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 RÍOS

REALIZADO POR:

Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH)

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

S.D.T. N° 424

SANTIAGO, 2020

CONTENIDO

LISTADO DE ILUSTRACIONES 4
LISTADO DE TABLAS 7
I. RESUMEN 9
II. INTRODUCCIÓN 9
III. OBJETIVOS 10
III.1 OBJETIVO GENERAL 10
III.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 10
IV. ANTECEDENTES 10
IV.1 UBICACIÓN 10
IV.2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA 11
IV.2.1. GEOMORFOLOGÍA 11
IV.3. HIDROGRAFÍA 20
IV.4. CLIMA 26
IV.5. HIDROGEOLOGÍA 26
IV.5.1. Cuenca Río Valdivia 26
IV.5.1.1 Subcuenca Río San Pedro 27
IV.5.1.2 Subcuenca Río Callecalle 27
IV.5.2. Cuenca Costera entre Río Valdivia y Río Bueno 28
IV.5.3. Cuenca Río Bueno 29
IV.5.4. Acuíferos 32
IV.5.4.1 Vulnerabilidad de Acuíferos 35
Métodos de estimación de la vulnerabilidad 35
Mapas de vulnerabilidad 36
V. METODOLOGÍA 41
V.1. SELECCIÓN DE POZOS PARA MUESTREO 41
V.3. USO DE EQUIPOS Y MATERIALES 42
V.3.1. MATERIALES DE MUESTREO 42
V.3.2. EQUIPOS 43
V.4. METODOLOGÍAS ANALÍTICAS 44
V.5. PREPARACIÓN DEL TRABAJO EN TERRENO 45
V.6. OBTENCIÓN DE MUESTRAS 45
V.7. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS QUÍMICOS 45
V.8. MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFERO SEGÚN ÍNDICE DE CALIDAD 46
V.8.1. ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA 47

V.8.2. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD 48
VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES 55
VI.1. DATOS REGISTRADOS EN TERRENO 55
VI.1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES EN TERRENO Y LABORATORIO 55
VI.1.2. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS 57
VI.2. CONFIABILIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS 63
VI.3. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS 65
VI.3.1. ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO BUENO 66
VI.4. CONCENTRACIONES QUÍMICAS ESPECÍFICAS Y COMPARACIÓN CON LA NORMA CHILENA 71
VI.4.1. LÍMITES DE DETECCIÓN 71
VI.4.2. RESULTADOS POR ACUÍFERO 72
VI.4.3. RESUMEN DE RESULTADOS COMPARADOS CON LA NORMA NCh409 y NCh133 73
VI.4.4. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS NORMADOS 75
VII. CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 124
VII.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS LOCALES 124
VII.2. CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS 124
VIII. CONCLUSIONES 125
IX. RECOMENDACIONES 128
X. REFERENCIAS 132

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Mapa Político de la zona de estudio. Fuente: Instituto geográfico militar. 11
Ilustración 2: Mapa geomorfológico de la zona en estudio. Fuente: Börgel (1983). 12
Ilustración 3: Mapa topográfico de la zona en estudio. Fuente: elaboración propia. 13
Ilustración 4: Mapa geológico de la zona en estudio. Fuente: SERNAGEOMIN, 2003. 16
Ilustración 5: Relieve de la cuenca del río Valdivia. Fuente: Amphos 21, 2012. 21
Ilustración 6: Red hídrica de la cuenca del río Valdivia. Fuente: Marcela Iturrieta, 2016 22
Ilustración 7: Red hídrica de la cuenca del río Bueno. Fuente: Marcela Iturrieta, 2016 24
Ilustración 8: Mapa de División de cuencas en la Región de los Ríos, Fuente: Elaboración propia. 25
Ilustración 9: Cuencas y subcuencas de la región de los ríos fuente: DGA, 2014 31
Ilustración 10: Acuíferos y pozos de monitoreo DGA de la región de los ríos. Fuente: DGA, 2017 . 33
Ilustración 11: Mapa de División de acuíferos en la Región de los Ríos, Fuente: Elaboración Propia. 34
Ilustración 12: Mapa de Vulnerabilidad de la Región de los Ríos, Fuente: Elaboración propia 37
Ilustración 13: Mapa de Vulnerabilidad de la Región de los Ríos con división de acuíferos, Fuente: Elaboración propia 38
Ilustración 14: Zona ampliada de mapa de vulnerabilidad, con distribución de pozos en la Región de los Ríos, Fuente: Elaboración propia 39
Ilustración 15: Etapas de selección de los pozos de muestre de aguas subterráneas (DGA, 2017). 41
Ilustración 16: Ejemplo diagrama de Stiff con los iones considerados. 46
Ilustración 17: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper. 46
Ilustración 18: Esquema y diagrama de flujo de metodología de cálculo del Índice de Calidad de aguas subterráneas Fuente: Modificado de DGA (2009). 48
Ilustración 19: Cálculo del Índice de Calidad (IC) mediante interpolación lineal entre clases. Fuente: DGA (2009). 51
Ilustración 20: Gráfico de torta con la cantidad de muestras obtenidas por sector acuífero. Fuente: Elaboración propia 55
Ilustración 21: Muestreo de pozos pertenecientes al programa de Agua Potable Rural (APR) realizado para este estudio durante el año 2019 con mapa de referencia de fondo. Fuente: Elaboración Propia. 56
Ilustración 22: Grafico de profundidades de los pozos estudiados. Fuente: Fabricación propia. 59
Ilustración 23: Mapa de distribución de pH en pozos de estudio. Fuente: Elaboración propia. 60
Ilustración 24: Mapa de distribución de Temperaturas en pozos de estudio. Fuente: Elaboración propia. 61
Ilustración 25: Mapa de distribución de Conductividad eléctrica en pozos de estudio. Fuente: Elaboración propia 62
Ilustración 26: Grafico de errores de Balance iónico. Fuente: Elaboración propia 63
Ilustración 27: Secuencia de Chevotareb. Fuente: Sánchez (2012). 66
Ilustración 28: Diagrama de Piper de pozos en estudio. Fuente: Elaboración propia. 68
Ilustración 29: Mapa con Diagramas Stiff de cada pozo. Fuente: Elaboración propia. 69
Ilustración 30: Mapa ampliado con Diagramas Stiff de cada pozo. Fuente: Elaboración propia. 70
Ilustración 31: Grafico de valores pH en pozos de la cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia. 74
Ilustración 32: Grafico de Concentraciones de Nitrato. Fuente: Elaboración propia. 77
Ilustración 33: Mapa de distribución de concentraciones de Nitrato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia. 79
Ilustración 34: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Nitrato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia. 80

Ilustración 35: Mapa de vulnerabilidad de acuiferos y distribución de concentraciones de Nitrato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia. 81
Ilustración 36: Grafico de concentraciones de Sulfato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia. 84
Ilustración 37: Mapa de distribución de concentraciones de Sulfato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia..... 86
Ilustración 38: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Sulfato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia..... 87
Ilustración 39: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Sulfato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia. 88
Ilustración 40: Grafico de concentraciones de Cloruro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia. 91
Ilustración 41: Mapa de distribución de concentraciones de Cloruro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia..... 93
Ilustración 42: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Cloruro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia..... 94
Ilustración 43: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Cloruro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia. 95
Ilustración 44: Grafico de concentraciones de Magnesio en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 98
Ilustración 45: Mapa de distribución de concentraciones de Magnesio en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 100
Ilustración 46: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Magnesio en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia..... 101
Ilustración 47: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Magnesio en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 102
Ilustración 48: Grafico de concentraciones de Arsénico en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 105
Ilustración 49: Mapa de distribución de concentraciones de Arsénico en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia..... 107
Ilustración 50: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Arsénico en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia..... 108
Ilustración 51: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Arsénico en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 109
Ilustración 52: Grafico de concentraciones de Hierro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 112
Ilustración 53: Mapa de distribución de concentraciones de Hierro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia..... 114
Ilustración 54: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Hierro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia..... 115
Ilustración 55: Mapa ampliado de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Hierro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 116
Ilustración 56: Grafico de concentraciones de Manganeso en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 119
Ilustración 57: Mapa de distribución de concentraciones de Manganeso en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 121
Ilustración 58: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Manganeso en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 122

Ilustración 59: Mapa ampliado de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Manganeso en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia 123
Ilustración 60: Mapa de distribución de pozos sin medir en Región de los Ríos. Fuente: Elaboración propia. 132

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Descripción litológica del "Mapa Geológico Región de los Ríos" 17
Tabla 2: Catalogo de cuencas y subcuencas hidrográficas Región de los Ríos, fuente: DGA: 2014.. 26
Tabla 3: Catalogo de acuíferos preliminares de la región de los ríos, modificada con datos de precipitación promedio de cada acuífero. Fuentes: DGA 32
Tabla 4: Oferta de recursos hídricos v/s demanda comprometida Región de los Ríos, Fuente: DGA 2014 (Informe técnico DARH N°208) 35
Tabla 5: Resumen de vulnerabilidad para cada acuífero. Fuente: Elaboración propia. 40
Tabla 6: Listado de parámetro controlados en las muestras de aguas subterráneas del presente estudio. SGS: Laboratorio Ambiental SGS Chile Ltda. (Externo a la DGA); LADGA: Laboratorio Ambiental Dirección General de Aguas..... 42
Tabla 7: Tipos de envases utilizados. Fuente: DGA, 2018a 43
Tabla 8: Equipos para medición en terreno. Fuente: DGA, 2018a..... 43
Tabla 9: Parámetros medidos y las respectivas metodologías utilizadas por el Laboratorio Ambiental SGS 44
Tabla 10: Parámetros medidos y las respectivas metodologías utilizadas por el Laboratorio Ambiental de la DGA. 44
Tabla 11: Parámetros químicos utilizados en la metodología. Fuente: DGA 2009. 49
Tabla 12: Parámetros a medir en caracterización química 49
Tabla 13: Relación entre clases de calidad y valores de corte. Fuente: DGA (2009). 52
Tabla 14: Criterios para establecer el IC general. Fuente: DGA (2009)..... 53
Tabla 15: Tabla resumen de los niveles estáticos, dinámicos y los parámetros fisicoquímicos tomados en terreno de cada uno de los pozos del acuífero del Biobío, ordenados según el acuífero al que corresponden. Fuente: Elaboración propia. 58
Tabla 16: Tabla de Balances iónicos de cada pozo. Fuente: Elaboración propia 64
Tabla 17: Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea. Fuente: Custodio y Llamas (1976). 66
Tabla 18: Límites de detección para los parámetros medidos. Los elementos mayoritarios fueron medidos por SGS, mientras que los metales, por LADGA. Fuente: DGA 2019..... 71
Tabla 19: Concentración química de elementos mayoritarios y Solidos Disueltos Totales (SDT) de los pozos encuestados en la cuenca del río Bueno. Fuente: Elaboración propia 72
Tabla 20: Resumen de parámetros medidos, sus límites de detección, los límites máximos permitidos por las normas Chilenas (NCh 409 y 1333) y la cantidad de pozos en la región con valores fuera de norma. 73
Tabla 21: Clasificación de los pozos estudiados según su salinidad en base a la Norma NCH N°1333 para aguas de riego. 74
Tabla 22: Concentraciones de Nitrato en pozos de la cuenca del Río Bueno 76
Tabla 23: Concentraciones de Sulfato en pozos de la cuenca del Río Bueno 83
Tabla 24: Concentraciones de Cloruro en pozos de la cuenca del Río Bueno 90
Tabla 25: Concentraciones de Magnesio en pozos de la cuenca del Río Bueno..... 97
Tabla 26: Concentraciones de Arsénico en pozos de la cuenca del Río Bueno. 104
Tabla 27: Concentraciones de Hierro en pozos de la cuenca del Río Bueno 111
Tabla 28: Concentraciones de Manganeso en pozos de la cuenca del Río Bueno 118
Tabla 29: Parámetros fisicoquímicos estudiados. 124
Tabla 30: Índice de Calidad para pozos Región de los Ríos..... 125
Tabla 31: Resumen de pozos con valores mayores a la normativa chilena. Fuente: Elaboración propia. 127
Tabla 32: Resumen de pozos de seguimiento recomendado. Fuente: Elaboración propia..... 129

Tabla 33: Pozos APR pendientes de monitoreo en la Región de los Ríos 129

I. RESUMEN

Se informa sobre el análisis de las muestras obtenidas entre los meses de mayo y diciembre del año 2019 desde los acuíferos que abastecen a 28 pozos APR (pertenecientes al programa Agua Potable Rural del Ministerio de Obras Públicas. El muestreo y análisis fue realizado por el Laboratorio SGS Chile S.A. 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 en las muestras de agua, se realiza un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas y también se presenta una comparación respecto a la normativa de uso vigente, esta 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.

