente destapando la botella 5 minutos antes de tomar la muestra.
- Para el muestreo de nitrógeno amoniacal: Llenar una botella de 500cc especialmente provista por el laboratorio y que incluye la preservación con ácido sulfúrico. Se ambienta atmosféricamente destapando la botella 5 minutos antes de tomar la muestra.
- Para el muestreo de aniones (Cloruro, Sulfato) Llenar una botella de 500cc especialmente provista por el laboratorio y que no incluye preservantes. Se ambienta enjuagando tres veces con agua lista y preparada para el muestreo antes de tomar la muestra.
- Para el muestreo de Bicarbonato: Llenar una botella de 500cc especialmente provista por el laboratorio y que no incluye preservantes. Se ambienta enjuagando tres veces con agua lista y preparada para el muestreo antes de tomar la muestra.
- Para el muestro de Nitratos: Llenar una botella de 500cc especialmente provista por el laboratorio y que incluye la preservación con ácido sulfúrico. Se ambienta atmosféricamente destapando la botella 5 minutos antes de tomar la muestra.
- Para el muestro de Fosfatos: Llenar una botella de 500cc especialmente provista por el laboratorio y que no incluye preservantes. Se ambienta enjuagando tres veces con agua lista y preparada para el muestreo antes de tomar la muestra.
- Para el muestreo de metales totales. Llenar una botella de 500cc especialmente provista por el laboratorio y que incluye la preservación con ácido nítrico. Se ambienta atmosféricamente destapando la botella 5 minutos antes de tomar la muestra.
- Todos los reactivos preservantes que se requieran vendrán ya dispuestos en los frascos para muestra dispuestos por el laboratorio. De este modo se minimizará la manipulación de ácidos.

V.8.5. Almacenamiento y transporte de muestras al laboratorio

La muestra es identificada inmediatamente después de su recolección, mediante una etiqueta autoadhesiva y aplicada en el envase con al menos las siguientes características.

- Descripción: Constituye un identificador, generalmente el código de la estación y nombre de Proyecto.
- Número de muestra: Indica el número correlativo del muestreo.
- Fecha de muestra: Día, mes, año y hora de la toma de muestra.

Una vez terminado el muestreo en el punto, se procederá a guardar las muestras en un cooler.

Las muestras denominadas críticas (alcalinidad, SDT, bicarbonato y nitrato) serán enviadas al final del día directamente al laboratorio vía Courier.

Las muestras para amonio serán almacenadas y enviadas al laboratorio vía Courier después de acumular 4 días de muestreo.

Las demás muestras para aniones disueltos, cationes disueltos y metales totales serán almacenadas en coolers mantenidos a entre 2°C y 5°C y ubicadas en las bodegas del vehículo. Todo el tiempo se mantendrá stock de hielo en gel en el congelador y se reemplazarán lo que sea necesario para mantener la temperatura constante en las muestras almacenadas.

Una vez finalizada cada campaña de 2 semanas, se dejarán personalmente en el laboratorio que corresponda de Santiago.

V.9. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS QUÍMICOS

La calidad de los resultados de los análisis químicos de iones es verificada 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:

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

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

- Parámetros fisicoquímicos medidos en terreno: gráficas de círculos sobre cartografía.
- Iones mayoritarios: diagrama de Stiff (Ver Figura 22) y diagrama de Piper (Para su construcción se utilizó el software EASY QUIM v5.0 (2012)).
- Microelementos: gráficos de barra comparando con normas de calidad de agua para consumo humano (NCh 409/2005) y aguas para riego (NCh 1333).

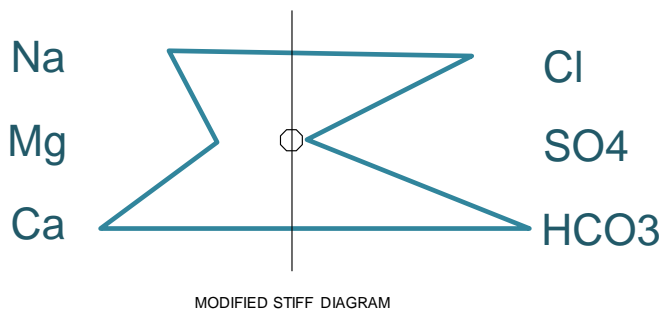
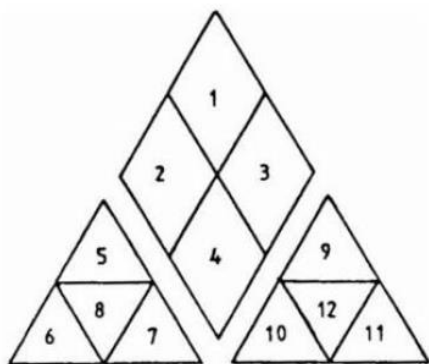


Figura 22: Ejemplo diagrama de Stiff con los iones considerados.

La interpretación de los diagramas de Piper (Figura 23) 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 23: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.

V.10. MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFERO SEGÚN ÍNDICE DE CALIDAD

La legislación ambiental chilena no contempla normativas de calidad para las aguas subterráneas, solamente está normado para determinados usos, como la Norma Chilena N°409 y N°1.333, que dictan las concentraciones máximas permitidas de cada elemento para Agua Potable y para Agua de Riego, respectivamente.

La práctica ambiental considera como aguas en una condición desfavorable a aquellas que, contrastadas con análisis previos del mismo lugar, han aumentado sus concentraciones químicas producto de una actividad antrópica que directa o indirectamente es causante 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 respecto 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.10.1. 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 24) 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.

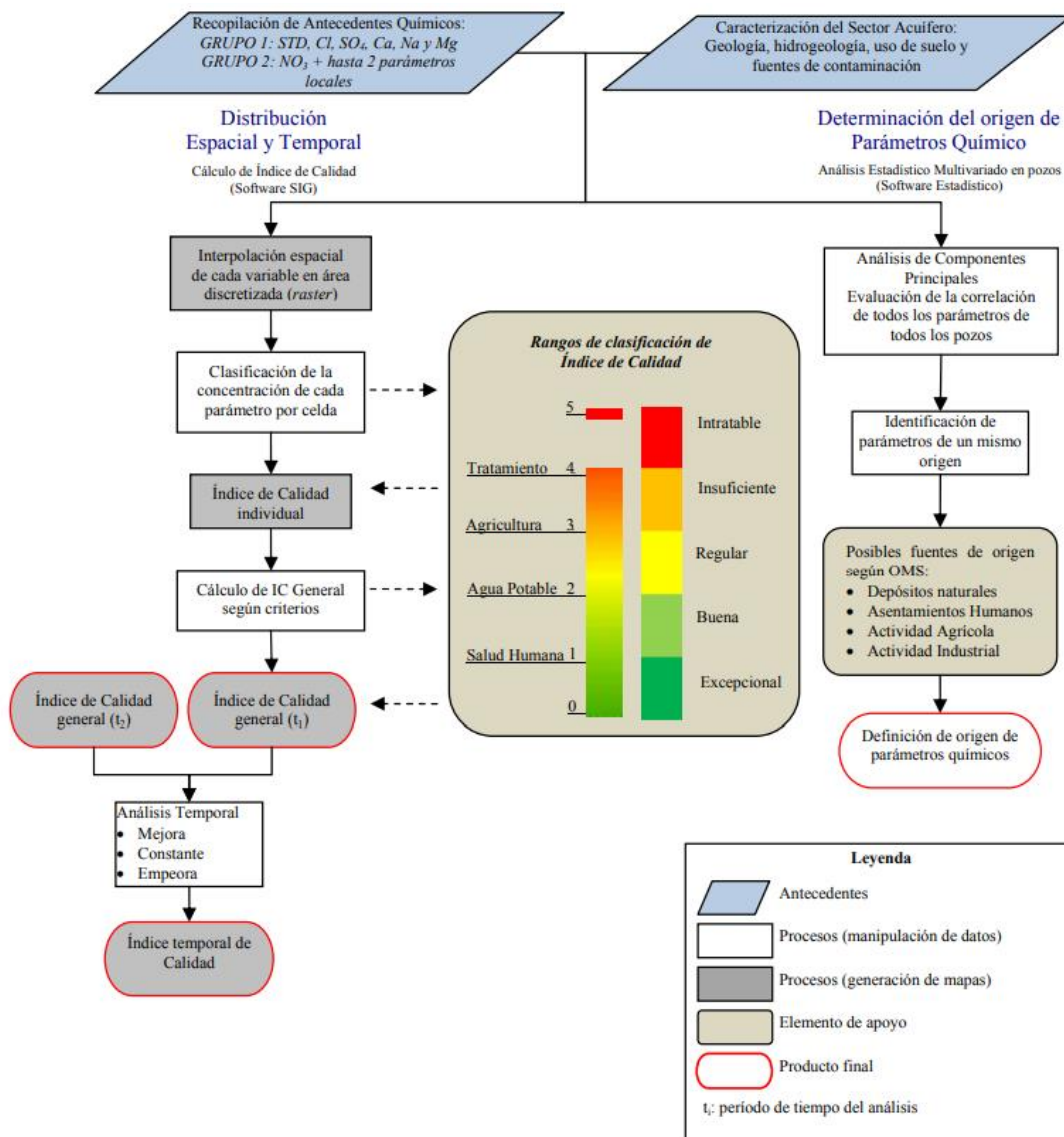


Figura 24: Esquema y diagrama de flujo de metodología de cálculo del Índice de Calidad de aguas subterráneas Fuente: Modificado de DGA, 2009.

V.10.2. Cálculo del índice de calidad

La metodología contempla trabajar con dos grupos de parámetros (Tabla 13), normalmente determinados en los análisis de aguas. El primer grupo está conformado por los parámetros químicos Sólidos Disueltos Totales (SDT), Cloruros (Cl), Sulfatos (SO_4), Calcio (Ca), Sodio (Na) y Magnesio (Mg), que corresponden a parámetros comúnmente realizados en cualquier muestra de agua y que además son utilizados en la mayoría de las metodologías internacionales. Estos parámetros se encuentran siempre disueltos en las aguas en forma natural, y el aumento de sus concentraciones puede deberse a efectos antrópicos. El segundo grupo está conformado por parámetros químicos que dan cuenta de la singularidad de cada acuífero y está conformado por un máximo de tres parámetros: la concentración de Nitratos (NO_3), más la concentración de dos elementos minoritarios que pueden escogerse en forma libre para cada acuífero, siempre y cuando reflejen las particularidades específicas de éste, ya sea por causas naturales o artificiales.

Tabla 13: Parámetros químicos utilizados en la metodología. Fuente: DGA, 2009.

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

Es importante señalar que, a pesar del uso de siete parámetros químicos fijos por parte de la metodología, se requiere un análisis químico completo de las muestras de agua subterránea. En efecto, estos siete parámetros fijos deben formar parte de un conjunto mayor de parámetros analizados en cada muestra de agua subterránea, donde la cantidad total dependerá de cada zona de estudio y del uso que pueda darse a los resultados obtenidos. En la Tabla 14 se mencionan los parámetros más comúnmente medidos en el agua subterránea y que son coincidentes con los monitoreados por la DGA. La primera columna indica parámetros mínimos necesarios para una caracterización química básica del agua subterránea de un sector, y entre los cuales se encuentran los siete parámetros fijos de la metodología. La segunda columna indica parámetros adicionales que pueden ser de interés local, ya que la normativa vigente de agua potable (INN, 2005) los califica como perjudiciales para la salud humana.

Tabla 14: Parámetros a medir en caracterización química.

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

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 se describen a continuación.

V.10.2.1. Índice de calidad individual

Después de 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. Éste 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 25).

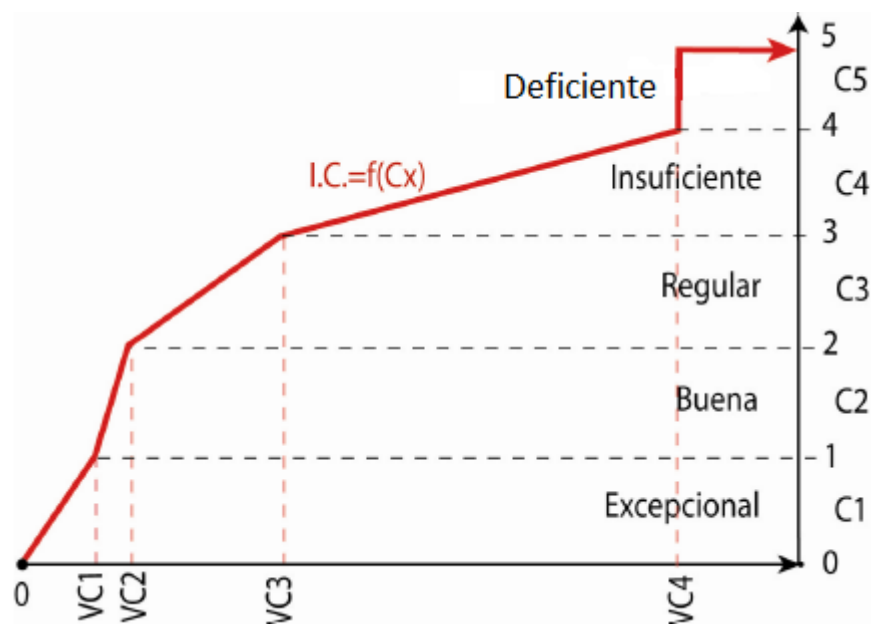


Figura 25: Cálculo del Índice de Calidad (IC) mediante interpolación lineal entre clases. Fuente: DGA, 2009.

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. El detalle de la relación entre las clases de calidad y sus valores de corte, se resumen en la Tabla 15.

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. Of, 2005.

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.

Tabla 15: Relación entre clases de calidad y valores de corte. Fuente: DGA, 2009.

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	Deficiente ¹	VC5	Aguas que no se pueden tratar. De ser posibles serían mediante procesos muy costosos o complejos.

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.

Los parámetros con concentraciones por sobre el valor de corte 4 son clasificados como Deficiente (C5). Hay que considerar que al haber adoptado un valor intermedio de remoción para la definición del valor de C4, las aguas de esta clase no se refieren, en términos estrictos, a aguas que no se pueden tratar, sino que su tratamiento es complejo y costoso.

En el presente estudio, los valores de corte son los definidos por la DGA (2009) para determinar el Índice de Calidad (IC), que se muestran en la Tabla 16 a continuación:

¹ Desde el año 2015 al 2020 los diagnósticos de calidad de agua subterránea y los seguimientos posteriores han utilizado la clasificación Intratable de acuerdo a DGA (2009). Sin embargo desde el 2021 se modifica el término a "Deficiente" por considerar que representa de mejor forma una calidad con dificultades de tratamiento.

Tabla 16: Valores de corte usados para el cálculo del IC de las aguas de este estudio.

Parámetro	Unidad	VC1	VC2	VC3	VC4
Cloruro	mg/L	250	400	1064	1600
Sulfato	mg/L	250	500	961	10000
Calcio	mg/L	100	200	401	4000
Sodio	mg/L	200	200	920	6000
Magnesio	mg/L	100	125	250	2500
Nitratos	mg/L	10	50	133	200
Níquel	mg/L	0,02	0,02	0,2	0,4
Manganeso	mg/L	0,05	0,1	0,2	40

V.10.2.2. 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 criterios que se detallan a continuación (Tabla 17).

Tabla 17: Criterios para establecer el IC general. Fuente: DGA, 2009.

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 $IC_{individual} \leq 1$ $IC_{general} = \frac{\sum_{i=\text{parametro}} IC_i}{n^{\circ} \text{parametros}}$

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 Deficiente:

- 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.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES

VI.1. DATOS REGISTRADOS EN TERRENO

VI.1.1. Parámetros geométricos

En la Tabla 18 se detalla las profundidades, por pozo, tanto del pozo en sí mismo, la profundidad del nivel estático y nivel dinámico del agua, además de la altura de la columna de agua en el pozo, respecto tanto al nivel estático como al dinámico. En la Figura 26 se representan estos mismos datos.

Tabla 18: Profundidades de los pozos, niveles estáticos y dinámicos y altura de columna de agua. (S.I. = Sin información).

N° del pozo	Nombre	Profundidad del pozo (m)	Profundidad del agua (Nivel Estático) (m)	Altura de columna de agua - nivel estatico (m)	Profundidad del agua (Nivel Dinámico) (m)	Altura de columna de agua - nivel dinamico (m)
1	Quilacahuín	80,00	S.I.	S.I.	6,31	73,69
2	Trumao	40,00	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
3	Buenaventura	70,00	24,36	45,64	S.I.	S.I.
4	Las Lumas	96,00	7,68	88,32	S.I.	S.I.
5	Las Quemias Bajo	75,00	24,84	50,16	S.I.	S.I.
6	Rincón Chahuilco	85,00	26,55	58,45	S.I.	S.I.
7	Quisquelefun	S.I.	7,96	S.I.	14,29	S.I.
8	Cancura	80,00	S.I.	S.I.	17,90	62,10
9	Tres Esteros	62,00	S.I.	S.I.	16,60	45,40
10	Chan-Chan	60,00	5,80	54,20	S.I.	S.I.
11	Estación Concordia	62,00	10,84	51,16	S.I.	S.I.
12	Colonia La Radio	50,00	5,72	44,28	S.I.	S.I.
13	Los Polizones	56,00	S.I.	S.I.	14,62	41,38
14	Ensenada	70,00	0,00	70,00	0,00	70,00
15	Nueva Braunau	90,00	S.I.	S.I.	16,58	73,42
16	Paraguay Chico	90,00	S.I.	S.I.	63,36	26,64
17	Alto Bonito	120,00	S.I.	S.I.	54,45	65,55
18	Las Quemias San Antonio	100,00	S.I.	S.I.	51,45	48,55
19	Trapen Chinguihue Paitao	S.I.	0,00	S.I.	32,32	S.I.
20	Coyán	80,00	7,76	72,24	S.I.	S.I.
21	Lolcura	50,00	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
22	Lepihue - La Pasada	18,00	S.I.	S.I.	9,25	8,75
23	Amortajado	12-16	1,34	S.I.	S.I.	S.I.
24	El Yale	105-110	S.I.	S.I.	54,82	S.I.
25	El Peñasco	70,00	S.I.	S.I.	28,00	42,00
26	Carelmapu	40	S.I.	S.I.	3,20	36,80
27	Yaco Alto y Bajo	S.I.	41,50	S.I.	S.I.	S.I.
28	Puntilla San Rafael	S.I.	S.I.	S.I.	11,88	S.I.
29	Punta Machil	66,00	S.I.	S.I.	25,44	40,56
30	Caicaen	70,00	S.I.	S.I.	46,69	23,31
31	Chauquear Alto	>118	S.I.	S.I.	87,12	S.I.
32	Pugueñún	57,00	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
33	Curamó	60,00	9,02	50,98	17,62	42,38
34	El Quitrál	67,00	S.I.	S.I.	8,67	58,33
35	Rauco Alto	120,00	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
36	Puqueldón	100,00	68,51	31,49	S.I.	S.I.
37	Tara	S.I.	S.I.	S.I.	17,26	S.I.
38	Natri	60,00	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.

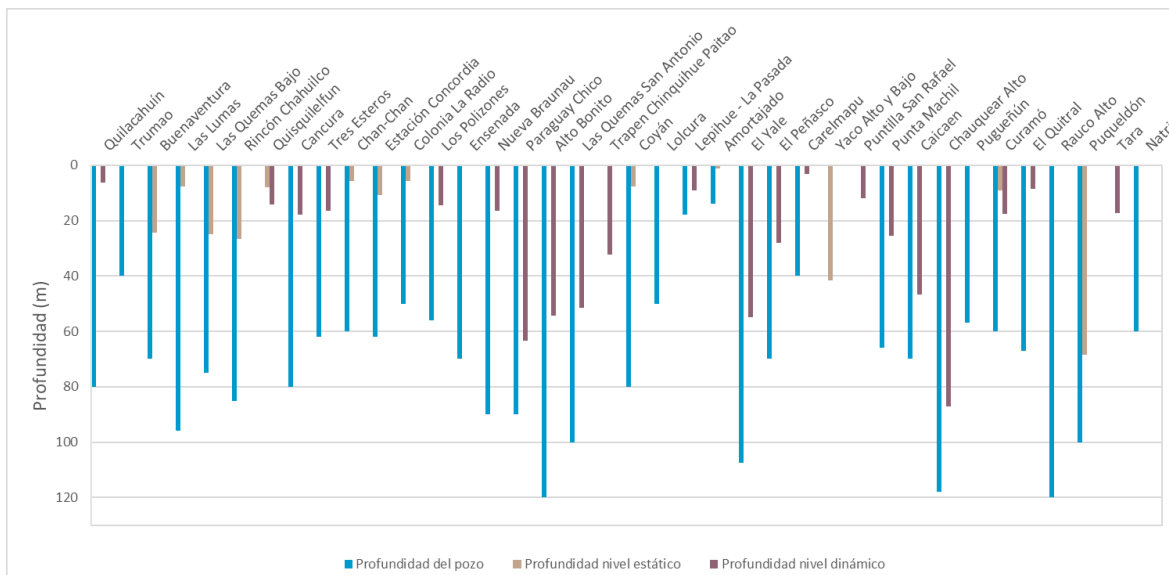


Figura 26: Profundidad de pozos APR, con sus niveles estáticos y dinámicos. Fuente: Elaboración propia.

VI.1.2. Parámetros fisicoquímicos

A continuación, se presentan los valores de pH, temperatura, conductividad eléctrica y potencial redox obtenidos en cada pozo (ver Tabla 19). Se señalan en rojo los valores de pH que se encuentren fuera de la Norma Chilena N°409 para agua potable, es decir valores de pH menores a 6.5 o mayores a 8.5.

En la Figura 27, Figura 28, Figura 29 y Figura 30 se observa la distribución espacial de los pozos APR muestreados con sus parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica, temperatura y potencial redox respectivamente.

Según los valores de pH obtenidos, se observa que sólo 2 pozos de los muestreados presentan aguas más ácidas que lo permitido por la norma de agua potable, en rojo en Tabla 18 (Ensenada y Carelmapu) y que ninguno de ellos presenta valores más alcalinos que lo permitido por dicha norma.

Los valores de conductividad eléctrica son relativamente bajos en todas las muestras. En relación con lo expuesto en la Norma N°1333 (para agua de riego), la mayoría de las aguas corresponden a aguas *“con las cuales generalmente no se observarán efectos perjudiciales”* por tener conductividades eléctricas menores a 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sólo un pozo se encuentra en la categoría *“agua que puede tener efector perjudiciales en cultivos sensibles”*, en naranja en Tabla 19, por estar entre 750 y 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Trumao) y otro pozo se encuentra en la categoría *“agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos”*, en rojo en Tabla 19, por estar entre 1500 y 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Caicaen). Límites aceptados para este parámetro no se encuentran especificados en la Norma NCh N°409 (Calidad de agua potable).

Por último, las temperaturas registradas, los valores fluctúan entre 11,07 y 14,80°C y el potencial redox entre 645,7 y -185,5 mV.

Tabla 19: Parámetros fisicoquímicos de los pozos APR.

N° del pozo	Nombre del Pozo	pH	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Temperatura (°C)	Potencial redox (mV)
1	Quilacahuín	7,9	474	14,8	-100,4
2	Trumao	7,77	1173	14,54	-50,5
3	Buenaventura	7,27	249	12,58	-16,1
4	Las Lumas	7,3	180	12,76	-86,5
5	Las Quemadas Bajo	7,4	164	12,77	-82
6	Rincón Chahuilco	7,38	181	12,26	-44,6
7	Quisquelefun	7,25	352	12,53	441,7
8	Cancura	7,79	223	13,8	-80
9	Tres Esteros	6,93	99	13,04	315
10	Chan-Chan	7,23	125	12,13	256,2
11	Estación Concordia	7,39	117	12,65	484,7
12	Colonia La Radio	7,49	130	11,84	-112,3
13	Los Polizones	7,42	119	11,68	453,3
14	Ensenada	6,21	100	11,62	364,3
15	Nueva Braunau	7,55	158	11,31	352,5
16	Paraguay Chico	7,49	147	11,39	362,8
17	Alto Bonito	7,49	192	11,65	-117,9
18	Las Quemadas San Antonio	7,46	171	11,33	-37,4
19	Trapen Chiquihue Paitao	7,67	166	11,8	-43,5
20	Coyán	6,71	129	12,36	293,1
21	Lolcura	7,11	141	12,7	268,7
22	Lepihue - La Pasada	8,2	356	12,73	-185,5
23	Amortajado	7,5	431	11,79	166,8
24	El Yale	7,5	253	11,14	Sin información
25	El Peñasco	7,28	148	11,84	267,5
26	Caremapu	6,44	325	13,12	-42,1
27	Yaco Alto y Bajo	7,45	121	12,07	290,4
28	Puntilla San Rafael	7,38	159	11,72	645,7
29	Punta Machil	7,28	201	12,74	317,5
30	Caicaen	7,52	2045	12,45	355,5
31	Chauquear Alto	7,36	179	12,75	-115,9
32	Pugueñún	6,81	224	12,12	14,5
33	Curamó	7,46	303	12,78	-88,2
34	El Quitral	6,84	194	11,07	71,5
35	Rauco Alto	7,29	91	11,4	245
36	Puqueldón	7,82	148	13,65	140,1
37	Tara	6,64	173	11,46	293,1
38	Natri	7,88	204	12,42	-121,5

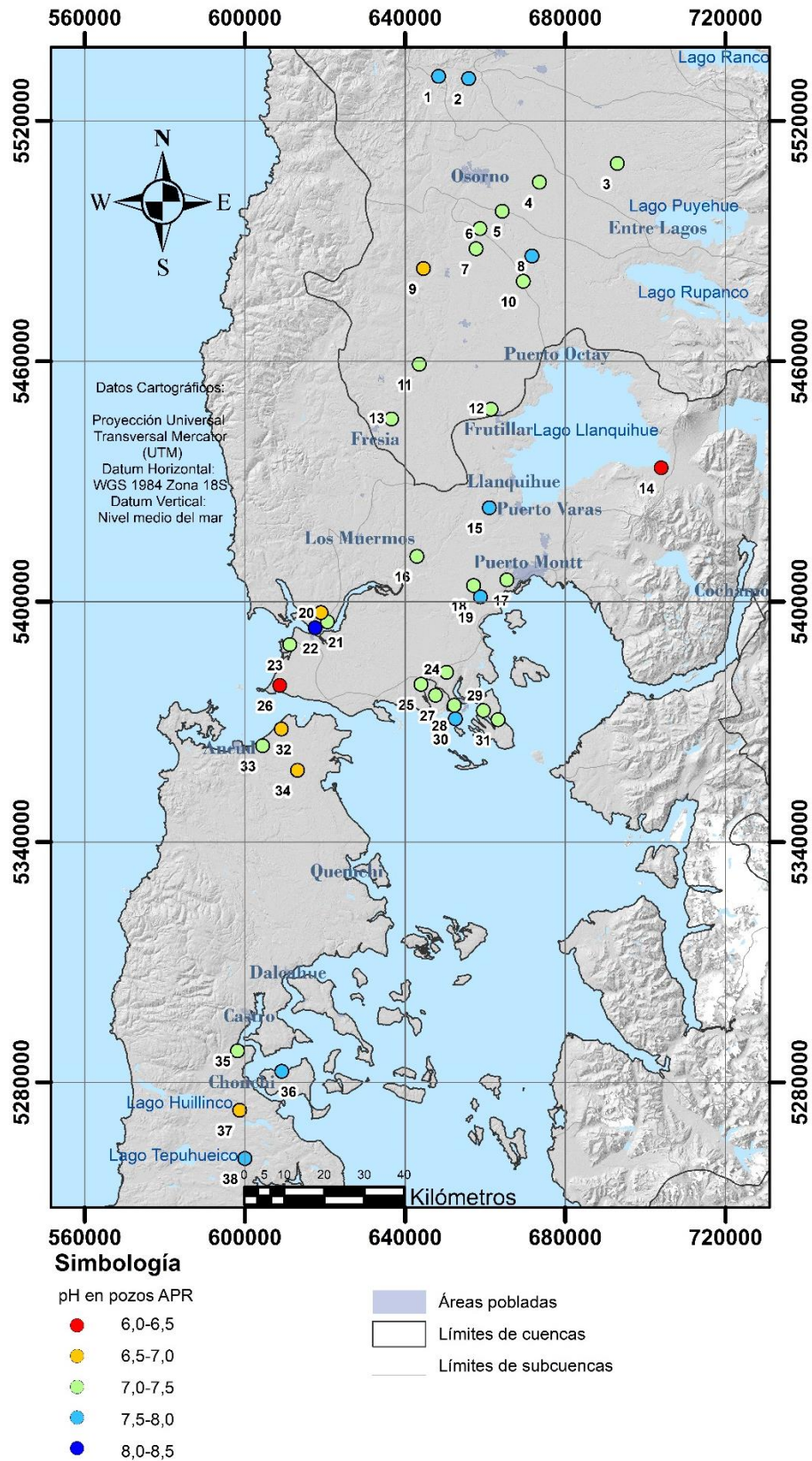
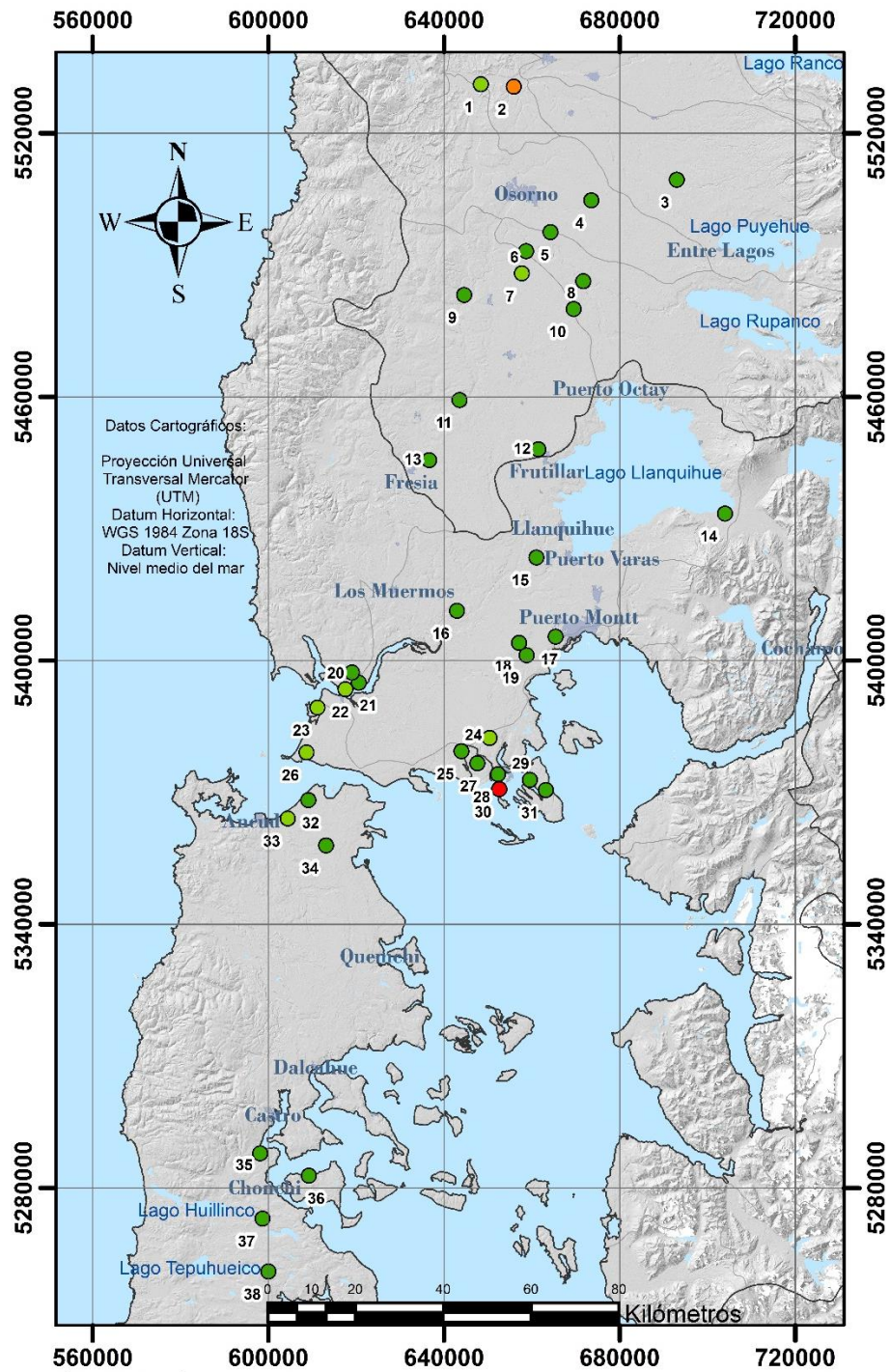


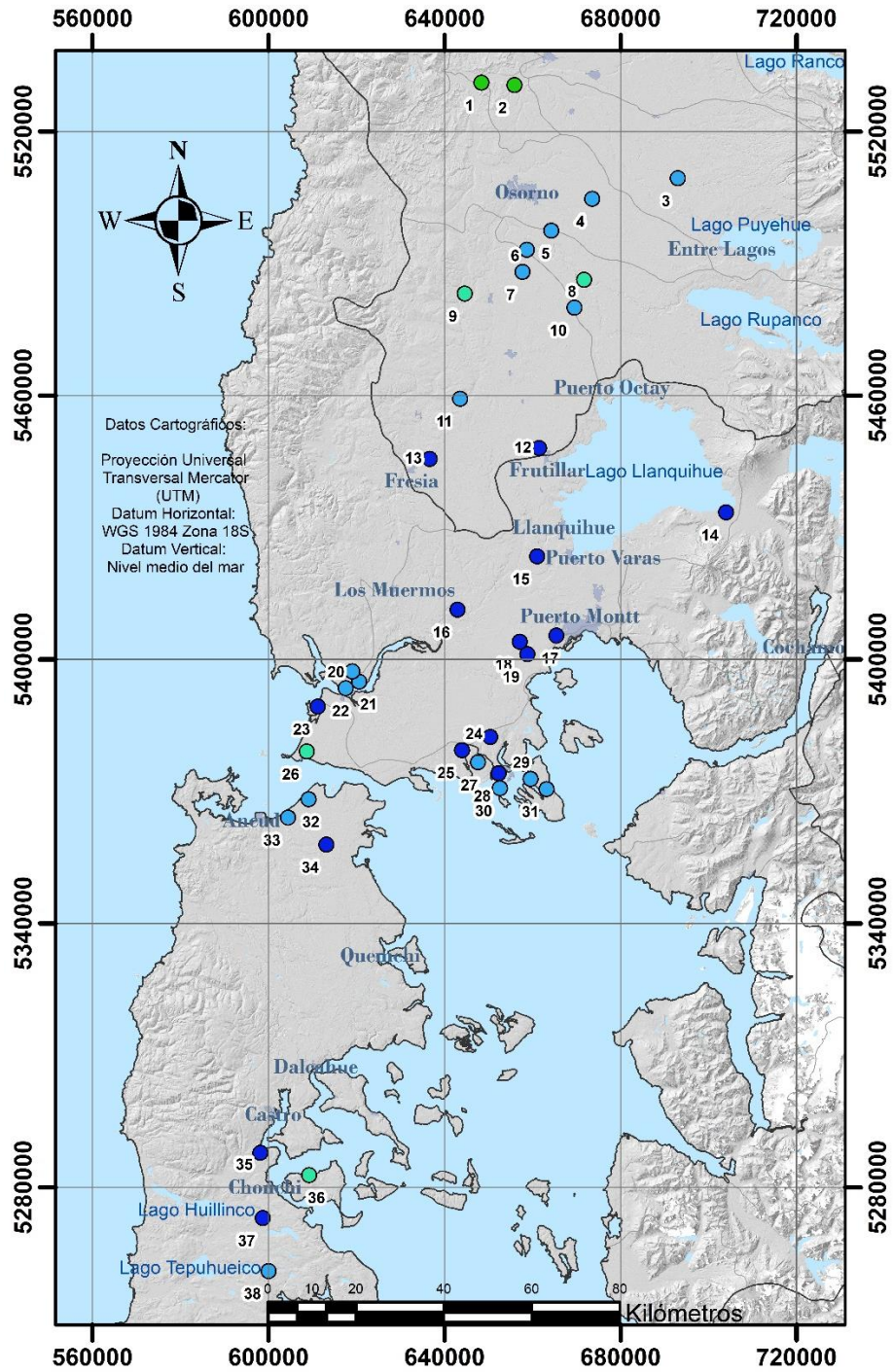
Figura 27: Mapa de distribución de pH en pozos de estudio (ver numeración en Tabla 19). Fuente: Elaboración propia.



Simbología

- | | |
|--|-------------------------|
| Conductividad eléctrica de pozos APR ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Áreas pobladas |
| ● 0-350 | ▭ Límites de cuencas |
| ● 350-750 | ▭ Límites de subcuencas |
| ● 750-1500 | |
| ● 1500-3000 | |

Figura 28: Mapa de distribución de Conductividad eléctrica en pozos de estudio (ver numeración en Tabla 19). Fuente: Elaboración propia.



Simbología

- | | | |
|-------------------------------|-------------|-----------------------|
| Temperatura en pozos APR (°C) | | Áreas pobladas |
| ● (dark blue) | 11,00-12,00 | ▭ (grey) |
| ● (light blue) | 12,00-13,00 | ▭ (white with border) |
| ● (green) | 13,00-14,00 | ▭ (white with border) |
| ● (yellow-green) | 14,00-15,00 | |

Figura 29: Mapa de distribución de Temperaturas en pozos de estudio (ver numeración en Tabla 19). Fuente: Elaboración propia.

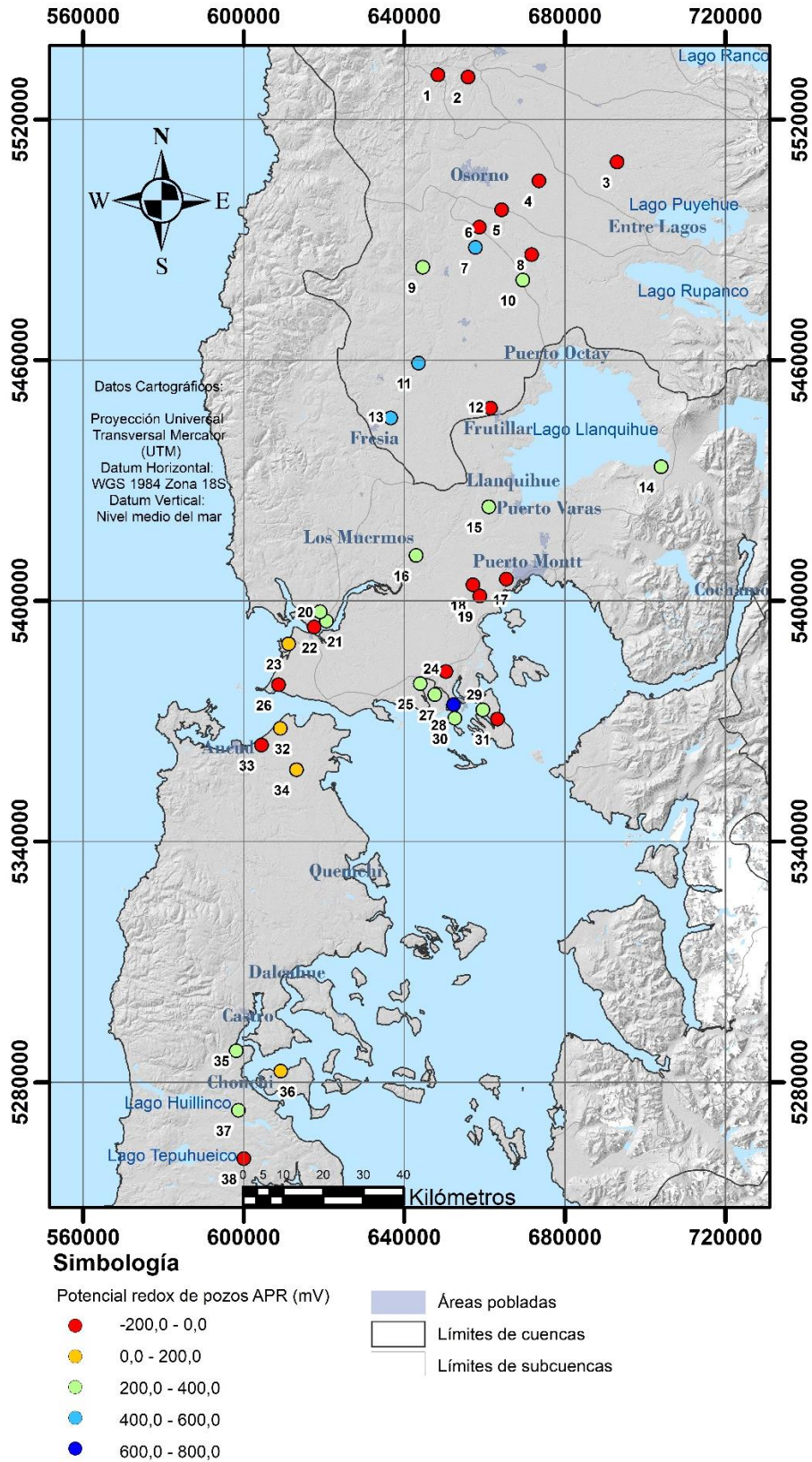


Figura 30: Mapa de distribución de potencial redox en pozos de estudio (ver numeración en Tabla 19). Fuente: Elaboración propia.

VI.2. CONFIABILIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

Se calcularon los balances iónicos para cada una de las muestras subterráneas obtenidas, de acuerdo a lo expuesto en la metodología del presente informe, según el cual un error positivo se da si hay un exceso de cationes y uno negativo si hay exceso de aniones. El error máximo en valor absoluto aceptado en un análisis es del 5% (DGA, 2009), valores más altos sugieren una significancia de error suficiente para excluir dicho análisis de ciertas aplicaciones interpretativas.