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

II. INTRODUCCIÓN

La Región de los Ríos se divide en dos provincias (Valdivia y Ranco) y 12 comunas, distribuidas en 18.429,5 km² de extensión total. Tal territorio representa el 2,44% de la superficie de Chile Americano e Insular. Se trata entonces, de una de las áreas más pequeñas de Chile. Las estructuras más importantes, en el área del mapa, se relacionan con el desarrollo y cierre de la cuenca del Río Cruces controlada por las fallas Río Cruces y Santa Elena, que representarían estructuras ligadas a la Zona de Falla Lanalhue. Regionalmente, se acepta que durante el Mioceno superior y Plioceno se generó un régimen compresivo que invirtió las cuencas del Cenozoico. Este evento está registrado como fallas inversas de vergencia NE (Falla Santa Elena) que afectaron a las rocas de la Formación Santo Domingo.

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

En el presente informe se recopila la información obtenida para generar una caracterización de la calidad de agua en la Región de los Ríos, 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. Cabe destacar que la definición de acuífero en el presente informe se refiere a los acuíferos definidos preliminarmente por la DGA durante el año 2016.

El Servicio cuenta con una red de aguas subterráneas que monitorea el estado de calidad de los acuíferos y sus cambios temporales y espaciales, permitiendo su caracterización para el desarrollo de instrumentos de gestión.

III. OBJETIVOS

III.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente estudio es generar un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la Región de los Ríos, e interpretar ese resultado a partir de la información hidrogeológica disponible.

III.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar las sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa.
2. Determinar Índice de calidad para cada pozo del cual se recopilaron datos.
3. Proponer recomendaciones para el futuro programa de monitores.

IV. ANTECEDENTES

La zona de estudio corresponde a la Región de los Ríos (XIV), la cual se compone de 2 provincias luego de la promulgación de la ley 20.174; la provincia de Valdivia y la provincia de Ranco.

IV.1 UBICACIÓN

La Región de los Ríos (XIV) se ubica entre los 39º15' y los 40º33' de latitud sur, y desde el límite con la República Argentina hasta el Océano Pacífico. Las características del relieve presentan una gran cantidad de procesos y formas orográficas. Los diferentes agentes que actuaron en el pasado, especialmente los hielos y la actividad volcánica, originaron la mayoría de las formas que se encuentran en la actualidad. Es por esta razón que hoy la región se encuentra dividida en dos sectores diferentes.

Ilustración 1: Mapa Político de la zona de estudio. Fuente: Instituto geográfico militar.

IV.2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La información que se presenta a continuación se obtiene principalmente de la recopilación bibliográfica hecha durante los estudios hidrogeológicos realizados por AMPHOS 21 CONSULTING CHILE LTDA para la Dirección General de Aguas durante el año 2012, en las 2 principales cuencas de la región: río Valdivia y Rio Bueno, además de la información contenida en la Carta geológica del área Valdivia-Corral (Serie geológica básica No. 137, 2012).

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:

- Cordillera de los Andes volcánica activa.
- Pre cordillera morrénica.
- Depresión Intermedia o Llano Central con Morrenas y Conos.
- Cordillera de la Costa.
- Planicies Litorales.

La cordillera volcánica activa se caracteriza por la presencia principalmente de sierras y cordilleras que se empinan entre los 1.000 y 1.600 msnm. Se define como un relieve fuertemente rebajado

debido a la erosión de los glaciales y ríos. La morfología dominante de la cordillera volcánica activa corresponde a los nevados conos volcánicos que en forma aislada se levantan al extremo oriental de los grandes lagos (volcán Choshuenco, 2.415 msnm).

La Pre cordillera, posee un carácter de acumulación de sedimentos fluvio–glaciovolcanicos. En esta zona se presenta como formas del relieve de lomas sometidas a una intensa acción erosiva lineal por los cuerpos fluviales y lacustres.

La depresión Intermedia presenta una topografía fuertemente ondulada y los ríos se profundizan creando los sistemas aluviales. Es en esta región donde recobra su característica de valle longitudinal, luego de haber sido interrumpido al norte de Valdivia por el cordón transversal que les quita a los valles su continuidad. Sus suelos están formados por el acarreo glacial y fluvial con depositación de gran cantidad de sedimentos. Una de sus mayores características es que se encuentra cortada por numerosos lagos.

La Cordillera de la Costa se presenta baja y ondulada, recibiendo el nombre de cordillera de Mahuidanche, descendiendo en altura hacia el sur hasta ser interrumpida por el río Valdivia.

Las Planicies Litorales de sedimentación fluviomarina en esta zona se presentan muy estrechas e interrumpidas por un muro costero que se empina sobre los 600 m de altitud (Cerro Oncol, 715 msnm).

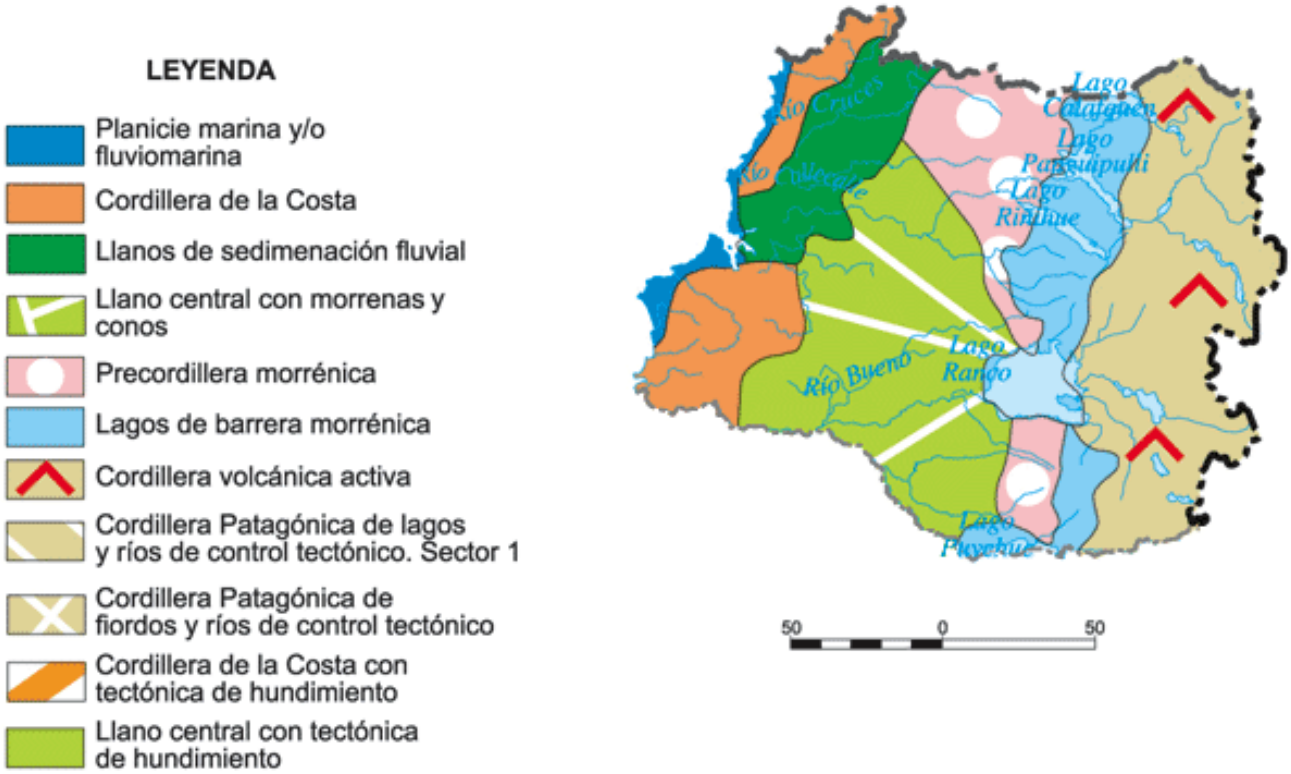


Ilustración 2: Mapa geomorfológico de la zona en estudio. Fuente: Börgel (1983).

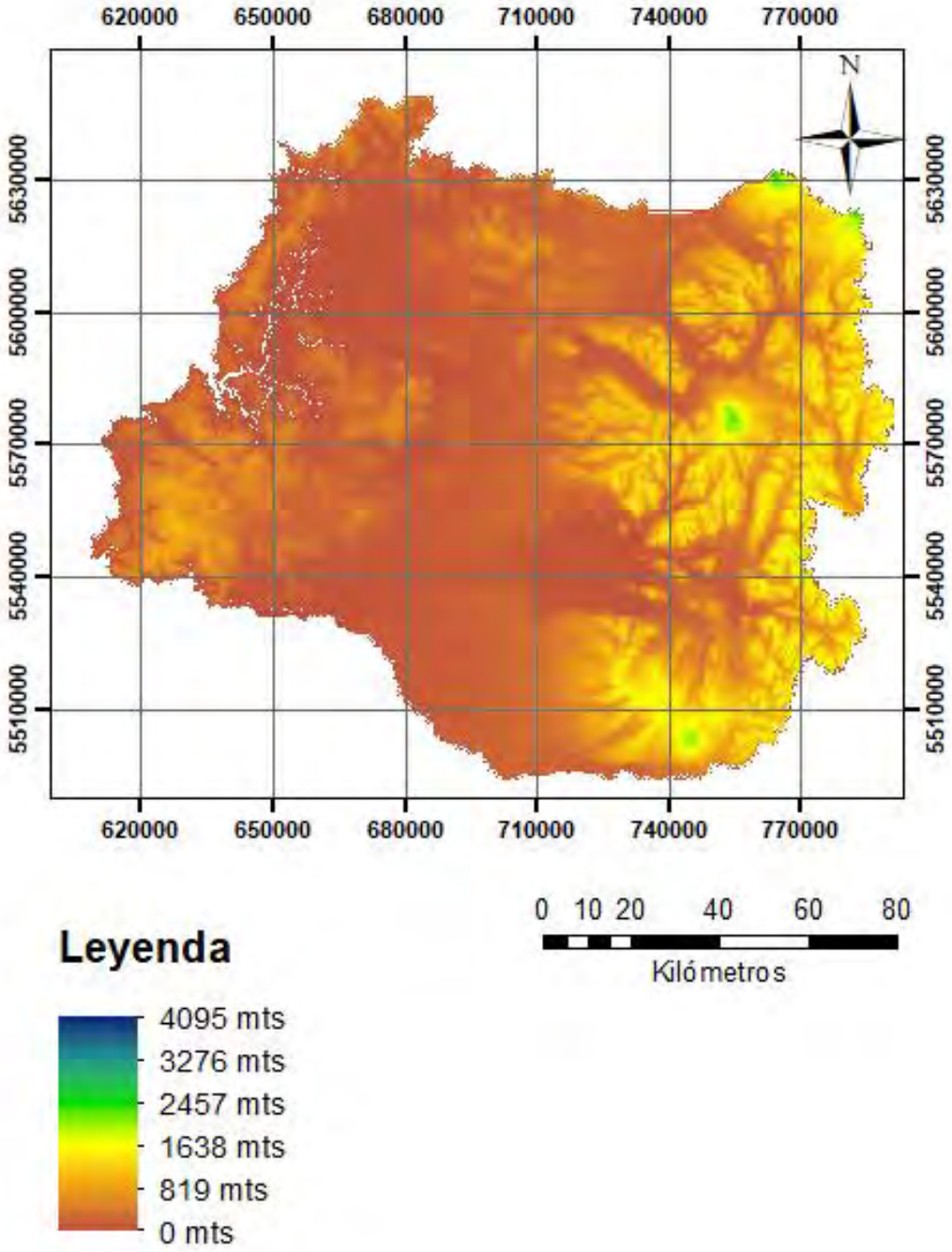


Ilustración 3: Mapa topográfico de la zona en estudio. Fuente: elaboración propia.

IV.2.2. GEOLOGÍA

La geología de esta zona incluye depósitos cuaternarios de origen glacial, estuario, fluvial y litoral, sedimentitas marinas y continentales del Mioceno, rocas intrusivas del Cretácico y metamórficas del Paleozoico-Triásico. La historia geológica de esta zona se caracteriza por una fuerte influencia tectónica con numerosas subsidencias y alzamientos del terreno a los que se asocian sucesivas regresiones y transgresiones marinas.

El Holoceno está representado por depósitos litorales, arenas y gravas no consolidadas de composición principalmente volcánica, y depósitos fluviales y fluvio-estuarinos no consolidados, compuestos por grava y arena gruesa con proporción variable de material fino y materia orgánica, los que componen las terrazas más bajas de los actuales cauces de los ríos de la zona. El espesor de estos depósitos es variable, alcanzando hasta aproximadamente 30-35 m. (Karzulovic, 1960; Doyel *et al*., 1960, Illies, 1970).

El Pleistoceno está representado por sedimentos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Pleistoceno Superior, Mercer, 1976; EIOM 4-2) correspondientes a gravas y arenas que se distribuyen en el noreste del área de estudio, y que conforman terrazas de alturas entre 10 y 15 m. Estos sedimentos sobreyacen a depósitos fluvio-estuarinos de la última etapa interglaciar. (EIOM 5, Antinao y Mc Donough, 1999) conformados por gravas finas, arenas, limos y arcillas, moderada a débilmente compactadas, incluyendo a los estratos conocidos localmente como Cancagua. En la costa, forman terrazas de más de 30 m.s.n.m. y, a lo largo del sistema fluvio-estuarino presentan una altura aproximada de 13 m.s.n.m. Su espesor puede variar entre 50 m. y más de 80 m. (Illies, 1970; Doyel et al., 1960). Según el origen de los componentes principales, estos depósitos se dividieron en dos asociaciones de sedimentos que engranan lateralmente:

a) Gravas, arenas limosas y limos arenosos, que intercalan con niveles limosos con fósiles marinos y turbas, reconocidos principalmente en la costa. Las arenas y otros materiales más finos provienen de la erosión del basamento rocoso del área. La fauna encontrada indica ambiente intermareal y un clima similar al actual (Moreno 2002).

b) Arenas, gravas finas, arenas limoarcillosas, limos y arcillas, moderada a débilmente consolidadas que se observa en la costa y en el área de Pelchuquín-San José de La Mariquina y en los alrededores de Valdivia. Los fragmentos corresponden, principalmente, a rocas volcánicas (basaltos y andesitas), rocas intrusivas, cuarzo, magnetita y pómez redondeados y meteorizados a arcillas. Se ha sugerido (Barozzi y Lemke, 1966; Illies, 1970; Rojas, 1990) que, durante el periodo de sedimentación de estos depósitos, confluían en los sectores de Pelchuquin y Valdivia diversos ríos, probablemente similares a los actuales Callecalle y Cruces, depositando material volcánico transportado desde la zona andina en forma de flujos densos y rápidos, o flujos hiperconcentrados (Smith, 1991; Smith y Lowe, 1991). Estos se habrían depositado en forma alternada con otros propios de ambientes de baja energía.

Sedimentos glaciofluviales de la Glaciación Santa María (Pleistoceno Medio; Porter, 1981; EIOM 8-6) correspondientes a gravas y arenas gruesas que conforman una topografía plana en los alrededores de San José de la Mariquina y al este de la ciudad de Valdivia, infrayacen a la profundidad de 65 a 70 m. bajo la superficie (Barozzi y Lemke, 1966; Illies, 1970).

La Glaciación Rio Llico (Pleistoceno Medio; Porter, 1981; EIOM 12-10) está representada por remanentes discontinuos de sedimentos de morrenas, correspondientes a gravas y arenas gruesas polimicticas que se observan al norte de la ciudad de Valdivia, donde sobreyacen a unidades miocenas.

Las secuencias estratificadas están representadas por la Formación Santo Domingo (Mioceno inferior a medio; Martinez y Pino, 1979), unidad sedimentaria continental-marina con macro y microfósiles. En la localidad tipo de esta formación se reconocieron dos niveles marinos: areniscas y fangolitas cuarzo-micáceas, las que infrayacen a areniscas cuarzo-líticas. Las facies de este periodo se formaron en ambientes asociados con la inundación progresiva de valles fluvio-estuarinos por parte del mar, que culmino en el Mioceno Medio con la formación de un embahiamiento profundo en esta región. Infrayaciendo a la anterior formación, y con afloramientos discretos en esta área, se presentan los Estratos de Pupunahue (Oligoceno-Mioceno Inferior; Illies, 1970), correspondiente a una unidad sedimentaria continental-paralica. Las asociaciones de facies de esta unidad, se depositaron en un típico sistema de estuario de manera similar a lo que ocurre en Valdivia.

La cordillera de la Costa está constituida principalmente por rocas metamórficas y algunos cuerpos intrusivos. Las rocas metamórficas se han integrado en el Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM, Devonico-Triasico, Duhart et. al, 2001) correspondiente a esquistos pelíticos a semipeliticos con menor cantidad de; metareniscas, intercalaciones de esquistos cloríticos y escasos cuerpos de rocas ultramaficas tectónicamente emplazadas. Las relaciones estratigráficas originales entre ellas están completamente destruidas y localmente se observan contactos miloniticos. Se han verificado al menos dos episodios de sedimentación, además de un similar número de eventos de deformación y metamorfismo (Duhart et al., 2001). Las rocas intrusivas corresponden a la Granodiorita Chaihuiín (edad U-Pb circón de 85,8 ± 1 Ma; Duhart et al., 1997), la Granodiorita Oncol (edad K-Ar de 91±2 Ma; McDonough et al., 1998) la Dacita Laurel y la Dacita Ramon. Dada la proximidad de estas últimas a los cuerpos cretácicos existentes en el área, se les atribuye la misma edad. En general estos cuerpos intrusivos presentan una fuerte alteración, principalmente del tipo Argílica.

Las depresiones morfológicas actuales localizadas en el área de Valdivia tienen su origen en el Terciario (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior), donde se generaron cuencas sedimentarias como resultado de procesos tectónicos, principalmente de tipo extensional, asociados a variaciones en la velocidad de convergencia y ángulo de subducción de las placas Nazca (Farellón) y Sudamericana (Muñoz et al., 2000). Debido a la falta de estudios estructurales de detalle en esta área, la evolución tectónica y dinámica actual de la cuenca de Valdivia es en gran parte desconocida. Sin embargo, estudios recientes (Feuker, comunicación escrita) sugieren la presencia de un depocentro de tipo “pull-apart” para el sector de Valdivia.

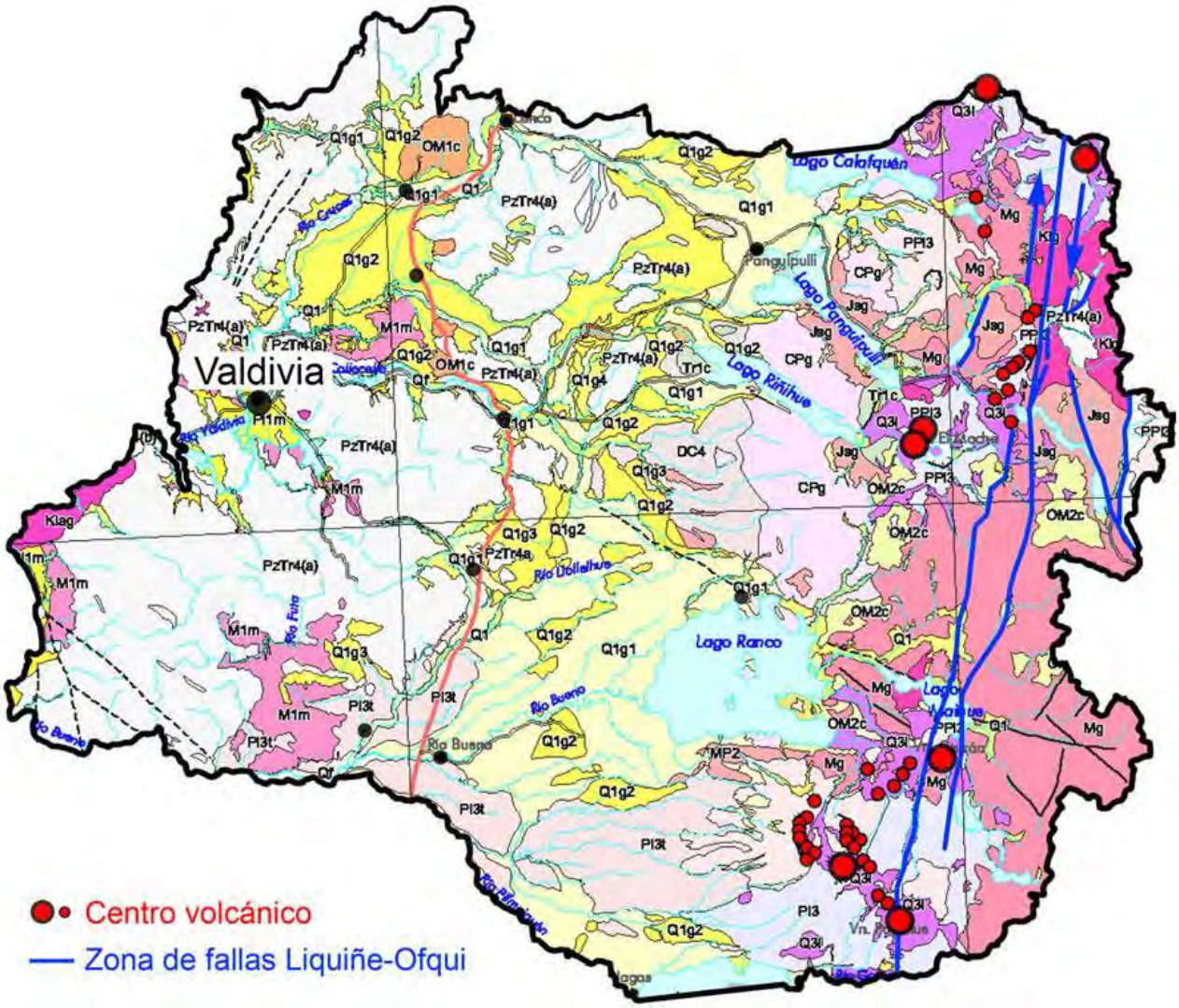


Ilustración 4: Mapa geológico de la zona en estudio. Fuente: SERNAGEOMIN, 2003.