De la población total de muestras de agua subterránea, se detectó que en 21 casos (73,68% del total) los errores son menores al 3%, en 3 casos (7,89% del total) los errores se encuentran entre 3 y 5% y, por último, en 7 casos (18,42% del total) el error es mayor al 5%. Las muestras con errores superiores a 5% corresponden a: Quilacahuín (14,76%), Coyán (9,41%), Amortajado (-9,38%), Carelmapu (-8,92%), Puntilla San Rafael (-6,70%), Caicaen (-7,5%) y Pugeñún (-5,23%).

El error observado en estas muestras puede deberse a los errores acumulados de cada una de las determinaciones individuales (de las concentraciones de cada ion) y a no considerar todos los iones que podría haber en solución (para el cálculo sólo se consideraron los cationes de sodio, calcio, magnesio y amonio, y los aniones de cloro, flúor, sulfato, bicarbonato, carbonato y nitrato).

Los detalles de los errores se presentan en la Figura 31 y Tabla 20.

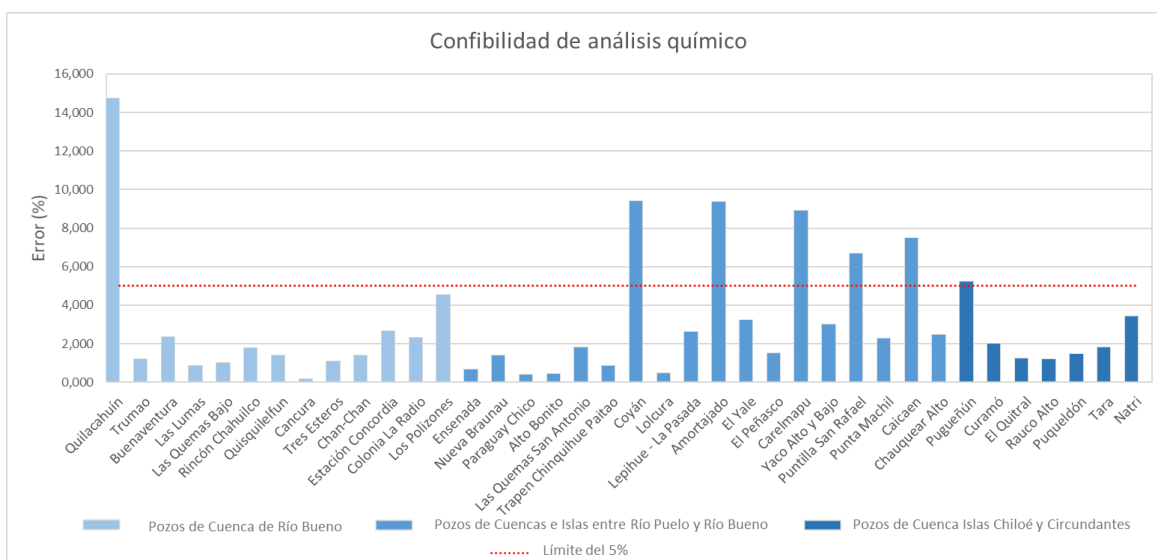


Figura 31: Gráfico con los valores absolutos de los errores obtenidos en los pozos APR. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20: Tabla de Balances iónicos de cada pozo. Fuente: Elaboración propia.

N° del pozo	Nombre del Pozo	Suma de cationes (mEq/L)	Suma de aniones (mEq/L)	Error (%)
1	Quilacahuín	4,62	3,43	14,76
2	Trumao	9,68	9,45	1,20
3	Buenaventura	2,65	2,52	2,36
4	Las Lumas	1,81	1,84	-0,89
5	Las Quemadas Bajo	1,63	1,59	1,04
6	Rincón Chahuilco	1,87	1,81	1,79
7	Quisquefun	3,81	3,70	1,40
8	Cancura	2,35	2,34	0,20
9	Tres Esteros	0,99	0,97	1,10
10	Chan-Chan	1,33	1,29	1,39
11	Estación Concordia	1,57	1,49	2,67
12	Colonia La Radio	1,29	1,35	-2,32
13	Los Polizones	1,10	1,20	-4,53
14	Ensenada	0,99	0,98	0,66
15	Nueva Braunau	1,54	1,50	1,40
16	Paraguay Chico	1,56	1,55	0,41
17	Alto Bonito	1,99	2,01	-0,46
18	Las Quemadas San Antonio	1,74	1,80	-1,83
19	Trapen Chinquihue Paitao	1,70	1,73	-0,85
20	Coyán	1,31	1,08	9,41
21	Lolcura	1,38	1,36	0,50
22	Lepihue - La Pasada	3,49	3,68	-2,64
23	Amortajado	3,98	4,80	-9,38
24	El Yale	2,66	2,84	-3,26
25	El Peñasco	1,44	1,48	-1,51
26	Carelmapu	2,02	2,42	-8,92
27	Yaco Alto y Bajo	1,25	1,33	-3,02
28	Puntilla San Rafael	1,68	1,92	-6,70
29	Punta Machil	1,96	2,05	-2,29
30	Caicaen	17,00	19,76	-7,50
31	Chauquear Alto	1,80	1,89	-2,47
32	Pugueñún	1,76	1,95	-5,23
33	Curamó	2,28	2,19	2,01
34	El Quitral	2,00	2,05	-1,27
35	Rauco Alto	0,87	0,90	-1,23
36	Puqueldón	1,50	1,54	-1,47
37	Tara	1,83	1,77	1,85
38	Natri	2,02	2,16	-3,42

VI.3. CLASIFICACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Con el objetivo de tener una caracterización y clasificación general de la composición química de las aguas subterráneas muestreadas en la Región de los Lagos se elaboraron diagramas de Piper y de Stiff para cada pozo.

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 estará condicionada en primera instancia por la composición del agua de lluvia, la cual presenta una composición muy variable y generalmente es de gran importancia en el aporte de sales solubles y agresividad a las aguas de infiltración. Cerca de la costa se esperarían aguas de lluvia más ricas en Cl, Na y K, y a medida que las precipitaciones se internan en el continente se esperarían un enriquecimiento en las concentraciones de iones tales como SO_4 , HCO_3 y Ca.

La etapa de infiltración a través del suelo es muy importante para la composición química del agua subterránea. Con frecuencia, gran parte de la “personalidad geoquímica” del agua subterránea se adquiere en los primeros metros de su recorrido, aunque después haya recorrido varios kilómetros en el subsuelo. Esto es debido principalmente a que el agua en el suelo es ácida por la reacción del CO_2 con el agua (pues generalmente los poros del suelo presentan una elevada concentración de este gas). Esta acidez hace que el agua sea muy agresiva con los silicatos y carbonatos. Si el agua permanece en el suelo, dado que siempre hay CO_2 presente, esta recupera la acidez que ha consumido en la alteración. Esto mantendrá su agresividad mientras permanezca en el suelo, pero, si llega a un acuífero, dado que en un medio saturado normalmente no hay aportes de acidez, el agua se hará básica y perderá su capacidad de disolver carbonatos y alterar silicatos (Drever, 1997).

Luego de que el agua de lluvia, o procedente de otro proceso de recarga, es infiltrada al medio subterráneo, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto, que a su vez depende de la velocidad del flujo subterráneo. Como norma general se espera que, a mayor tiempo de permanencia en el terreno mayor sea la concentración de sales disueltas.

Aunque las reacciones y procesos químicos que se desarrollan son muy variados, generalmente, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas. Después predomina el sulfato y, por último, las aguas más salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina *secuencia de Chevotareb* (1955, ampliamente citado, por ej.: Kehew, 2001). (Ver Figura 32).

	-----Recorrido y tiempo de permanencia en el acuífero ----- >>>>>				
Aniones predominantes:	HCO_3^- -->	HCO_3^- --> $\text{SO}_4^{=}$	$\text{SO}_4^{=}$ -->	$\text{SO}_4^{=}$ --> Cl^-	Cl^-
	----- Aumento de la salinidad ----->>>>>>>>>				

Figura 32: Secuencia de Chevotareb. Fuente: Sánchez, 2012.

En el caso de los cationes se esperarían que aguas con poco tiempo de residencia sean cálcicas, y a medida que el tiempo en contacto con la roca aumente, pasen a magnésicas y finalmente sódicas.

La composición de las aguas subterráneas está condicionada por diversos factores, tanto naturales como antropogénicos. En la Tabla 21 se enlistan los orígenes más comunes de los diferentes parámetros mayoritarios analizados tradicionalmente para caracterizar la composición de aguas subterráneas.

Tabla 21: Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea. Fuente: 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.3.1. Cuenca del río Bueno

A partir de la información presentada en el diagrama Piper que se observa en la Figura 33, la composición catiónica de las muestras de los pozos pertenecientes a esta cuenca es principalmente mixta, con sólo dos muestras sódicas. Por su parte, la composición aniónica es marcadamente bicarbonatada, sólo el pozo Trumao es clorurado, esto podría ser indicativo de que corresponden a aguas con relativamente poco tiempo de permanencia en el subsuelo y, por lo tanto, que ha tenido poca interacción con roca, a excepción de Trumao que correspondería a un agua más evolucionada, lo que concuerda con su salinidad alta (ver conductividad eléctrica en Tabla 19). En términos generales las aguas muestreadas en este acuífero tienen una composición bicarbonatada cálcica-magnésica, sólo Trumao tiene una composición clorurada sódica y Quilacahuín bicarbonatada sódica.

En la Figura 34 se presenta un mapa con los diagramas de Stiff obtenidos para cada pozo (se señala el número de identificación del pozo), con el objetivo de identificar una posible evolución espacial o variaciones composicionales debido a factores locales. En el mapa es muy claro observar en general una ausencia del anión sulfato en todas las muestras, además de lo mismo ya descrito sobre el diagrama Piper.

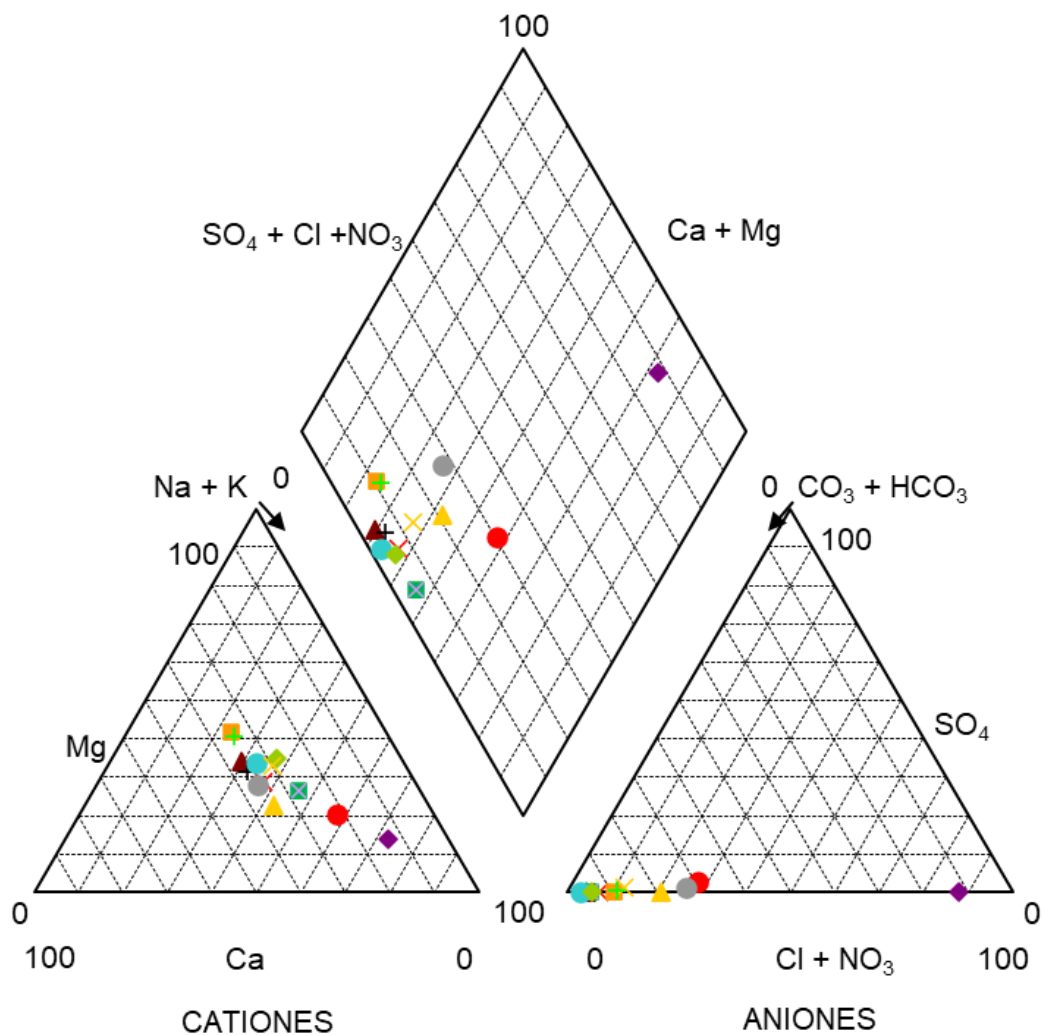


Figura 33: Diagrama Piper de pozos APR en la cuenca de río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

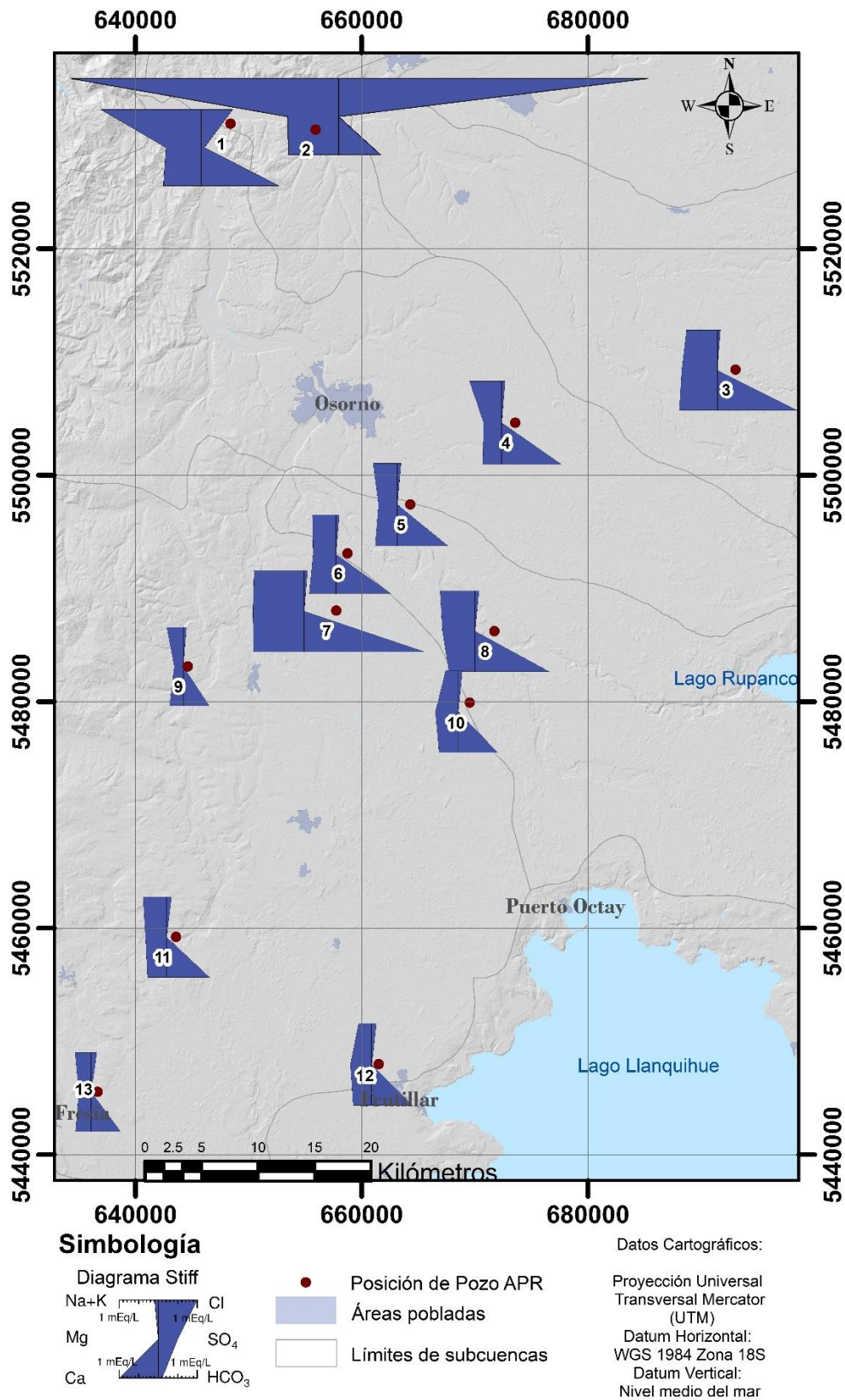


Figura 34: Mapa con diagramas Stiff de la cuenca de río Bueno (ver numeración en Tabla 20). Fuente: Elaboración propia.

VI.3.2. Cuencas e islas entre río Puelo y río Bueno

A partir de la información presentada en el diagrama Piper que se observa en la Figura 35, la composición catiónica de las muestras de los pozos pertenecientes a esta cuenca es principalmente mixta, con sólo dos muestras sódicas y una cálcica. Por su parte, la composición aniónica es marcadamente bicarbonatada, sólo el pozo Caicaen es clorurado y el pozo Carelmapu es bicarbonatado-clorurado. Esto podría ser indicativo de que el general de las aguas llevan relativamente poco tiempo de permanencia en el subsuelo y, por lo tanto, que han tenido poca interacción con roca, a excepción de Caicaen que correspondería a un agua más evolucionada, lo que concuerda con su salinidad alta (ver conductividad eléctrica en Tabla 19) y por su ubicación (ver Figura 28) su composición podría incluso estar vinculada a procesos de intrusión salina. En términos generales las aguas muestreadas en este acuífero tienen una composición bicarbonatada cálcica-magnésica, sólo Caicaen tiene una composición clorurada sódica, Amortajado bicarbonatada sódica (que generalmente se vincula a procesos de intercambio catiónico) y Carelmapu es clorurada cálcico-magnésica.

En la Figura 36 se presenta un mapa con los diagramas de Stiff obtenidos para cada pozo (se señala el número de identificación del pozo), con el objetivo de identificar una posible evolución espacial o variaciones composicionales debido a factores locales. En el mapa es muy claro observar en general una ausencia del anión sulfato en casi todas las muestras, destaca claramente Caicaen por su alta salinidad, además de aquello observado sobre el diagrama Piper.

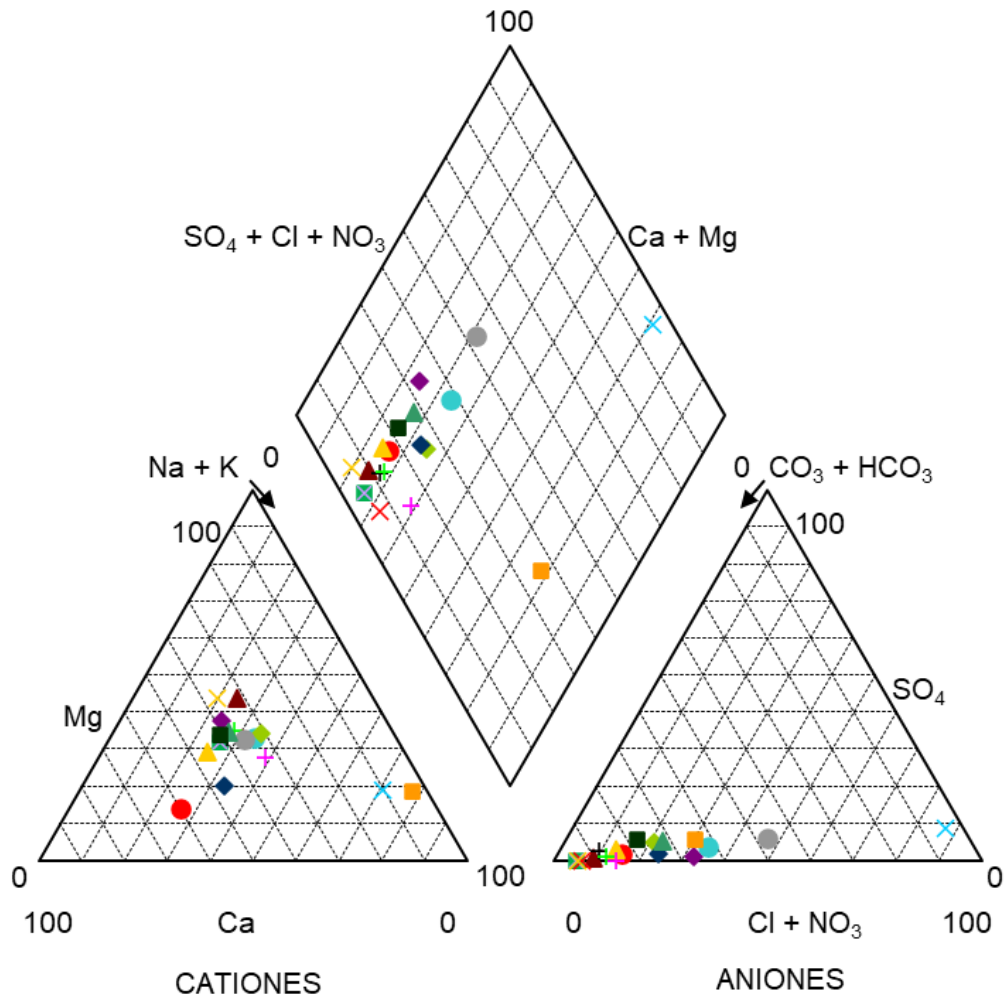


Figura 35: Diagrama Piper de pozos APR en las cuencas e Islas entre río Puelo y río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

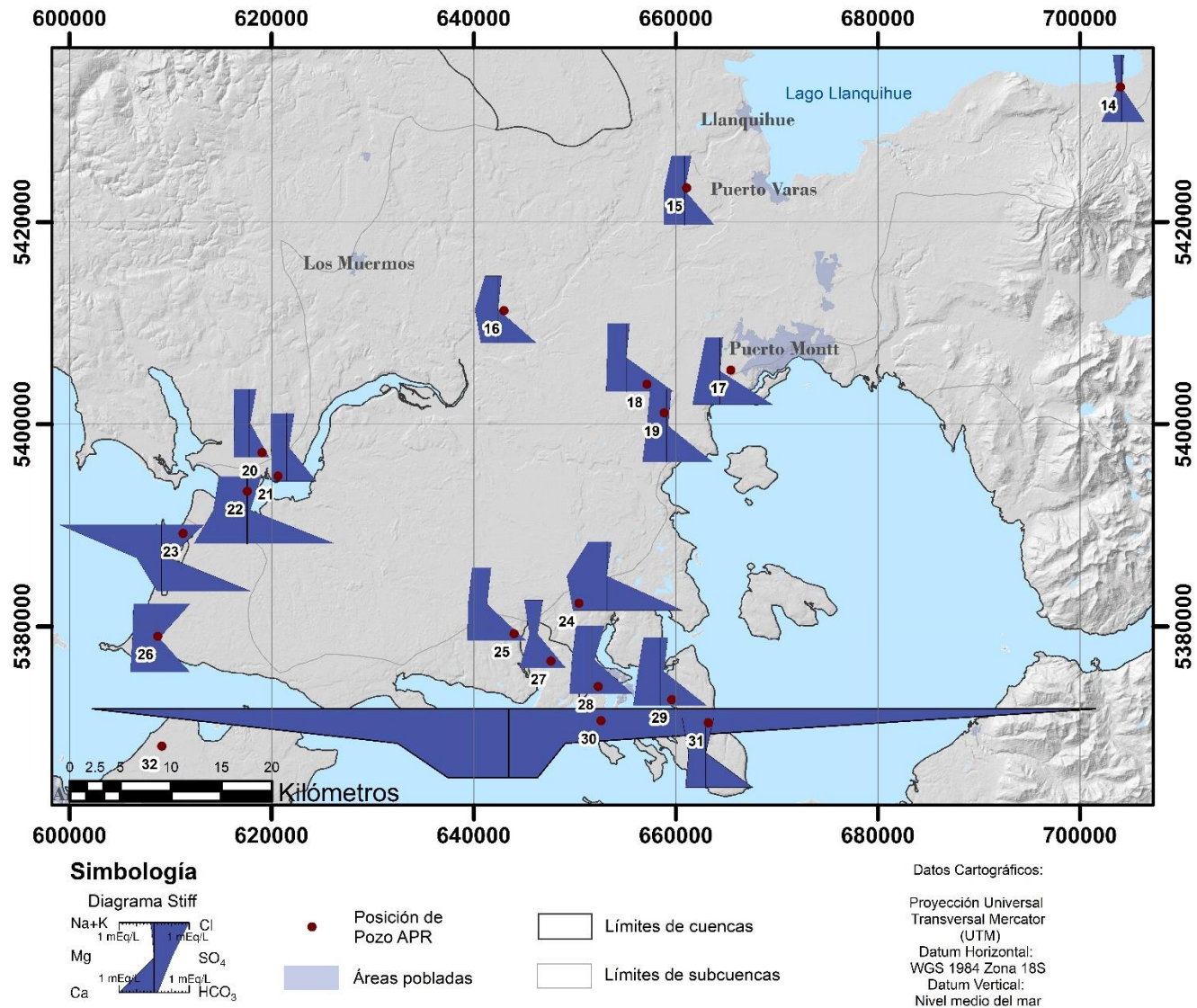


Figura 36: Mapa con diagramas Stiff de las cuencas e islas entre río Puelo y río Bueno (ver numeración en Tabla 20). Fuente: Elaboración propia.

VI.3.3. Cuenca islas Chiloé y Circundantes

A partir de la información presentada en el diagrama Piper que se observa en la Figura 37, la composición catiónica de las muestras de los pozos pertenecientes a esta cuenca es solamente mixta. Por su parte, la composición aniónica es sólo bicarbonatada. Por lo que todas se clasifican como bicarbonatadas cálcico magnésicas, así que en general se puede decir que son aguas poco evolucionadas. Esto concuerda bastante bien con el hecho de que es una cuenca en una isla, por lo que el ciclo por el cual el agua subterránea se recicla es relativamente rápido en todos los acuíferos.

En la Figura 38 se presenta un mapa con los diagramas de Stiff obtenidos para cada pozo (se señala el número de identificación del pozo), con el objetivo de identificar una posible evolución espacial o variaciones composicionales debido a factores locales. En el mapa es muy claro observar una casi ausencia del anión sulfato en todas las muestras, además de lo mismo ya dicho sobre el diagrama Piper.

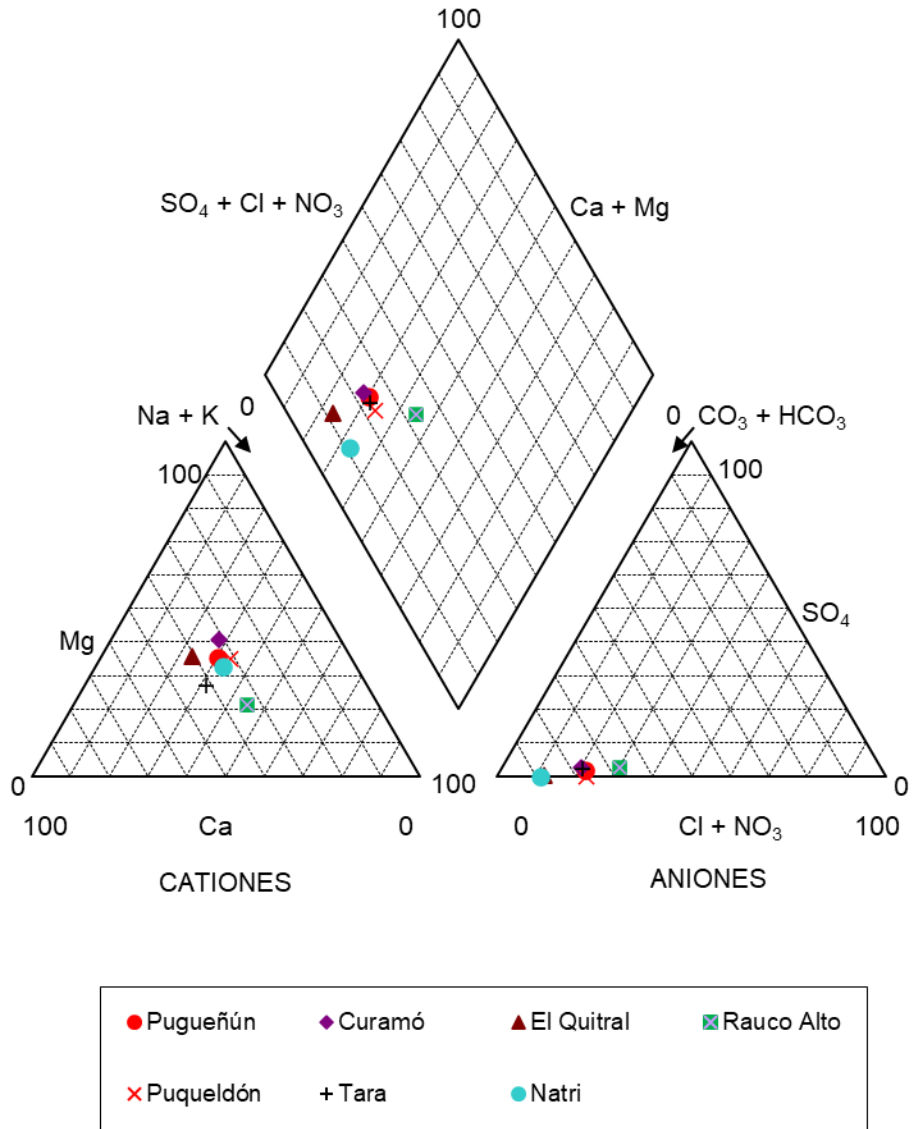


Figura 37: Diagrama Piper de pozos APR en la cuenca islas Chiloé y Circundantes. Fuente: Elaboración propia.

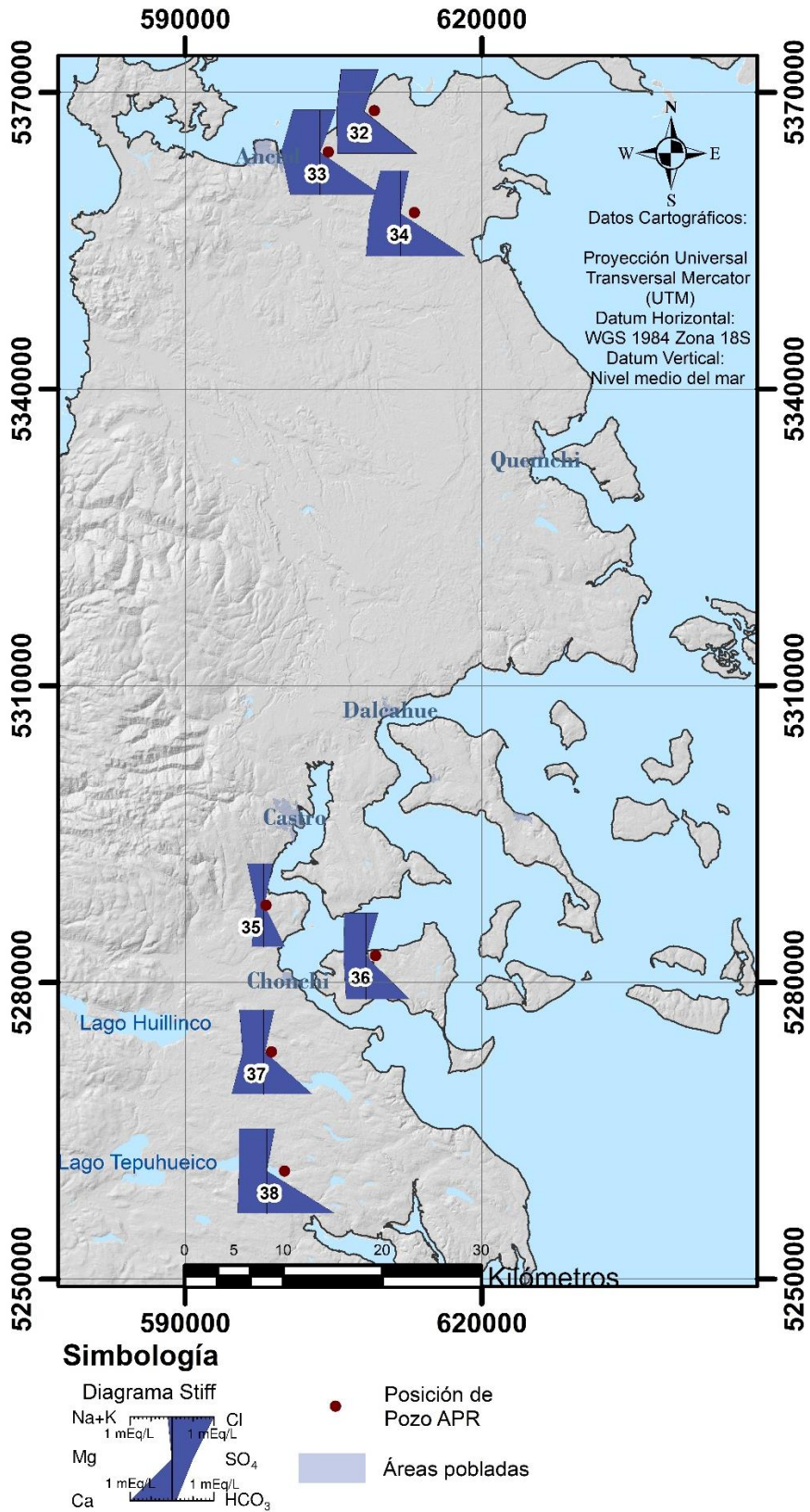


Figura 38: Mapa con diagramas Stiff de la cuenca islas Chiloé y circundantes (ver numeración en Tabla 20). Fuente: Elaboración propia.

VI.4. CONCENTRACIONES ESPECÍFICAS Y COMPARACIÓN CON NORMA CHILENA

VI.4.1. Componentes mayoritarios

Los componentes mayoritarios, como su nombre lo indica, son los elementos que están usualmente en mayor concentración en agua naturales. Los cationes mayoritarios son el Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y en algunos casos se incluye el NH_4^+ (amonio), mientras que aniones mayoritarios son en Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} y a veces se considera el F^- , Br^- y NO_3^- . De los componentes antes mencionados, sólo el magnesio, amonio, cloro, sulfato, flúor y nitrato están normados según la Norma NCh N°409/1, mientras que el sodio, cloro, sulfato y flúor lo están para la NCh N°1333 para agua de riego. Las concentraciones para los pozos APR de los elementos muestreados se muestran en la Tabla 22, a excepción del bromo que no se analizó en este estudio y del carbonato que no se detectó en ninguna muestra. Se destaca en rojo la casilla que supera a la NCh N°409/1 y en naranja a las superiores a la NCh N°1333.

A continuación, se detallarán los distintos elementos mayoritarios, a excepción del bromo que como ya se dijo, no se analizó y a excepción del fluoruro, que como se ve en la Tabla 22, sólo una muestra superó el límite de detección, APR Amortajado, con 0,12 mg/L que sigue estando bajo lo recomendado por las normativas de calidad de agua ya mencionadas (1,5 mg/L como máximo para la norma NCh N°409 y 1,0 mg/L para la norma NCh N°1333).

Tabla 22: Concentraciones de elementos mayoritarios en pozos APR de estudio.

N° del pozo	Nombre del Pozo	Cationes						Aniones				
		Sodio (mg/L)	Sodio porcentual (%)	Potasio (mg/L)	Calcio (mg/L)	Magnesio (mg/L)	Amonio* (mg/L)	Cloro (mg/L)	Flúor (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Bicarbonato** (mg/L)	Nitrato (mg/L)
1	Quilacahuín	58,52	55,78	3,728	20,04	11,225	0,76	30,91	<0,06	3,77	124	<0,22
2	Trumao	158,00	71,15	5,714	26,18	16,226	0,31	287,59	<0,06	<0,12	67	<0,22
3	Buenaventura	16,04	26,86	2,742	18,92	10,773	0,69	3,01	<0,06	<0,12	122	<0,22
4	Las Lumas	16,69	43,42	1,969	9,15	5,340	1,89	2,82	0,007	<0,12	88	<0,22
5	Las Quemadas Bajo	12,49	34,07	2,007	10,85	5,578	0,43	3,26	<0,06	<0,12	75	<0,22
6	Rincón Chahuilco	12,13	28,40	2,771	13,59	7,064	0,24	3,15	<0,06	<0,12	86	<0,22
7	Quisquelefun	26,08	30,22	4,274	25,01	15,360	0,77	3,00	<0,06	<0,12	181	<0,22
8	Cancura	18,22	34,09	2,914	12,98	9,861	0,40	3,72	<0,06	<0,12	112	<0,22
9	Tres Esteros	9,04	39,66	1,128	6,91	2,729	0,05	2,93	<0,06	<0,12	40	5,62
10	Chan-Chan	6,46	21,13	1,233	9,32	6,719	<0,03	3,39	<0,06	<0,12	59	1,12
11	Estación Concordia	11,92	33,07	2,501	9,40	6,284	<0,03	4,56	<0,06	0,70	66	1,46
12	Colonia La Radio	6,28	21,37	1,669	8,91	6,301	0,10	4,23	<0,06	0,36	61	<0,22
13	Los Polizones	8,35	33,04	1,372	7,87	3,747	<0,03	5,44	<0,06	0,60	46	7,29
14	Ensenada	5,38	23,56	1,010	11,91	1,677	<0,03	2,64	<0,06	0,72	42	3,07
15	Nueva Braunau	7,87	22,29	1,015	11,85	7,011	0,03	7,11	<0,06	0,58	53	13,83
16	Paraguay Chico	7,96	22,26	1,364	9,96	8,242	0,03	3,99	<0,06	0,39	71	0,29
17	Alto Bonito	10,80	23,88	1,996	16,47	7,592	0,36	3,23	<0,06	<0,12	96	<0,22
18	Las Quemadas San Antonio	11,26	28,76	2,620	11,75	6,809	0,45	3,54	<0,06	<0,12	85	<0,22
19	Trapen Chinquihue Paitao	9,47	24,49	1,957	13,38	6,715	0,30	4,68	<0,06	1,75	78	0,26
20	Coyán	9,52	31,66	1,126	8,70	5,241	<0,03	7,84	<0,06	1,72	36	6,57
21	Lolcura	10,20	32,31	1,342	8,56	5,696	0,05	7,71	<0,06	2,65	53	1,91
22	Lepihue - La Pasada	12,18	15,36	12,585	31,80	12,275	0,60	14,58	<0,06	4,26	159	<0,22
23	Amortajado	66,44	73,40	7,101	2,69	8,916	0,54	45,37	0,12	11,58	164	<0,22
24	El Yale	10,60	17,38	2,780	19,51	13,953	0,09	4,92	<0,06	<0,12	135	<0,22
25	El Peñasco	7,75	23,49	2,627	10,59	6,111	<0,03	4,24	<0,06	0,67	66	1,60
26	Caremapu	13,33	29,06	1,866	14,33	7,938	0,38	36,54	<0,06	6,14	63	<0,22
27	Yaco Alto y Bajo	7,04	24,45	2,305	10,26	4,559	<0,03	6,32	<0,06	0,89	52	5,78
28	Puntilla San Rafael	8,79	22,76	2,858	12,92	7,048	0,03	13,28	<0,06	4,02	73	0,33
29	Punta Machil	9,73	21,63	2,938	16,00	8,026	<0,03	7,77	<0,06	4,66	83	4,49
30	Caicaen	272,45	69,71	8,370	34,98	38,832	<0,03	604,26	<0,06	78,97	52	1,85
31	Chauquear Alto	14,09	35,15	2,683	11,60	5,878	0,80	8,05	<0,06	<0,12	83	0,32
32	Puqueñún	10,98	27,14	2,112	12,14	7,572	<0,03	12,81	<0,06	1,38	78	0,26
33	Curamó	13,01	24,95	2,892	14,24	11,173	0,08	13,26	<0,06	2,17	88	0,37
34	El Quítral	9,15	19,95	2,857	16,24	8,682	<0,03	6,93	<0,06	0,19	92	0,45
35	Rauco Alto	7,69	38,70	2,159	5,85	2,220	0,15	7,80	<0,06	0,92	32	1,09
36	Puqueldón	10,09	29,46	2,579	9,28	6,351	0,11	10,47	<0,06	<0,12	62	0,46
37	Tara	11,21	26,64	3,504	15,21	6,002	0,05	8,91	<0,06	1,63	71	3,82
38	Natri	13,96	30,32	2,143	13,75	7,958	0,22	6,92	<0,06	<0,12	98	0,39

* La concentración de amonio está como mg/L de nitrógeno amoniacal.

** La concentración de bicarbonato se encuentra como mg/L de carbonato de calcio.

VI.4.1.1. Sodio

El sodio es un elemento altamente soluble en agua y por lo tanto, en general se puede considerar como un elemento conservativo, es decir, una vez que se disuelve en el agua es raro que este salga de ésta, este puede provenir de distintas fuentes, como intercambio catiónico, mezclas con aguas connatas de rocas marinas, intrusión salina de agua de mar, disolución de silicatos y evaporitas, o por contaminación antropogénica.

Aunque en el general de las muestras de la zona de estudio la concentración de sodio no es tan alta, a excepción de Quilacahuín, Trumao, Amortajado y Caicaen, considerando una concentración común de sodio en aguas subterráneas de 30 mg/L, sí es alto el sodio porcentual (Ver Tabla 22, Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42 y Figura 43, diagramas Piper en Figura 33, Figura 35 y Figura 37), en especial observando la NCh N°1333, que por cierto es la única que se

refiere a la concentración de sodio, que especifica un porcentaje máximo de sodio en mEq/L respecto a los cationes de sodio, potasio, calcio y magnesio de un 35%, siendo 8 de las muestras superiores a este límite.