Tabla 1: Descripción litológica del "Mapa Geológico Región de los Ríos"

Simbologia	Tiempo Geologico	Descripcion Litologica
CPg	Carbonífero- Pérmico	Granitos, granodioritas, tonalitas y doritas, de hornblenda y biotita, localmente muscovita.
DC4	Devónico-Carbonífero	Metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados, metaturbiditas con facies de "mélage".
Jsg	Jurásico Medio-Superior (180-142 Ma)	Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. En la Cordillera de la Costa, regiones I a VI; en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Plutón Panguipulli y borde oriental del Batolito Norpatagónico; en la península Antártica.
Kiag	Cretácico Inferior alto- Cretácico superior bajo (123-84 Ma)	Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita.
Klg	Cretácico Inferior (144-90 Ma)	Granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. En la Cordillera Principal, regiones VIII a XI: Grupo Plutónico Gualletué, archipiélago de los Chonos y borde oriental del Batolito Norpatagónico; en la península Antártica.
M1m	Mioceno	Secuencias sedimentarias marinas transgresivas plataformales: areniscas finas, arcillolitas y limolitas. En la costa, región VIII: Fm. Ranquil; en la Depresión Central, región IX: Formación Cholchol.
Mg	Mioceno (18-6 Ma)	Granodioritas, dioritas y tonalitas. En la Cordillera Principal, regiones VII a X
MP2	Mioceno Superior-Plioceno	Secuencias volcanosedimentarias: conglomerados, lavas andesíticas, domos y tobas. En la Cordillera Principal, región VIII: Formación Mitrauquén.
OM1c	Oligoceno-Mioceno	Secuencias sedimentarias continentales parálicas o aluviales: conglomerados, areniscas, lutitas, calizas y mantos de carbón. En la Cordillera Principal y Precordillera, regiones I y II: formaciones Altos de Pica (inferior) y San Pedro; en la Cordillera de la Costa, región X: Estratos de Pupunahue y Parga, Formación Cheuquemó; en la región XII: Formación Loreto.
OM2c	Oligoceno- Mioceno	Secuencias volcanosedimentarias; lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.
Pl1m	Pleistoceno	Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas: coquinas, conglomerados coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos. En la costa, regiones II y III: Estratos de Mejillones y de Caldera; en la región X: Estratos de Niebla (Cancagua).
Pl3t	Pleistoceno	Depósitos piroclásticas principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. En la Depresión Central y valles de la Cordillera Principal, regiones V a VII: Ignimbrita Pudahuel y Toba loma Seca.
PPl3	Plioceno-Pleistoceno	Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. En la Cordillera Principal, regiones VII a X: formaciones Cola de Zorro y Malleco; en la Cordillera Patagónica, región XII: basaltos de Pali Aike; en las islas oceánicas: volcán Poike (Isla de Pascua), archipiélago Juan Fernández, isla Salas y Gómez; islas San Félix y San Ambrosio.
PzTr4	Paleozoico- Triásico	Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico.
Q1	Pleistoceno- Holoceno	Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciares, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioflaciares con intercalación de depósitos volcanoclásticos.
Q1g1, Q1g2, Q1g3	Pleistoceno-Holoceno	Depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glacilacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. En la Cordillera Principal, regiones I a IV. En la Depresión Central, regiones IX y X; en regiones XI y XII: lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales, abanicos fluvioglaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue
Q3i	Cuaternario	Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basáticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos; principalmente calcoalcalinos; adakíticos al sur de los 47ºS. En la Cordillera Principal, regiones I a III: volcanes Taapaca, Parinacota, Láscar y Ojos del Salado. Principalmente holocenos en la Cordillera Principal, regiones Metropolitana a X: volcanes San José, Peteroa, Antuco, Llaima, Villarrica, Osorno y Calbuco, entre otros; en la Cordillera Patagónica, regiones XI a XII: volcanes Hudson, Lautaro y Monte Burney. En Antártica: isla Decepción.

IV.2.3. ESTRUCTURAS

La estructura dominante del sector cordillerano es la más importante de la zona. Allí se encuentra la Falla Liquiñe-Ofqui que aparece bien expuesta en el área al este de Liquiñe. Esta estructura regional, de rumbo general variable entre N-S y N20°E, afecta claramente a las unidades litológicas pre-Triásico Superior. La formación y el Batolito Panguipulli afloran exclusivamente al W de la falla mientras que el complejo Igneo-Metamorfico de la Cordillera de los Andes lo hace exclusivamente al este de ella.

Las trazas principales de desplazamiento del Sistema de Falla de Liquiñe-Ofqui han controlado la localización de algunos de los centros del frente volcánico Plio-Cuaternario. Los volcanes activos Mocho-Choshuenco, caldera Puyehue, Casablanca y el erodado volcán Quinchilca, se ubica a lo largo de las trazas principales. A las trazas principales se asocian, 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 neotectonicas de orientación aproximada N-S, que constituirían el límite oriental de la Depresión Central.

De acuerdo con análisis de imagen de radar en la Cordillera de la Costa, se corrobora la existencia de importantes lineamientos de rumbo NW que coinciden con trazas de fallas extensionales, de las cuales las orientales limitan, por el O con la distribución de las secuencias sedimentarias continentales marinas del Terciario, representadas en la Depresión Central por las cuencas Osorno-Llanquihue, constituyendo el contacto actual entre ellas y el basamento metamórfico. En conjunto, un sistema extensional de rumbo NE y otro transcurrente de dirección NW, habrían controlado la localización de los depocentros de las cuencas terciarias y la ubicación de cuencas neotectonicas en el borde occidental de la Depresión Central. El sistema transcurrente se interpreta 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 (Sernageomin, 1997).

Las unidades geológicas del área Valdivia-Corral fueron afectadas tanto por deformación dúctil, registrada en el CMBM, como frágil, establecida en las secuencias sedimentarias cenozoicas y en el CMBM. La deformación dúctil fue catalogada en el CMBM como una foliación principal penetrativa S2, con orientación preferencial NO y SE, con manteos entre 10º-50º al SO y NE. En diversos lugares, se observaron pliegues asimétricos y recumbentes (isoclinales), de escala centimétrica a métrica, hasta milimétrica, con planos axiales de orientación NNE-SSO semejante a la foliación S2.

En el sector del cerro Oncol se visualizaron, a escala de los afloramientos, pliegues asimétricos con plano axial de N30ºE/45ºNO. Generalmente, en las charnelas de los pliegues métricos a decamétricos, se observaron 'kink band', pliegues en 'echelon', vetas de tensión rellenas con cuarzo y desarrollo de clivaje de crenulación. Sobre la base de la orientación de la foliación S2 se definieron, de preferencia en la porción occidental del mapa Valdivia-Corral, pliegues de tipo sinforme y antiforme de orientación NNE-SSE. La deformación frágil fue determinada en numerosas fallas a escala regional y local.

En el poblado de Corral, fue observada una falla, denominada Falla Corral (FC, SERNAGEOMIN, 1998), que se extiende por más de 15 km al SE del poblado homónimo. Esta falla se caracteriza por un plano de falla de bajo ángulo (<40º), que pone en contacto a esquistos máficos con esquistos pelíticos (fue interpretada como una falla inversa, dado el bajo ángulo del plano de falla y la geometría de la fábrica S2 del bloque colgante (SERNAGEOMIN, 1998).

En el borde occidental del mapa Valdivia-Corral, se reportó una falla inversa, denominada Falla Río Cruces (FRC, SERNAGEOMIN, 1998), que marca el límite occidental de la cuenca del Río Cruces. La FRC se caracteriza por un rumbo NE-SO y manteos entre 60o y 80o hacia el NO (SERNAGEOMIN, 1998), semejante a la Falla Camarones reportada hacia el sur, fuera del presente mapa en la localidad de Bahía Mansa (McDonough *et al.,* 1997), a 40 km al oeste de la ciudad de Osorno. A 10 km al este del estero Ralicura, se observó una falla subvertical, denominada Falla Estero Ralicura, de orientación N85E/80º y sentido sinistral, que corta a esquistos pelíticos. Además, se identificaron lineamientos localizados al norte de Niebla y hasta el límite septentrional del área de estudio, con orientación este-oeste semejante a la observada en la Falla Estero Ralicura, lo que sugiere un origen similar. Estos lineamientos y la Falla Estero Ralicura se interpretan como deformación frágil, asociada a la activación de la FRC.

En el sector de Ramón, fueron reportadas fallas de rumbo norte-sur con manteo entre 10-50º al oeste (Peri y Rivera, 1991). Un pliegue y falla inversa de orientación NO-SE, localizada en el sector de Santa Elena, afecta a la Formación Santo Domingo, deformando areniscas fosilíferas. El pliegue anticlinal volcado, cuyo plano axial posee un rumbo N20ºO y un manteo al SO de 55º, indica una vergencia hacia el NE, lo que sugiere que el esfuerzo principal provino del SO. La FRC está cubierta por depósitos glaciofluviales del Pleistoceno y su pared colgante contiene estratos marinos de la Formación Santo Domingo (Msd). Por lo tanto, se considera que el desplazamiento está restringido entre el Mioceno medio y el Pleistoceno.

Por otro lado, a partir de interpretaciones de fotos aéreas y satelitales, fueron observados lineamientos estructurales, de orientación NO-SE, de carácter regional que controlan gran parte de la red de drenaje de la zona de estudio (*e.g.,* ríos Cayumapu, Angachilla, Futa) y coinciden con la orientación de grandes lineamientos estructurales continentales definidos en Chile entre los 37º y 40ºS, como la Zona de Falla Lanalhue (Glodny *et al.,* 2008; Melnick *et al.,* 2009) y Falla Futrono (Lara *et al.,* 2009), y en Argentina, como la Zona de Falla Malvinas-Gastre (Aceñolaza *et al.,* 2002). La cercanía de la zona de estudio con la Zona de Falla Lanalhue, activada en los terremotos de 1960 y 2010 (Cifuentes, 1989; Moreno *et al.,* 2008) y, presumiblemente, activa desde el Plioceno (Mella y Quiroz, 2010), así como la presencia de estructuras frágiles de orientación NO-SE, que afectan a la Formación Santo Domingo y al CMBM, sugiere que dichas estructuras podrían reactivarse en eventos mayores que afecten la Zona de Falla Lanahue. Tomando en cuenta los antecedentes expuestos, se sugiere que la etapa principal de alzamiento del CMBM y el cierre de la cuenca del Río Cruces, estarían vinculados con un evento tectónico, de características compresivas, que afectó al basamento a fines del Mioceno y a principios del Plioceno (Cisternas y Frutos, 1994; McDonough *et al.,* 1997; McDonough *et al.,* 1998; Radic, 2010; Elgueta y Mpodozis, 2012).

IV.3. HIDROGRAFÍA

A pesar de la evidencia de su nombre, la región se caracteriza por presentar una gran cantidad de ríos de régimen mixto, lo que a su vez se ve regulado por la fuerte importancia que generan los lagos en su caudal. Resulta notable la capacidad de navegación del río Valdivia en su parte baja.

Las hoyas hidrográficas más importantes son:

Río Valdivia: Está formado por la confluencia del Callecalle y el Cruces. El río Callecalle a su vez está formado por la unión del San Pedro, que desagua los lagos Pirihueico, Panguipulli, Calafquén, Riñihue y Neltume. Su hoya tiene una superficie de 9.900 km2. y una longitud de 200 km. desde su nacimiento en territorio argentino y hasta su desembocadura en bahía de Corral.

Su régimen de alimentación es pluvial, presentando un caudal constante todo el año, debido a que hay una similar distribución de las precipitaciones durante todo el año y no existen periodos secos: su caudal medio es de 687 m3/seg.

Río Bueno: Nace en el lago Ranco, tiene une longitud de 130 km y la superficie de su hoya hidrográfica es de 17.200 km2. En su curso superior está regulado por los lagos Rupanco y Puyehue. Los ríos que tributan al río bueno son los ríos Pilmaiquén, Rahue (que es el desaguadero del lago Rupanco) y Negro. El régimen de alimentación del río bueno es pluvial, regulado por lagos precordilleranos, pero algunos de sus tributarios tienen régimen nival. Su caudal medio es de 570 m3/ seg, y es navegable desde Trumao hasta su desembocadura.

IV.3.1. CUENCA DEL RÍO VALDIVIA

La cuenca hidrográfica del río Valdivia se extiende desde la latitud 39º20’ por el norte hasta la latitud 40º10’ por el sur. En el sector alto de la cuenca destaca la existencia de formaciones rocosas de origen sedimentario volcánico del período Terciario y Cuaternario y rocas hipabisales e intrusivas pertenecientes a los períodos Jurásico Terciario. Destacan los volcanes Quetrupillán y Choshuenco como importantes formadores del relieve de esta cuenca, así como las glaciaciones acontecidas durante el período Cuaternario. Estas formaciones consisten principalmente en coladas, brechas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de lutitas, calizas, areniscas y conglomerados de baja permeabilidad y que forman el basamento de este sector de la cuenca. Por lo tanto, las infiltraciones de aguas meteóricas escurren por el subsuelo principalmente hasta los cuerpos lacustres de Panguipulli, Calafquén, Riñihue, Pellaifa, Pirihueico y Neltume. Las aguas de estos lagos se infiltran a través del material morrénico originando una fuente constante de abastecimiento del acuífero. En el valle central de la cuenca escurren dos acuíferos: uno en dirección SWW paralelo al río Las Cruces y el otro lo hace en dirección oeste paralelo al río Calle-Calle juntándose ambos en las proximidades de la ciudad de Valdivia. El medio por el cual escurre el acuífero es material de relleno o depósitos no consolidados de origen glacial, consistente en morrenas y materiales aluviales de alta permeabilidad, Valdivia 9. Destaca el estrechamiento del valle central por parte del batolito costero consistente en rocas metamórficas y sedimentarias del período Paleozoico que provoca la bifurcación antes señalada de los acuíferos. Destaca la baja profundidad del acuífero que se mantiene hasta su desembocadura con profundidades de 2 a 3 metros.

La cuenca del río Valdivia está compuesta principalmente por las subcuencas de los ríos Cruces y Callecalle. El río Cruces nace en la parte noreste de la cuenca, en la vertiente occidental de los cerros situados entre los lagos Villarrica y Calafquén, para luego tomar un curso suroriental hasta la confluencia con el río Callecalle, dando origen al río Valdivia, en la ciudad homónima. Por su parte, la subcuenca del río Callecalle, la cual corresponde a una hoya trasandina, se origina en el extremo poniente del lago Lacar, en el nacimiento del río Huahum, en territorio argentino. La parte de esta subcuenca que se ubica en territorio nacional abarca desde el paso internacional Huahum hasta la confluencia del Callecalle con el río Cruces. En la parte alta de esta subcuenca existe un número importante de grandes lagos conectados entre sí, entre los cuales destacan los lagos Calafquén, Pirihueico, Neltume, Panguipulli y Riñihue. En general esta cuenca presenta un régimen pluvial, salvo el río Liquiñe, afluente del lago Neltume, el que presenta leves influencias nivales, mostrando un régimen pluvio – nival.

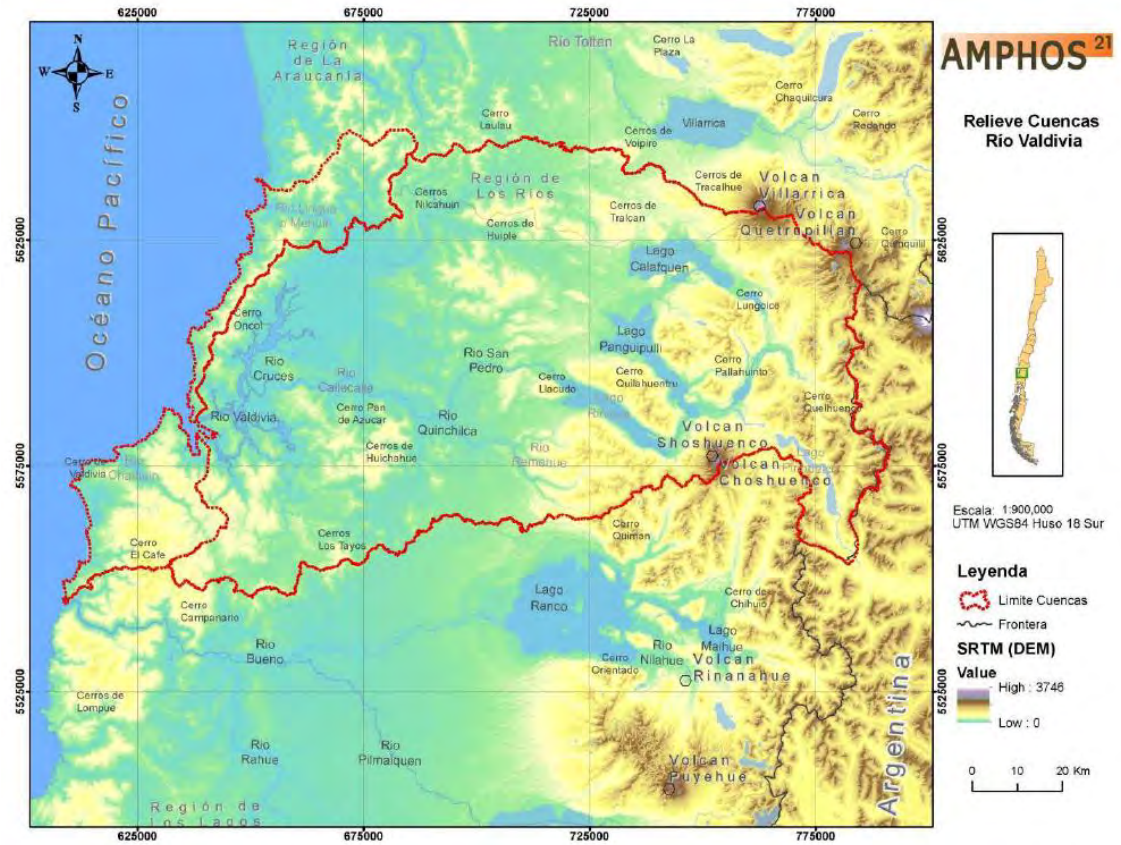


Ilustración 5: Relieve de la cuenca del río Valdivia. Fuente: Amphos 21, 2012.

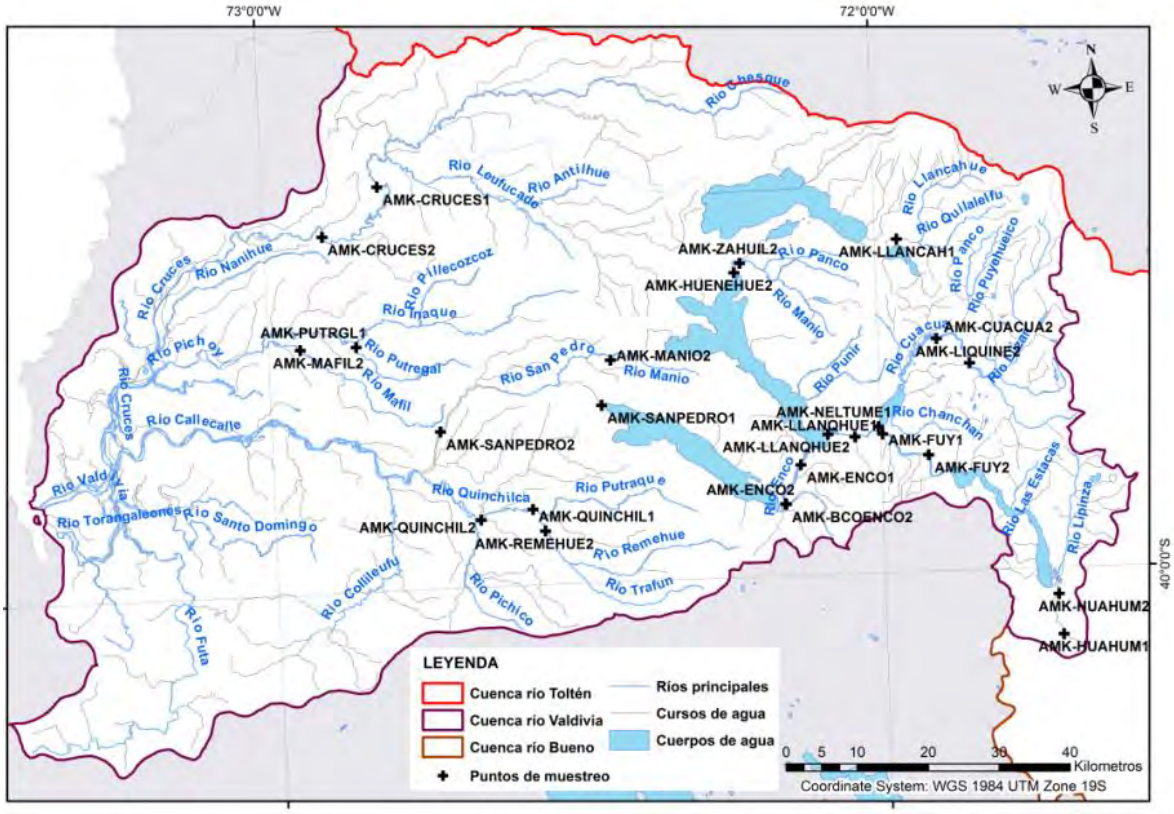


Ilustración 6: Red hídrica de la cuenca del río Valdivia. Fuente: Marcela Iturrieta, 2016

IV.3.2. 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 39º50' y 41º05' de latitud sur, al sur de la cuenca del río Valdivia. Abarcando una superficie de 15.367 km2 (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; 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 hoya andina del río Bueno forma parte de la X Región de Los Lagos, con 15.367 km2 de extensión, es la quinta cuenca de Chile en atención a su tamaño. En su tercio oriental existe una gran densidad de lagos de variadas dimensiones, quizás la más profusa de estos cuerpos de agua en todo el territorio nacional. Destacan por sus superficies los lagos Ranco, Puyehue y Rupanco.