Aunque la causa del alto porcentaje de sodio no es clara, si es posible especular, en base a las características climáticas y geológicas de la zona, que las altas proporciones de sodio se deban al intercambio catiónico y una fuerte meteorización de silicatos sódicos que abundan en la zona, la presencia de aguas connatas de origen marino y no se descarta la acción antrópica. Por último, para el pozo Caicaen, que es el más salino, debido a su ubicación (ver Figura 41), se puede decir que la intrusión salina es un buen candidato a señalar para el origen de éste.

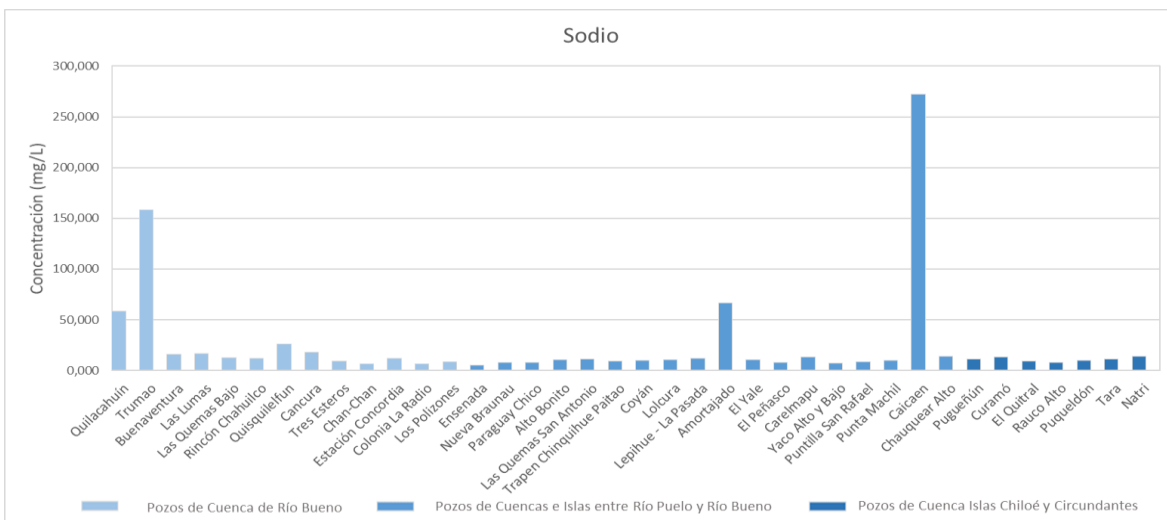


Figura 39: Gráfico de concentraciones de sodio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

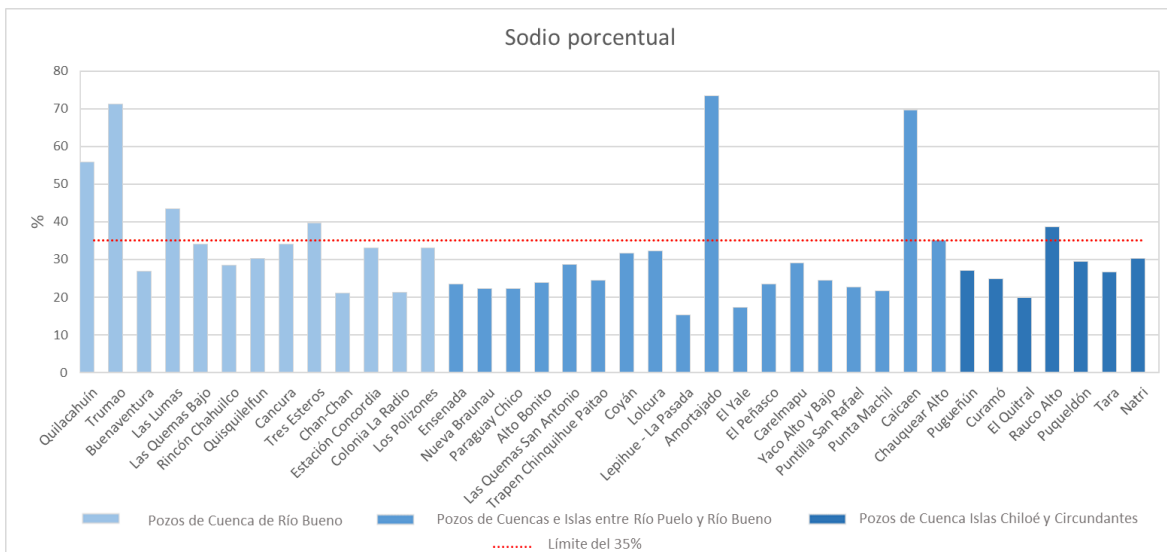


Figura 40: Gráfico de sodio porcentual en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

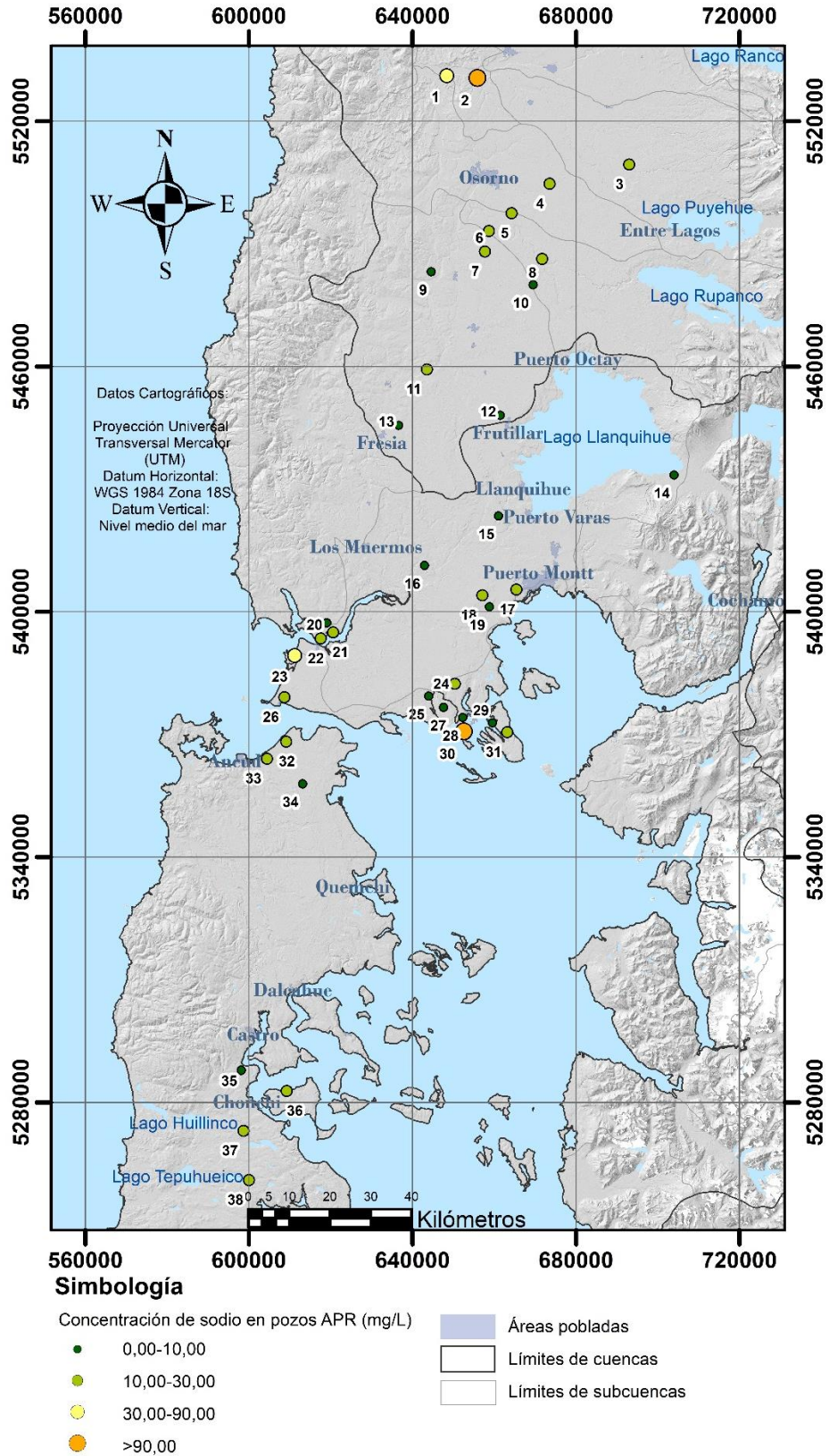


Figura 41: Mapa de distribución de concentraciones de sodio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.

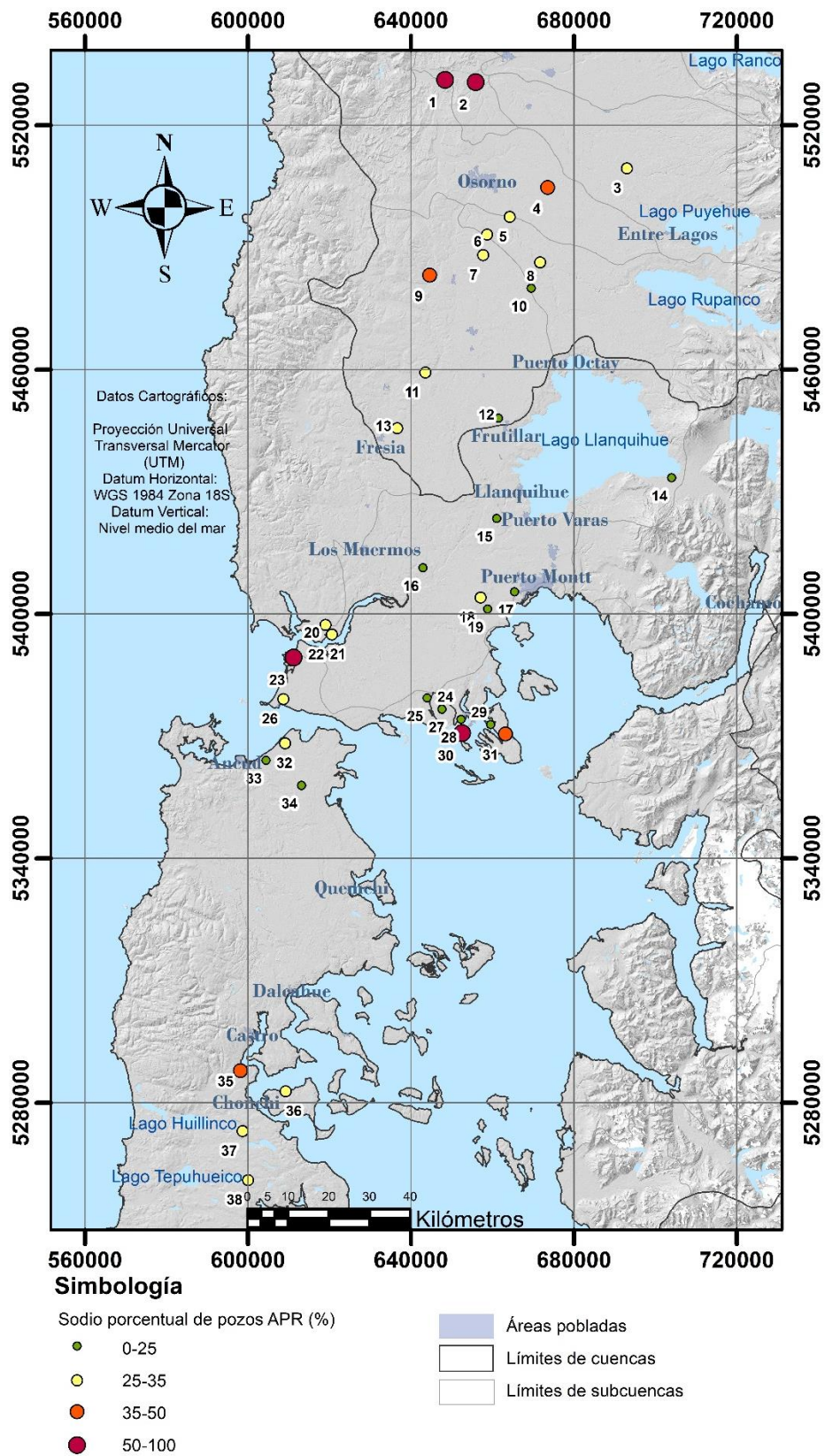


Figura 42: Mapa de distribución de sodio porcentual en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.

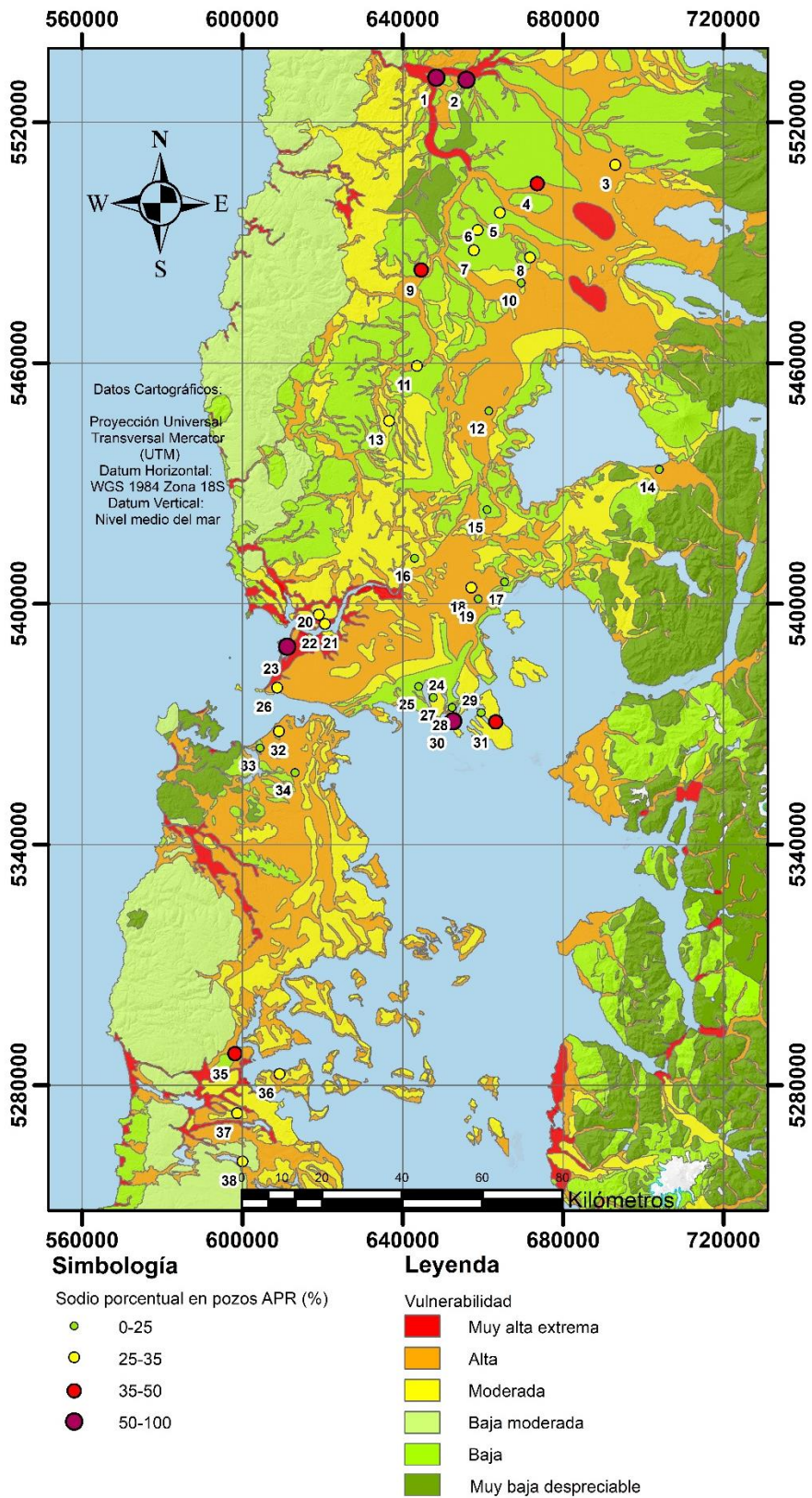


Figura 43: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de sodio porcentual en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.1.2. Potasio

El potasio es un elemento con varias similitudes respecto al sodio, al igual que éste tiene alta solubilidad y tiene orígenes similares, como la meteorización de silicatos, en especial ortoclasa y algunos filosilicatos, puede proceder de evaporitas como la silvita y de algunas fuentes antrópicas, en especial del rubro de la agricultura.

El potasio no se encuentra incluido en ninguna norma de calidad de aguas, y de todas formas, en general, las muestras de esta región presentan bajas concentraciones de este ion (ver Tabla 22, Figura 44 y Figura 45), el único pozo con una concentración destacable es el pozo Lepihue - La Pasada, pues tiene una alta concentración de potasio sin un enriquecimiento en sodio (ver Tabla 22), siendo que estos dos elementos suelen tener orígenes comunes. Por lo anterior, es probable que el origen del potasio sea de tipo antrópico, como por ejemplo, algún fertilizante, lo que en principio no debería tener un efecto perjudicial sobre la calidad de las aguas, por el carácter inocuo de éste, pero si estos fertilizantes tienen otros componentes que no se hayan analizado en este estudio, que sí sean perjudiciales, llegando a ser un motivo de alerta.

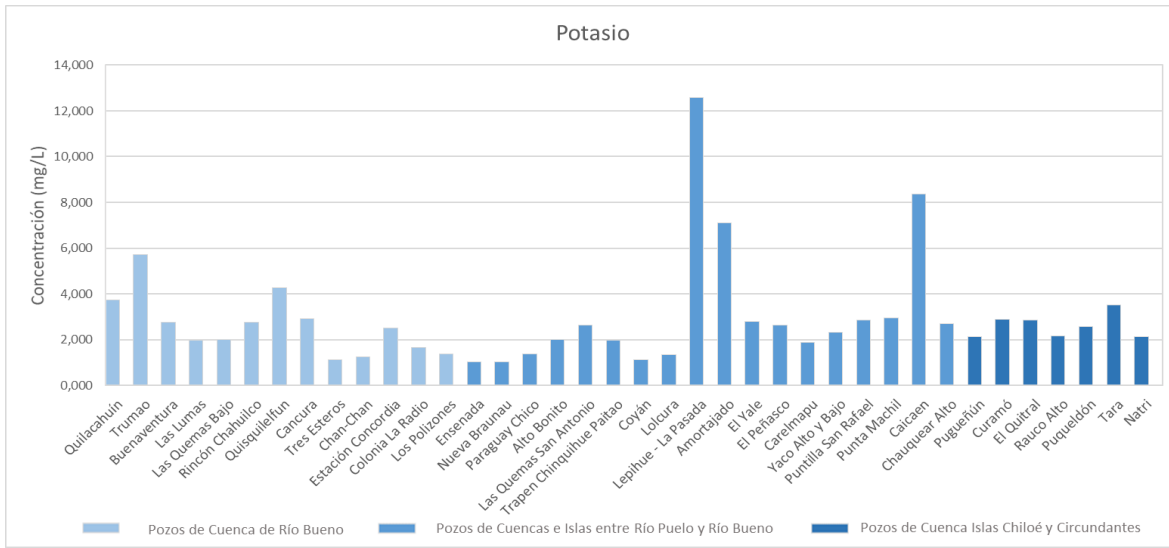
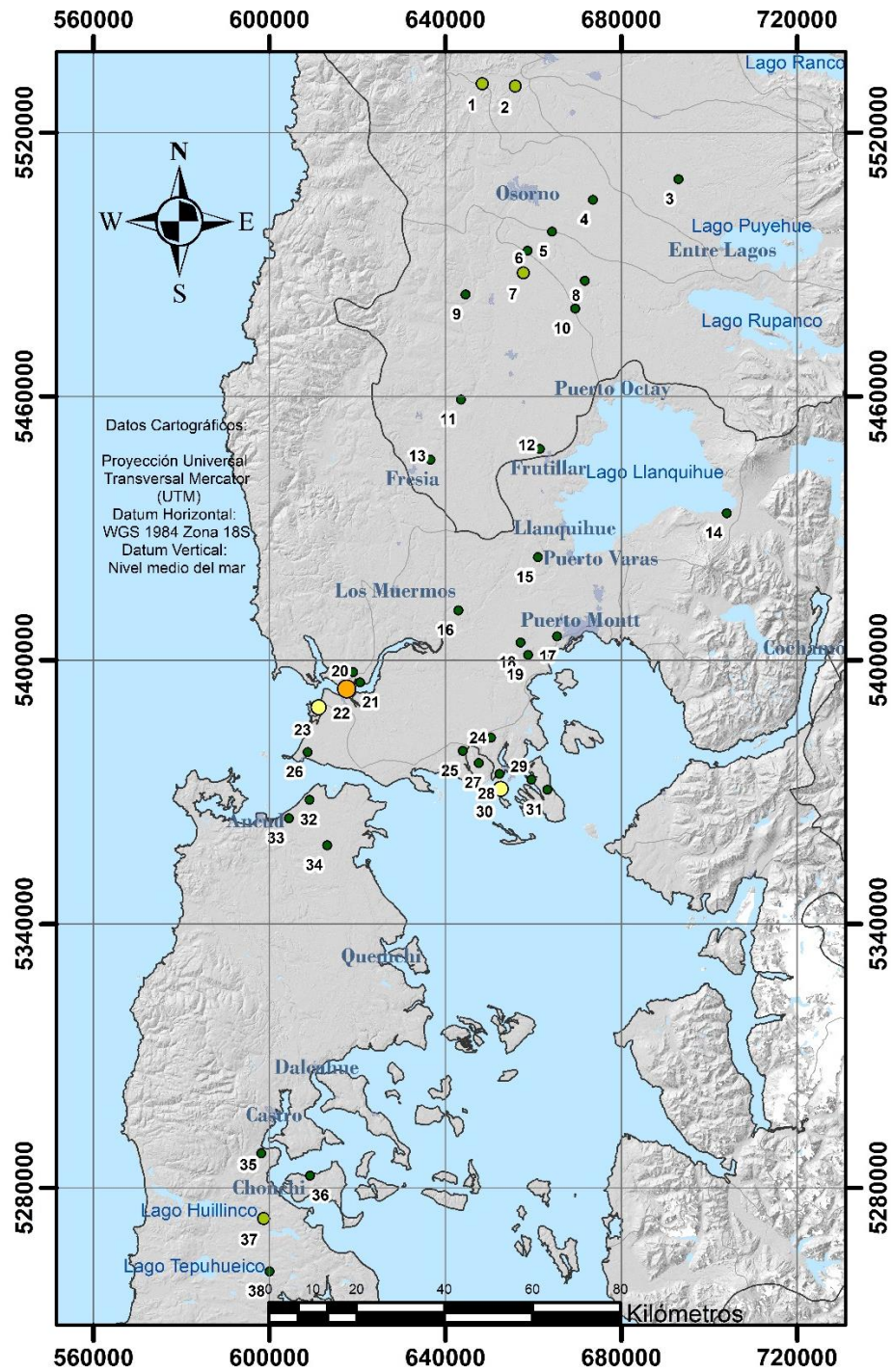


Figura 44: Gráfico de concentraciones de potasio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.



Simbología

- | | |
|-------------|-------------------------|
| ● 0,00-3,00 | ■ Áreas pobladas |
| ● 3,00-6,00 | □ Límites de cuencas |
| ● 6,00-9,00 | □ Límites de subcuencas |
| ● >9,00 | |

Figura 45: Mapa de distribución de concentraciones de potasio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.

VI.4.1.3. Calcio

El calcio es un elemento que suele provenir de carbonatos, evaporitas como el yeso y la anhidrita, ataque a silicatos cálcicos, disolución de cemento calcáreo, agua de lluvia y agua de mar.

Este catión no se encuentra normado en Chile, y aunque estuviera normado, no se encuentran anomalías positivas en las concentraciones de este catión en las aguas analizadas, teniendo en cuenta que para aguas subterráneas las concentraciones pueden estar alrededor de los 50 mg/L (ver Tabla 22, Figura 46 y Figura 47).

La fuente probable de este elemento en las aguas, considerando una ausencia generalizada de carbonatos y evaporitas en la zona, es probablemente la misma agua de las precipitaciones además de la meteorización de silicatos y disolución de cemento calcáreo de los depósitos de los acuíferos.

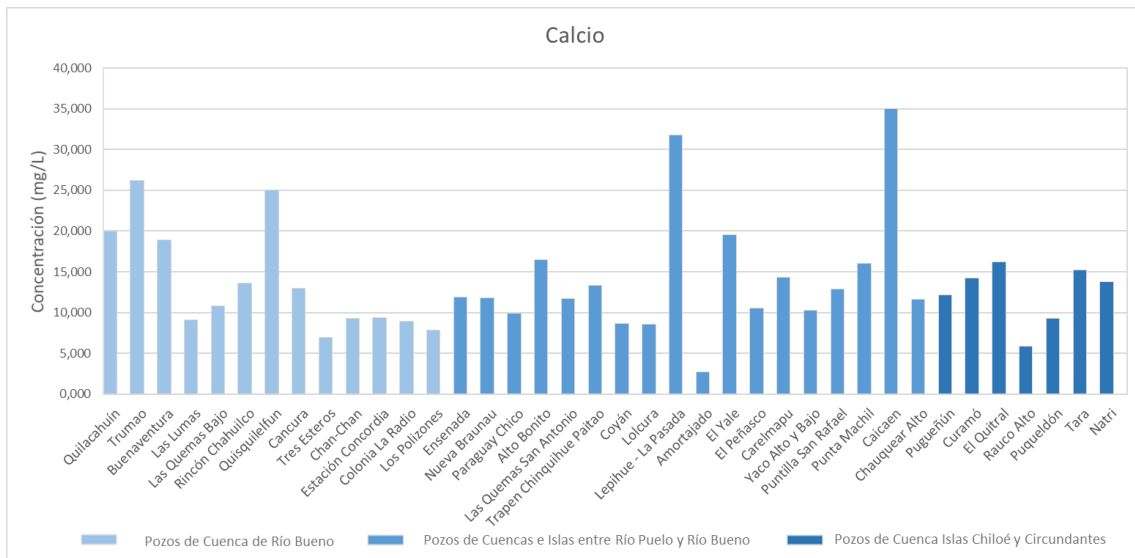


Figura 46: Gráfico de concentraciones de calcio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

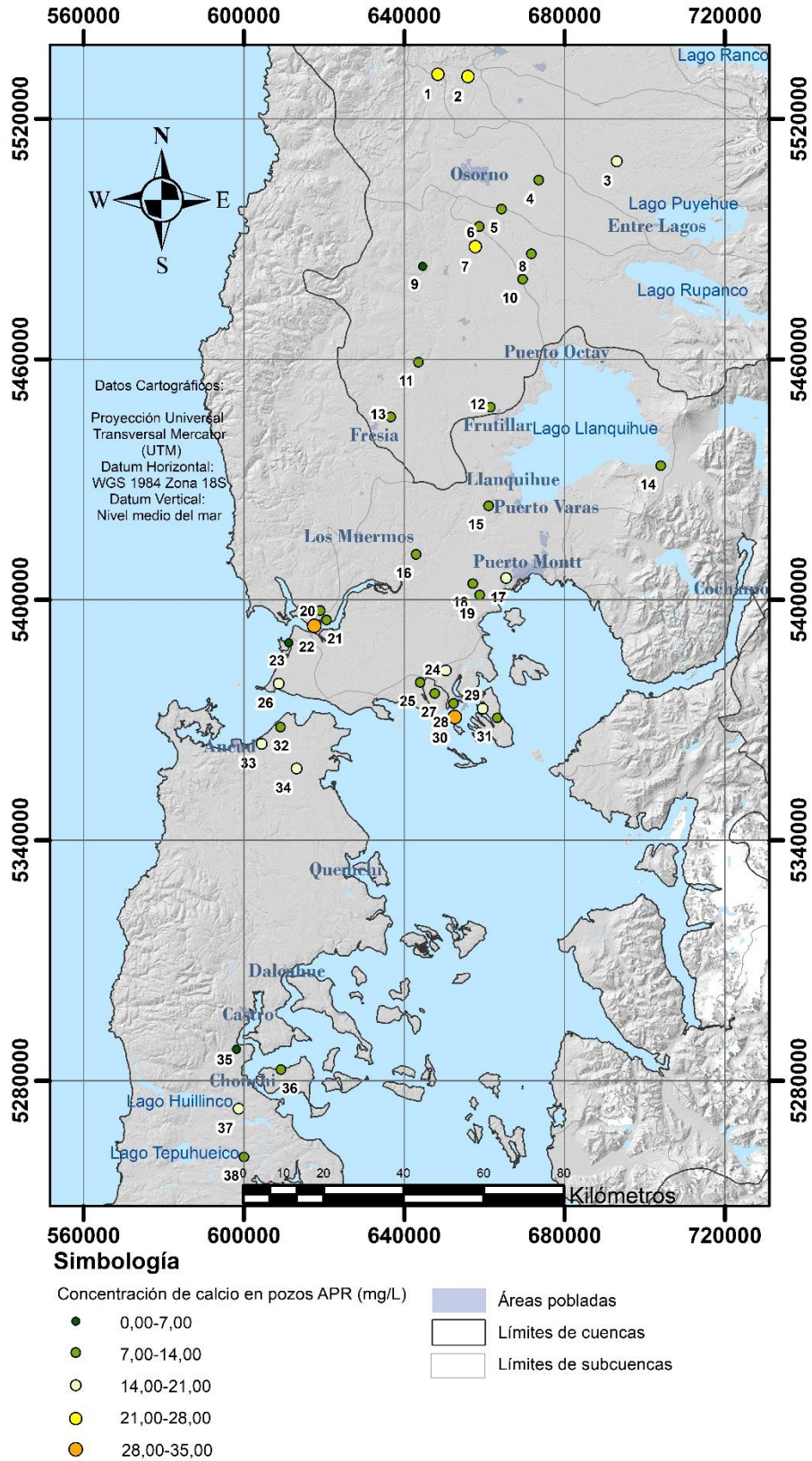


Figura 47: Mapa de distribución de concentraciones de calcio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.

VI.4.1.4. Magnesio

El magnesio se encuentra disuelto como ion de forma natural en el agua. Según Custodio y Llamas (1976) este elemento procede de la disolución de dolomías y calizas dolomíticas, ataque de silicatos magnésicos y ferromagnesianos, localmente del lavado de rocas evaporitas magnésicas, mezcla con agua marina y por contaminación industrial y minera. Las aguas de lluvia, en general, presentan valores medios que oscilan entre 0,1 y 2 mg/L pudiendo alcanzar los 5 mg/L, mientras que los valores comunes para aguas subterráneos bordean los 7 mg/L.

La Norma Chilena N°409 determina una concentración límite de 250 mg/L para agua potable, mientras que para el agua de riego (NCh N°1.333) no se estipula ningún valor máximo aceptado para esta sustancia. A falta de evidencia científica sobre la toxicidad de este elemento, no se suelen implementar límites legales para el agua potable.

En aguas naturales el contenido de magnesio no suele sobrepasar los 40 mg/L. En terrenos calcáreos pueden rebasarse los 100 mg/L y en terrenos evaporíticos pueden alcanzarse valores de 1000 mg/L, Mar: 1200 mg/L.

Como se logra apreciar en la Tabla 22, Figura 48, Figura 49 y Figura 50, en la región de Los Lagos se tiene que todos los pozos APR registran valores de concentración de Magnesio por debajo del límite estipulado por la normativa chilena. Siendo el pozo de Caicaen el único que tiene una concentración considerablemente mayor al resto.

Similar a como pasa con el calcio, en la zona no hay evidencia de presencia de evaporitas ni rocas calcáreas, por lo que es probable que las principales fuentes de magnesio para esta región sean las mismas aguas de lluvia que ya vienen con el catión incluido y la meteorización de silicatos ferromagnesianos.

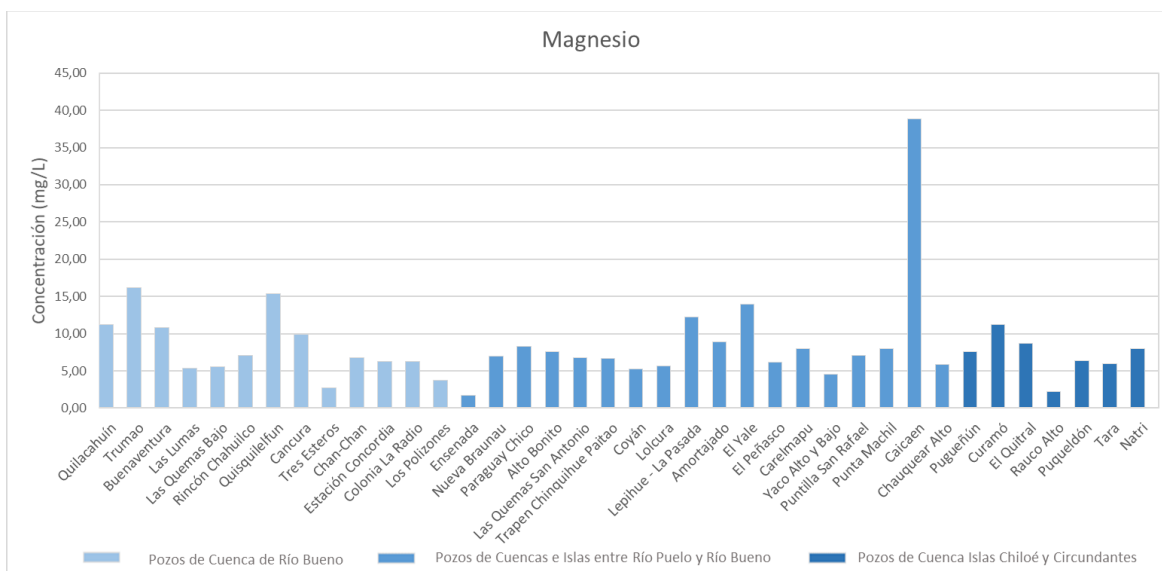


Figura 48: Gráfico de concentraciones de magnesio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

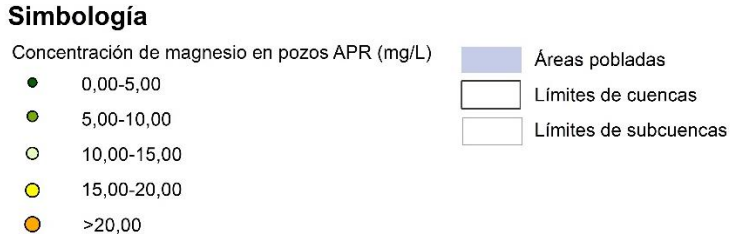
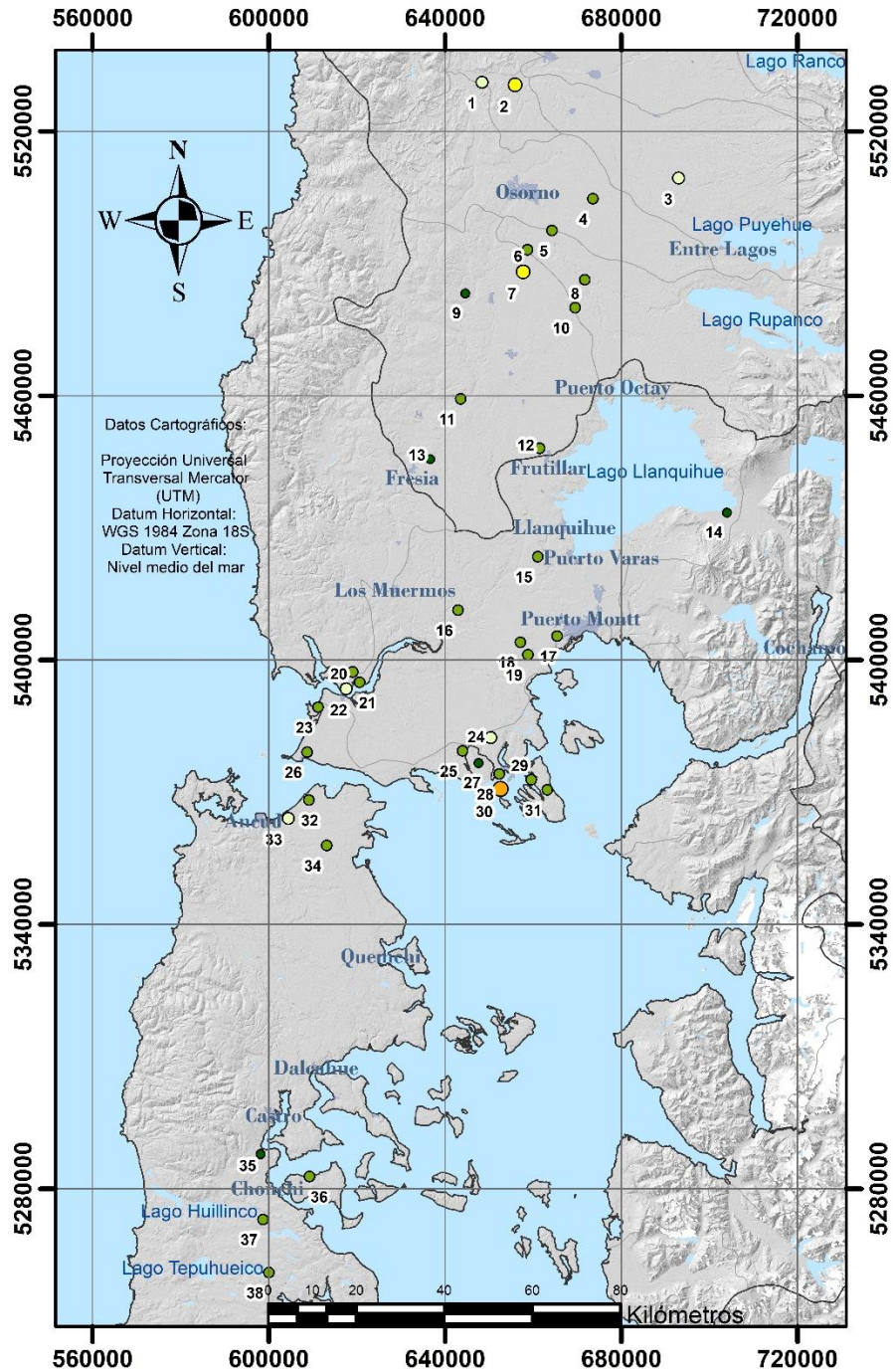


Figura 49: Mapa de distribución de concentraciones de magnesio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.

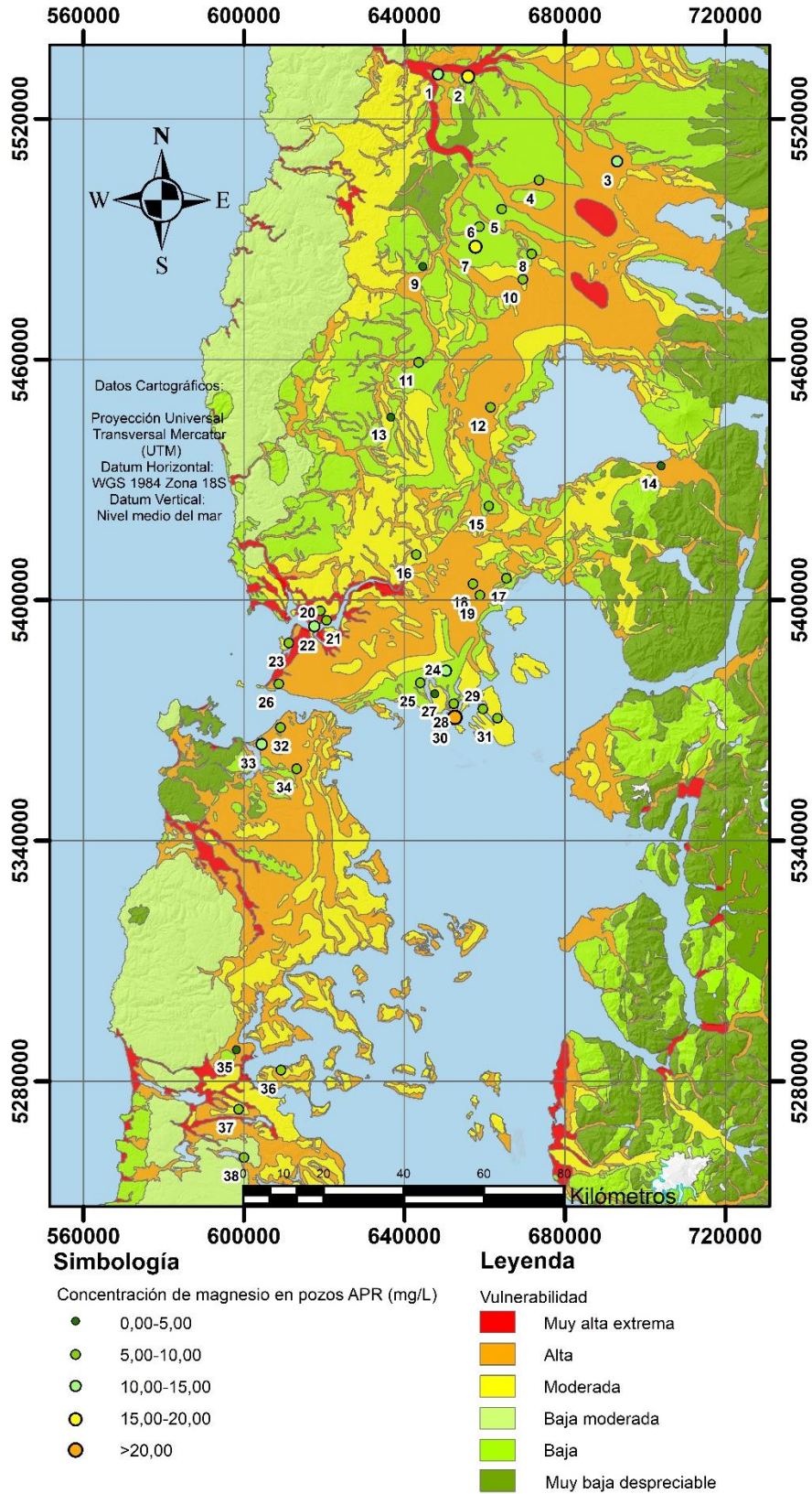


Figura 50: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de magnesio en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.1.5. Amonio

El amonio se produce naturalmente en aguas por la descomposición microbacteriana de compuestos nitrogenados en materia orgánica, peces u otros organismos igual pueden excretar este compuesto, también es posible que llegue al agua debido a una contaminación antropogénica. Las aguas no contaminadas, suelen tener valores bajos de este compuesto, usualmente menor a 0,02 mg/L (Environmental Protection Agency, 2011).