El río Bueno, cuyo nombre original en idioma mapuche era Huenuleuve o Llinquieleuvu, nace en el extremo poniente del lago Ranco. Tras un recorrido de 130 km. en dirección general E-W,

desemboca en el Océano Pacífico al norte de la punta Dehui, después de trasponer una barra que impide en la actualidad la navegación desde su boca. En su curso superior, la pendiente es fuerte y la caja es angosta y profunda, entre barrancos de 50 y más metros de altura. Varios rápidos se intercalan en este primer tramo. Ya en su curso medio, la corriente es más lenta y las riberas menos escarpadas. El curso inferior es navegable por pequeñas embarcaciones, siendo su escurrimiento lento y caudaloso. El río Bueno recibe sus más importantes tributarios desde el sur, donde la hoya alcanza su mayor desarrollo. El lago Ranco posee una superficie cercana a los 410 km2, a cota 70 m.s.n.m. y una profundidad superior a 80 m. En su flanco oriental se encuentra rodeado de altas montañas y su espejo de agua es interrumpido por varias islas de las cuales la Guapi es la más importante. Mientras su costa sur y poniente es bastante regular, el flanco oriental es accidentado y en él destacan varias penínsulas, senos y golfos. El lago Ranco es alimentado desde la cordillera andina a través de varios tributarios: el principal es el río Calcurrupe, que vacía el lago Maihue situado más al oriente. Este lago recibe alimentación de los ríos Hueinahue, proveniente del este, incrementado por las aguas del Rupemeica; pero también desde el norte cae al Maihue el río Pillanleufu, de aguas bastante turbias y fuerte pendiente. El lago Ranco tiene otros afluentes de consideración, como los ríos Nilahue y Caunahue. Quince kilómetros aguas abajo de la ciudad de Río Bueno, le afluye desde el sur, en las proximidades de Trumao, el río Pilmaiquén, que constituye el emisario del lago Puyehue. Tiene un recorrido de 68 km. en dirección al NW. El río Pilmaiquén presenta un salto en roca de 17 m de altura a menos de 10 km. de su origen, donde se ubica la central hidroeléctrica Pilmaiquén.

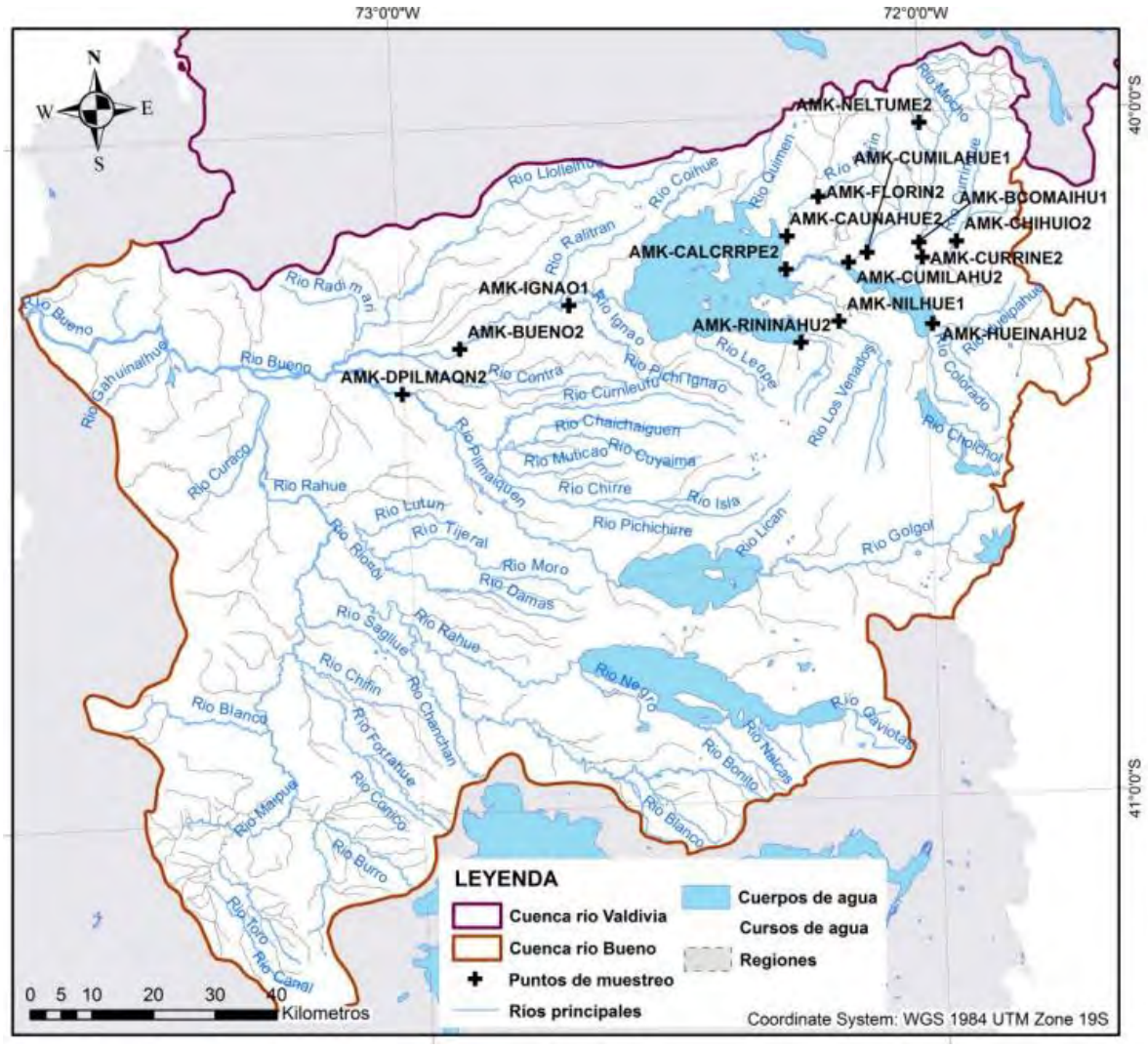


Ilustración 7: Red hídrica de la cuenca del río Bueno. Fuente: Marcela Iturrieta, 2016

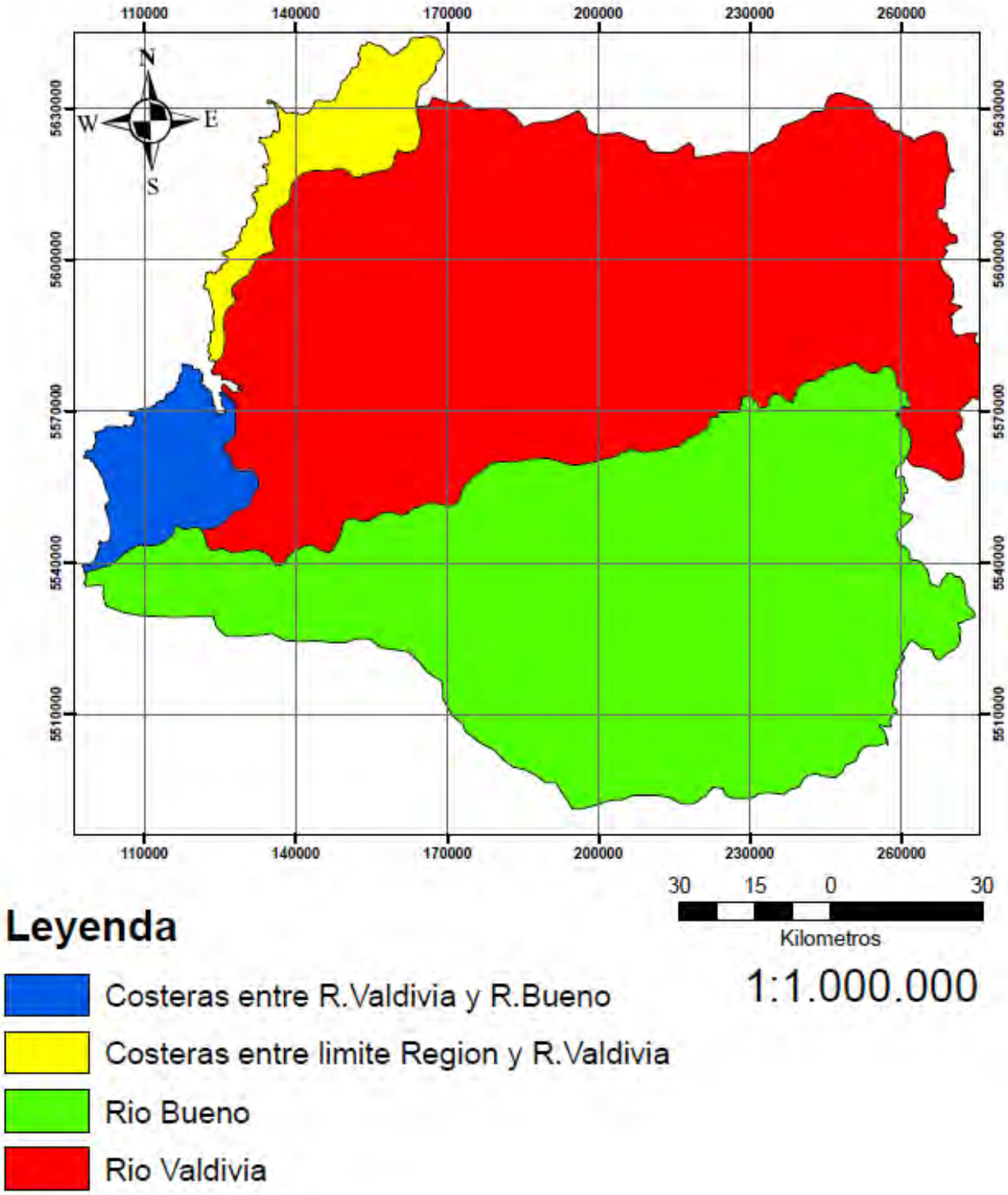


Ilustración 8: Mapa de División de cuencas en la Región de los Ríos, Fuente: Elaboración propia.

IV.4. CLIMA

El clima que presenta esta región es templado oceánico o lluvioso. Las temperaturas promedio son de 11,9°C en Valdivia. La influencia oceánica y fluvial ayuda a mantener la uniformidad térmica, de manera que los promedios mensuales no desciende bajo los 6°C en gran parte de la región (INE, 2010). Desde el punto de vista hidrográfico, esta región se distingue por la presencia de una gran cantidad de ríos cuyas características generales son las suaves pendientes.