El amonio presente en el agua no tiene una importancia inmediata para la salud, no obstante, puede poner en peligro la eficacia de la desinfección, dar lugar a la formación de nitritos en los sistemas de distribución y averiar los filtros para la eliminación de manganeso. Se debe considerar que cuando se utiliza cloro en cantidades excesivas, se forman compuestos orgánicos clorados y carbono orgánico biodegradable (OMS, 1995).

Este compuesto está normado por la NCh N°409 de agua potable, con 1,5 mg/L como el límite máximo para considerarse potable. Sólo una muestra presentó una concentración mayor a este límite, Las Lumas, con una concentración de 2,43 mg/L de amonio (NH_4^+) (ver Figura 51, Figura 52, Figura 53 y Tabla 23), y aunque casi todas de las muestras están por debajo del límite, varias de éstas están entre 10 a 50 veces las concentraciones que se dan normalmente de manera natural.

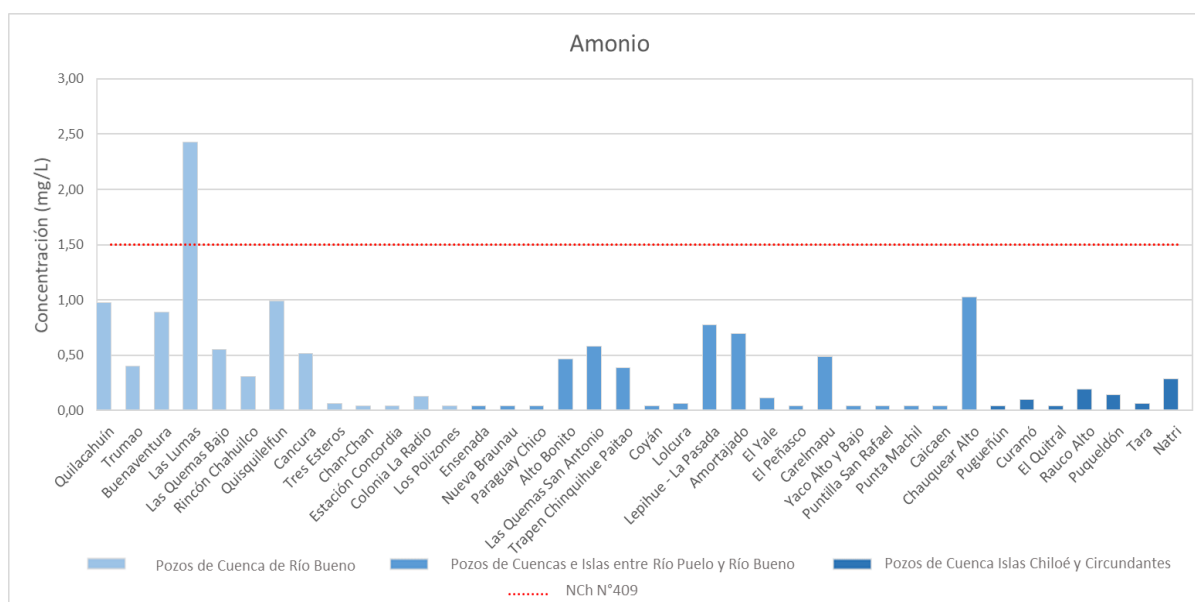
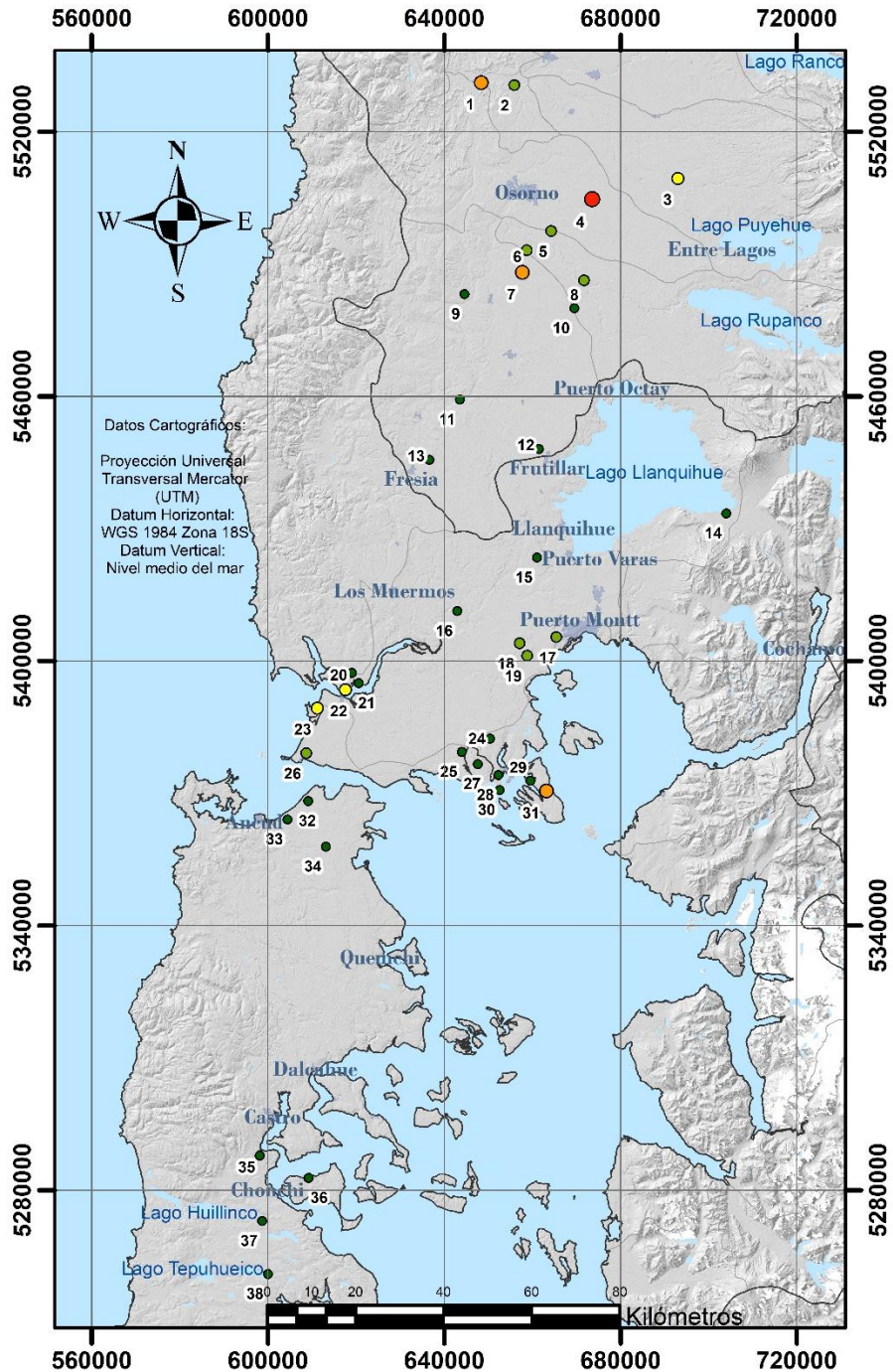


Figura 51: Gráfico de concentraciones de amonio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.



Simbología

- | | |
|-------------|-------------------------|
| ● 0,00-0,30 | ■ Áreas pobladas |
| ● 0,30-0,60 | □ Límites de cuencas |
| ● 0,60-0,90 | □ Límites de subcuencas |
| ● 0,90-1,50 | |
| ● >1,50 | |

Figura 52: Mapa de distribución de concentraciones de amonio (ver numeración en Tabla 23). Fuente: elaboración propia.

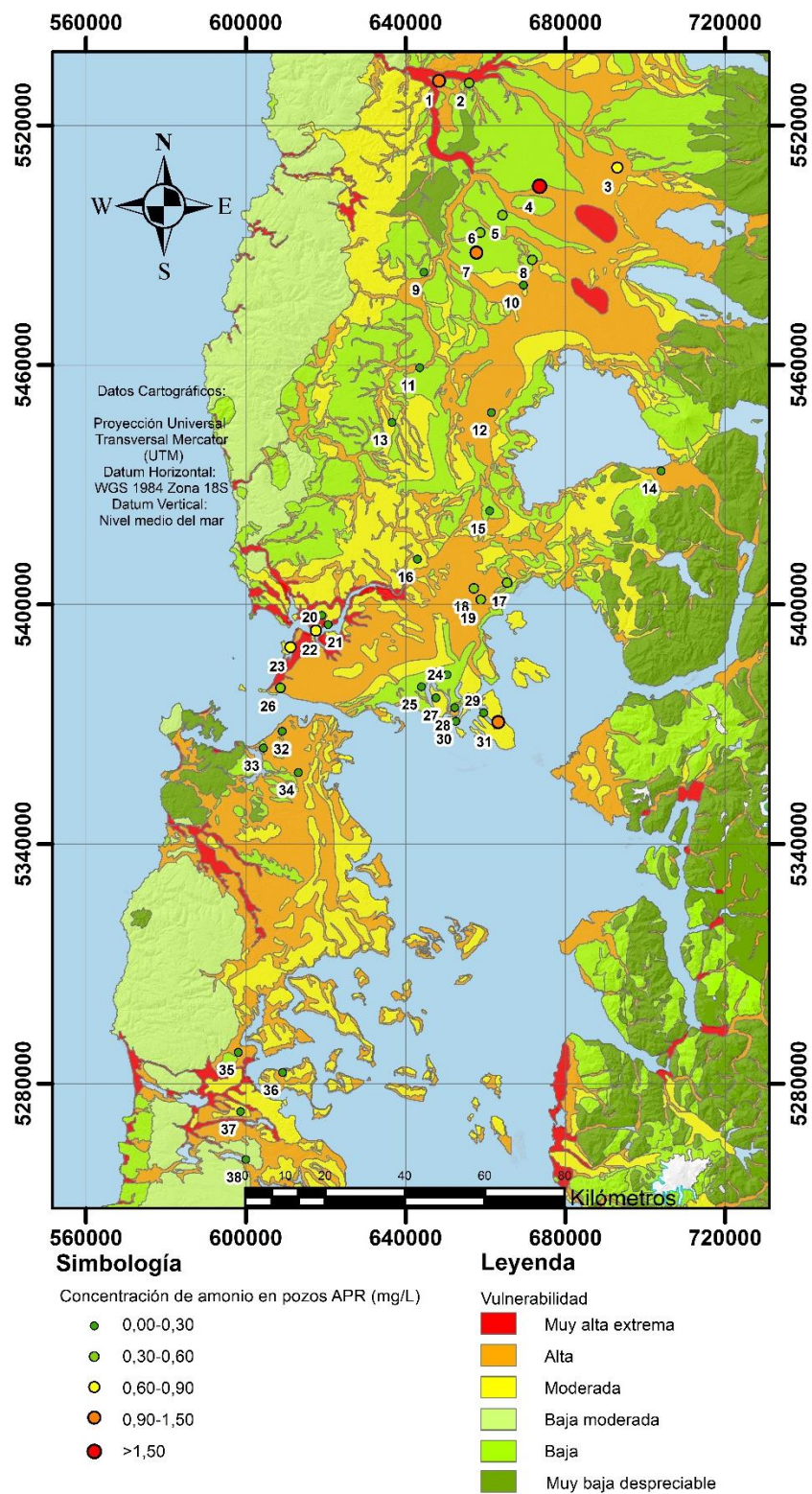


Figura 53: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución (ver numeración en Tabla 23). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

Tabla 23: Concentraciones de amonio como mg/L de NH_4^+ en pozos muestreados (En rojo el valor que supera la NCh N°409).

N° del pozo	Nombre del Pozo	Amonio (mg/L)
1	Quilacahuín	0,98
2	Trumao	0,40
3	Buenaventura	0,89
4	Las Lumas	2,43
5	Las Quemadas Bajo	0,55
6	Rincón Chahuilco	0,31
7	Quisquelefun	0,99
8	Cancura	0,51
9	Tres Esteros	0,06
10	Chan-Chan	<0,04
11	Estación Concordia	<0,04
12	Colonia La Radio	0,13
13	Los Polizones	<0,04
14	Ensenada	<0,04
15	Nueva Braunau	0,04
16	Paraguay Chico	0,04
17	Alto Bonito	0,46
18	Las Quemadas San Antonio	0,58
19	Trapen Chiquihue Paitao	0,39
20	Coyán	<0,04
21	Lolcura	0,06
22	Lepihue - La Pasada	0,77
23	Amortajado	0,69
24	El Yale	0,12
25	El Peñasco	<0,04
26	Caremapu	0,49
27	Yaco Alto y Bajo	<0,04
28	Puntilla San Rafael	0,04
29	Punta Machil	<0,04
30	Caicaen	<0,04
31	Chauquear Alto	1,03
32	Pugueñún	<0,04
33	Curamó	0,10
34	El Quitral	<0,04
35	Rauco Alto	0,19
36	Puqueldón	0,14
37	Tara	0,06
38	Natri	0,28

VI.4.1.6. Cloruro

El ion cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni forma parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal, por lo tanto, es conocido como un ion conservativo. El agua dulce no contaminada suele tener una concentración de cloruro de menos de 10 mg/L, e incluso puede estar bajo 1 mg/L. (Department of National Health and Welfare, 1978)

El origen de las aguas cloruradas es la lluvia (núcleos de condensación), hasta 100 ppm, normalmente <30 ppm, que disminuye su concentración con la distancia al mar, otras fuentes son las aguas congénitas y fósiles, producto de intrusión marina, terrenos evaporíticos, contaminación residuos sólidos y líquidos urbanos. La normativa chilena vigente estipula una concentración máxima de 200 mg/L para el agua de riego (NCh N°1.333) y de 400 mg/L para el agua potable (NCh N°409).

En el presente estudio se han registrado concentraciones de Cl principalmente menores a 10 mg/L, pero sí hay dos muestras que superan el límite de agua de riego: Trumao con 287,59 mg/L y Caicaen con una concentración de 604,26 mg/L, este último incluso superando el límite para la normativa de agua potable (ver Tabla 22, Figura 54, Figura 55 y Figura 56) lo cual se podría atribuir a contaminación por actividad antrópica o a factores geológicos locales para ambos casos, y en específico para Caicaen, es probable un proceso de intrusión salina por su ubicación.

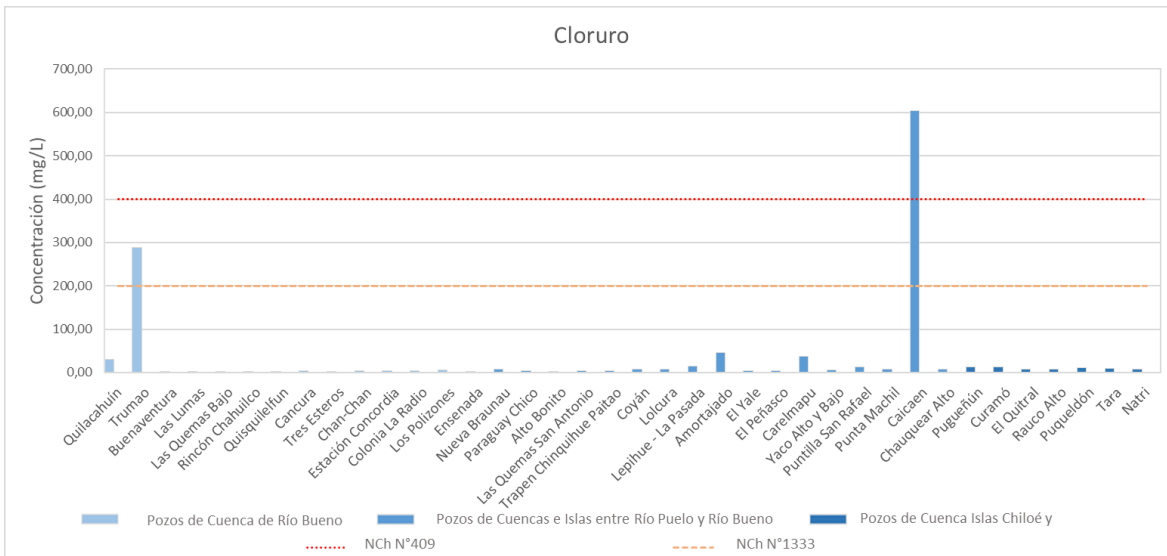


Figura 54: Gráfico de concentraciones de cloruro en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

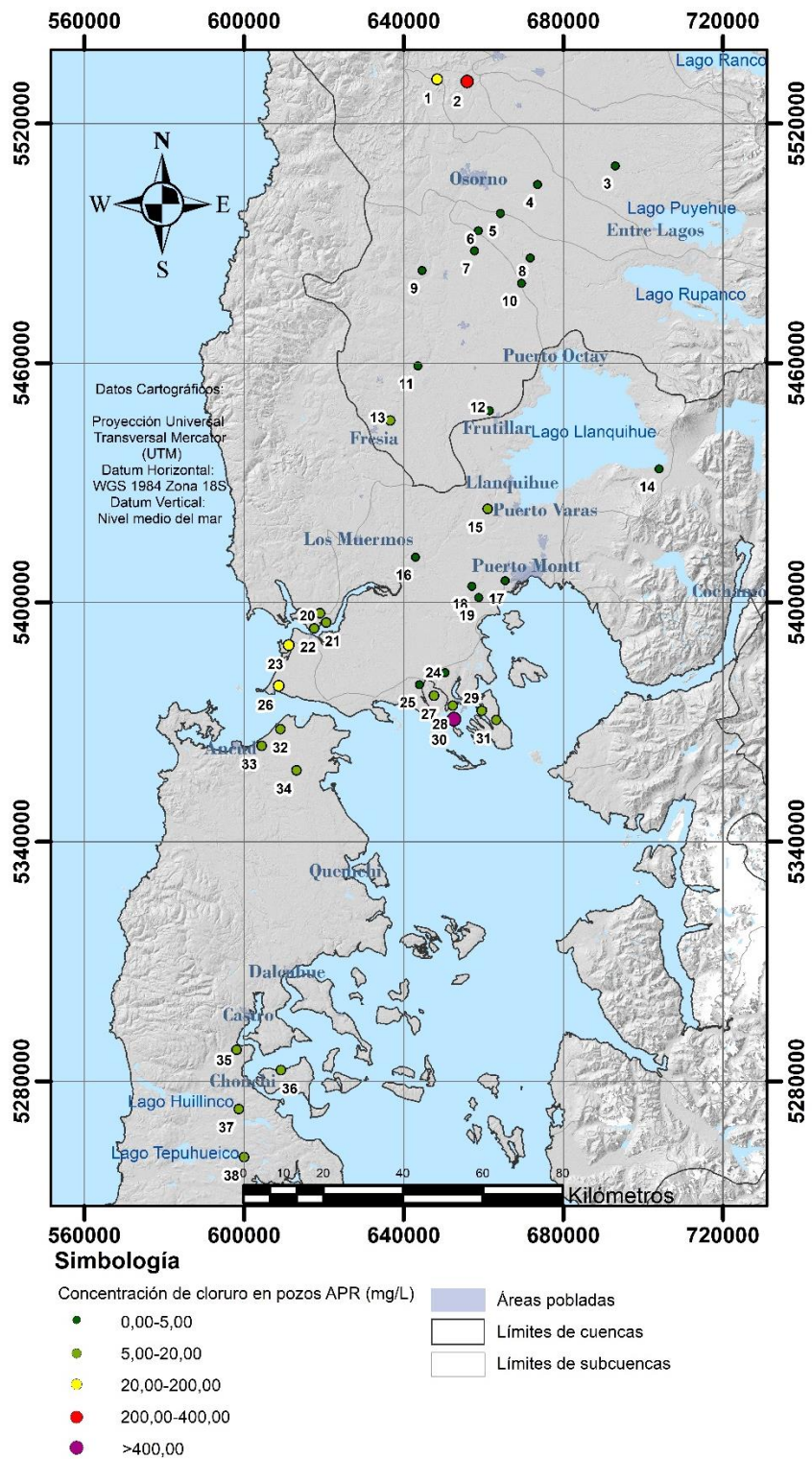


Figura 55: Mapa de distribución de concentraciones de cloruro en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.

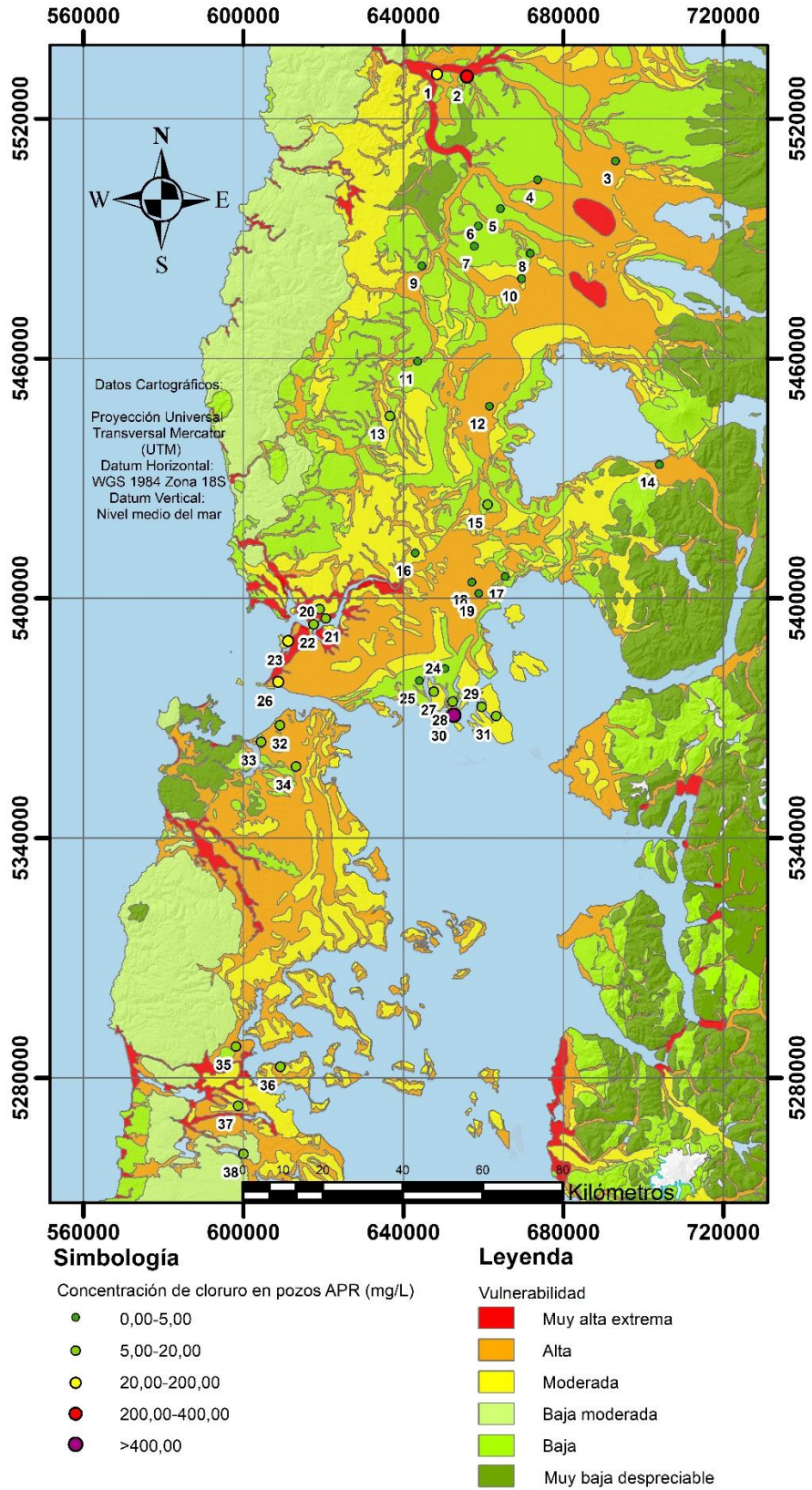


Figura 56: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de cloruro en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.1.7. Nitrato

Los niveles naturales de nitratos en las aguas subterráneas son generalmente muy bajas (típicamente menor de 10 mg/L NO₃), pero los niveles de concentración de nitratos crecen a causa de las actividades humanas, como la agricultura, la industria, efluentes domésticos y emisiones de motores de combustión. (Lenntech, 2021)

Los nitratos generalmente se mueven lentamente en el suelo y las aguas subterráneas: existe un lapso de tiempo de aproximadamente 20 años entre la actividad de contaminación y la detención de contaminantes en el subsuelo y aguas subterráneas. Por esta razón, se predice que las actividades actuales de contaminación continuarán afectando a niveles de nitrato por varias décadas. De cualquier modo, si la presión del acuífero es alta, el transporte puede ser muy rápido dentro de la zona de saturación.

Las fuentes de contaminación por nitratos en las aguas subterráneas son:

- Cultivos en áreas donde la capa de suelo es relativamente fina, tiene poca capacidad de nutrientes o cuando existen cambios en los usos de las tierras.
- Exceso de fertilización de cultivos por actividades agrícolas intensivas;
- Extensión de cultivos que requieren altas dosis de fertilización debido a que el suelo es utilizado durante largos periodos (ejemplo: maíz, tabaco y verduras);
- Sistemas de drenaje que provocan el drenaje de fertilizantes;
- Ciclos de agricultura intensiva de rotación caracterizados por frecuentes arados y áreas extensivas de suelos desnudos durante los inviernos;
- Fertilizantes orgánicos para explotación de pastos;
- Aumento de la urbanización.

El nitrato es un compuesto comúnmente usado como fertilizante, pudiendo incrementar entre un 4 y 5% el rendimiento de los cultivos (Banco Mundial, 2019). Es un compuesto muy soluble, por tanto, puede trasladarse grandes distancias (a nivel superficial y a nivel subterráneo) cuando se encuentra disuelto (Wetzel, 2001). Esto representa un problema cuando se quiere contener una contaminación por nitrato, pues el principal aporte de nitratos al medio ambiente es en la utilización de fertilizantes y en los desechos de actividades ganaderas que representan fuentes difusas de contaminación (Wetzel, 2001). El nitrato puede causar el síndrome del bebe azul, el cual impide la fijación de oxígeno en la sangre, causando asfixia en los bebés. Sin embargo, se identifican efectos posteriores a este síndrome, los cuales involucran bajos niveles de peso en infantes y desarrollo tardío (Banco Mundial, 2019).

Las concentraciones de nitrato se pueden analizar considerando 3 umbrales por definir a continuación:

- Valores entre los 15 y 30 mg/L: Concentraciones de nitrato que representan una alerta.
- Valores entre 30 y 50 mg/L: Concentraciones cercanas a comprometer el uso potable del agua.
- Valores superiores a 50 mg/L: Concentraciones que impiden el uso potable del agua por los efectos que puede causar sobre la salud de las personas.

Aunque en estudios anteriores en la zona se han encontrado varios pozos dentro de los primeros dos intervalos (SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos, 2008), como se aprecia en la Tabla 22, Figura 57, Figura 58 y Figura 59 ninguno de los pozos supera ningún umbral y de hecho la mayoría

tiene concentraciones mucho menores al umbral más bajo, con sólo un pozo con una concentración cercana al primer límite, Nueva Braunau, con 13,83 mg/L.

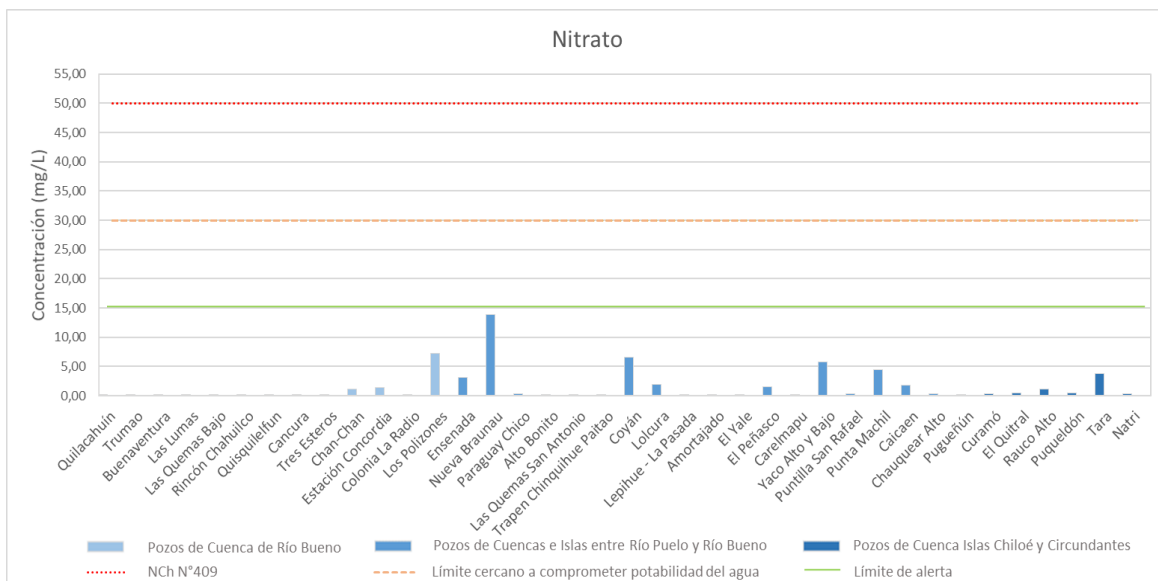


Figura 57: Gráfico de concentraciones de nitrato en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

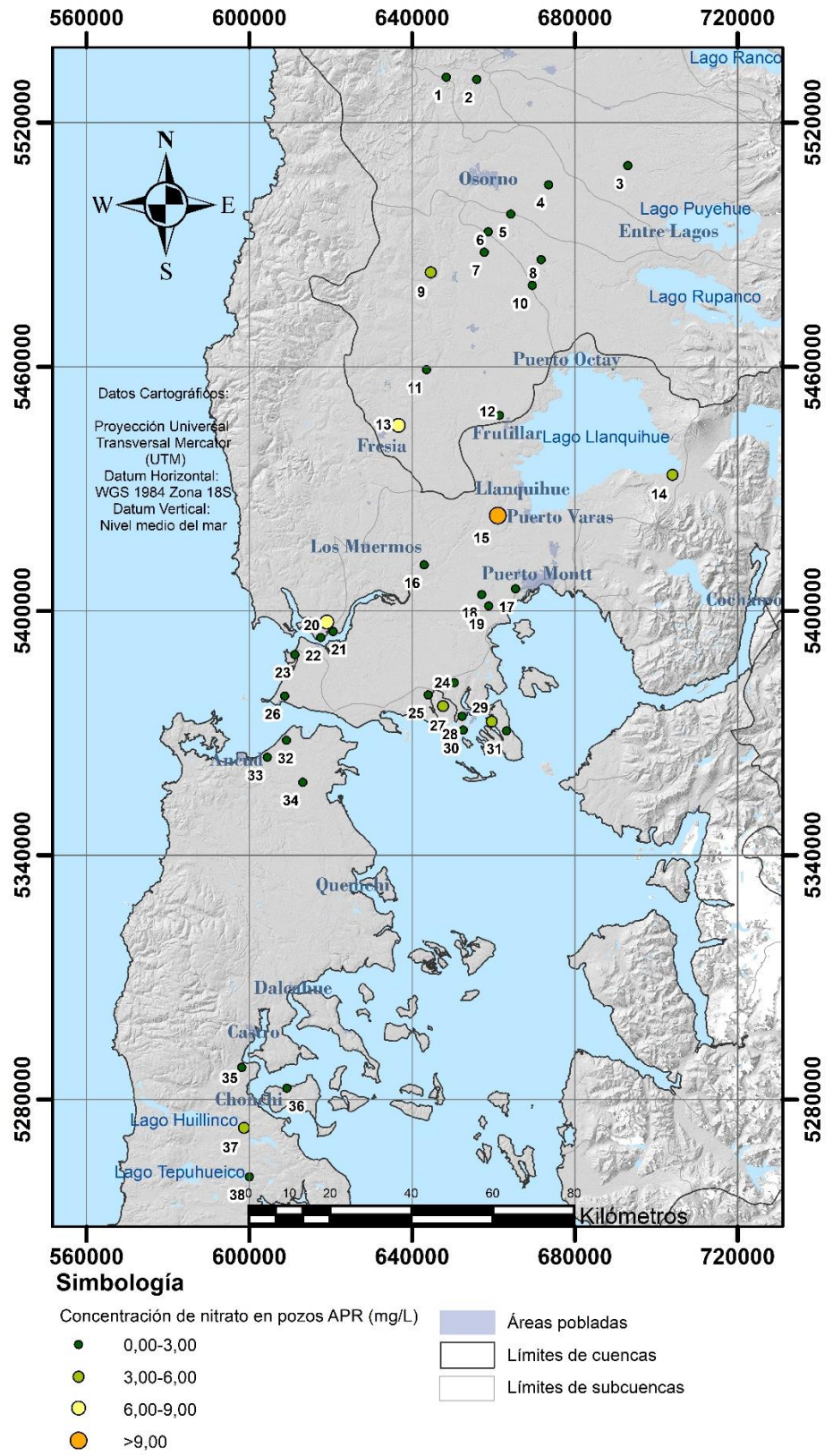


Figura 58: Mapa de distribución de concentraciones de nitrato en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.

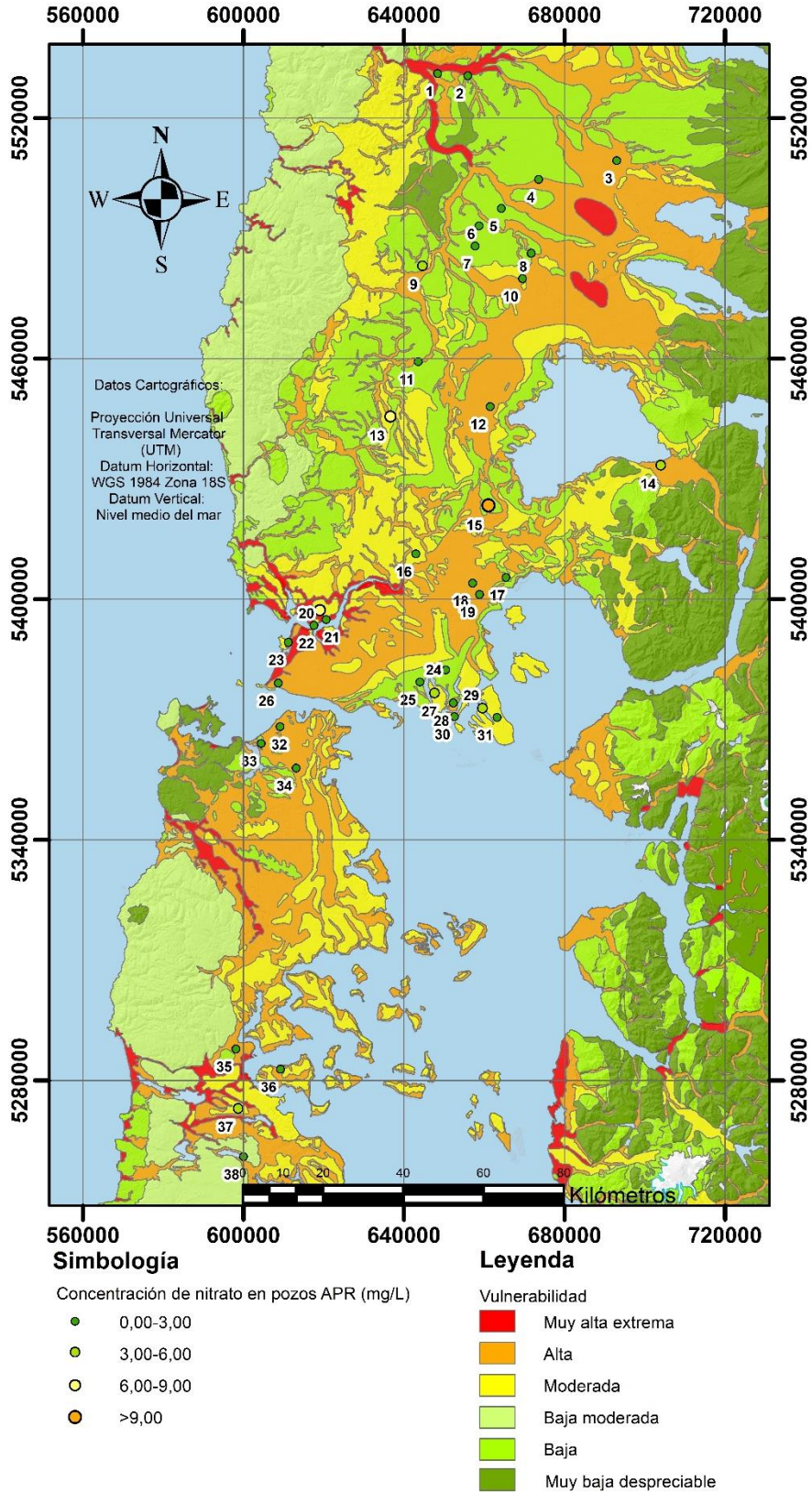


Figura 59: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de nitrato en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.1.8. Sulfato

Este ion se encuentra naturalmente presente en las aguas subterráneas y puede proceder del lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambiente marino, oxidación de sulfuros, disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, concentración en el suelo de agua de lluvia o de actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas (Custodio y Llamas, 1976). Las aguas de lluvia presentan valores medios que oscilan entre 1 y 3 mg/L, siendo mayores en áreas continentales, mientras que en zonas industriales alcanza valores que pueden superar los 15 mg/L.

El ion sulfato está sometido a procesos de reducción especialmente en presencia de bacterias y de materia orgánica. En ambientes reductores a pH menor que 7, la forma reducida estable es el H₂S (ácido sulfídrico) mientras que en soluciones alcalinas predomina el ión HS⁻ (bisulfuro). La mayoría de las aguas subterráneas sulfurosas presentan contenidos apreciables de HS⁻ ó H₂S que incluso a concentración muy baja le confieren al agua un olor característico (huevo podrido).

La normativa Chilena vigente estipula un límite de sulfato para agua de riego de 250 mg/L (NCh N°1.333) y un límite para agua potable de 500 mg/L (NCh N°409).

En la Tabla 22, Figura 60, Figura 61 y Figura 62 se puede observar que ninguno de los pozos supera los límites de las normativas vigentes, de hecho la zona se caracteriza por una baja concentración de éste (ver diagramas Stiff en Figura 34, Figura 36 y Figura 38), el único pozo con una concentración considerable del anión es Caicaen, que como se ha mencionado en otras secciones podría estar sometido a una intrusión salina, lo que explicaría dicha anomalía.