IV.5. HIDROGEOLOGÍA

Como su nombre lo dice, la región presenta una gran cantidad de ríos de régimen mixto. Este régimen se encuentra regulado por los importantes aportes que realizan los lagos en los caudales de estos ríos. Es destacable la capacidad de navegación del río Valdivia en su parte baja. Los principales ríos son: El río Valdivia y río Bueno. En ambos casos, los ríos se originan en la zona cordillerana y presentan en su curso diversos lagos, formados a partir de la acumulación de morrenas de origen glacial que han detenido el paso de las aguas.

Tabla 2: Catalogo de cuencas y subcuencas hidrográficas Región de los Ríos, fuente: DGA: 2014

CUENCAS Y SUBCUENCAS DE LA REGIÓN DE LOS RÍOS.

CODIGO CUENCA	CUENCAS NOMBRE	AREA KM2	TIPO	REGION	% por REGION
CODIGO SUBCUENCA	SUBCUENCAS NOMBRE	AREA KM2			
101	Rio Valdivia	10245,0	Exorreica	IX - XIV	(10 - 90)%
1010	Rio Valdivia Alto (hasta desague Lago Panguipulli)	2875,5			
1011	R. San Pedro (Entre desague L. Panguipulli y Bajo R. Quinchilca)	1788,7			
1012	Rio Calle Calle	1100,6			
1013	Rio Cruces	3289,9			
1014	R. Valdivia Bajo	1190,3			
102	Costeras entre R.Valdivia y R.Bueno	762,7	Exorreica	XIV	100%
1020	Costeras entre R. Valdivia y Rio Chaihuin	121,8			
1021	Rio Chaihuin	308,2			
1022	Rio Colun	213,5			
1023	Costeras entre Rio Colun y Rio Bueno	119,1			
103	Rio Bueno	15366,8	Exorreica	XIV - X	(50 - 50)%
1030	Afluentes Lago Ranco	3346,4			
1031	Rio Bueno entre Lago Ranco y Rio Pilmaiquen	1765,3			
1032	Rio Pilmaiquen	2910,3			
1033	Rio Bueno entre Rio Pilmaiquen y Rio Rahue	406,9			
1034	Rio Rahue hasta antes junta Rio Negro	2161,0			
1035	Rio Negro	2576,5			
1036	R. Rahue Bajo	1485,3			
1037	R. Bueno Bajo	715,0			

IV.5.1. Cuenca Río Valdivia

La hoya del río Valdivia tiene el carácter de "Cuenca de recursos hidrológicos compartidos". Queda comprendida entre los paralelos sur 39°20' y 40°18´, Y meridianos O 71°13' y 73º23´ Ocupa en Chile un sector XIV Región. Se caracteriza fundamentalmente por comprender en su curso alto una cadena de grandes lagos dispuestos en serie. La extensión total de la cuenca es de 9902 km2.

La hoya limita al norte con la cuenca del río Toltén y, en La Argentina, con la del lago Lolog y la del río Quilquihue que nace en él; al sur con la hoya del río Bueno; al oriente, con las cabeceras de los tributarios orientales del Collancura, afluente importante del norte del río Limay, en La Argentina.

Dos grandes ríos concurren a formar el río Valdivia en la importante ciudad de este nombre, en latitud S39°49 ´ y longitud O 73°14´ : El Callecalle, que es el más importante, proviene del oriente y se alimenta en parte mediante el Hua - Hum de Argentina, y el Cruces que se genera enteramente en territorio nacional y proviene del norte. Las aguas del río Valdivia son salobres en la última mitad de su curso a causa de las mareas que alcanzan en sus afluentes hasta 49 km del mar.

El río Valdivia fue descubierto en septiembre de 1544 por el capitán Juan Bautista Pastene quien lo bautizó con el nombre del Gobernador Pedro de Valdivia, cambiándole el nombre original Cunilebo que le daban los indígenas. El régimen del río Valdivia y de sus tributarios es estrictamente de carácter pluvial.

IV.5.1.1 Subcuenca Río San Pedro

El río San Pedro describe desde su origen un pequeña arco hacia el norte para luego dirigirse al sur al encuentro del otro tributario. Se forma así el río Callecalle que se dirige hacia el oeste en un desarrollo meándrico y de escasa pendiente, de aproximadamente 55 km. A su término rodea a la ciudad de Valdivia par sus costados este y norte, y la ribera sudeste de la isla Teja. El otro costado de esta isla frente a Valdivia lo baña el río Cruces. A partir de la junta de ambos se genera el río Valdivia para desembocar en la bahía de Corral, después de 15 km. Un brazo hacia el sur rodea por el sur y el oeste la gran isla del Rey y se junta al brazo principal en la misma bahía.

Este brazo, llamado río Tornagaleones recibe por su ribera estos dos ríos de cursas paralelos y breve desarrollo, son los ríos Angachilla y Futa.

IV.5.1.2 Subcuenca Río Callecalle

El río Callecalle se origina de la reunión de los ríos San Pedro y Quinchilca, ocho kilometros aguas arriba de la ciudad de Los Lagos. El primero de estos ríos constituye el desagüe del lago Riñihue que es el último de la cadena de grandes lagos que generan dicho río. Esta cadena tiene la siguiente trayectoria. Se origina en el extremo poniente del lago Lacar con el nombre de río Hua-Hum. Cruza la frontera política en el paso de Hua-Hum dirigiéndose al noroeste por 12,5 km para caer en el extremo sur del lago Pirihueico. Con el nombre de río Fui, de dirección aproximada al oeste y 7,5 km de longitud, escurre a partir de dicho lago para juntarse con el desagüe del lago Neltume, situado poco más al norte, formando el río Llanquihue que cae en el extrema sureste del lago Panguipulli. Este río tiene dirección al oeste y longitud de 8 km. En la ribera opuesta, dentro de la misma zona donde llega al río Llanquihue está el desagüe del lago Panguipulli a través del río Enco, que toma dirección al SSO y longitud de 10 km. El río Eoco entra al extremo sudeste del lago Riñihue que tiene un eje mayor orientado al NO, y de cuyo extremo más occidental nace, finalmente, el río San Pedro.

El río Callecalle, no tiene tributarios importantes de la ribera norte. Por el sur, recibe sin embargo varios cauces mayores, aunque de corto desarrollo. En Los Lagos se le junta el río Collileufu, que a

su vez tiene una red de captación amplia en cerros montuosos al sur de la ciudad; el estero Laureño, el río Cuicuileufu, estero del Choco y otros menores.

IV.5.1.3 Subcuenca Río Cruces

El río Cruces tiene un largo desarrollo de noreste a suroeste entre riberas acantiladas con numerosas vueltas y meandros dejando islas y pantanos. Nace con el nombre de San José o Copihuelpi de la reunión de varios esteros que se originan en la vertiente occidental de los cerros situados entre los lagos Villarrica y Calafquen (esteros Luma y Colico; Lliuco y Copihuelpi). Se dirige hacia el oeste por espacio de 25 km, hasta la ciudad de Loncoche, punto en el cual dobla hacia el suroeste y recibe otros dos esteros desde el norte: el Cahuinhue y el Niguen. Hasta la ciudad de Lanco recorre otros 20 km y recibe en este tramo por su ribera oriente el río Quilquil, y por la ribera oeste los esteros Coihue y Curanilahue. En Lanco mismo se le junta desde el SE el río Leufucade. Al sur de Lanco serpentea entre riberas acantiladas y tras otros 30 km baña la ciudad de San José de la Mariquina, sin recibir aportes importantes. Sigue al sur de este pueblo siempre en dirección al SO, tomando el nombre de Cruces, al pasar por el caserío homónimo. Hasta juntarse con el Callecalle recorre otros 50 km. En este último tramo recibe por su ribera oeste o derecha los esteros Bellavista, Tambillo y Rehue; por su ribera izquierda u oriente recibe dos aportes importantes: el río Nanihue y el río Pichoy. Este último nace muy al este y drena un área importante del Valle Central recogiendo las aguas de los ríos Mafil, Iñaque y Rucapichin.

El río Cruces es navegable por embarcaciones menores hasta el punto denominado Panul, o sea, hasta unos 15 km río arriba desde su desembocadura.

IV.5.2. Cuenca Costera entre Río Valdivia y Río Bueno

IV.5.2.1 Subcuenca Río Chaihuin

La principal de estas cuencas es la del río Chaihuín, la cual se distribuye abriendo un valle en la Cordillera de la Costa en dirección Noreste. Alcanza una superficie de 34.000 ha y la longitud del río principal es de aproximadamente 26 km. Una entramada red de pequeños esteros y arroyos tributan sus aguas desde el nacimiento del río Chaihuín (a 750 m.s.n.m) hasta su desembocadura en la localidad del mismo nombre, cuyo cauce sirve de límite a la Reserva Costera Valdiviana propiedad de la Organización no gubernamental “The Nature Conservancy” (TNC). En su curso inferior es un río navegable para embarcaciones menores y desemboca como estuario en la bahía de Chaihuín, a unos 20 km al sur de la Bahía de Corral. En su desembocadura, este río mantiene un régimen estuarino, cuya cuña de agua salada se extiende aproximadamente hasta el sector de Cadillal Bajo.

IV.5.2.2 Subcuenca Río Colún

La cuenca del río Colún se encuentra íntegramente en la comuna de La Unión, se distribuye transversalmente en el cordón montañoso que atraviesa la Cordillera de la Costa, presenta una superficie de 13.000 ha y es posible identificar un total de 17 microcuencas asociados a una variedad de esteros que desembocan en los principales cuerpos de aguas que drenan el río Colún. (Conservación Marina, 2007).

En el curso inferior del sistema de la hoya hidrográfica del río Colún, se presenta un interesante caso geomorfológico: las llamadas lagunas gemelas de Colún. Se trata de 2 sistemas lacustres muy semejantes entre sí, que se extienden paralelamente de N a S sobre una terraza marina. El sector está localizado en las coordenadas 40°-40°6' Lat. Sur y 73°30'-73°40' Long. Oeste, en la vertiente occidental de la cordillera costera, sobre una terraza marina modelada en sedimentos pliocenico, (estratos de Colún) donde dos esteros menores originan sendos espejos de agua.

IV.5.3. Cuenca Río Bueno

En la parte alta destaca la existencia de formaciones rocosas de origen sedimento volcánicos del período Terciario y Cuaternario y rocas hipabisales e intrusivas pertenecientes a los períodos Jurásico - Terciario. Destacan los volcanes Puyehue, Carrán, Osorno y Casablanca como importantes formadores del relieve de esta cuenca, así como las glaciaciones acontecidas durante el período Cuaternario. Estas formaciones consisten principalmente en coladas, brechas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de lutitas, calizas areniscas y conglomerados de baja permeabilidad y que forman el basamento de este sector de la cuenca. Por lo tanto, las infiltraciones de aguas meteóricas escurren por el subsuelo principalmente hasta los cuerpos lacustres de Maihue, Ranco, Huishué, Constancia, Puyehue y Rupanco. Las aguas de estos lagos se infiltran a través del material morrénico originando una fuente constante de abastecimiento del acuífero.