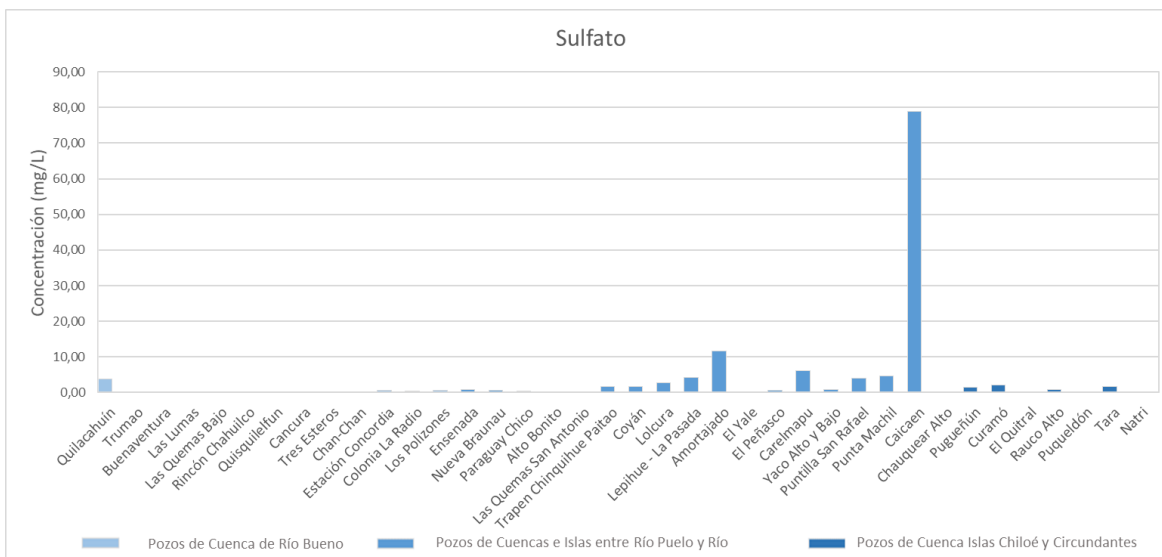


Figura 60: Gráfico de concentraciones de sulfato en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

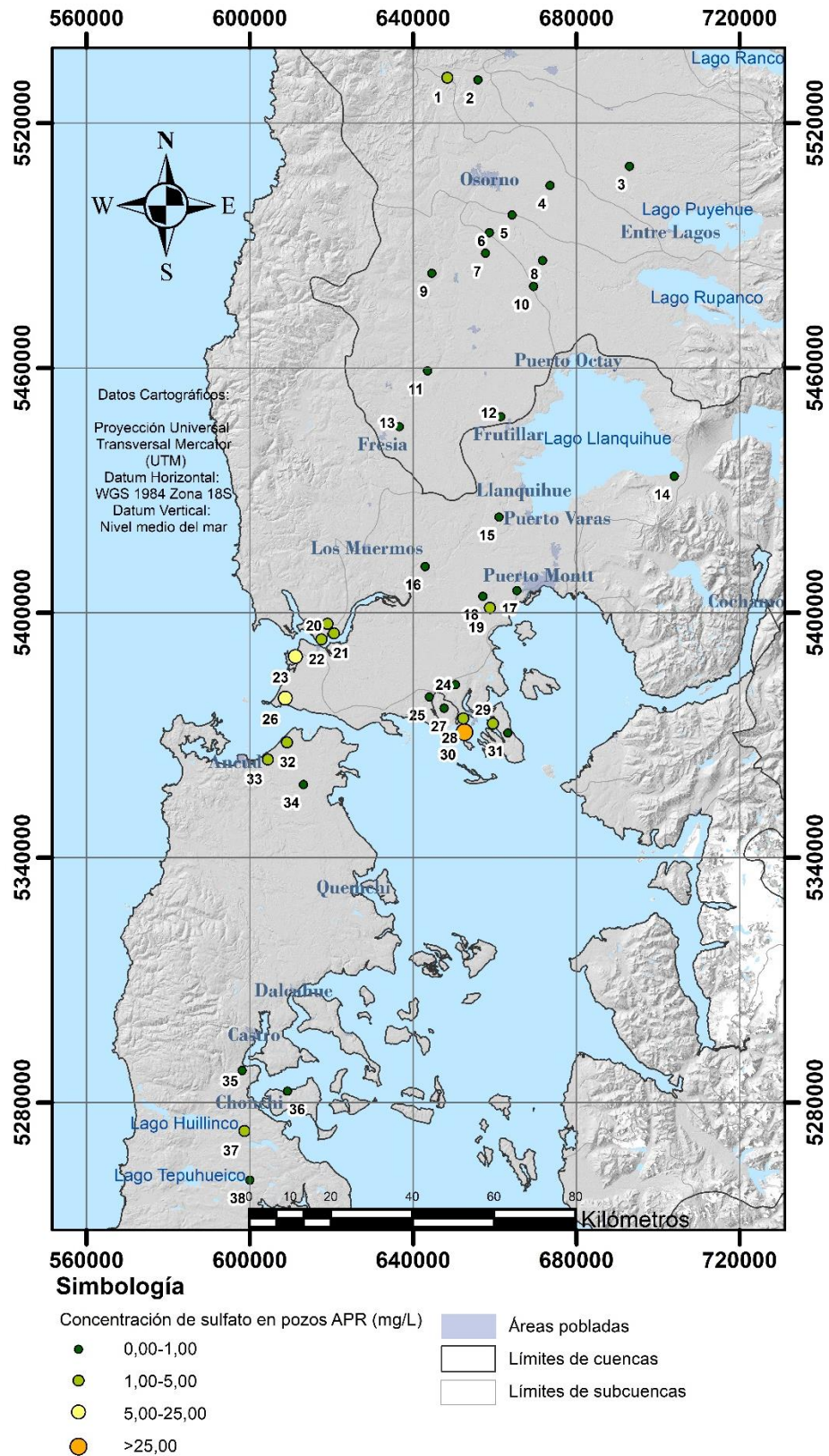


Figura 61: Mapa de distribución de concentraciones de sulfato en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.

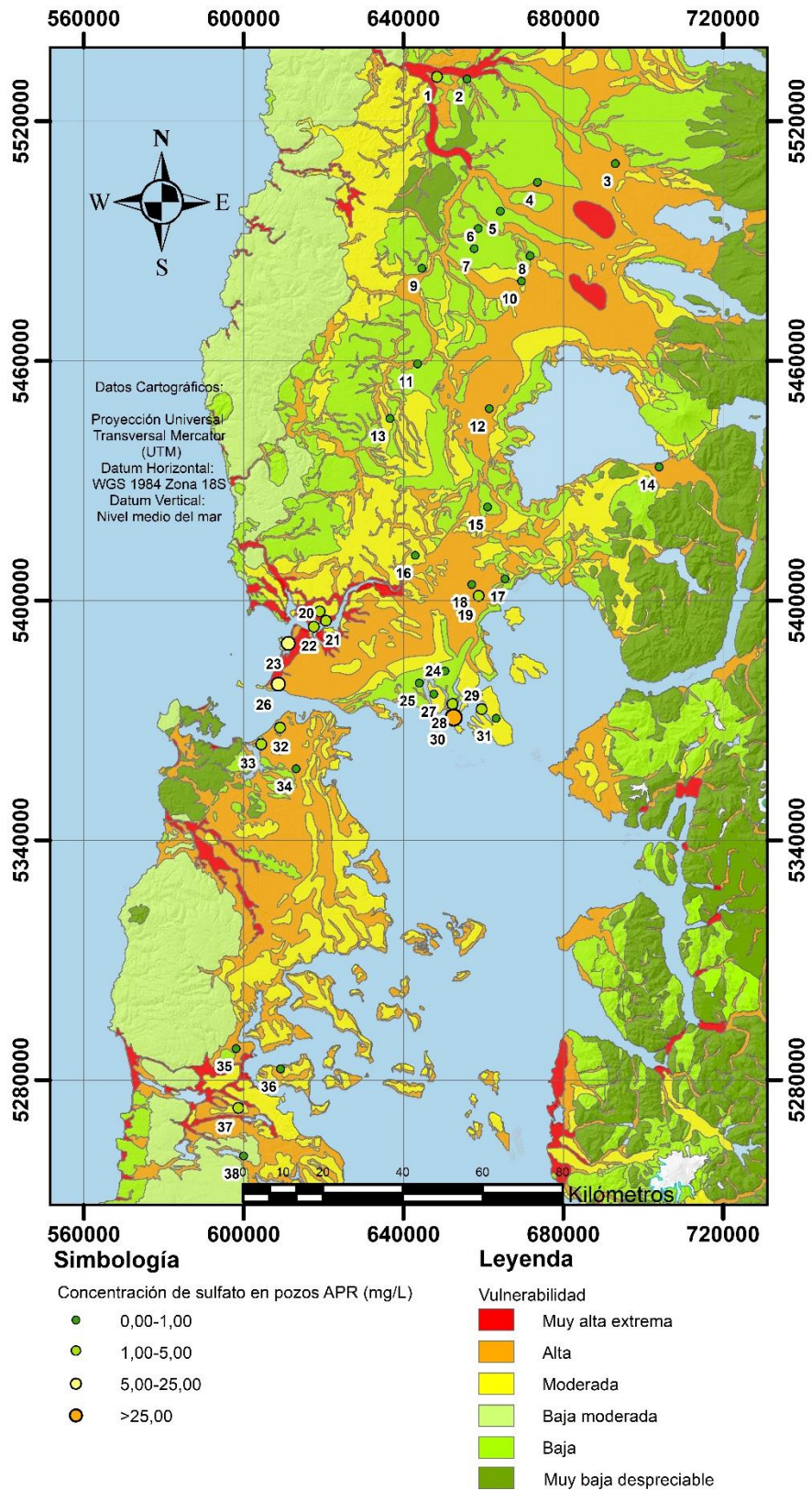


Figura 62: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de sulfato en los pozos APR (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.1.9. Carbonato y bicarbonato

Los iones carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-) de las aguas provienen normalmente del aporte de dióxido de carbono atmosférico en éstas, contribuciones del suelo cuando el agua se infiltra por éste, disolución de carbonatos e hidrólisis de silicatos.

Ambos iones, CO_3^{2-} y HCO_3^- coexisten en equilibrio, con una proporción que depende del pH, a valores altos de este parámetro domina de ion carbonato, pero a valores de pH menores a 8,3 generalmente la concentración de éste es despreciable, que es justamente lo que pasa con todas las muestras del estudio (ver valores de pH en Tabla 19).

Las distribuciones de concentraciones de las muestras utilizadas no son muy variables (ver Tabla 22, Figura 63 y Figura 64), con valores entre 32 y 181 mg/L de CaCO_3 , pero con la mayoría bordeando los 70 mg/L. No existe ninguna normativa en Chile en relación a estos parámetros, pues se suele considerar un compuesto inocuo para la salud a concentraciones naturales.

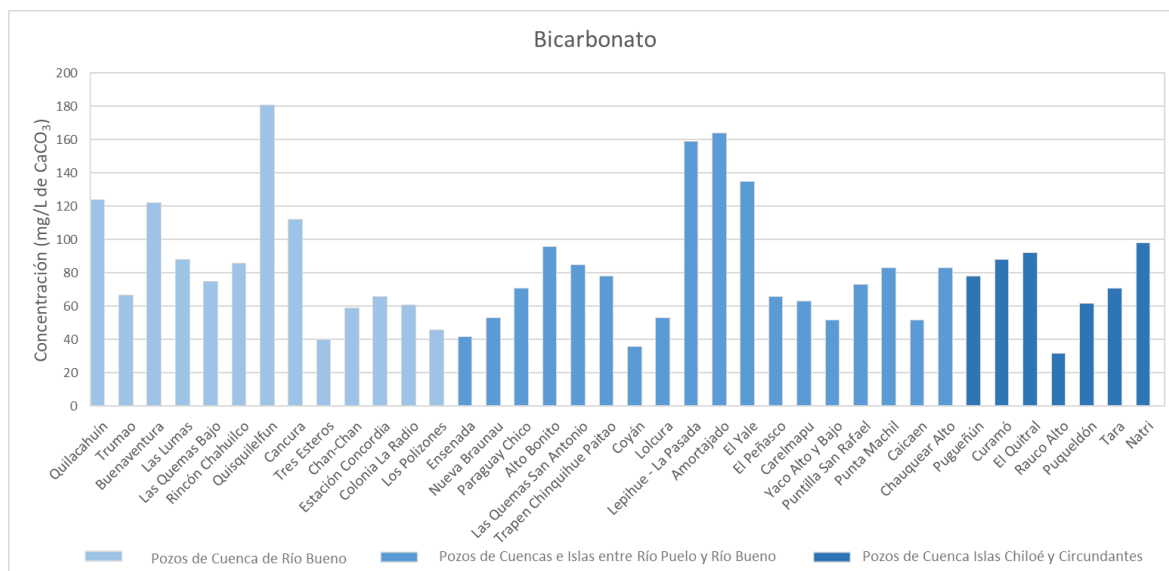


Figura 63: Gráfico de concentraciones de bicarbonato en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

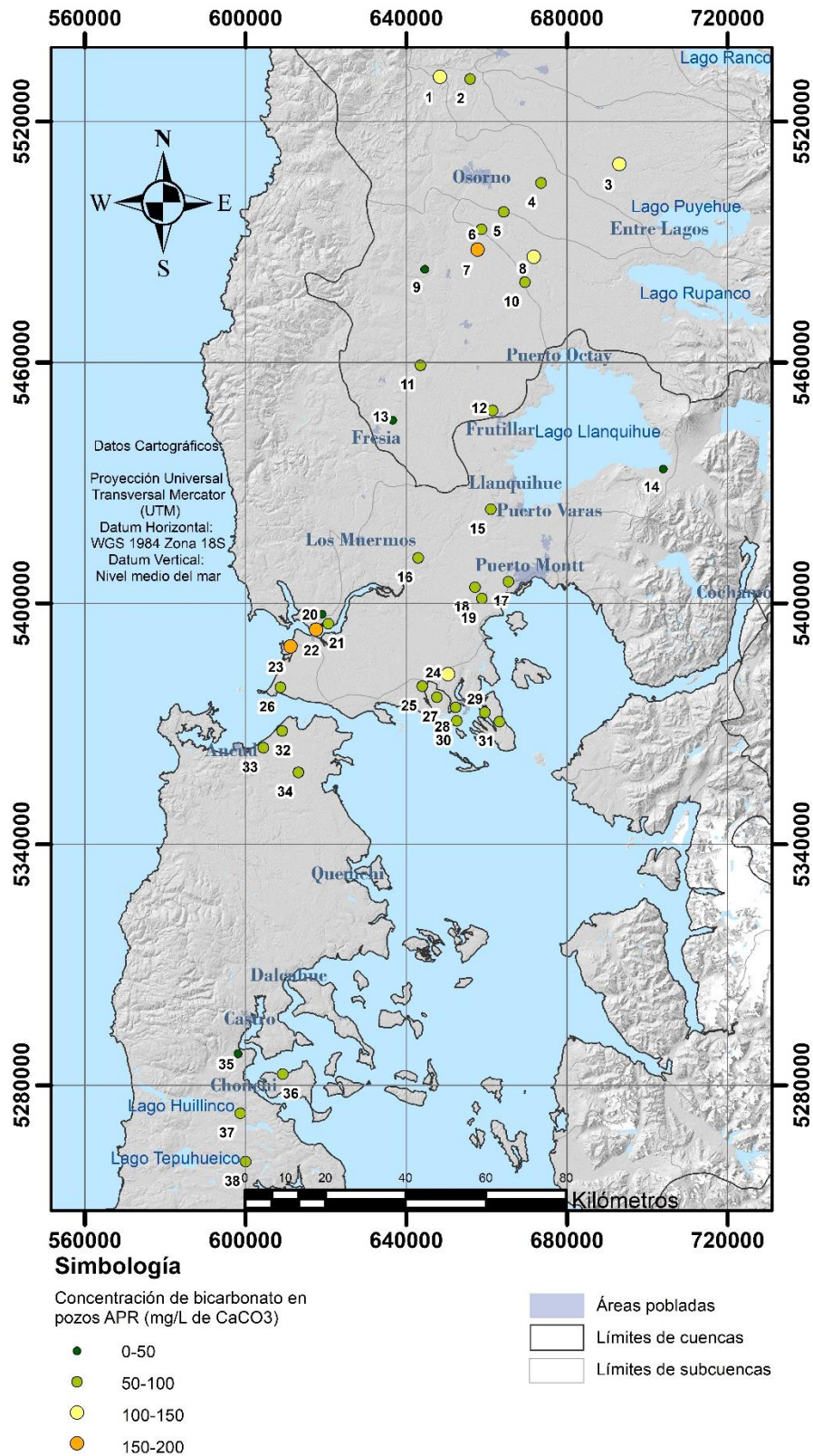


Figura 64: Mapa de distribución de concentraciones de bicarbonato en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 22). Fuente: Elaboración propia.

VI.4.2. Otros componentes normados

Además de determinar la concentración de los elementos mayores, también se midió la concentración de sólidos disueltos totales y 14 elementos traza totales, es decir, sin filtrar la muestra: aluminio, arsénico, cadmio, cobalto, cobre, hierro, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio y zinc, todos ellos normados, ya sea por la norma NCh N°409, NCh N°1333 o ambas. Las concentraciones de todos estos parámetros se detallan en la Tabla 24 y Tabla 25.

Tabla 24: Concentraciones de SDT, Al, As, Cd, Co, Cu, Fe y Mn de los pozos APR muestreados. En color naranja los pozos que superan la NCh 1333, en rojo los que superan la NCh 409 y en morado aquellos que superan ambas normas.

N° del pozo	Nombre del Pozo	SDT (mg/L)	Aluminio (mg/L)	Arsénico (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Cobalto (mg/L)	Cobre (mg/L)	Hierro (mg/L)	Manganeso (mg/L)
1	Quilacahún	380	0,04	0,0036	< 0,00002	0,0001	< 0,0005	1,220	0,5950
2	Trumao	784	<0,01	0,0036	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,431	0,7024
3	Buenaventura	162	0,15	0,0026	< 0,00002	0,0012	< 0,0005	3,043	1,0845
4	Las Lumas	138	0,02	0,0030	< 0,00002	< 0,0001	0,0065	0,465	0,2569
5	Las Quemadas Bajo	101	0,02	<0,0003	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	2,574	0,2619
6	Rincón Chahuico	132	0,02	0,0021	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,992	0,2997
7	Quisquelefun	220	0,06	0,0021	< 0,00002	0,0003	0,0114	1,757	0,5171
8	Cancura	151	0,02	0,0039	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,056	0,2404
9	Tres Esteros	79	0,09	0,0011	< 0,00002	< 0,0001	0,0055	0,220	0,0127
10	Chan-Chan	88	0,03	0,0004	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,049	0,0012
11	Estación Concordia	119	0,03	0,0023	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,011	0,0413
12	Colonia La Radio	97	0,02	<0,0003	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	1,081	0,2082
13	Los Polizones	94	0,03	0,0012	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,017	0,0008
14	Ensenada	75	<0,01	0,0004	< 0,00002	< 0,0001	0,0008	0,083	0,0002
15	Nueva Braunau	130	<0,01	0,0010	< 0,00002	< 0,0001	0,0056	0,020	0,0008
16	Paraguay Chico	100	0,03	0,0016	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,035	0,0022
17	Alto Bonito	119	0,03	0,0052	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,672	0,2140
18	Las Quemadas San Antonio	104	0,02	0,0032	< 0,00002	0,0002	0,0186	1,429	0,2337
19	Trapen Chiquihue Paitao	112	0,03	0,0014	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,705	0,0829
20	Coyán	126	<0,01	0,0030	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,033	0,0031
21	Lolcura	110	<0,01	0,0096	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,070	0,0015
22	Lepihue - La Pasada	274	<0,01	0,0013	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,100	0,0566
23	Amortajado	287	0,02	0,0033	< 0,00002	< 0,0001	0,0006	0,040	0,3417
24	El Yale	168	0,02	0,0068	< 0,00002	0,0003	< 0,0005	0,090	0,6597
25	El Peñasco	112	0,02	0,0019	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,026	0,0043
26	Caremapu	200	0,03	0,0017	< 0,00002	0,0003	< 0,0005	25,530	0,3888
27	Yaco Alto y Bajo	98	0,13	0,0014	< 0,00002	0,0001	< 0,0005	0,149	0,0019
28	Puntilla San Rafael	112	0,11	0,0016	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,139	0,0147
29	Punta Machil	142	0,02	0,0008	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,026	0,0003
30	Caicaen	1206	0,02	0,0042	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,037	0,0010
31	Chauquear Alto	116	0,02	0,0008	< 0,00002	0,0001	< 0,0005	2,649	0,2426
32	Pugueñún	136	0,05	0,0012	< 0,00002	0,0026	< 0,0005	4,758	0,3920
33	Curamó	152	<0,01	0,0007	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	2,625	0,3225
34	El Quitral	132	0,02	0,0021	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	4,201	0,2810
35	Rauco Alto	64	0,04	0,0015	0,00003	< 0,0001	< 0,0005	0,040	0,0011
36	Puqueldón	112	0,03	0,0019	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,117	0,2064
37	Tara	130	0,04	0,0008	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,154	0,0046
38	Natri	144	0,02	0,0007	< 0,00002	< 0,0001	< 0,0005	0,353	0,1204

Tabla 25: Concentraciones de Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, Se y Zn de los pozos APR muestreados.

N° del pozo	Nombre del Pozo	Mercurio (mg/L)	Molibdeno (mg/L)	Níquel (mg/L)	Plata (mg/L)	Plomo (mg/L)	Selenio (mg/L)	Zinc (mg/L)
1	Quilacahuín	< 0,0001	0,0012	< 0,0001	< 0,00002	< 0,0004	< 0,0003	0,0954
2	Trumao	< 0,0001	0,0141	< 0,0001	< 0,00002	< 0,0004	< 0,0003	0,0623
3	Buenaventura	< 0,0001	0,0005	0,0643	< 0,00002	0,0022	< 0,0003	0,0792
4	Las Lumas	< 0,0001	0,0008	< 0,0001	< 0,00002	< 0,0004	0,0004	0,0552
5	Las Quemadas Bajo	< 0,0001	0,0003	0,0009	< 0,00002	0,0020	0,0005	0,0571
6	Rincón Chahuilco	< 0,0001	0,0005	0,0002	< 0,00002	0,0008	0,0005	0,0685
7	Quisqueifun	< 0,0001	0,0009	0,0035	< 0,00002	0,0017	< 0,0003	0,1177
8	Cancura	< 0,0001	0,0031	0,0040	< 0,00002	0,0009	< 0,0003	0,0548
9	Tres Esteros	< 0,0001	< 0,0002	0,0003	< 0,00002	0,0017	0,0005	0,2193
10	Chan-Chan	< 0,0001	< 0,0002	0,0005	< 0,00002	0,0008	0,0011	0,0665
11	Estación Concordia	< 0,0001	0,0007	0,0002	< 0,00002	0,0005	0,0005	0,0708
12	Colonia La Radio	< 0,0001	< 0,0002	0,0014	< 0,00002	0,0082	< 0,0003	0,0348
13	Los Polizones	< 0,0001	< 0,0002	0,0266	< 0,00002	< 0,0004	0,0004	0,0561
14	Ensenada	< 0,0001	< 0,0002	0,0035	< 0,00002	0,0007	< 0,0003	0,0245
15	Nueva Braunau	< 0,0001	< 0,0002	0,0080	< 0,00002	0,0013	< 0,0003	0,0317
16	Paraguay Chico	< 0,0001	< 0,0002	0,0020	< 0,00002	< 0,0004	0,0010	0,0739
17	Alto Bonito	< 0,0001	0,0004	0,0030	< 0,00002	0,0019	< 0,0003	0,0424
18	Las Quemadas San Antonio	< 0,0001	0,0006	0,0109	< 0,00002	0,0041	< 0,0003	0,0496
19	Trapen Chingihue Paitao	< 0,0001	0,0006	0,0007	< 0,00002	0,0053	< 0,0003	0,0387
20	Coyán	< 0,0001	0,0003	0,0028	< 0,00002	0,0049	0,0006	0,0240
21	Lolcura	< 0,0001	0,0007	0,0113	< 0,00002	0,0018	< 0,0003	0,0263
22	Lepihue - La Pasada	< 0,0001	0,0004	< 0,0001	< 0,00002	0,0021	< 0,0003	0,0283
23	Amortajado	< 0,0001	0,0021	0,0016	< 0,00002	0,0040	0,0004	0,0283
24	El Yale	< 0,0001	0,0012	0,0092	< 0,00002	0,0065	< 0,0003	0,0207
25	El Peñasco	< 0,0001	0,0004	0,0007	< 0,00002	0,0017	0,0003	0,0378
26	Caremapu	< 0,0001	< 0,0002	0,0045	< 0,00002	0,0024	< 0,0003	0,0832
27	Yaco Alto y Bajo	< 0,0001	< 0,0002	0,0012	< 0,00002	0,0060	0,0009	0,0225
28	Puntilla San Rafael	< 0,0001	< 0,0002	0,0013	< 0,00002	0,0053	0,0009	0,0555
29	Punta Machil	< 0,0001	0,0003	0,0015	< 0,00002	0,0056	0,0003	0,0333
30	Caicaen	< 0,0001	0,0004	0,0010	< 0,00002	0,0040	< 0,0003	0,0243
31	Chauquear Alto	< 0,0001	0,0006	0,0625	< 0,00002	0,0066	0,0007	0,0240
32	Pugueñún	< 0,0001	< 0,0002	0,0280	< 0,00002	0,0034	< 0,0003	0,0189
33	Curamó	< 0,0001	< 0,0002	0,0099	< 0,00002	0,0025	< 0,0003	0,0214
34	El Quitral	< 0,0001	0,0004	0,0028	< 0,00002	0,0018	< 0,0003	0,0177
35	Rauco Alto	< 0,0001	0,0003	0,0004	< 0,00002	0,0045	< 0,0003	0,0798
36	Puqueldón	< 0,0001	0,0005	0,0011	< 0,00002	0,0032	0,0004	0,0427
37	Tara	< 0,0001	< 0,0002	0,0016	< 0,00002	0,0037	< 0,0003	0,0235
38	Natri	< 0,0001	0,0005	0,0089	< 0,00002	0,0043	0,0006	0,0228

En las tablas es posible observar que todas las muestras están por debajo del límite de detección del mercurio y la plata, y ya que estos límites son menores que las normativas chilenas (ver Tabla 2 y Tabla 3) se puede asegurar que todas las muestras cumplen la normativa de estos parámetros.

Los elementos cadmio, cobalto, cobre y selenio tienen la mayoría de sus muestras bajo el límite de detección, sólo 1 muestra de cadmio se identificó sobre el límite de detección, el cobalto 9, el cobre 7 y el selenio 17, igualmente con todos estos parámetros bajo las normativas chilenas vigentes.

El resto de parámetros se detallarán a continuación:

VI.4.2.1. Sólidos disueltos totales

Los sólidos disueltos totales corresponden a la medida en masa de todas las sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en el agua, ya sea de forma moléculas, ionizada o en forma coloidal.

En aguas subterráneas los valores de éste suelen ir desde 100 a 350 mg/L y ya con concentraciones superiores a 1000 mg/L las aguas ya se pueden clasificar como salobres. La NCh N°409 establece un límite de 1500 mg/L, y la N°1333 según lo que aparece en la Tabla 4. No se identificaron pozos que superaran los 1500 mg/L de la NCh 409, no obstante se observó que, respecto a la NCh 1333, 36 de los 38 pozos caen en la clasificación “*Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales*”, un pozo, Trumao, cae en la clasificación “*Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles*” por estar entre los 500 y 1000 mg/L de SDT y el pozo más salino de los recolectados, Caicaen se clasifica como “*Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso*” por estar entre los 1000 y 2000 mg/L de SDT. Cabe destacar que esta clasificación concuerda bien con la de conductividad eléctrica (ver sección “VI.1.2. Parámetros fisicoquímicos”). Los detalles de las concentraciones se pueden observar en la Tabla 24, Figura 65, Figura 66 y Figura 67.

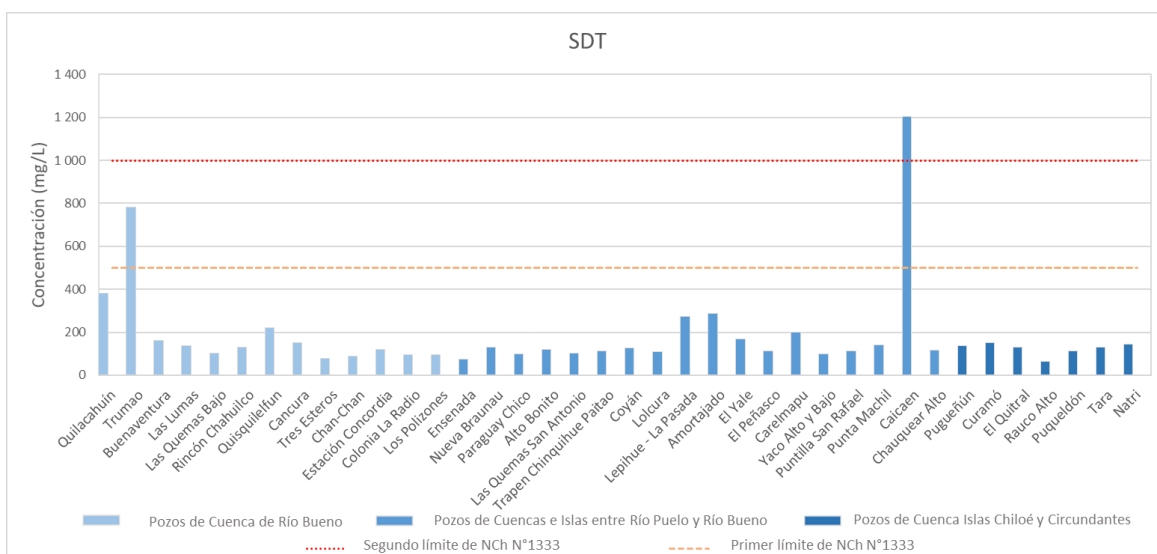


Figura 65: Gráfico de concentraciones de sólidos totales disueltos en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

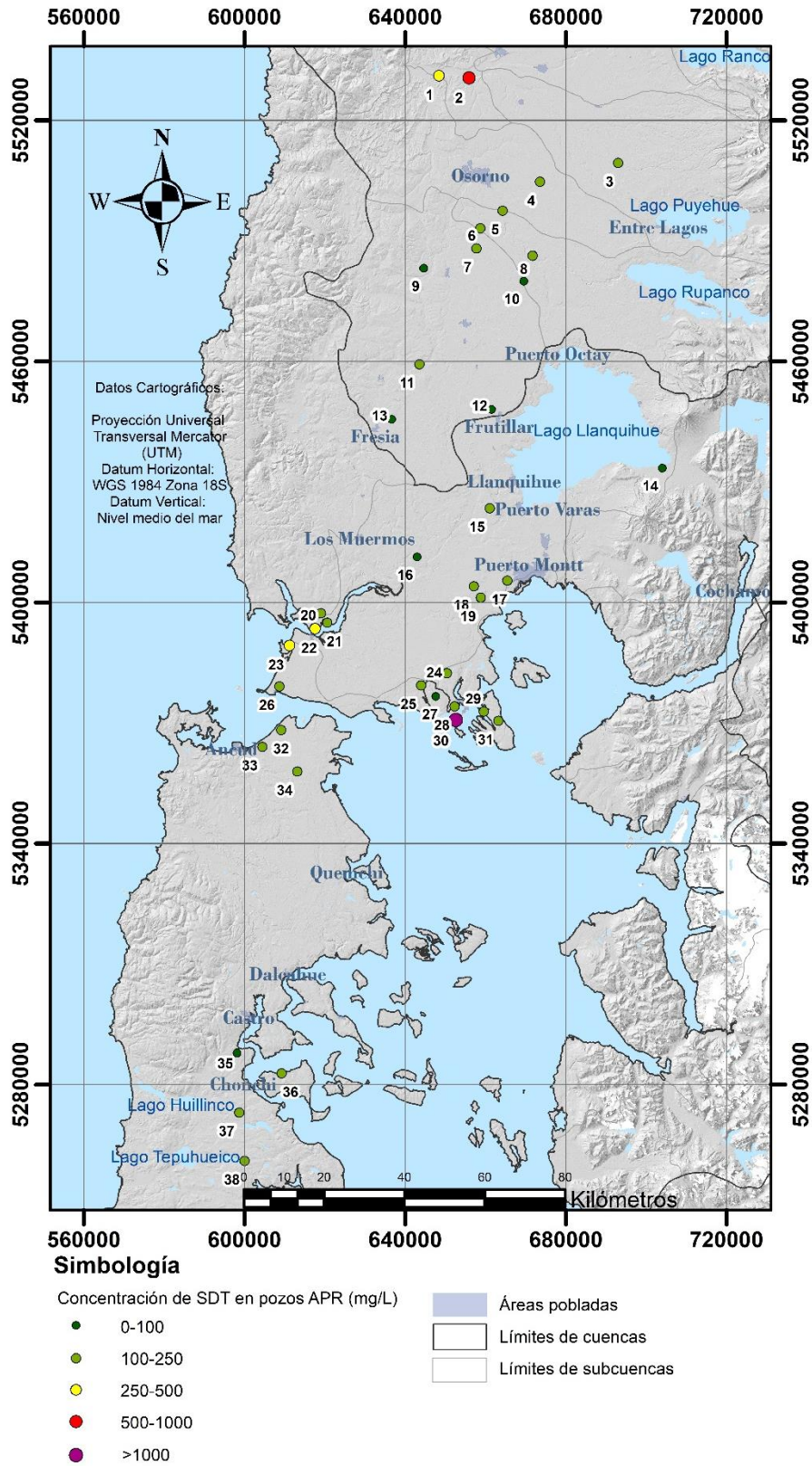


Figura 66: Mapa de distribución de concentraciones de SDT en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Elaboración propia.

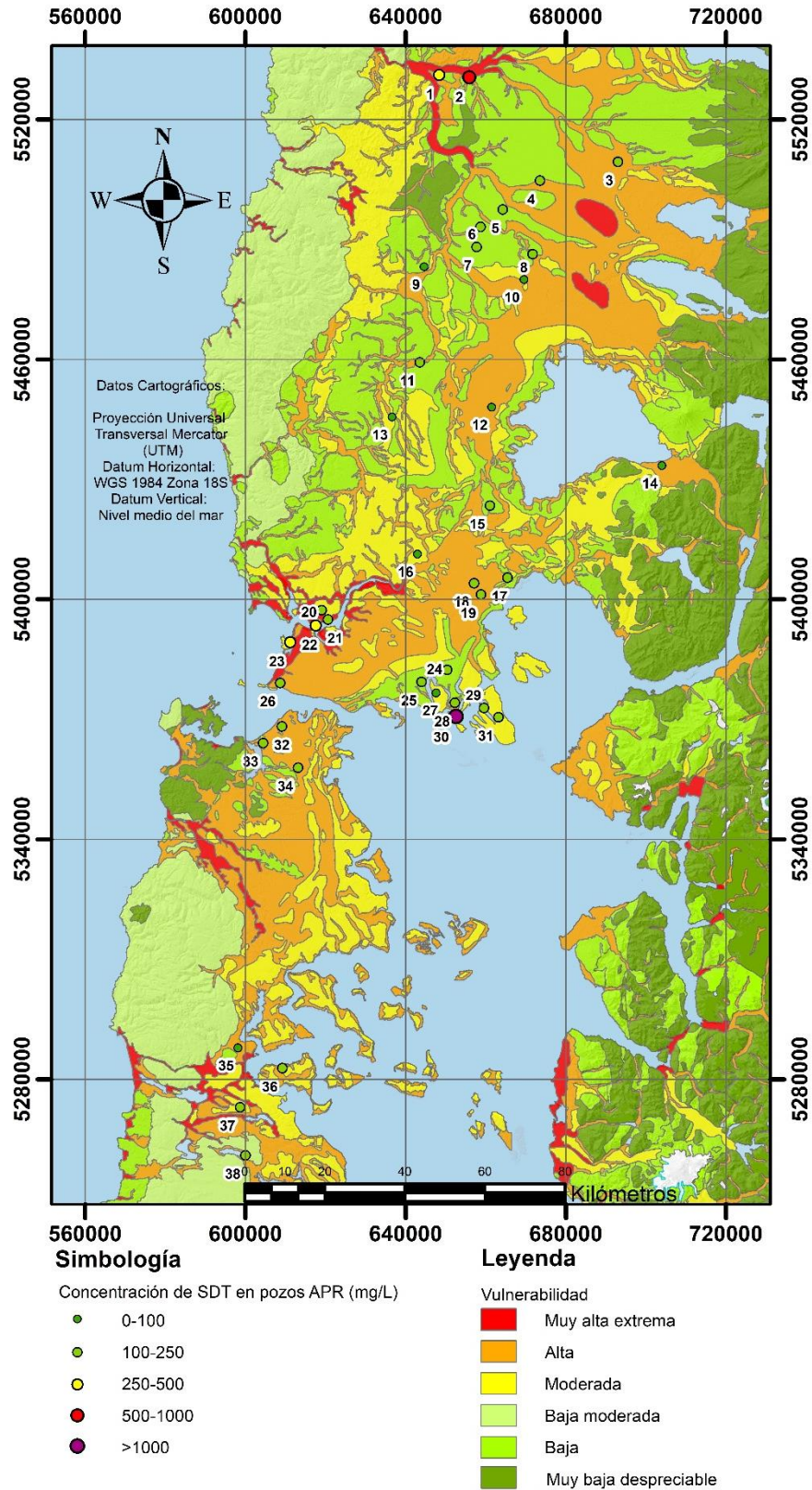


Figura 67: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de SDT en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.2.2. Aluminio

El aluminio es un elemento muy poco soluble en las aguas, y generalmente el que se puede encontrar en éstas está en las redes cristalinas de los minerales que puedan estar suspendidos en el líquido, y ya que este es un elemento que es muy abundante en los silicatos, como en arcillas, feldspatos, zeolitas, etc. Es muy común que éste se encuentre en las aguas sin filtrar.

La concentración de éste en las muestras es bastante baja en comparación con la establecida en la NCh N°1333 de agua de riego (ver Tabla 24, Figura 68, Figura 69 y Figura 70), que establece un límite de 5,00 mg/L para este elemento (la norma de agua potable no lo considera), incluso 7 muestras están bajo e límite de detección. Respecto al origen del aluminio, es probable que la concentración en las muestras dependiera más de la carga de sedimento suspendido en éstas, más que de las condiciones fisicoquímicas.

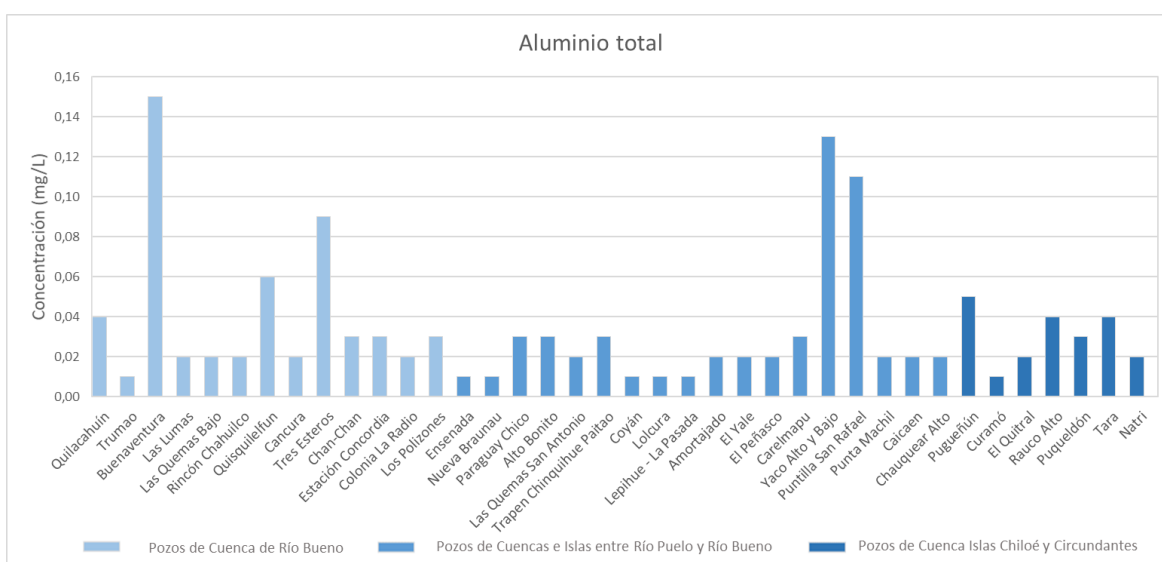


Figura 68: Gráfico de concentraciones de aluminio en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

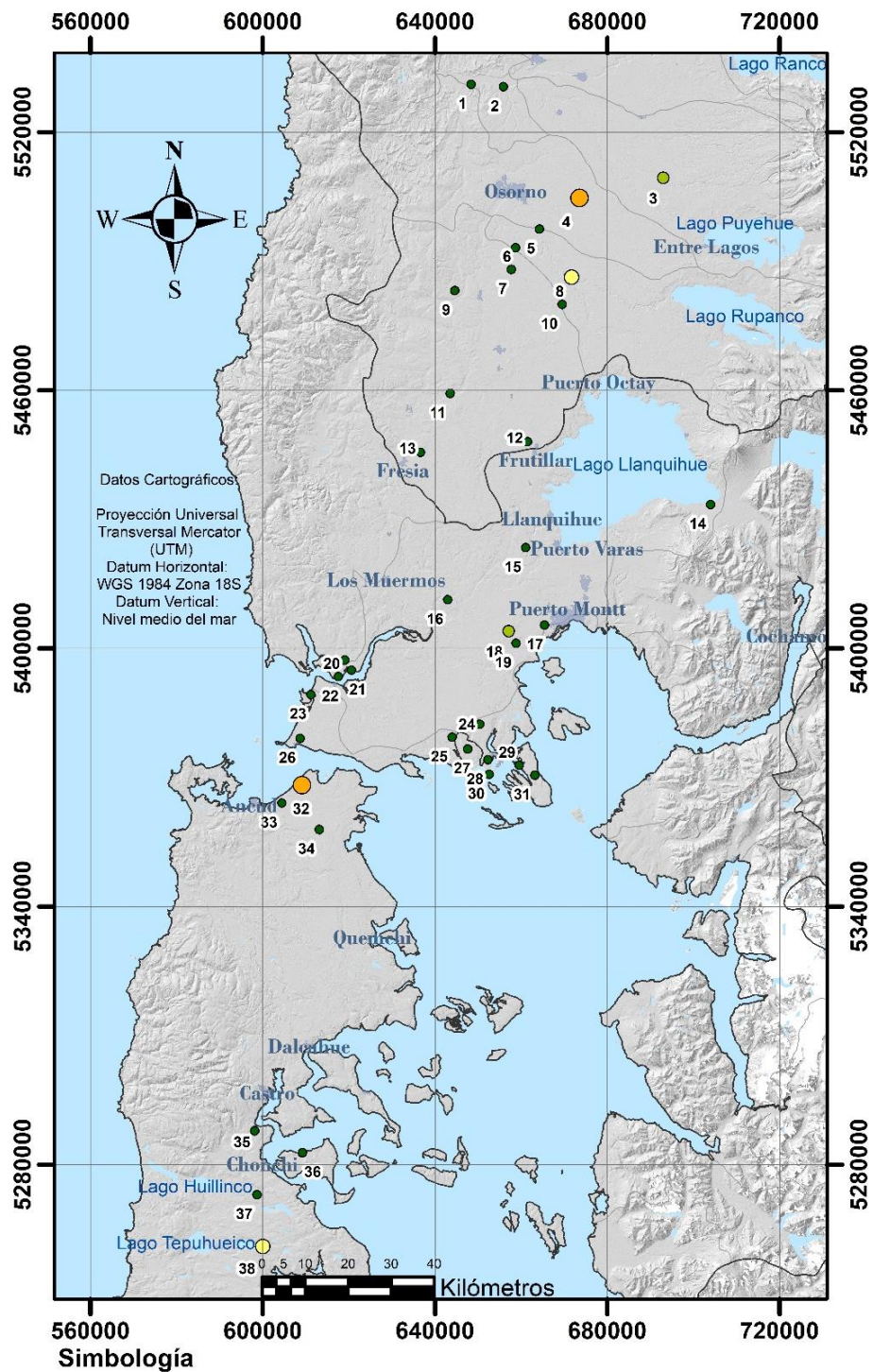


Figura 69: Mapa de distribución de concentraciones de aluminio en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Elaboración propia.

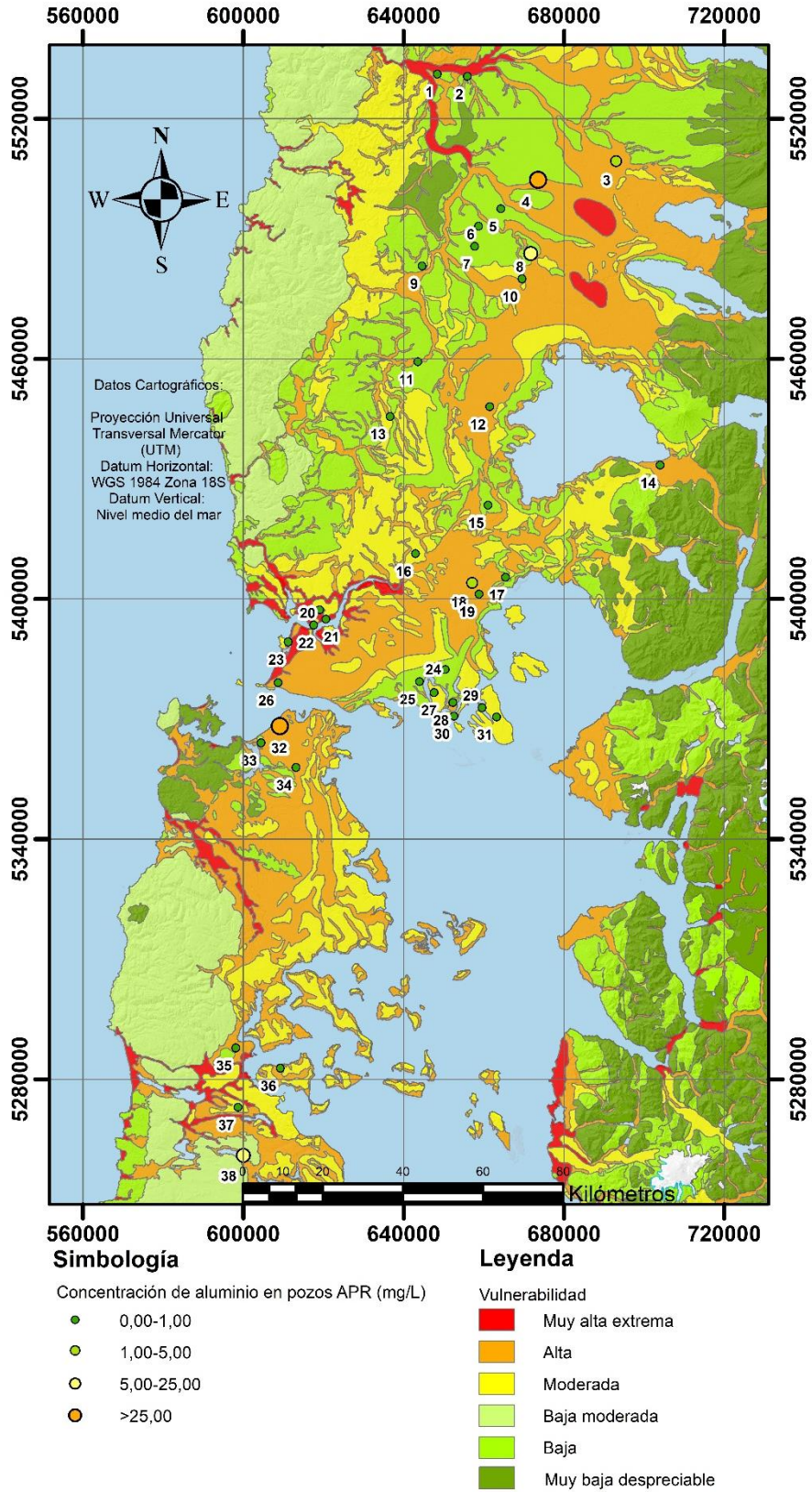


Figura 70: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de aluminio en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.2.3. Arsénico

Las concentraciones altas de arsénico no se restringen a determinadas condiciones o ámbitos, ya que pueden aparecer en acuíferos en condiciones oxidantes y de pH alto, acuíferos en condiciones reductoras, acuíferos con circulación geotermal, acuíferos afectados por procesos ligados a la actividad minera o relacionados con depósitos minerales, y acuíferos ligados a otros procesos antropogénicos (actividad industrial, asentamientos urbanos, actividad agropecuaria, etc.) (Lillo, 2003).

Es común que los acuíferos con contenidos altos de arsénico tengan un origen ligado a procesos geoquímicos naturales, por ejemplo, éste se puede liberar por reducción microbiana de oxi-hidróxidos de hierro, en los cuales es normal que éste se adsorba (Neumann et al. 2010). La principal diferencia que puede haber entre acuíferos contaminados de forma natural, de los de origen antropogénico, radica en que en estos últimos poseen una afección de carácter más local, mientras que la ocurrencia de concentraciones altas de arsénico de origen natural afecta a grandes áreas. (Lillo, 2003).

El contenido de arsénico es controlado por tres factores (Lillo, 2003):

- La fuente primaria de arsénico (geosfera y atmósfera).
- Los procesos de movilización/retención de arsénico en la interacción entre la fase sólida.
- La fase líquida, y el transporte de arsénico como especie acuosa en el seno del agua.

La normativa chilena vigente estipula una concentración máxima de 0,01 mg/L para el agua potable (NCh N°409) y 0,10 mg/L para el agua de riego (NCh N°1333) como se aprecia en la Tabla 24, Figura 71 y Figura 72, todos los pozos cumplen las normas, aunque es apreciable que el pozo Lolcura está bastante cercano al límite de agua potable, con una concentración de 0,0096 mg/L, lo cual puede ser muy preocupante considerando la vulnerabilidad “Muy Alta Extrema” de este acuífero (Figura 73).

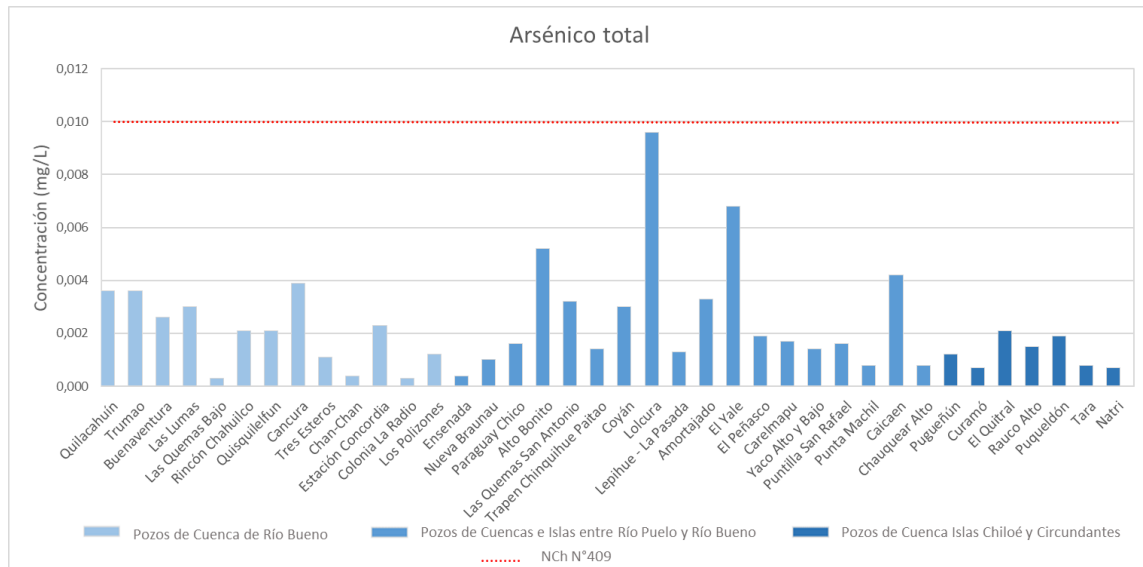


Figura 71: Gráfico de concentraciones de arsénico en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

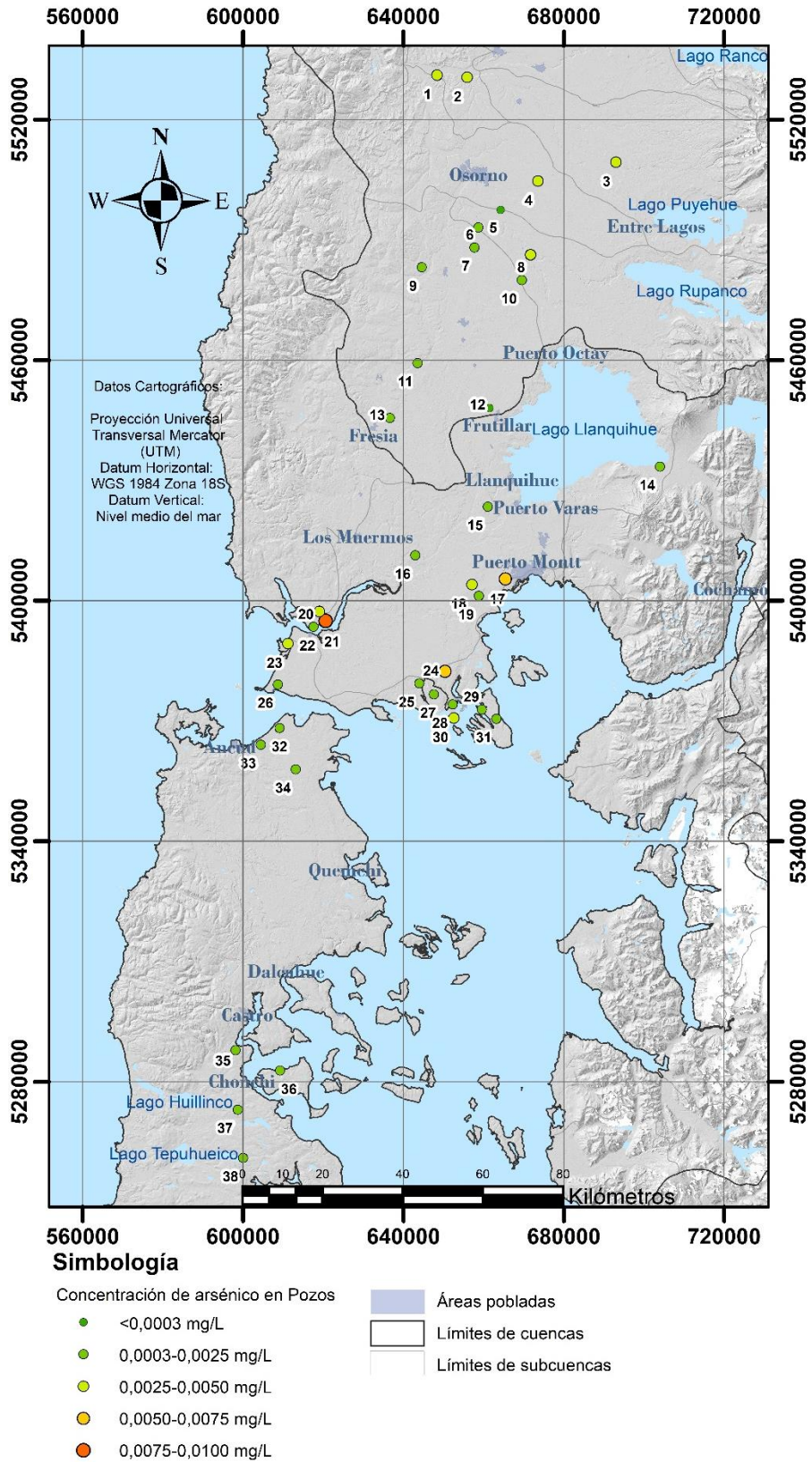


Figura 72: Mapa de distribución de concentraciones de arsénico en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Elaboración propia.

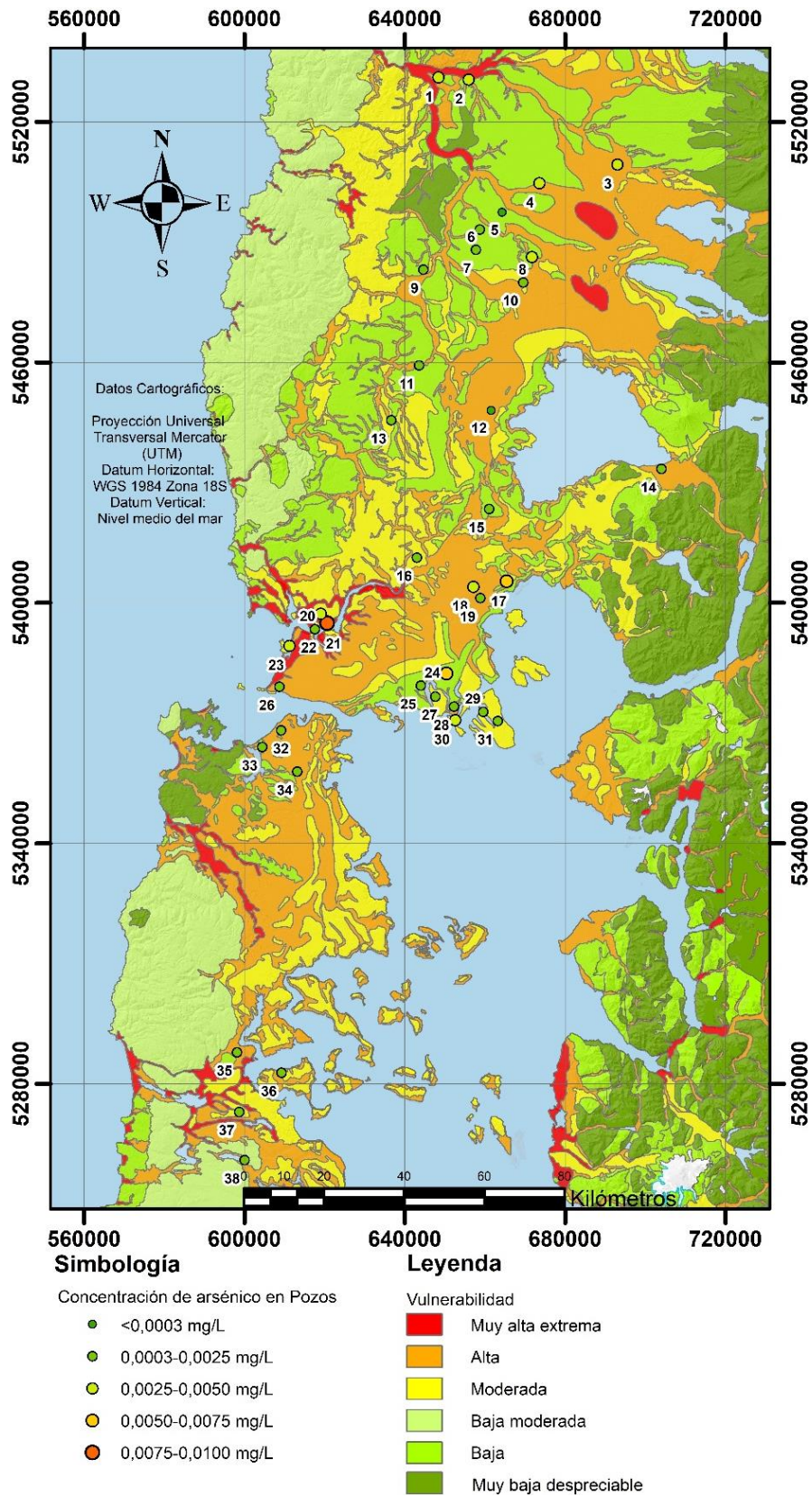


Figura 73: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de arsénico en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.2.4. Hierro

El hierro en los suministros de aguas procedentes del subsuelo en zonas rurales es muy frecuente: los niveles de concentración van entre rangos de 0 a 50 mg/L. Éste ocurre de manera natural en acuíferos, pero los niveles de aguas subterráneas pueden aumentar por la disolución de componentes ferrosos de los sistemas de abastecimiento o del material permeable del acuífero (Lenntech, 2021). En aguas subterráneas se reduce a su forma de hierro II, esta forma es más soluble y normalmente no causa ningún problema por sí misma, no así oxidándose a hierro III (hidróxidos insolubles), generando un compuesto rojo corrosivo.

La normativa chilena vigente estipula una concentración máxima de 0,3 mg/L para el agua potable (NCh N°409) y 5,00 para el agua de riego (NCh N°1333) como se aprecia en la Tabla 24, Figura 74, Figura 75 y Figura 76 hay varios pozos APR (17) que sobrepasan el límite para el agua potable, e incluso hay uno, Carelmapu, que sobrepasa el límite del agua de riego también, con una concentración 5 veces el límite (25,530 mg/L), además los pozos Pugeñún (4,758 mg/L) y El Quitral (4,201 mg/L) están bastante cerca del de agua de riego igualmente. Esta alta concentración en pozos de la zona ya tiene antecedentes, pues en el estudio de SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos del 2008 varios de sus muestras presentaron valores superiores a la norma, dejando al hierro como uno de los principales contaminantes que se determinó en esas aguas.

No es muy clara la razón de las altas concentraciones de este elemento, aunque sí es posible decir que en la mayoría de los casos donde sobrepasa la NCh N°409 la muestra se encontraba en un estado reducido (ver Tabla 19), de hecho la mayoría con valores negativos de potencial redox, a excepción de Quisqueñun, Pugeñún y El Quitral, y considerando que 0,77 V es el límite de estabilidad entre las especies Fe^{2+} y Fe^{3+} , se puede decir que en la mayoría de las muestras el hierro se encuentra disuelto (Fe^{+2}) por lo que el filtrado no sería suficiente tratamiento.

En específico para el sector de Alerce, según SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos del 2008 infieren que la presencia de hierro en el agua subterránea tiene relación con la presencia de capas superficiales de depósitos piroclásticos.

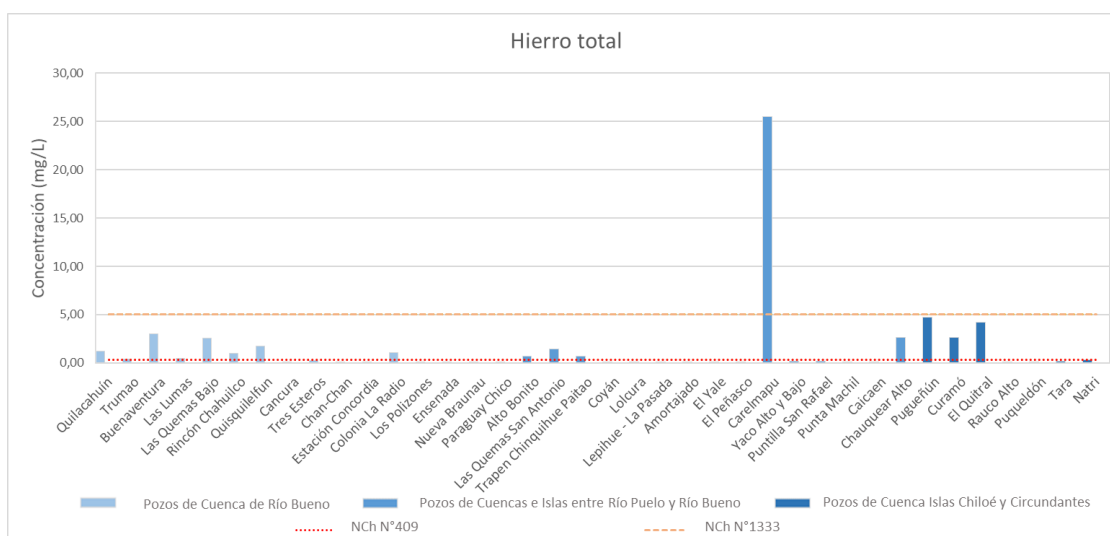


Figura 74: Gráfico de concentraciones de hierro en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

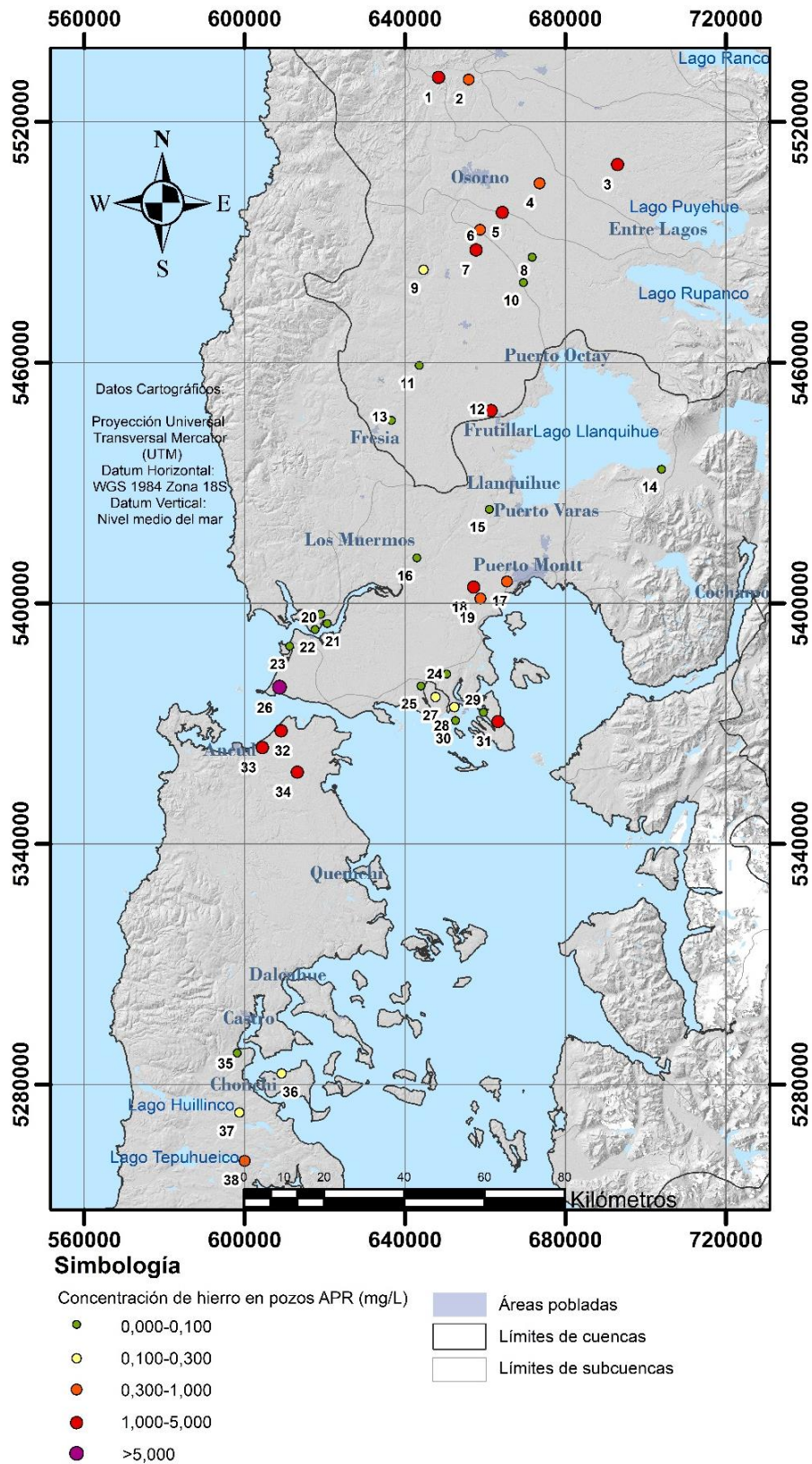


Figura 75: Mapa de distribución de concentraciones de hierro en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Elaboración propia.

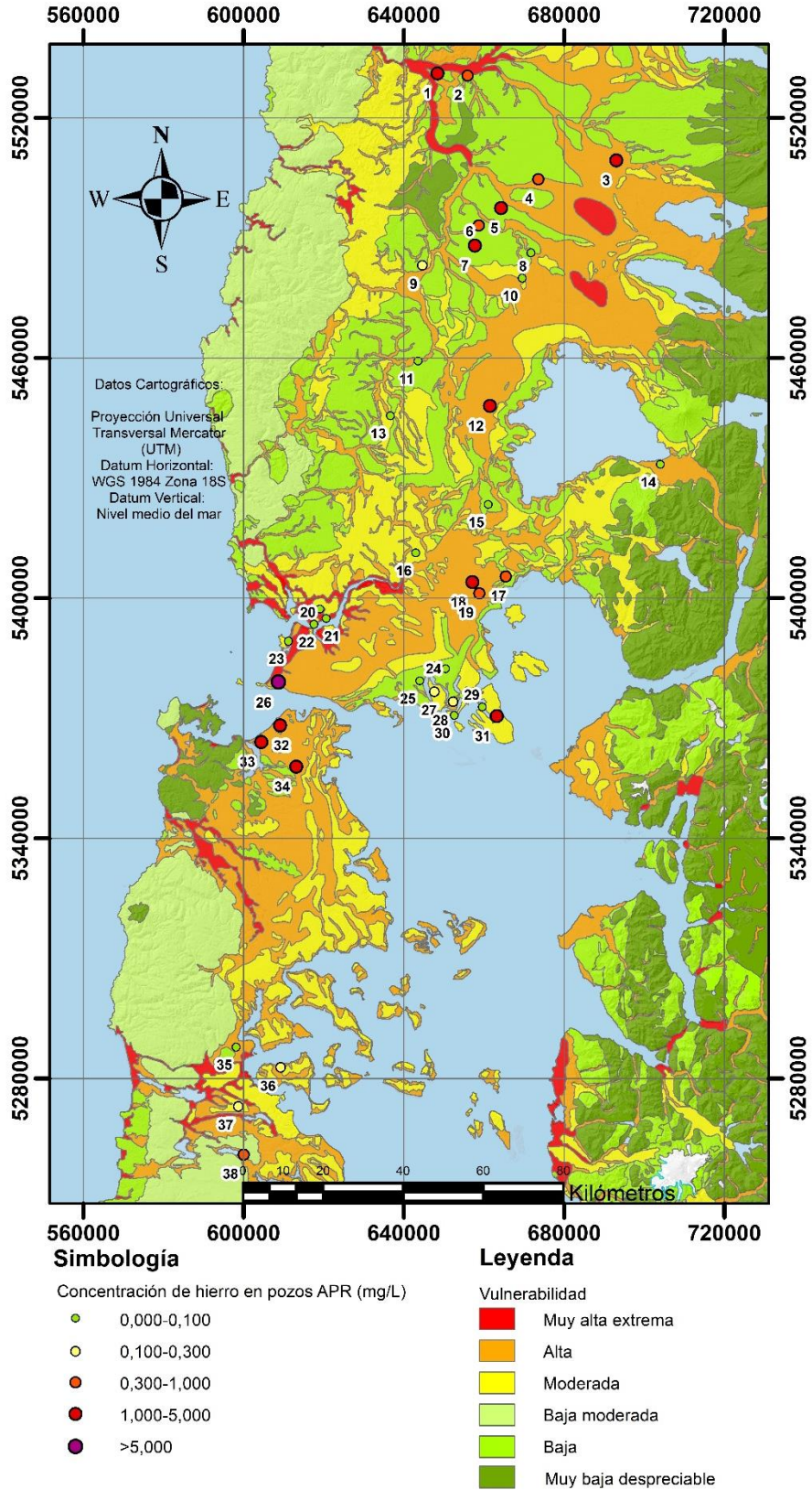


Figura 76: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de hierro en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.2.5. Manganeso

El Manganeso, tal como sucede con el Hierro, pero en menor proporción, se encuentra en forma natural en los en el agua subterránea de manera disuelta, mediante procesos de lixiviación, en donde las concentraciones pueden llegar a los 1,50 mg/L o más.

Es un elemento esencial para el buen funcionamiento tanto de los seres humanos como de los animales, ya que es necesario para el funcionamiento de muchas enzimas celulares (p. Ej., Superóxido dismutasa de manganeso, piruvato carboxilasa) y puede servir para activar muchas otras (Ej. Quinasas, descarboxilasas, transferasas, hidrolasas) (IPCS, 2002).

En concentraciones superiores a 0,1 mg/L, el ion manganeso imparte un sabor indeseable a las bebidas y mancha los accesorios de plomería y la ropa al lavar (Griffin, 1960). Cuando los compuestos de manganeso (II) en solución se oxidan, el manganeso precipita, lo que da lugar a problemas de incrustaciones. En concentraciones tan bajas como 0,02 mg/L, el manganeso puede formar recubrimientos en las tuberías de agua que luego pueden desprenderse como un precipitado negro (Bean, 1974).

Por vía oral, el manganeso se considera a menudo como uno de los elementos menos tóxicos, aunque existe cierta controversia sobre si hay efectos neurológicos vinculados a la exposición oral (WHO, 2011a), además los resultados de varios estudios en ratas y ratones indican que la ingestión de manganeso puede retrasar la maduración reproductiva en animales machos (ATSDR, 2000).

Respecto a los efectos neurológicos, en un estudio de la exposición al manganeso del agua en personas mayores, los autores concluyeron que los aumentos progresivos de la concentración de manganeso en el agua de bebida están asociados con una prevalencia progresivamente mayor de signos neurológicos de intoxicación crónica por manganeso. (Kondakis et al., 1989). Contrariamente al estudio anterior, otro estudio a largo plazo sobre el agua potable en una zona rural del norte de Alemania (Vieregge et al., 1995) no encontró efectos neurológicos del manganeso a un nivel de al menos 0,3 mg/L de agua durante 10 a 40 años.

La normativa chilena vigente estipula una concentración máxima de manganeso en el agua de 0,1 mg/L para el agua potable (NCh N°409) y de 0,2 mg/L para el agua de riego (NCh N°1333), donde un pozo solamente supera la normativa de agua potable y 19 pozos superan el valor de ambas normativas, siendo el mayor valor de manganeso el medido en APR Buenaventura (Ver Tabla 24, Figura 77, Figura 78 y Figura 79). Al igual que como ocurre con el hierro, en el estudio de SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos del 2008, se determinaron varios pozos con altas concentraciones del elemento, por lo que éste se constituye como un contaminante común de la zona.

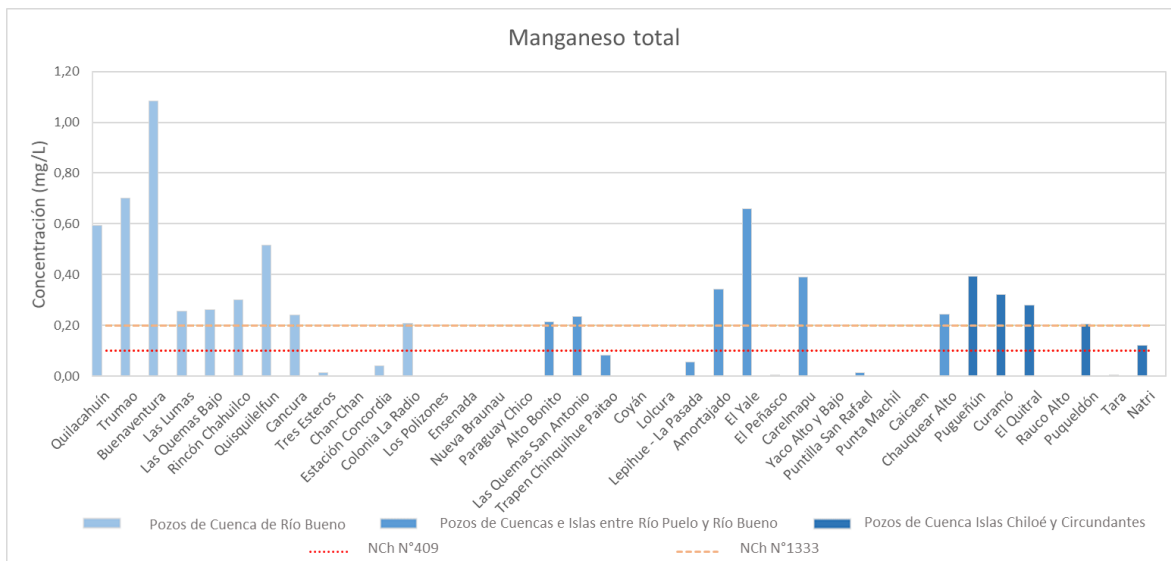


Figura 77: Gráfico de concentraciones de manganeso en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

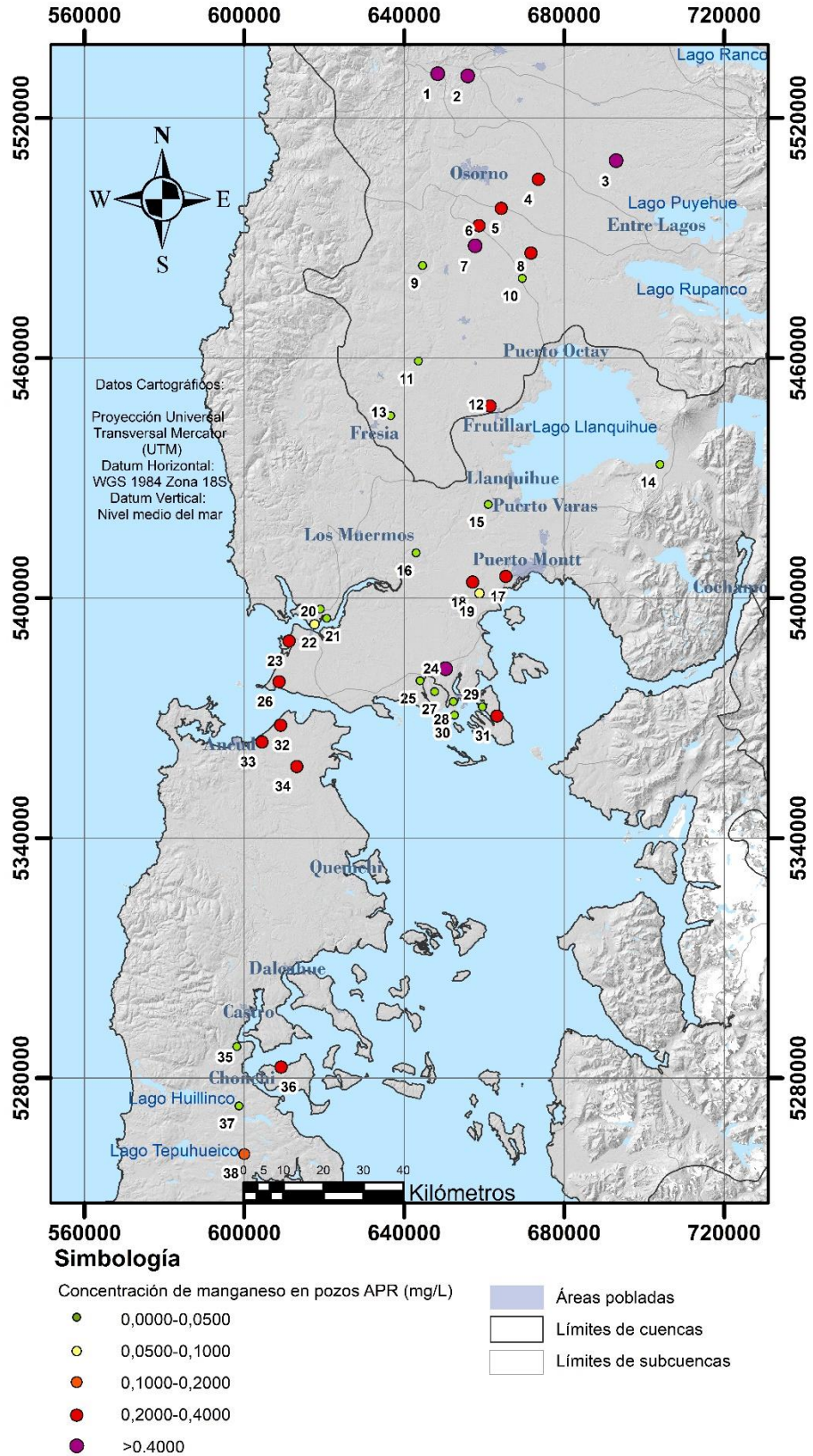


Figura 78: Mapa de distribución de concentraciones de manganeso en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

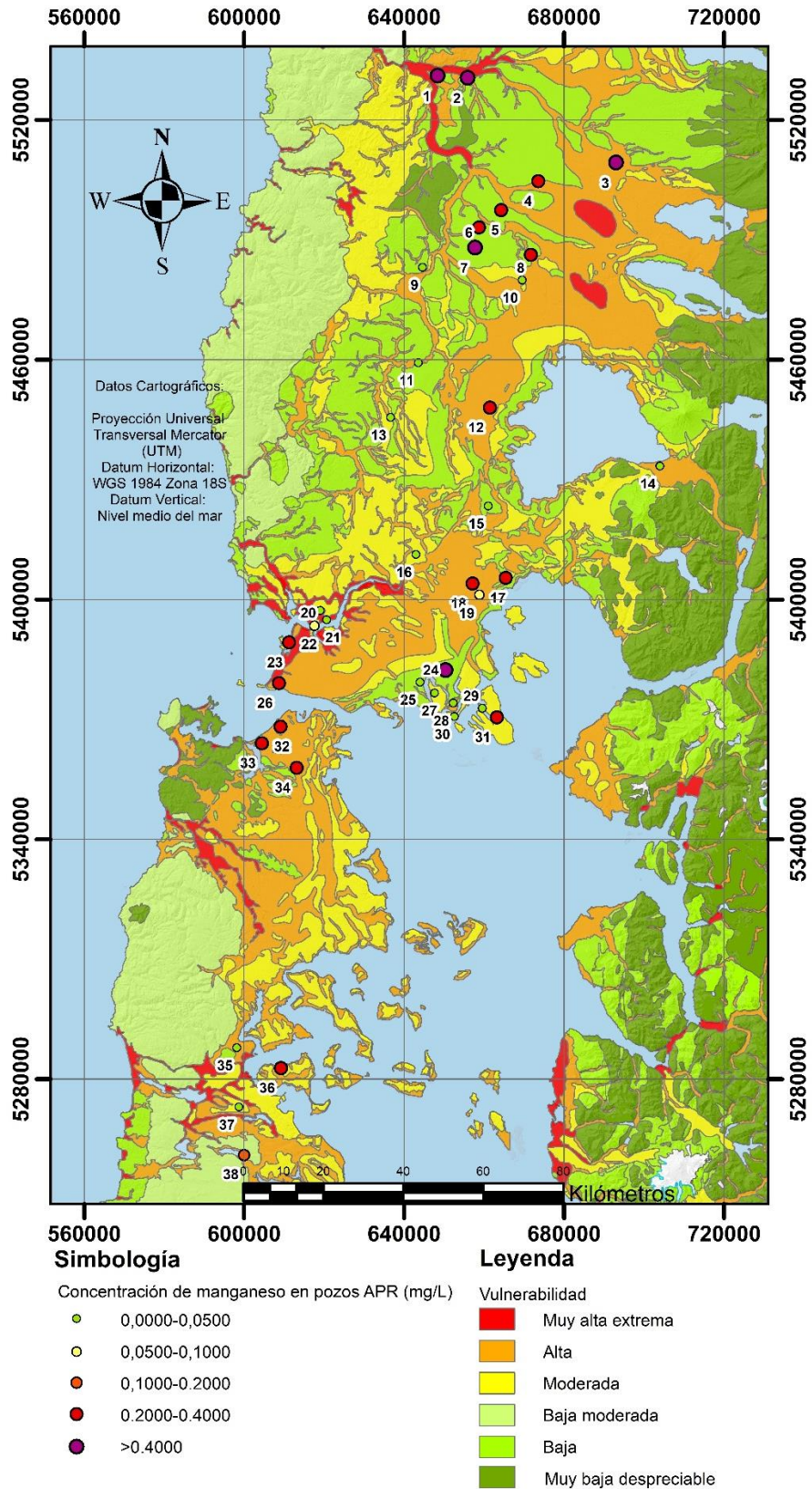


Figura 79: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de manganeso en los pozos APR (ver numeración en Tabla 24). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.2.6. Molibdeno

El molibdeno aparece en la naturaleza en varios estados de oxidación, siendo los estados IV y VI los más estables. Éste aparece en varios sulfuros, como la molibdenita, del cual es un constituyente mayor, y en proporciones variadas en piritita (Vorlicek et al., 2004), galena y esfalerita (Vorlicek et al., 2004), además aparece en óxidos como la wulfenita, powellita y óxidos de hierro, manganeso y aluminio más comunes (Goldberg et al., 1996; Wichard et al., 2009; Essilfie-Dughan et al., 2011). En las aguas, con los valores más típicos de pH y Eh, el molibdeno se suele encontrar como el anión MoO₄ (molibdato).

Este elemento también se puede derivar de variadas actividades industriales y agrícolas. Se usa en aleaciones de acero inoxidable, además de otros tipos de acero, se usa en pigmentos, cerámicas, lubricantes, catalizadores, y fertilizante. También se puede propagar en el ambiente por la combustión de combustibles fósiles y por drenajes mineros (Smedley et al, 2014).

Las dosis altas de molibdeno pueden ser perjudiciales, con síntomas como la diarrea, anemia y gota, además la exposición prolongada se vincula con debilidad, fatiga, falta de apetito, anorexia, dolor articulas y temblores (WHO, 2011b).

En Chile no hay restricciones para el molibdeno, según la normativa de agua potable, pero sí lo hay para la normativa de agua de riego, que establece un límite de 0,01 mg/L de éste. De las muestras, solamente una supera este límite, Trumao (0,0141 mg/L), el resto de las muestras se encuentra relativamente lejos del límite, como se observa en la Tabla 25, Figura 80, Figura 81 y Figura 82.

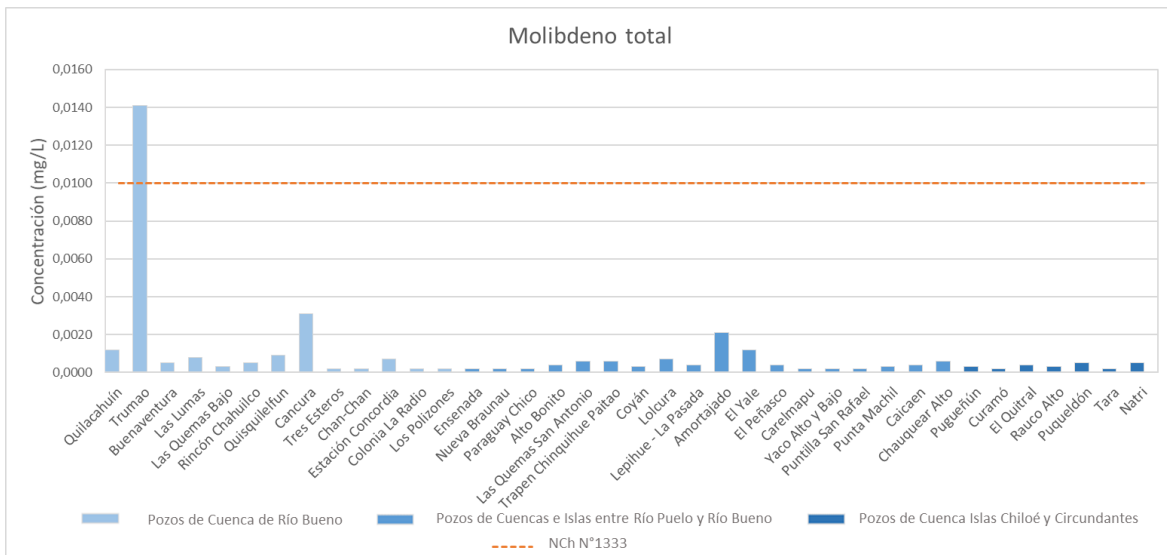


Figura 80: Gráfico de concentraciones de molibdeno en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

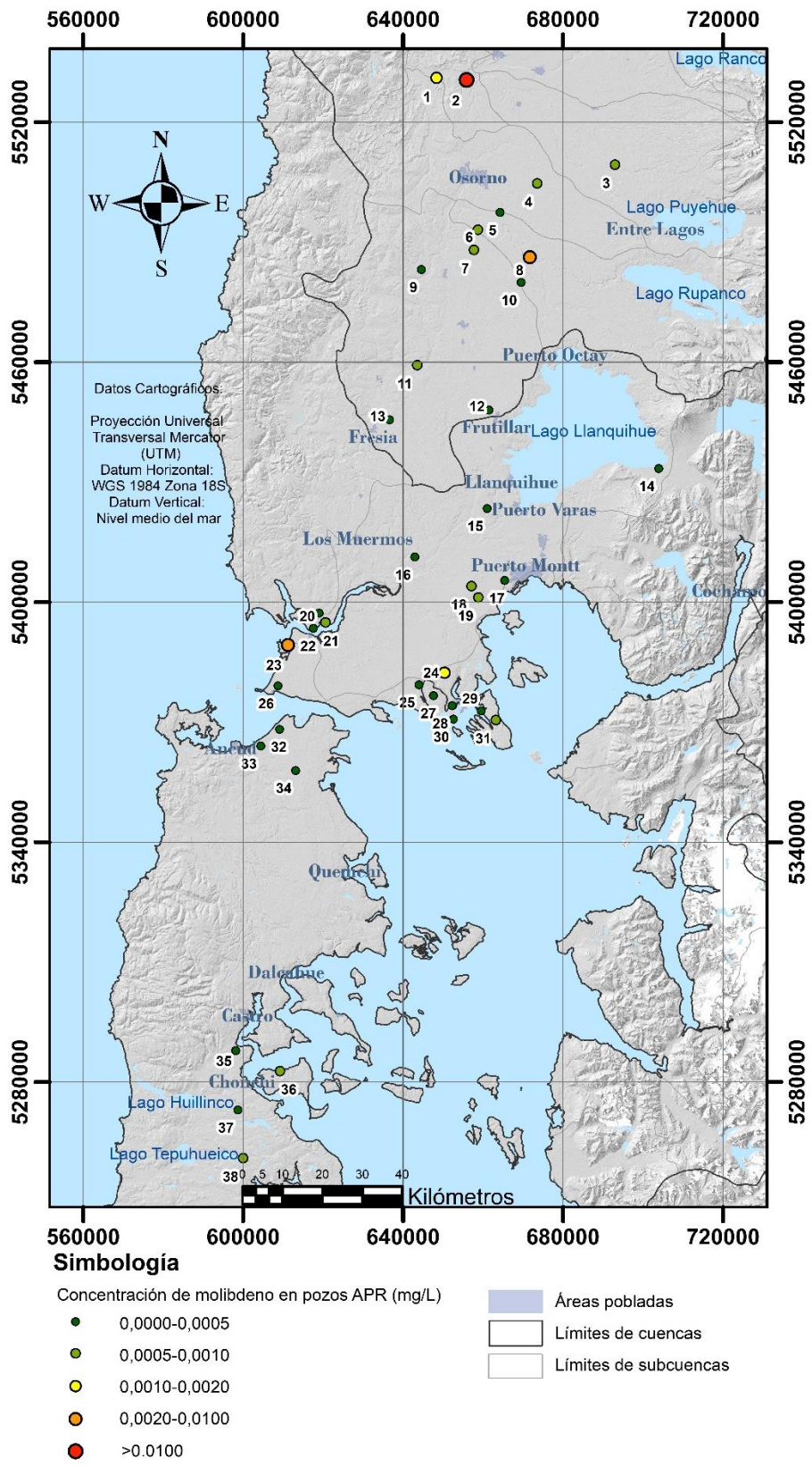


Figura 81: Mapa de distribución de concentraciones de molibdeno en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Elaboración propia.

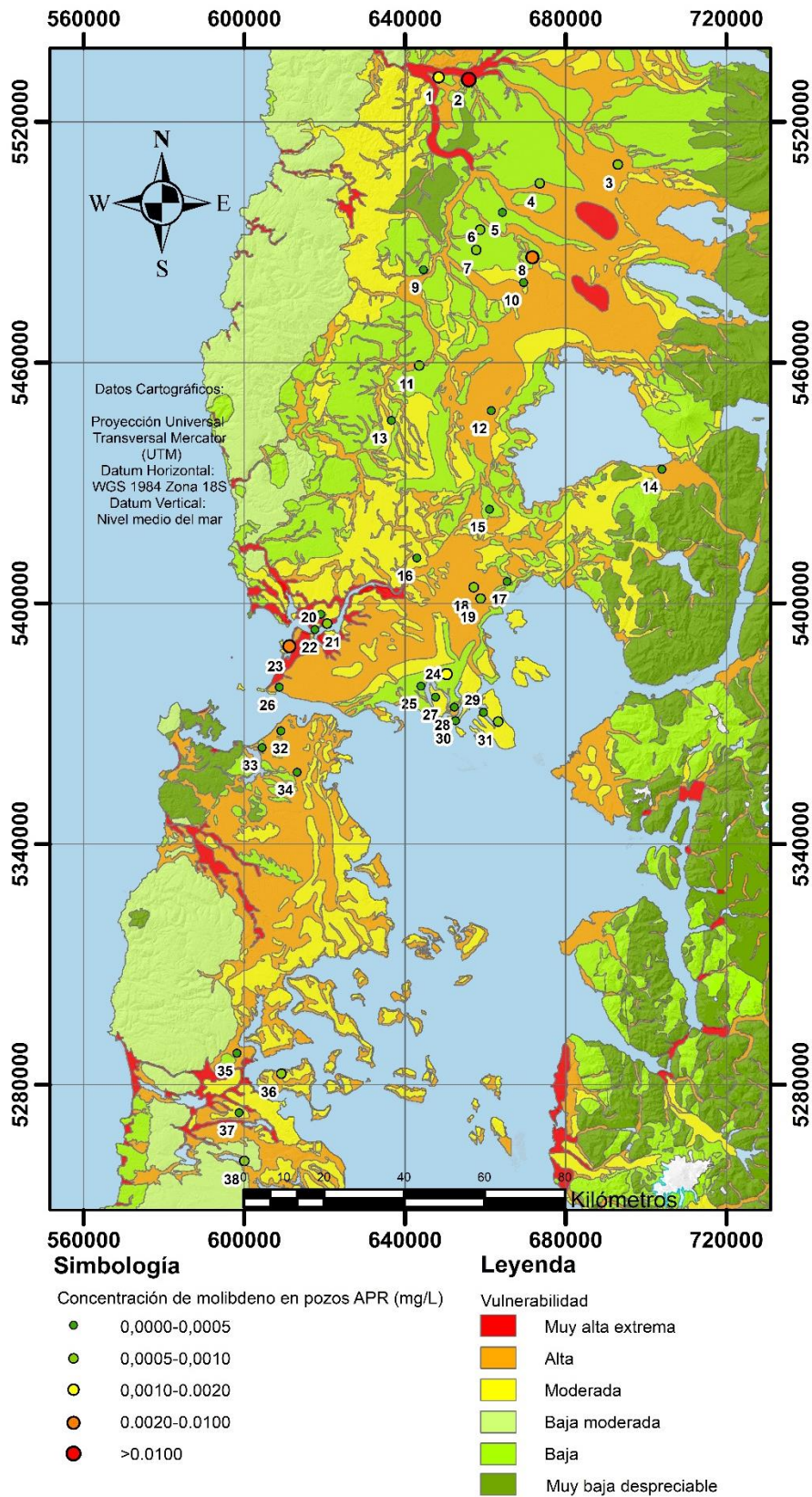


Figura 82: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de molibdeno en los pozos APR (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.2.7. Níquel

El níquel se manifiesta predominantemente en las aguas naturales en la forma del ión de coordinación hexaaquaníquel (II) ($[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$) entre los pH 5 a 9 (IPCS, 1991), en menor medida forma complejos con los ligantes hidroxilo (OH^-), sulfato (SO_4^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), cloro (Cl^-) y amina (NH_3). La concentración de éste en las aguas depende del uso del suelo, pH y la profundidad del pozo, aunque en general las muestras toman medidas de menos de 0,01 mg/L (ICPS, 1991).

En las aguas de la región todas las muestras están alrededor o en menor concentración de lo dicho anteriormente, y también están muy por debajo de la NCh N°1333 para agua de riego de 0,2 mg/L (ver Tabla 25, Figura 83, Figura 84 y Figura 85), dónde sólo destacan por su concentración los APR Buenaventura y Chauquear Alto, pero aun así, siguen estando muy por debajo del límite.

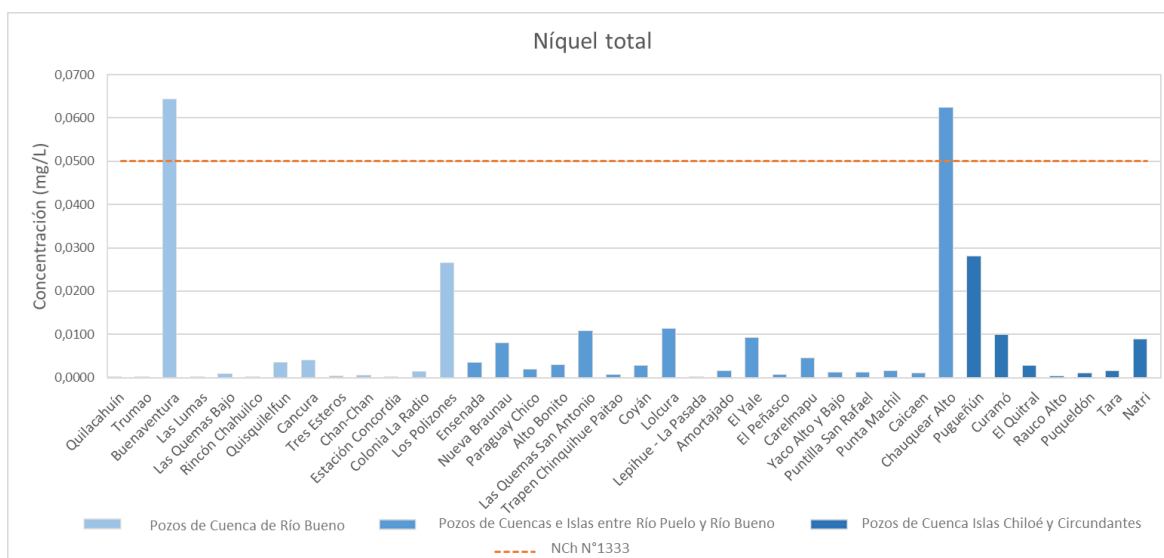


Figura 83: Gráfico de concentraciones de níquel en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

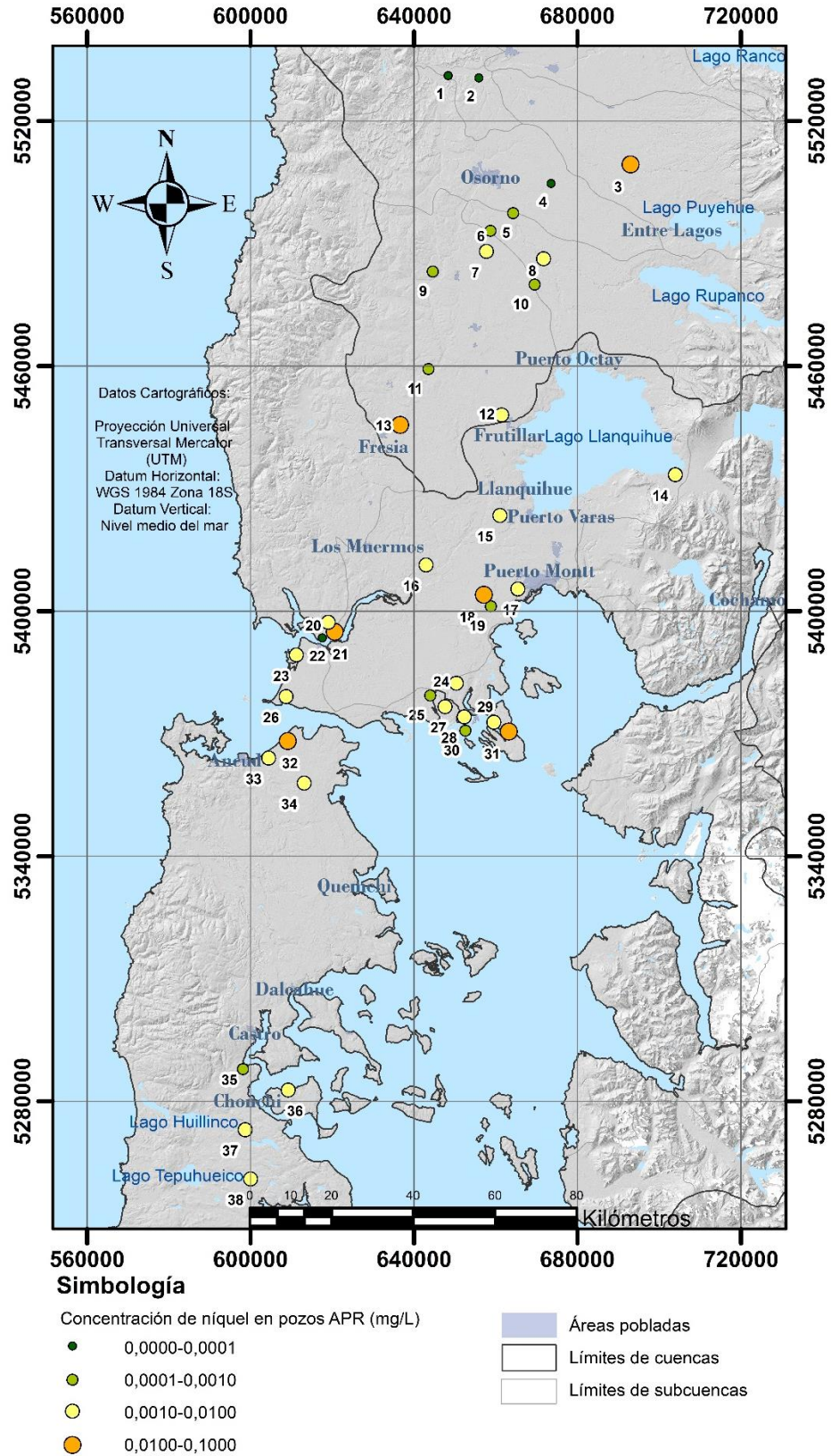


Figura 84: Mapa de distribución de concentraciones de níquel en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Elaboración propia.

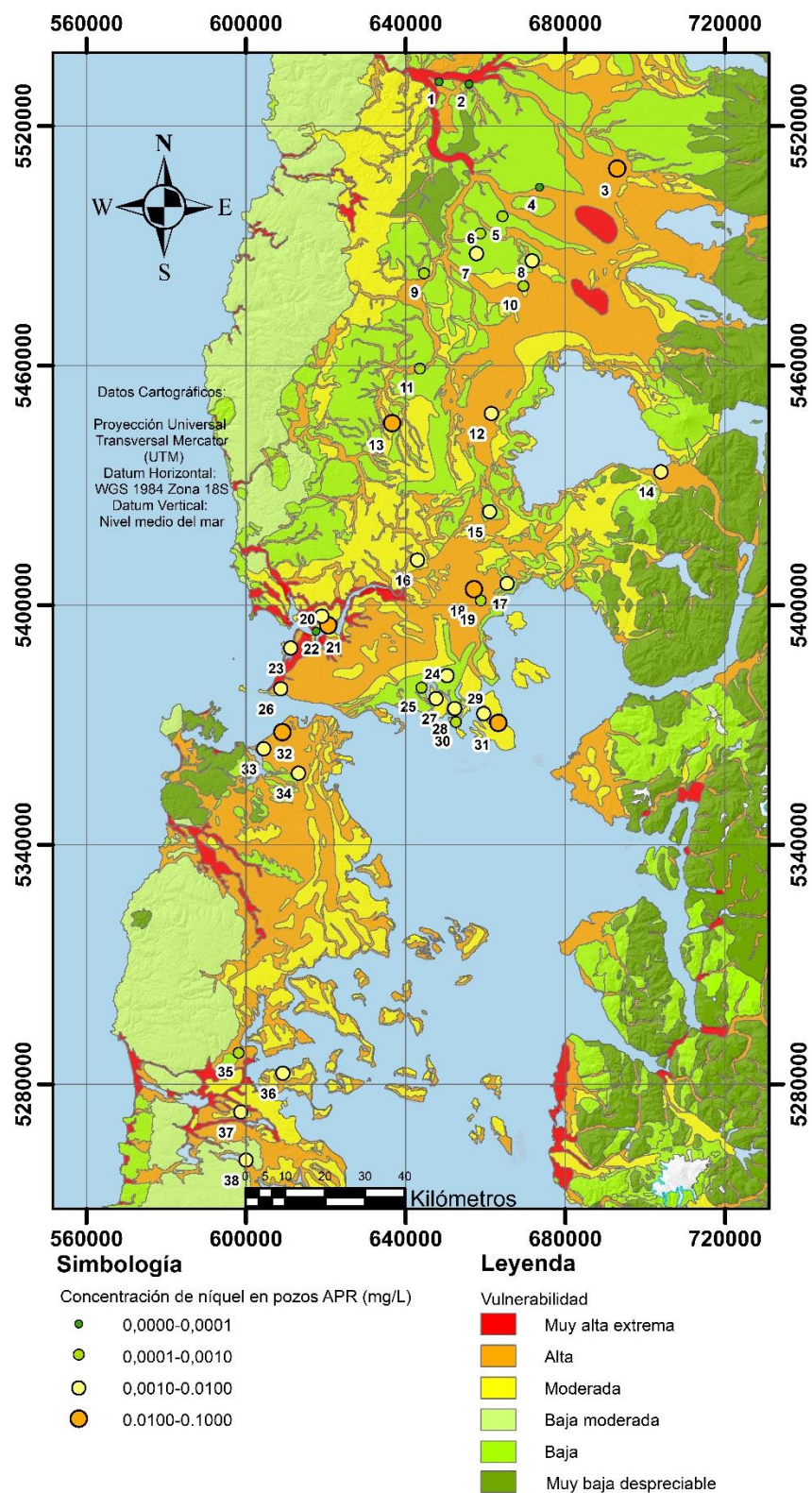


Figura 85: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de níquel en los pozos APR (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.2.8. Plomo

El plomo está presente en todo tipo de rocas en un amplio rango de concentraciones. El metal es liberado durante la alteración de los minerales y está presente en el suelo, agua y aire. Éste es absorbido por las plantas desde el suelo y así entra en la cadena alimenticia. Sin embargo, ya que el plomo es tóxico para la mayoría de las plantas, sus concentraciones en plantas son generalmente bajas (Mora, 2002).

Se ha generado una enorme cantidad de plomo a través de fuentes antropogénicas, aunque algunas naciones han reducido las emisiones de este metal, particularmente por medio del control de la combustión de gasolina con plomo, la concentración del mismo en el medio ambiente en todo el mundo permanecerá alta por muchos años (Moore, 1991).

En general, el agua superficial y el agua subterránea tienen bajas concentraciones de plomo, debido a que la mayoría de los minerales de plomo (por ejemplo, $PbCO_3$ y $PbSO_4$) tienen bajas solubilidades. La entrada de agentes contaminantes como el plomo en el manto acuífero subterráneo, puede tener lugar de muy diversas maneras. Los materiales que, como se ha visto inician su trayectoria en la superficie del terreno, están sujetos a una serie de procesos entre los que se encuentran la lixiviación, la infiltración a través de la zona no saturada del terreno y la llegada al nivel freático, es decir, al acuífero, algunos materiales pueden llegar al acuífero inmediatamente, como en el caso de la inyección directa de aguas residuales (Mora, 2002).

Las aguas muestreadas tienen concentraciones bastante bajas de plomo (Tabla 25, Figura 86, Figura 87 y Figura 88), todas menores a 0,01 mg/L, y considerando que la NCh N°409 establece un límite de 0,05 mg/L y la norma NCh N°1333 uno de 5 mg/L, todas las aguas cumplen con los estándares.

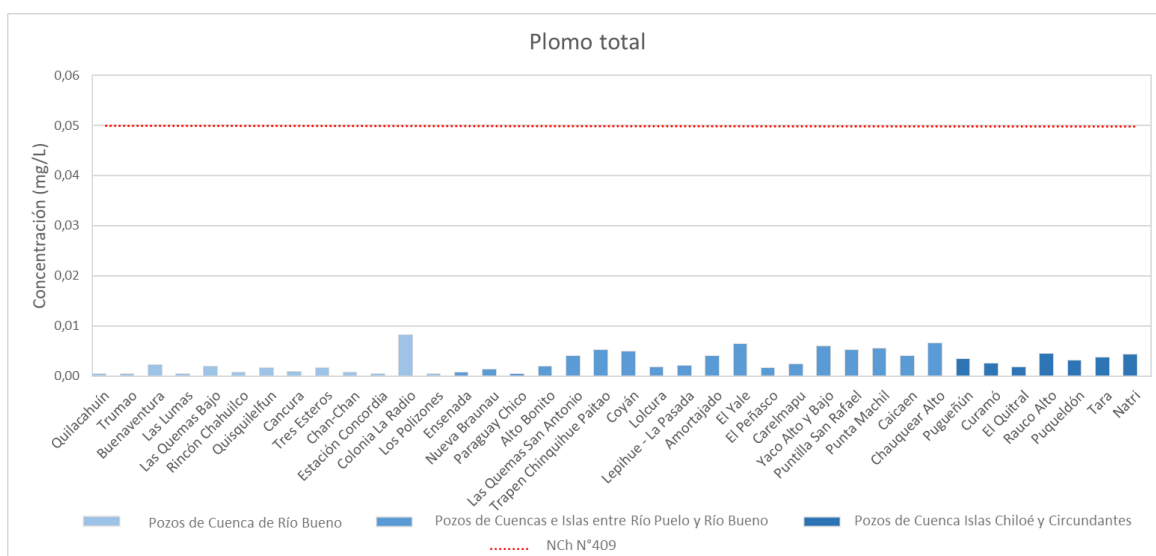


Figura 86: Gráfico de concentraciones de plomo en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

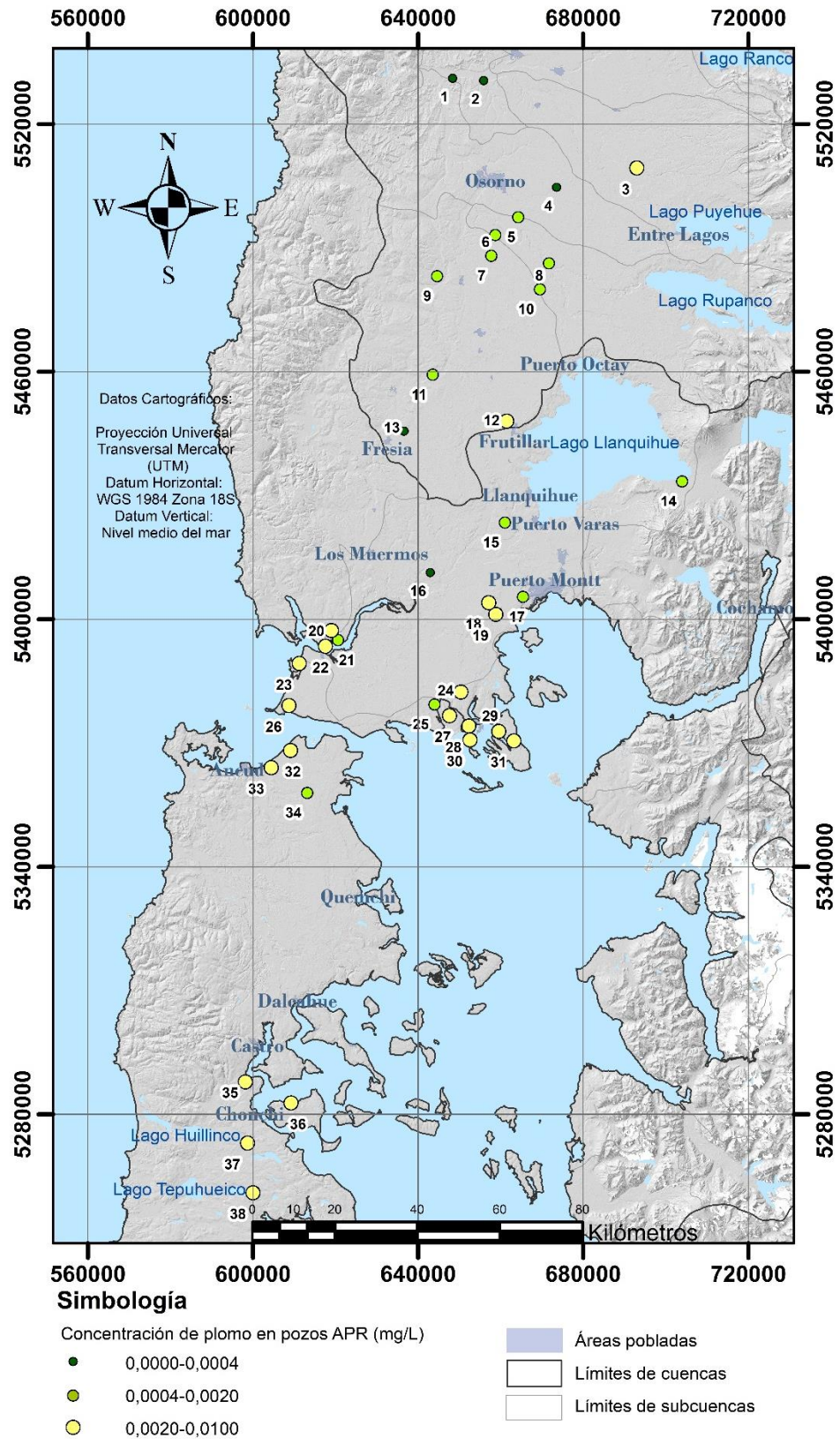


Figura 87: Mapa de distribución de concentraciones de plomo en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Elaboración propia.

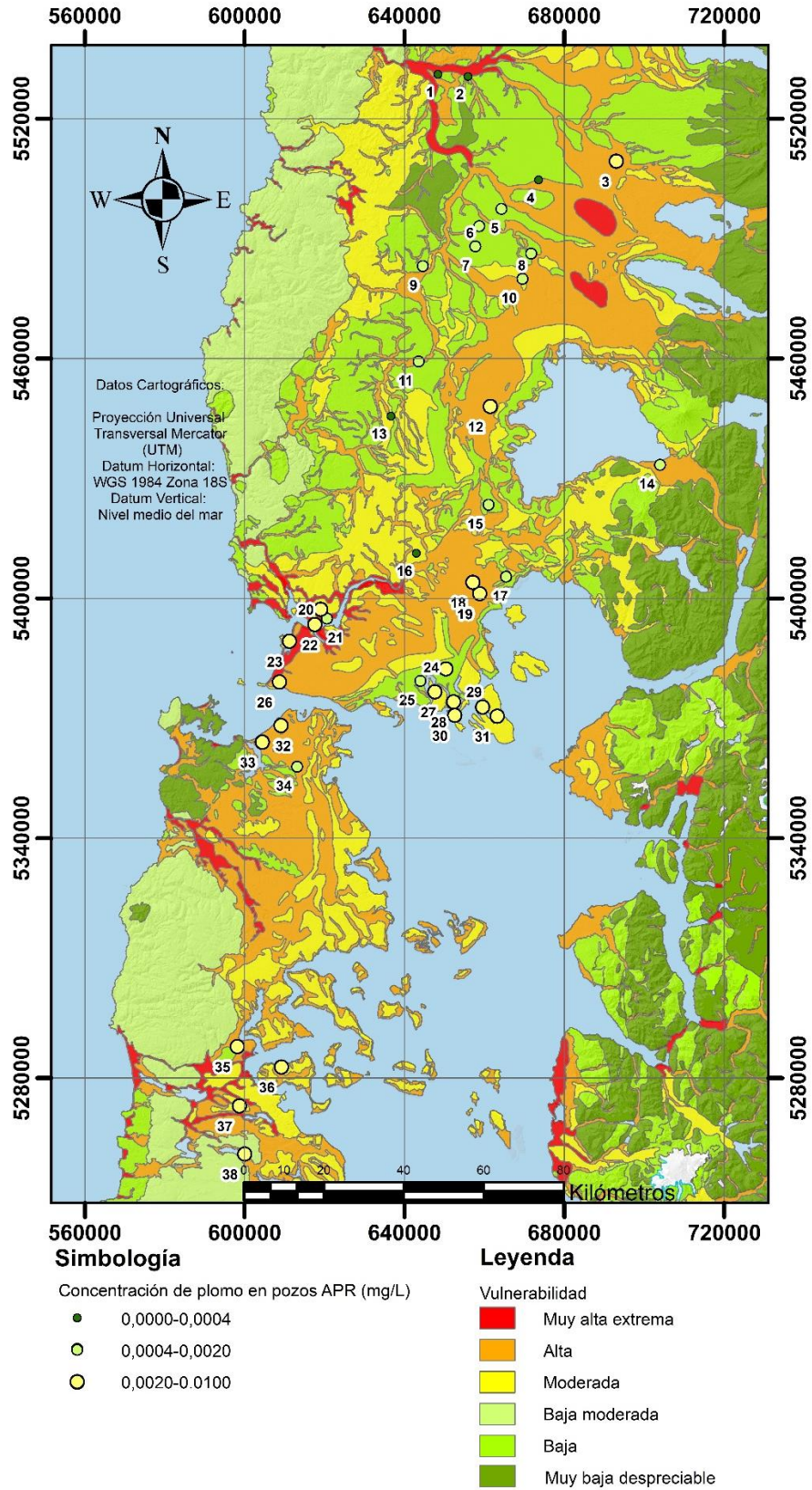


Figura 88: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de plomo en los pozos APR (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.2.9. Zinc

El zinc se encuentra en minerales como la esfalerita y la smithsonita, minerales que son bastante insolubles en las condiciones típicas de aguas subterráneas (Lenntech, 2021).

En aguas frescas, la concentración es normalmente menor que 0,040 a 0,060 mg/L (Eisler, 1993), así que, por lo que se ve en la Tabla 25, Figura 89, Figura 90 y Figura 91, los APR están todos cercanos a los rangos normales de agua dulce, siendo Tres Esteros el único que sobresale con 0,2193 mg/L, aun así, todos cumplen por un orden de magnitud las normativas chilenas vigentes, que dan un límite de 3 mg/L de zinc para agua potable y de 2 mg/L para agua de riego.

En general es posible observar una dispersión baja, pero algo más baja en zonas costeras, siendo la cuenca del río bueno la que en general tiene mayores concentraciones.

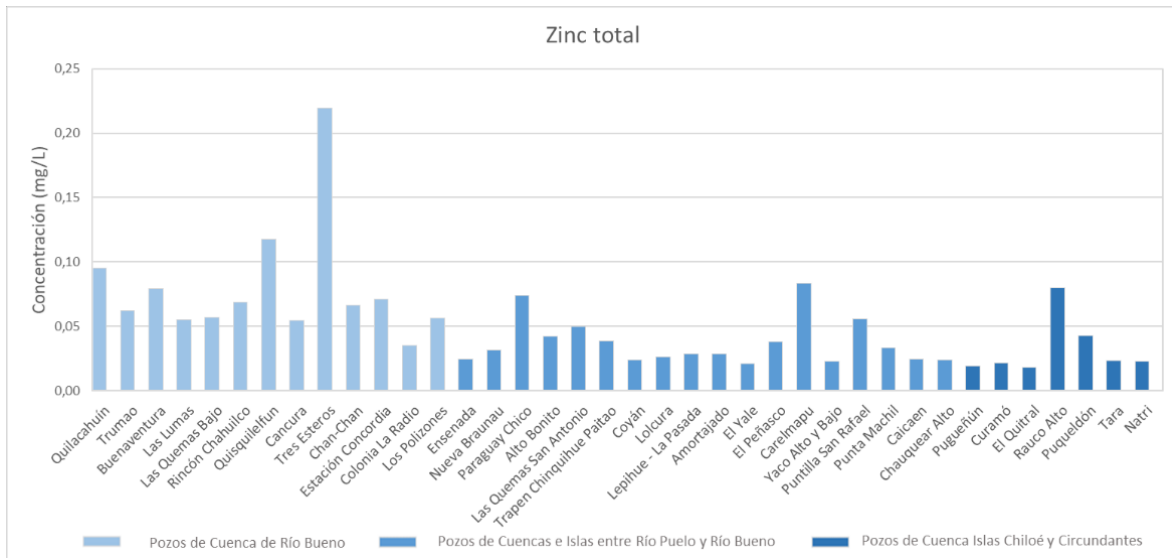


Figura 89: Gráfico de concentraciones de zinc en los pozos de la Región de Los Lagos. Fuente: Elaboración propia.

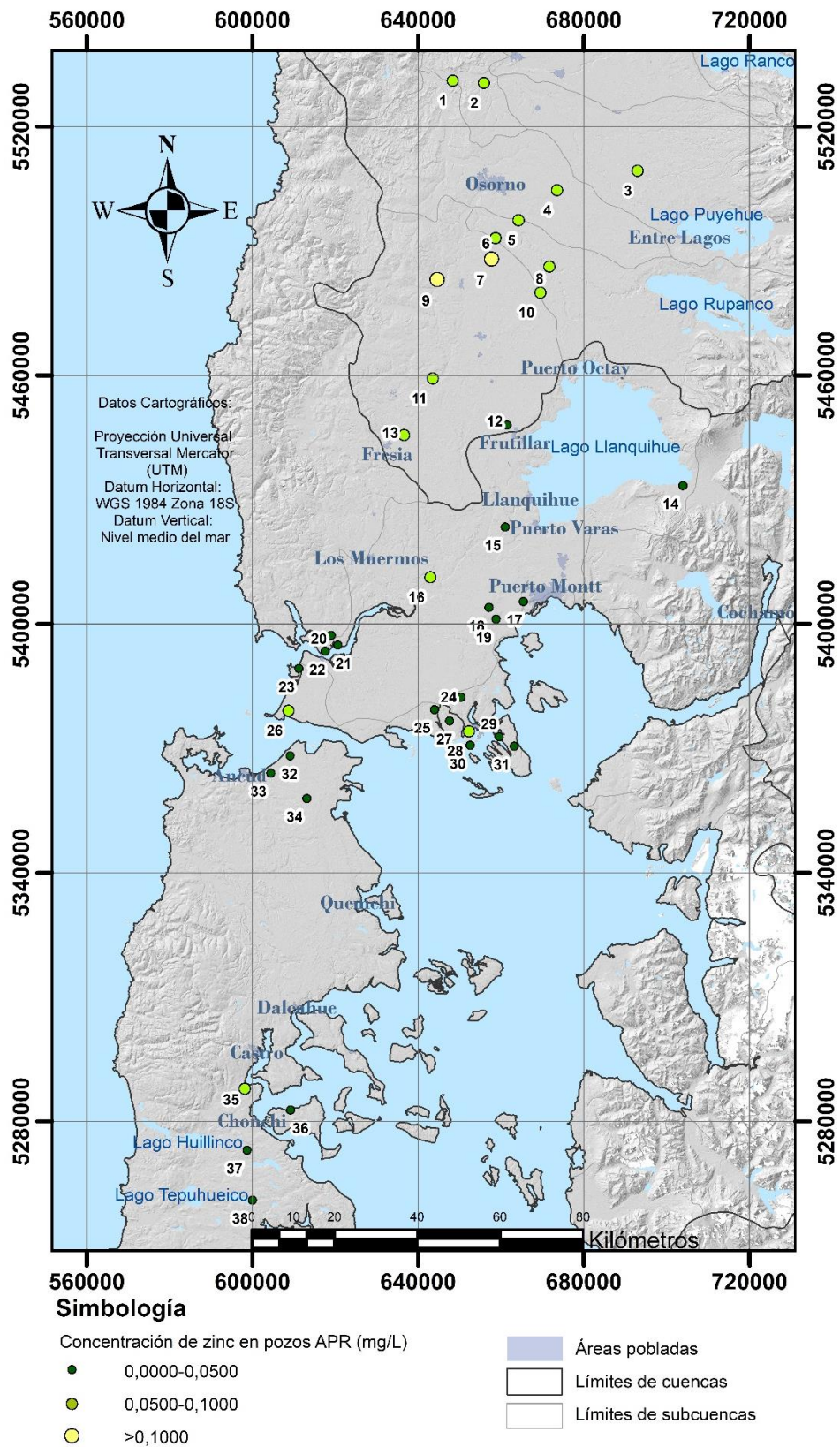


Figura 90: Mapa de distribución de concentraciones de zinc en los pozos de la Región de Los Lagos (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Elaboración propia.

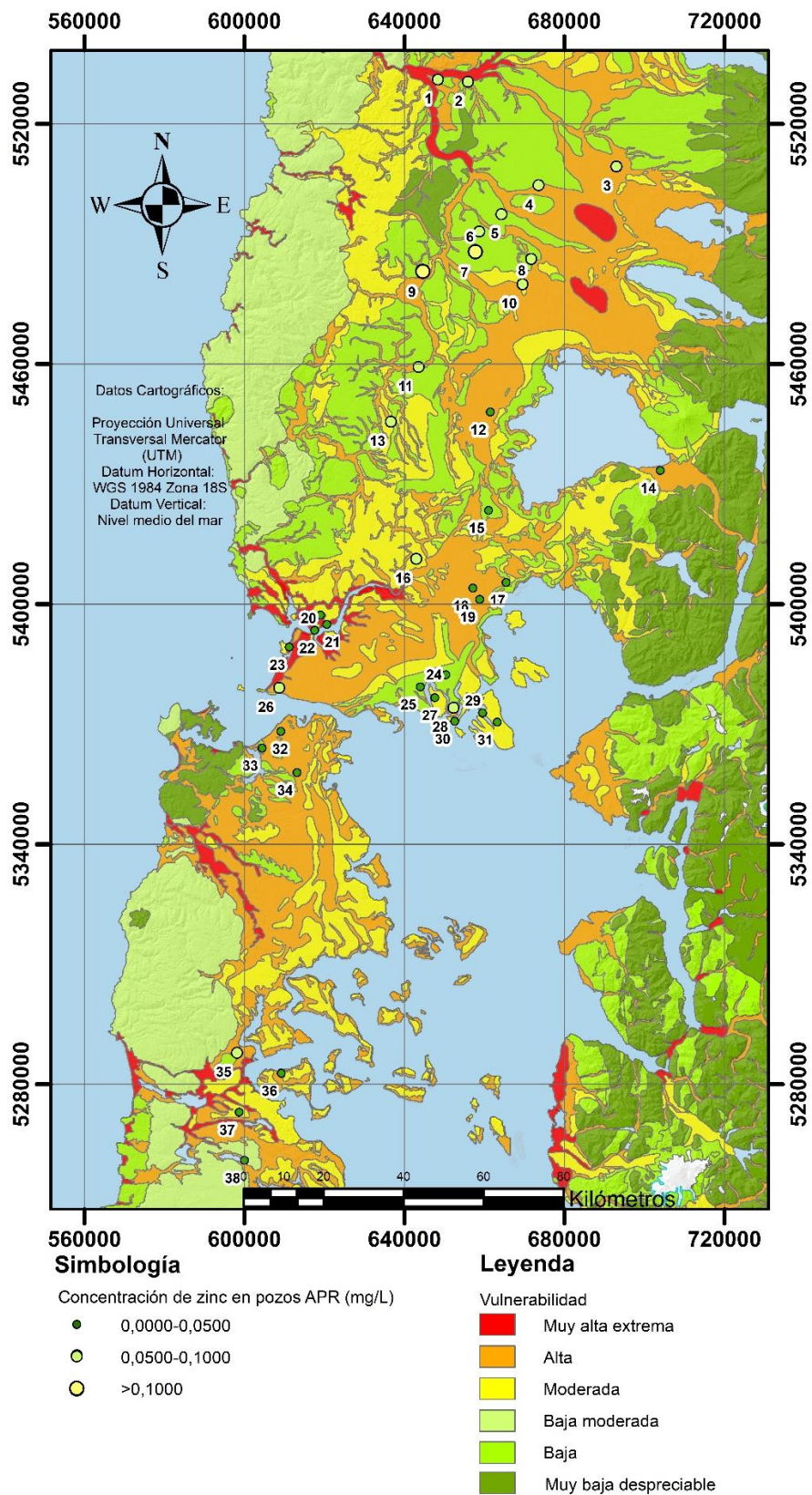


Figura 91: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentración de zinc en los pozos APR (ver numeración en Tabla 25). Fuente: Modificado de Wall et al., 2006.

VI.4.3. Resumen de comparación con normativas vigentes

El número de pozos que caen fuera de las normativas vigentes (NCh N°409 y N°1333) se resumen en la Tabla 26 y Tabla 27. En la Tabla 28, se muestran todos los pozos con las concentraciones de los parámetros que en alguna muestra superaron el límite de alguna normativa actual

Tabla 26: Resumen de parámetros medidos, los límites máximos permitidos por las normas chilenas de uso y la cantidad de pozos en la región con valores fuera de norma.

Parámetro	Unidad	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	-	6,5-8,5	5,5 – 9,0	2	0
Sulfato	(SO ₄ ⁻²) mg/L	500,00	250,00	0	0
Cloruro	(Cl ⁻) mg/L	400,00	200,00	2	1
Sodio*	(Na ⁺) %	No se incluye	35	-	8
Calcio	(Ca ⁺²) mg/L	No se incluye	No se incluye	-	-
Magnesio	(Mg ⁺²) mg/L	125	No se incluye	0	-
Nitrato	(NO ₃ ⁻¹) mg/L	50	No se incluye	0	-
Amonio	(NH ⁴⁺) mg/L	1,5	No se incluye	1	-
Arsénico	(As) mg/L	0,01	0,10	0	0
Cadmio	(Cd) mg/L	0,01	0,01	0	0
Cobalto	(Co) mg/L	No se incluye	0,05	-	0
Cobre	(Cu) mg/L	2,0	0,20	0	0
Hierro	(Fe) mg/L	0,3	5,00	17	1
Mercurio	(Hg) mg/L	0,001	0,001	0	0
Manganeso	(Mn) mg/L	0,1	0,20	20	19
Níquel	(Ni) mg/L	No se incluye	0,20	-	0
Plomo	(Pb) mg/L	0,05	5,00	0	0
Selenio	(Se) mg/L	0,01	0,020	0	0
Zinc	(Zn) mg/L	3,0	2,00	0	0
Molibdeno	(Mo) mg/L	No se incluye	0,010	-	1
Plata	(Ag) mg/L	No se incluye	0,2	-	0
Aluminio	(Al) mg/L	No se incluye	5,00	-	0
Total (**)				23	22

* Límite máximo de Sodio para aguas de riego se calcula según el porcentaje de Sodio respecto al total de cationes en mEq/L (Na + Ca + Mg + K).

**Total de pozos con uno o más parámetros fuera de norma, considerando los de la

Tabla 27.

Tabla 27: Clasificación de los pozos estudiados según su salinidad en base a la Norma NCh N°1333 para aguas de riego.

Clasificación	Conductividad Eléctrica (CE)		Sólidos 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	$\text{CE} \leq 750$	36	$\text{SDT} \leq 500$	36
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < \text{CE} \leq 1500$	1	$500 < \text{SDT} \leq 1000$	1
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso	$1500 < \text{CE} \leq 3000$	1	$1000 < \text{SDT} \leq 2000$	1
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadoso	$3000 < \text{CE} \leq 7500$	0	$2000 < \text{SDT} \leq 5000$	0

Tabla 28: Pozos APR y parámetros que superaron al menos un límite de las normativas vigentes de uso (NCh 1333 y NCh 409). En naranja los que superan la NCh N°1333, en rojo los que superaron la NCh N°409 y en morado los que superaron ambas.

N° del pozo	Nombre del Pozo	pH	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Sodio porcentual (%)	Amonio (mg/L)	Cloro (mg/L)	SDT (mg/L)	Hierro (mg/L)	Manganeso (mg/L)	Molibdeno (mg/L)
1	Quilacahuín	7,90	474	55,78	0,98	30,91	380	1,220	0,5950	0,0012
2	Trumao	7,77	1173	71,15	0,40	287,59	784	0,431	0,7024	0,0141
3	Buenaventura	7,27	249	26,86	0,89	3,01	162	3,043	1,0845	0,0005
4	Las Lumas	7,30	180	43,42	2,43	2,82	138	0,465	0,2569	0,0008
5	Las Quemadas Bajo	7,40	164	34,07	0,55	3,26	101	2,574	0,2619	0,0003
6	Rincón Chahuilco	7,38	181	28,40	0,31	3,15	132	0,992	0,2997	0,0005
7	Quisquelefun	7,25	352	30,22	0,99	3,00	220	1,757	0,5171	0,0009
8	Cancura	7,79	223	34,09	0,51	3,72	151	0,056	0,2404	0,0031
9	Tres Esteros	6,93	99	39,66	0,06	2,93	79	0,220	0,0127	< 0,0002
10	Chan-Chan	7,23	125	21,13	<0,04	3,39	88	0,049	0,0012	< 0,0002
11	Estación Concordia	7,39	117	33,07	<0,04	4,56	119	0,011	0,0413	0,0007
12	Colonia La Radio	7,49	130	21,37	0,13	4,23	97	1,081	0,2082	< 0,0002
13	Los Polizones	7,42	119	33,04	<0,04	5,44	94	0,017	0,0008	< 0,0002
14	Ensenada	6,21	100	23,56	<0,04	2,64	75	0,083	0,0002	< 0,0002
15	Nueva Braunau	7,55	158	22,29	0,04	7,11	130	0,020	0,0008	< 0,0002
16	Paraguay Chico	7,49	147	22,26	0,04	3,99	100	0,035	0,0022	< 0,0002
17	Alto Bonito	7,49	192	23,88	0,46	3,23	119	0,672	0,2140	0,0004
18	Las Quemadas San Antonio	7,46	171	28,76	0,58	3,54	104	1,429	0,2337	0,0006
19	Trapen Chiquihue Paitao	7,67	166	24,49	0,39	4,68	112	0,705	0,0829	0,0006
20	Coyán	6,71	129	31,66	<0,04	7,84	126	0,033	0,0031	0,0003
21	Lolcura	7,11	141	32,31	0,06	7,71	110	0,070	0,0015	0,0007
22	Lepihue - La Pasada	8,20	356	15,36	0,77	14,58	274	0,100	0,0566	0,0004
23	Amortajado	7,50	431	73,40	0,69	45,37	287	0,040	0,3417	0,0021
24	El Yale	7,50	253	17,38	0,12	4,92	168	0,090	0,6597	0,0012
25	El Peñasco	7,28	148	23,49	<0,04	4,24	112	0,026	0,0043	0,0004
26	Caremapu	6,44	325	29,06	0,49	36,54	200	25,530	0,3888	< 0,0002
27	Yaco Alto y Bajo	7,45	121	24,45	<0,04	6,32	98	0,149	0,0019	< 0,0002
28	Puntilla San Rafael	7,38	159	22,76	0,04	13,28	112	0,139	0,0147	< 0,0002
29	Punta Machil	7,28	201	21,63	<0,04	7,77	142	0,026	0,0003	0,0003
30	Caicaen	7,52	2045	69,71	<0,04	604,26	1206	0,037	0,0010	0,0004
31	Chauquear Alto	7,36	179	35,15	1,03	8,05	116	2,649	0,2426	0,0006
32	Pugueñún	6,81	224	27,14	<0,04	12,81	136	4,758	0,3920	< 0,0002
33	Curamó	7,46	303	24,95	0,10	13,26	152	2,625	0,3225	< 0,0002
34	El Quitral	6,84	194	19,95	<0,04	6,93	132	4,201	0,2810	0,0004
35	Rauco Alto	7,29	91	38,70	0,19	7,80	64	0,040	0,0011	0,0003
36	Puqueldón	7,82	148	29,46	0,14	10,47	112	0,117	0,2064	0,0005
37	Tara	6,64	173	26,64	0,06	8,91	130	0,154	0,0046	< 0,0002
38	Natri	7,88	204	30,32	0,28	6,92	144	0,353	0,1204	0,0005

VII. CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

VII.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS LOCALES

La elección de los 2 parámetros químicos locales se realizó en base a lo que sugiere la DGA (2009), en su estudio "Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos", en donde se sugiere que los parámetros cumplan una o más cualidades de las siguientes:

- Parámetros más abundantes con respecto a una de las normas consideradas.
- Parámetros más riesgosos para la salud.
- Parámetros minoritarios de mayor concentración.

- d. Parámetros no correlacionados y representativos de actividades antrópicas distintas.

Por lo que se observa en la Tabla 28, claramente el manganeso es el elemento que en mayor número de pozos cumple los puntos “a” y “c” ya mencionados, pues en 19 pozos supera ambas normativas (NCh N°409 y N°1333) y en otro solamente la de agua potable, como ya se explicó en la sección “VI.4.2.5. Manganeso” este elemento, aunque sigue en discusión, no es considerado nocivo para la salud en las concentraciones que los pozos APR presentan y tampoco se ha correlacionado a una actividad antrópica. Otro elemento que también cumple con las características “a” y “c” es el hierro, más el uso de éste se descarta porque tiene un comportamiento geoquímico similar con el manganeso y no es sugerible utilizar elementos correlacionables.

Despouy, (2005), propone que los contaminantes de origen naturales típicos de aguas subterráneas en la Región de Los Lagos son el aluminio, níquel, asbesto y antimonio. Considerando que no se tienen datos de asbesto ni de antimonio, y que las concentraciones de aluminio son relativamente bajas en las muestras, se procedió a elegir al níquel como el otro parámetro local.

Se descarta la elección de algún parámetro que pueda provenir de algún origen antrópico, ya que no se logró detectar ningún elemento que se encuentre como un contaminante de presencia regional, que tenga sospecha de ser ocasionado por la acción humana.

VII.2. CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS

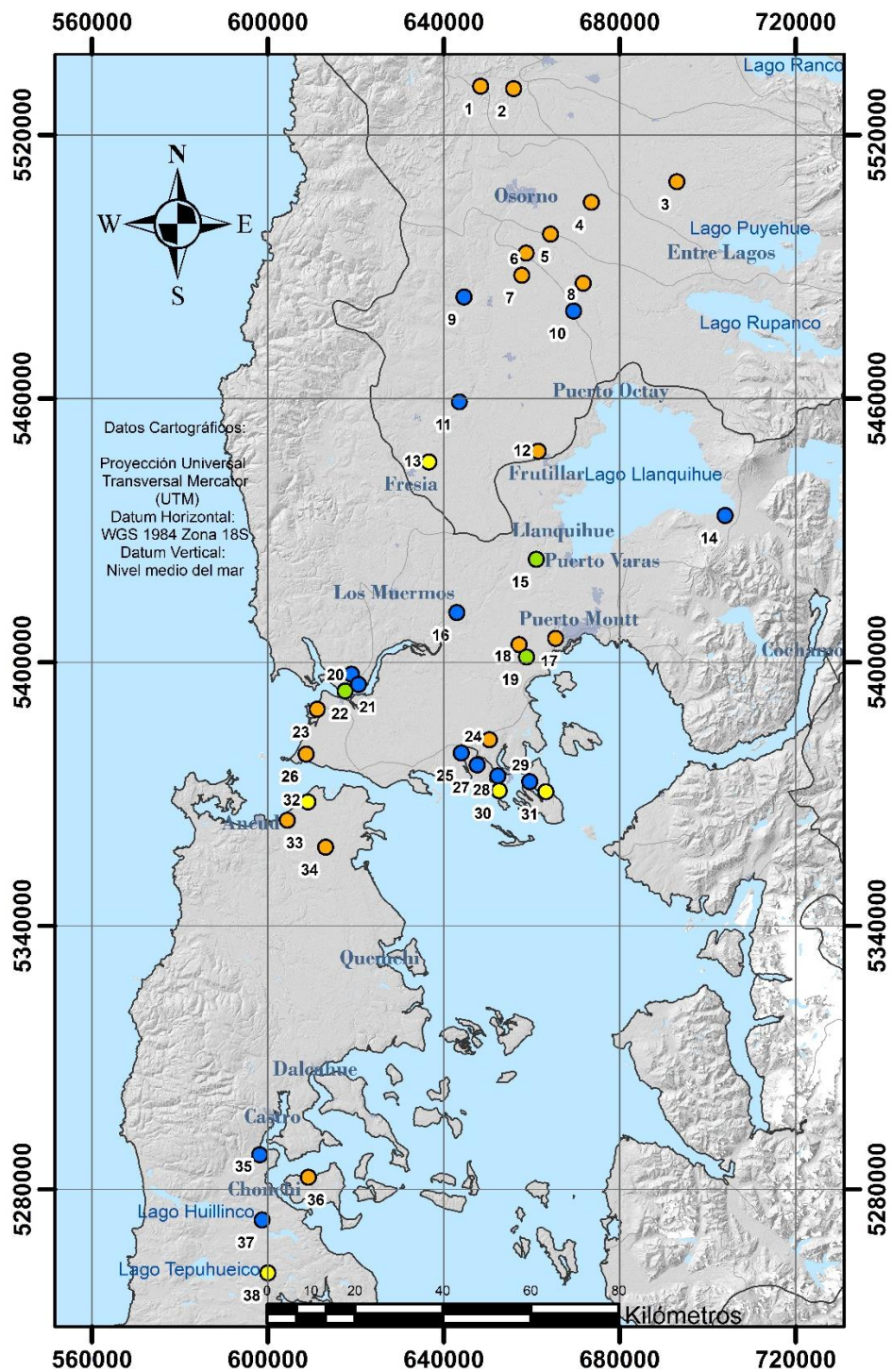
De los resultados analizados, en la determinación de los índices de calidad individual y generales, la región de Los Lagos cuenta con 13 pozos APR (34,21% de las muestras) de calidad “Excepcional”, 3 pozos (7,89%) de clasificación “Buena”, 3 (7,89%) de clasificación “Regular” y 19 (50%) de clasificación Insuficiente (Ver Tabla 29 y Figura 92).

Cabe destacar que la clasificación de calidad “Insuficiente” del agua se debe en la totalidad de los casos a la alta concentración de manganeso en éstas. Uno de los casos de clasificación “Regular” se debió al níquel, uno al sodio y cloruro y el otro al manganeso, mientras que la clasificación “Buena” se debió en uno de los casos al nitrato y en los otros dos al manganeso.

Por último, es importante recordar que los análisis fueron hechos sobre muestras sin tratamientos, por lo que no necesariamente el agua llega a los consumidores con la calidad determinada en este estudio, por otro lado, aunque la concentración del manganeso es alta en los pozos de calidad “Insuficiente”, este elemento no se considera tóxico y los problemas que conlleva la presencia de éste en el agua está más bien relacionado a un mal sabor del agua, a que puede llegar a manchar ropa e instrumentos de plomería y que causa incrustaciones en cañerías.

Tabla 29: Calidad de agua (IC individuales e IC general) de pozos APR de la Región de Los Lagos.

N°	Nombre del Pozo	Índice de calidad Individual									IC general
		Cloruro	Sulfato	Calcio	Magnesio	Sodio	Sólidos Totales Disueltos	Nitrato	Níquel	Manganeso	
1	Quilacahuín	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
2	Trumao	Buena	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
3	Buenaventura	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Regular	Insuficiente	Insuficiente
4	Las Lumas	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
5	Las Quemadas Bajo	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
6	Rincón Chahuilco	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
7	Quisquelefun	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
8	Cancura	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
9	Tres Esteros	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
10	Chan-Chan	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
11	Estación Concordia	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
12	Colonia La Radio	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
13	Los Polizones	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Regular	Excepcional	Regular
14	Ensenada	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
15	Nueva Braunau	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Buena	Excepcional	Excepcional	Buena
16	Paraguay Chico	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
17	Alto Bonito	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
18	Las Quemadas San Antonio	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
19	Trapen Chinguihue Paitao	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Buena	Buena
20	Coyán	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
21	Lolcura	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
22	Lepihue - La Pasada	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Buena	Buena
23	Amortajado	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
24	El Yale	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
25	El Peñasco	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
26	Carelmapu	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
27	Yaco Alto y Bajo	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
28	Puntilla San Rafael	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
29	Punta Machil	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
30	Caicaen	Regular	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Regular	Buena	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Regular
31	Chauquear Alto	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Regular	Insuficiente	Insuficiente
32	Pugueñún	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Regular	Insuficiente	Insuficiente
33	Curamó	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
34	El Quitral	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
35	Rauco Alto	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
36	Puqueldón	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Insuficiente	Insuficiente
37	Tara	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional
38	Natri	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Excepcional	Regular	Regular



Simbología

Calidad de aguas según índice IC general

- Excepcional
- Buena
- Regular
- Insuficiente

- Áreas pobladas
- Límites de cuencas
- Límites de subcuencas

Figura 92: Distribución de pozos APR en zona de estudio con sus índices de calidad. Fuente: Elaboración propia.

VIII. CONCLUSIONES

El presente estudio permite obtener información acerca del estado fisicoquímico actual de las aguas subterráneas de la Región de Los Lagos a partir del monitoreo de 38 pozos APR efectuado en el periodo agosto-septiembre de 2020, distribuidos espacialmente en 3 cuencas distintas.

Los resultados indicaron que la composición química de los acuíferos es principalmente bicarbonatada, con una clasificación catiónica mixta. En general, las fuentes de aguas subterráneas que abastecen los APR presentan valores de Conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales (SDT) característicos de aguas dulces. Se registraron valores de pH entre 6,5 y 7,5 para la mayor parte de los pozos, excepto en 2 de ellos que presentaron un valor fuera de lo establecido en la Norma N°409.

La superación de la normativa vigente de agua potable (NCh N°409) se dio en el pH (2 pozos), amonio (1 pozo), cloruro (1 pozo), hierro (17 pozos) y manganeso (20 pozos) y para la normativa de agua de riego (NCh N°1333) se dio en conductividad eléctrica y SDT (2 pozos), porcentaje de sodio (8 pozos), cloruro (2 pozos), hierro (1 pozo), manganeso (19 pozos) y molibdeno (1 pozo).

Cabe mencionar que esta comparación es solo referencial, ya que las muestras son representativas de la fuente, es decir el acuífero, y no dan cuenta de la calidad del agua después de su potabilización.

Se sospecha de un proceso de intrusión salina en el pozo Caicaen debido a sus altas concentraciones de SDT, cloro, sodio, entre otras sales, y a su ubicación costera, aunque es necesaria una investigación más a fondo para definirlo con claridad.

En relación con la alta concentración de hierro y manganeso en el agua, estos se encuentran en conjunto y de manera natural en las aguas subterráneas, a partir de la disolución por lixiviación. Esta concentración se puede producir debido a un bajo pH (aunque esto no sucede en la mayoría de las muestras) en conjunto con un estado reducido del agua. Si bien no producen un efecto negativo en la salud, altas concentraciones pueden generar complicación en la red de agua potable por operación y mantenimiento de éstas, ya que al contacto con el oxígeno precipitan generando incrustación y en algunas ocasiones obstrucción de las tuberías o válvulas, entre otros. Cabe destacar que este no es el primer estudio que determina altas concentraciones de estos metales en las aguas, puesto que el estudio de SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos (2008), ya había manifestado esta situación.

Por otro lado, cabe mencionar que a pesar de que es estudio de SERNAGEOMIN & GORE Los Lagos (2008), donde se encontraron altos valores de nitrato en la región de Los Lagos para varios pozos, éste presenta valores bajos de este compuesto en los APR muestreados para este informe. Considerando que la presencia de este anión es principalmente debido a intervención antropogénica, por el uso de fertilizantes, se puede inferir que la actividad agrícola en las zonas visitadas se sostiene con una necesidad escasa de fertilizantes que contengan nitrato, o bien, éste no ha tenido el tiempo necesario para percolar a los acuíferos.

A partir del cálculo de índice de calidad de los 38 pozos APR se aprecia que el 34,21% de los pozos estudiados (13 pozos) cuenta con una clasificación "Excepcional", el 7,89% (3 pozos) cuenta con calidad "Buena", el 7,89% con calidad "Regular" y finalmente el 50% restante (19

pozos) corresponde a una clasificación “Insuficiente”, lo último debido en la totalidad de los casos a las altas concentraciones de manganeso.

IX. RECOMENDACIONES

Se sugiere lo siguiente:

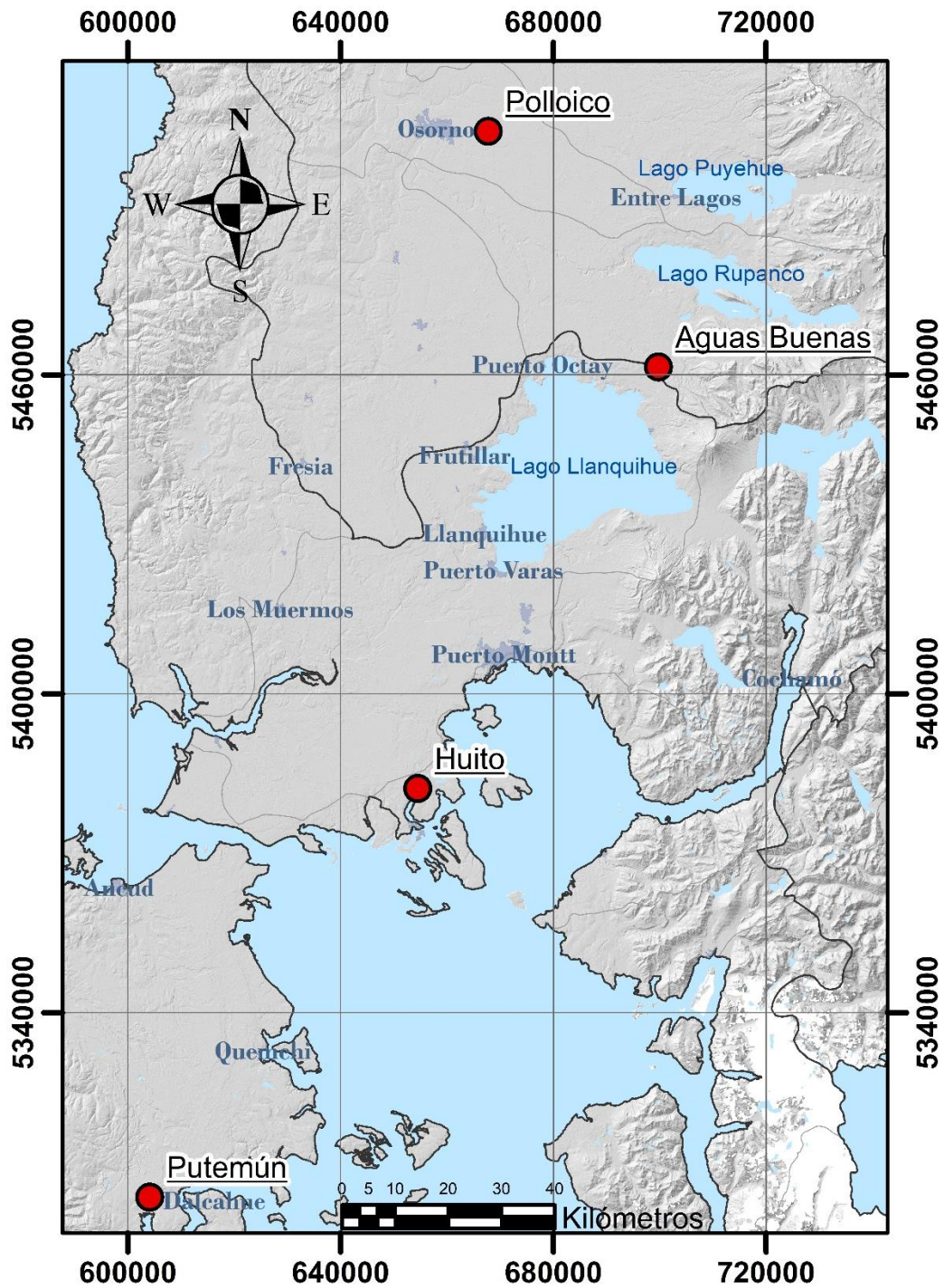
- Implementar un seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en donde se detectaron pozos cuyas concentraciones sobrepasaron la Norma de agua potable (NCh N°409), de agua de riego (NCh N°1333) o ambas (ver Tabla 30), dando preferencia al pozo Caicaen, que podría estar en proceso de contaminación por agua de mar y Trumao que supera varios límites de las normativas (ver Tabla 28).
- Hacer énfasis en el estudio de los elementos hierro y manganeso para futuros estudios de calidad de agua en la región, considerando que son los elementos que superan los parámetros normados en mayor número de muestras. Especialmente para los pozos de calidad “Insuficiente” (ver Tabla 29).
- Aplicar toma de muestras al resto de los pozos APR de la Región no monitoreados (Tabla 31 y Figura 93) y extender el muestreo a las zonas que no se visitaron para esta campaña de terreno, como las zonas costeras y cordilleranas de las provincias de Osorno y Llanquihue, así como la totalidad de la provincia de Palena, que, aunque no sean lugares característicos por acuíferos con alto potencial hidrogeológico, sí ayudaría a dar una visión hidrogeológica más clara de la totalidad de la región y de la calidad de aguas de ésta.
- Considerar los niveles permeables de los pozos en futuros diagnósticos con el fin de determinar variaciones composicionales de las aguas según la profundidad.
- 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.
- Como un criterio general, se recomienda enfocar los muestreos en pozos con la menor profundidad posible y que se encuentren ubicados 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.
- 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 (ver Tabla 28 y Tabla 29), especialmente Trumao y Caicaen, que son los APR que más normativas de calidad de agua sobrepasan.

Tabla 30: Resumen de pozos de seguimiento recomendados.

Nombre del Pozo	Parámetros
Quilacahuín	Sodio porcentual, hierro y manganeso
Trumao	Conductividad eléctrica, SDT, sodio porcentual, cloruro, hierro, manganeso y molibdeno.
Buenaventura	Hierro y manganeso
Las Lumas	Sodio porcentual, amonio, hierro y manganeso
Las Quemadas Bajo	Hierro y manganeso
Rincón Chahuilco	Hierro y manganeso
Quisqueifun	Hierro y manganeso
Cancura	Manganeso
Tres Esteros	Sodio porcentual
Colonia La Radio	Hierro y manganeso
Ensenada	pH
Alto Bonito	Hierro y manganeso
Las Quemadas San Antonio	Hierro y manganeso
Trapen Chinguíhue Paitao	Hierro
Amortajado	Sodio porcentual y manganeso
El Yale	Manganeso
Caremapu	pH, hierro y manganeso
Caicaen	Conductividad eléctrica, SDT, sodio porcentual y cloruro
Chauquear Alto	Sodio porcentual, hierro y manganeso
Pugueñún	Hierro y manganeso
Curamó	Hierro y manganeso
El Quitral	Hierro y manganeso
Rauco Alto	Sodio porcentual
Puqueldón	Manganeso
Natri	Hierro y manganeso

Tabla 31: Pozos APR que no pudieron ser muestreados, con sus coordenadas en UTM WGS 1984, Huso 18S.

Pozo APR	Comuna	Coordenada este	Coordenada norte
Polloico	Osorno	667820	5505741
Aguas Buenas	Puerto Octay	699835	5461393
Huito	Calbuco	654575	5382118
Putemún	Castro	604177	5305260



Simbología

- Áreas pobladas
- Límites de cuencas
- Límites de subcuencas
- APR sin muestrear

Datos Cartográficos:

Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)
 Datum Horizontal: WGS 1984 Zona 18S
 Datum Vertical: Nivel medio del mar

Figura 93: Mapa con ubicación de pozos que no pudieron ser muestreados. Fuente: Elaboración propia.

**LUCIANO MUÑOZ HIDALGO
ESTUDIANTE GEOLOGÍA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

**DANIELA FREDES MUÑOZ
ANALISTA DE DESARROLLO AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

**DIEGO SAN MIGUEL CORNEJO
JEFA DEL AREA DE DESARROLLO AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

X. REFERENCIAS

- Antinao, J., Duhart, P., Clayton, J., Elgueta, S., McDonough, M., (2000). *Área de Ancud-Maullín, Región de Los Lagos*, mapa geológico no. 17: Sernageomin, 1: 100.000 scale, 1 sheet.
- ATSDR. (2000). *Toxicological profile for manganese*. Atlanta, GA, United States Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- Ayala, Cabrera y asociados LTDA. AC Ingenieros Consultores LTDA., (2003). *Diagnóstico Actual del Riego, y Drenaje en Chile y su Proyección. Informe Final. Diagnóstico del Riego y Drenaje, en la X Región*.
- Banco Mundial. (2019). *Quality Unknown - The invisible water crisis*. Washington, DC: World Bank Group.
- Bean, E. (1974). *Potable water quality goals*. Journal of the American Water Works Association, 66:221.
- Biblioteca del Congreso Nacional (BCN). (Enero de 2021). *Sistema Integrado de información Territorial*. www.bcn.cl
- Cembrano, J., Hervé, F., Lavenu, A. (1996). *The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile*. Tectonophysics 259:55–66.
- Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. (2016). *Análisis de las condicionantes para el desarrollo hidroeléctrico en las cuencas del Maule, Biobío, Toltén, Valdivia, Bueno, Puelo y Yelcho, desde el potencial de generación a las dinámicas socioambientales. Grupo de cuencas Número 2: Valdivia, Bueno, Yelcho, Puelo*.
- Custodio, E., Llamas, M. (1976). *Hidrología subterránea*, Ediciones Omega, Barcelona, 2 Vol: 1-2350 (2ª, edic, 1985).
- Department of National Health and Welfare (1978). *Guidelines for Canadian drinking water quality. Supporting documentation*. Ottawa, Canadá.
- Despouy, I. (2005). *Caracterización de fuentes y Análisis Crítico de los Tratamientos de Agua Potable en Chile*. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile [Libro]. - Santiago: [s.n.].
- DeVries, T., Stott, L., Zinsmeister, W. (1984). *Neogene fossiliferous deposits in southern Chile*. Antarct. J. U. S. 29, 12-13.
- Dirección General de Aguas (DGA). (1986a). *Mapa Hidrogeológico de Chile*. Escala 1: 1.000.000.
- Dirección General de Aguas (DGA). (1986b). *Estudio del mapa hidrogeológico nacional. Escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000*.
- Dirección General de Aguas (DGA), CADE IDEPE Consultores en Ingeniería. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del río Valdivia. Informe técnico elaborado para la Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile 129p*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2009). *Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos, Realizado por Geohidrología Consultores Ltda. S,I,T, N° 183, Santiago, Región Metropolitana, Chile, Ministerio de Obras Públicas*.

- Dirección General de Aguas (DGA). (2010). *Mejoramiento y Ampliación de Red de Aguas Subterráneas, Regiones VII a X, Realizado por BF Ingenieros Civiles*, Santiago, Región Metropolitana, Chile, Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2012). *Investigación recarga artificial de acuíferos cuencas de los ríos Chopa y Quilimarí, Región de Coquimbo, Realizado por AC Ingenieros Consultores Ltda*, Santiago, Región Metropolitana, Chile, Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2017). *Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la Región de Coquimbo*, Ministerio de Obras Públicas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH), S.D.T N°397, Santiago.
- Dirección General de Aguas (DGA). (Enero de 2021). *Inventario Público de Cuencas Hidrográficas* [Archivo Excel]. Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos. https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/inventario_cuencas_lagos/Paginas/default.aspx
- Dirección Regional de Planeamiento MOP, Región de los Lagos. (2012). *Plan regional de infraestructura y gestión del recurso hídrico al 2021*.
- Drever, J. (1997). *The geochemistry of Natural Waters*, Prentice Hall, 3ª ed, 436 pp.
- Duhart, P. (2008). *Procesos metalogénicos en ambientes de arco magmático tipo andino, caso de estudio: mineralização da região dos Andes patagônicos setentrionais do Chile*. PhD thesis. Universidade de São Paulo, Brazil, p. 216.
- Duhart, P., Adriasola, A. (2010). *New time-constraints on provenance, metamorphism and exhumation of the Bahía Mansa Metamorphic Complex on the Main Chiloé Island, south-central Chile*. Revista Geológica de Chile 35 (1): doi:<http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV35n1-a04>
- Eisler, R. (1993). *Zinc Hazards to Fish, Wildlife, and Invertebrates: A Synoptic Review* (Report Report 26; Biological Report 10.; Contaminant Hazard Reviews). USGS Publications Warehouse. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/5200116>
- Elgueta, S., McDonough, M., Le Roux, J., Urqueta, E., Duhart, P. (2000). *Estratigrafía y sedimentología de las cuencas terciarias de la Región de Los Lagos (39°-41° 30'S)*. Boletín la Subdirección Nac. Geol. 57, 1-50.
- Encinas, A., Pérez, F., Nielsen, S., Finger, K., Valencia, V., Duhart, P. (2014). *Geochronologic and paleontologic evidence for a Pacific–Atlantic connection during the late Oligocene–early Miocene in the Patagonian Andes (43–44°S)*. Journal of South American Earth Sciences, 55, 1–18. doi: 10.1016/j.jsames.2014.06.008
- Environmental Protection Agency. (2011). *Integrated Water Quality Report*, sudeste de Irlanda.
- Essilfie-Dughan, J., Pickering, I., Hendry, M., George, G., Kotzer, T. (2011). *Molybdenum Speciation in Uranium Mine Tailings Using X-Ray Absorption Spectroscopy*. Environmental Science & Technology, 45(2), 455–460. doi: 10.1021/es102954b
- Fernández, L., Litvak, V., Echaurren, A., Iannelli, S., Encinas, A., Folguera, A., Valencia, V. (2018). *Late Eocene volcanism in North Patagonia (42°30'–43°S): Arc resumption after a stage of within-plate magmatism*. Journal of Geodynamics, 113, 13–31. doi: 10.1016/j.jog.2017.11.005
- Foster, S. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*. En: W. Van Duijvenbooden and H.G. van Waegeningh, eds. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. TNO, The Hague, pp. 69-86.

- Giacosa, R., Afonso, J., Heredia, N., Paredes, J. (2005). *Tertiary tectonics of the sub Andean region of the North Patagonian Andes, southern Central Andes of Argentina (41°-42°30'S)*. J. South Am. Earth Sci. 20, 157-170.
- Goldberg, S., Forster, H., Godfrey, C. (1996). *Molybdenum Adsorption on Oxides, Clay Minerals, and Soils*. Soil Science Society of America Journal, 60(2), 425. doi: 10.2136/sssaj1996.03615995006000020013x
- Griffin, A. (1960). *Significance and removal of manganese in water supplies*. Journal of the American Water Works Association, 52:1326.
- Hervé, F., Finger, K., Valencia, V., Gianni, G., Álvarez, O. (2015). *Late Oligocene-Early Miocene submarine volcanism and deep-marine sedimentation in an extensional basin of southern Chile. Implications on the tectonic development of the North Patagonian Andes*. Geol Soc Am Bulletin 128:807–823.
- Hervé, F., Sanhueza, A., Silva, C., Pankhurst, R., Fanning, M., Campbell, H., Crundwell, M. (2001). *A Neogene age for Traiguén Formation, Aysén, Chile, as revealed by shrimp U-Pb dating of detrital zircons*. In: III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Pucón, Chile, pp. 570-574.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (1987). *Norma Chilena Oficial Nch1333 of, 78, requisitos de calidad del agua para diferentes usos*.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2005). *Norma Chilena Oficial NCh409/1 of, 2005, requisitos de calidad del agua potable*.
- IPCS. (1991). *Nickel*. Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety (Environmental Health Criteria 108).
- IPCS. (2002). *Principles and methods for the assessment of risk from essential trace elements*. Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety (Environmental Health Criteria 228).
- Katz, H. (1965). *Informe preliminar sobre las nuevas perspectivas en la Cuenca de Osorno-Pto. In: Montt, en vista del perfil atravesado por el pozo Puerto Montt 1 y del estudio de las Formaciones sedimentarias en Ayacara y Puerto Manzano*. Empresa Nacional del Petróleo de Chile (ENAP), p. 21. Informe 553.1.008.
- Kehew, A. (2001). *Applied Chemical Hydrogeology*, Prentice Hall, 368 pp.
- Kiel, S., Nielsen, S.N. (2010). *Quaternary origin of the inverse latitudinal diversity gradient among southern Chilean mollusks*. Geology 38, 955e958.
- Kondakis, X., Makris, N., Leotsinidis, M., Prinou, M., Papapetropoulos, T. (1989). *Possible Health Effects of High Manganese Concentration in Drinking Water*. Archives of Environmental Health: An International Journal, 44(3), 175–178. doi: 10.1080/00039896.1989.9935883
- Lavenu, A., Cembrano, J. (1999). *Compressional- and transpressional-stress pattern for Pliocene and Quaternary brittle deformation in fore arc and intra-arc zones (Andes of Central and Southern Chile)*. J Struct Geol 21:1669–1691.
- Lenntech. (Febrero de 2021). *Tratamiento y purificación de agua*. <https://www.lenntech.es/>
- Lillo, J. (2003). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, www.ucm.es, Madrid, España.

- Moore J. (1991). *Inorganic Contaminants of surface Waters*. Research and monitoring priorities. Springer - Veriag, New York Inc. p. 155-171.
- Mora, J. (2002). *Migración de plomo a través de facies hidroquímicas del agua subterránea*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- Muñoz, J. (1997). *Sistemas estructurales cenozoicos en la Región de los Lagos, Chile: interpretación de lineamientos en imagen radarsat*. En 8avo Cong. Geol. Chileno, Actas, I, 163-168.
- Nielsen, S., Glodny, J. (2009). *Early Miocene subtropical water temperatures in the southeast Pacific*. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 280, 480-488.
- Nielsen, S., Encinas, A. (2014). *The genus Struthiochenopus (Gastropoda, Aporrhaidae): new Miocene records from southern Chile*. J. Paleontol. 88, 152-159.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1995). *Guías para la calidad del agua potable. Recomendaciones (segunda edición)*. Organización Mundial de la Salud, Vol. 1, 195 p. Ginebra.
- Pankhust, R., Hervé, F., Rojas, L., Cembrano, J., (1992). *Magmatism and tectonics in continental Chiloé, Chile (42°-42°30')*. Tectonophysics 205, 283-294.
- Quiroz, D., Duhart, P., Crignola, P. (2004). *Geología del área Chonchi-Cucao, Región de Los Lagos, Escala 1:100.000*. Sernageomin, Carta Geológica de Chile. Ser. Geol. Básica 86, 25.
- Ramos, V., Ghiglione, M. (2008). *Tectonic evolution of the Patagonian Andes*. In: Rabassa, J. (Ed.), *Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego*, Developments in Quaternary Sciences, vol. 11. Elsevier, Ushuaia, pp. 57-71.
- Riffo, R., Tapia, F., Encinas, A., Folguera, A., Azúa, P., Hervé, F., Valencia, V., Oliveros, V. (2013). *Age and sedimentary environment of the Traiguén Formation, Southern Chile, between 45°25' and 45°50'*. In: International Symposium on the Geology and Geophysics of the Southern Hemisphere, Viña del Mar, Sesión Temática, 3, pp. 243-244.
- SERNAGEOMIN. (2000). *Geología Ambiental del área de Osorno, X Región, Chile*.
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile: versión digital*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- SERNAGEOMIN, GORE Los Lagos. (2008). *Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea del Valle Central de la Región de Los Lagos, Informe Final (Revisado)*. Servicio Nacional de Geología y Minería-Gobierno Regional de Los Lagos, 199 p., 8 mapas escala 1:250.000, 1 leyenda, 16 figuras, 3 tablas, 2 apéndices, 4 anexos. Puerto Varas.
- Smedley, P., Cooper, D., Ander, E., Milne, C., Lapworth, D. (2014). *Occurrence of molybdenum in British surface water and groundwater: Distributions, controls and implications for water supply*. *Applied Geochemistry*, 40, 144-154. doi: 10.1016/j.apgeochem.2013.03.014
- Vieregge, P., Heinzow, B., Korf, G., Teichert, H.-M., Schleifenbaum, P., & Mössinger, H. (1995). *Long Term Exposure to Manganese in Rural Well Water Has No Neurological Effects*. *Canadian Journal of Neurological Sciences / Journal Canadien Des Sciences Neurologiques*, 22(04), 286-289. doi: 10.1017/s0317167100039482
- Vorlicek, T., Kahn, M., Kasuya, Y., Helz, G. (2004). *Capture of molybdenum in pyrite-forming sediments: role of ligand-induced reduction by polysulfides*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(3), 547-556. doi:10.1016/s0016-7037(03)00444-7

- 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.
- Wetzel, R. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. San Diego: Elsevier.
- Wichard, T., Mishra, B., Myneni, S., Bellenger, J.-P., Kraepiel, A. (2009). *Storage and bioavailability of molybdenum in soils increased by organic matter complexation*. *Nature Geoscience*, 2(9), 625–629. doi:10.1038/ngeo589
- World Health Organization (WHO). (2011a). *Manganese in Drinking Water. Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- World Health Organization (WHO). (2011b). *Molybdenum in Drinking Water. Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization, Geneva, Switzerland.