En el sector del valle central escurren dos acuíferos: uno en dirección NWW paralelo a los ríos Pilmaiquén y Rahue y el otro lo hace en dirección SSW paralelo al batolito costero hasta juntarse ambos con el acuífero de la cuenca del río Maullín por el sur. El medio por el cual escurre el acuífero es material de relleno o depósitos no consolidados de origen glacial, consistente en morrenas y materiales aluviales de alta permeabilidad.

Destaca el batolito costero como un gran murallón impermeable consistente en rocas metamórficas y sedimentarias del período Paleozoico que provoca la bifurcación antes señalada en los acuíferos. Destaca la baja profundidad del acuífero que se mantiene hasta su desembocadura con profundidades de 2 a 3 metros.

En las cercanías de la ciudad de Osorno destaca una extensa área de aguas surgentes entre los ríos Pilmaiquén y Rahue.

IV.5.3.1. Subcuenca Río Rahue

El río Rahue se origina en el extremo occidental del lago Rupanco y lleva sus aguas al río Bueno. Son afluentes del Rahue los ríos Forrahue, Negro y Damas. Afluentes del lago Ranco son los ríos Calcurrupe y Nilahue, que nacen el primero en el lago Maihue y el segundo en la cordillera de Los Andes. El río Bueno, por su parte, nace en el lago Ranco y va a desembocar en el océano Pacífico, siendo el río Pilmaiquén su principal afluente cuyo origen es el lago Puyehue. Una central hidroeléctrica se encuentra en funciones en el Pilmaiquén, a unos 36 km al Este de la ciudad de Osorno.

IV.5.3.2. Subcuenca Lago Ranco

El lago Ranco se encuentra en la Región de Los Ríos, está situado a 70 m.s.n.m., y posee una superficie cercana a los 410 km2, y una profundidad superior a 80 m. Al oriente está rodeado de altas montañas y presenta varias penínsulas, senos, golfos e islas, siendo la isla Guapi la de mayor importancia. Su principal tributario es el río Calcurrupe que desagua el lago Maihue ubicado más al oriente. Otros afluentes del Ranco son los ríos Nilahue y Caunahue (DGA 2004). Un estudio realizado por la Universidad de Chile (DGA 2011) caracteriza al lago Ranco como ambiente generalmente oligotrófico, pudiendo mantener dicho estado si no se aumenta la carga de nutrientes actual. En cuanto a sus afluentes (Nilahue, Caunahue, Calcurrupe, Pitreño, Iculpe, Quiman) los resultados indicaron un estado contaminado producido principalmente por las descargas de pisciculturas y otras fuentes. Su bajo nivel de trofía predominante se ha mantenido a largo plazo. (DGA 2014).

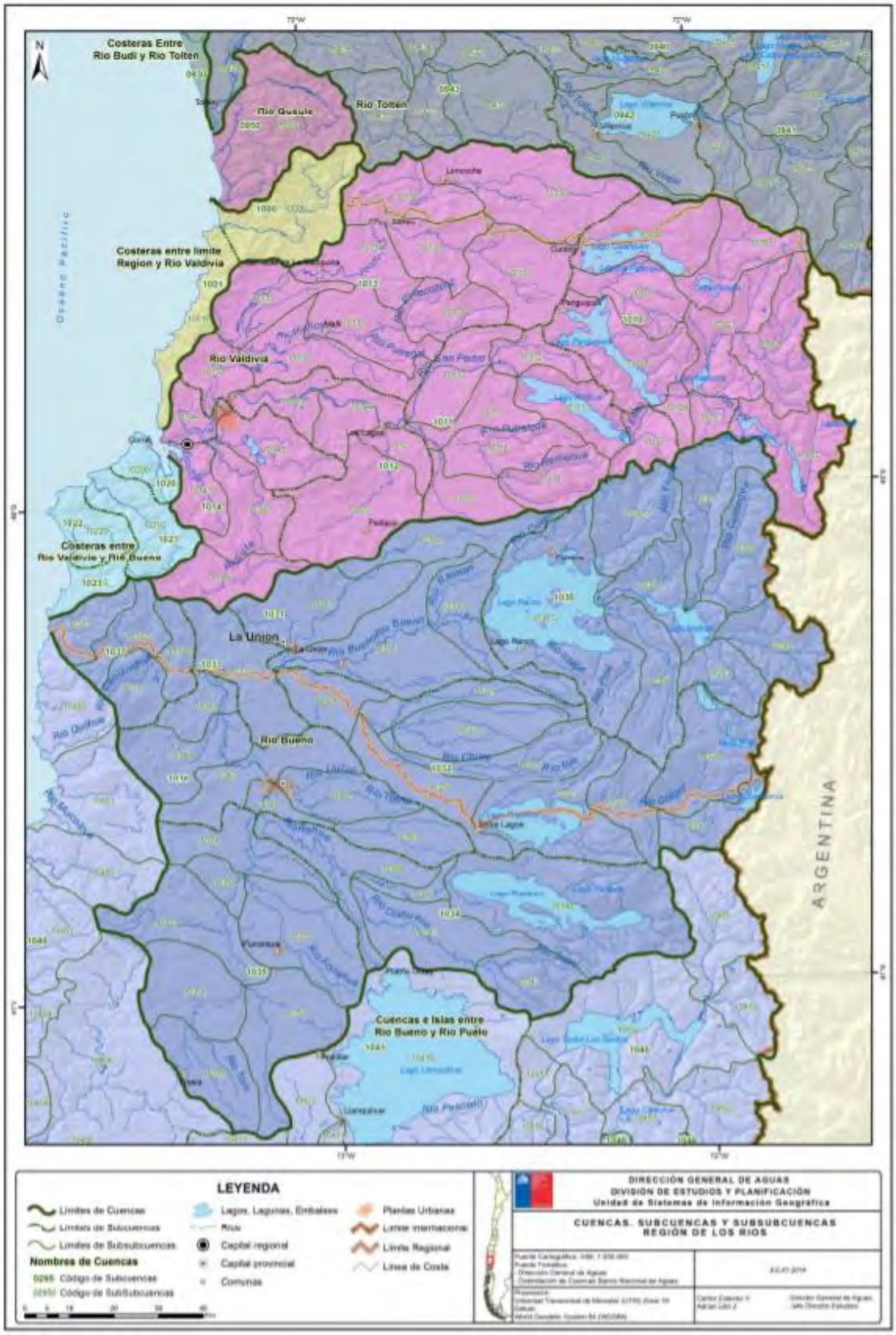


Ilustración 9: Cuencas y subcuencas de la región de los ríos fuente: DGA, 2014

IV.5.4. Acuíferos

Tabla 3: Catalogo de acuíferos preliminares de la región de los ríos, modificada con datos de precipitación promedio de cada acuífero. Fuentes: DGA

	Sector Acuifero			
Acuifero	**Cantidad**	**Nombre**	**Área km2**	**PP M/año**
Bueno inferior	1	Bueno inferior	721,6	2,16
Bueno superior	1	Bueno superior	5878,12	3,47
Colún	1	Colún	667,4	2,3
Loncoyen	1	Loncoyen	187,72	1,89
Mehuín	1	Mehuín	543,08	1,57
Río Bueno	1	Río Bueno	3567,12	1,72
Río Calle Calle	1	Río Calle Calle	2381,52	2,41
Río Cruces	1	Río Cruces	3380,56	1,96
Valdivia alto	1	Valdivia alto	362,72	4,99
Valdivia Inferior	1	Valdivia Inferior	1314,24	2,04
Valdivia Superior	1	Valdivia Superior	2991,52	3,73
		Total	21995,6	

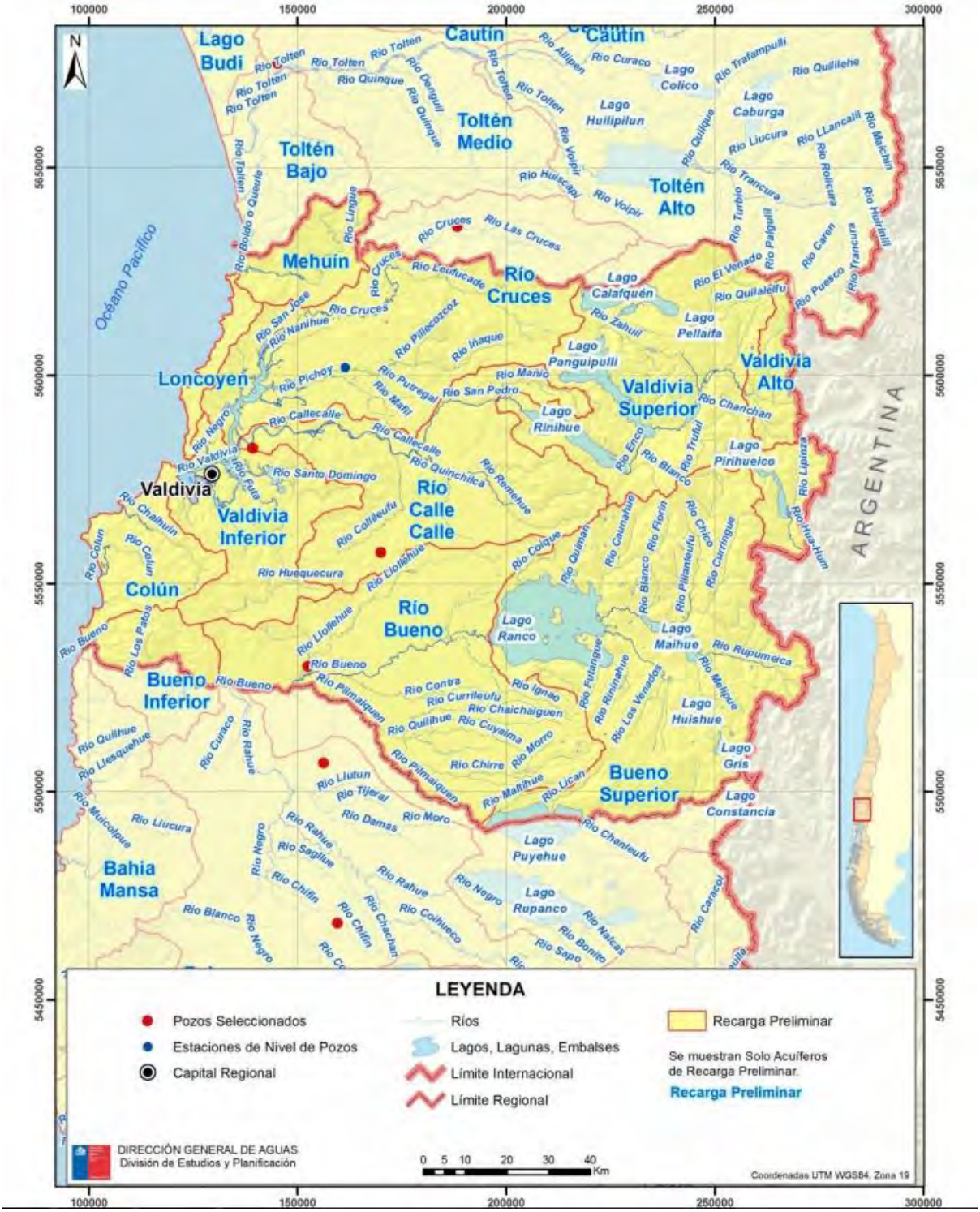


Ilustración 10: Acuíferos y pozos de monitoreo DGA de la región de los ríos. Fuente: DGA, 2017

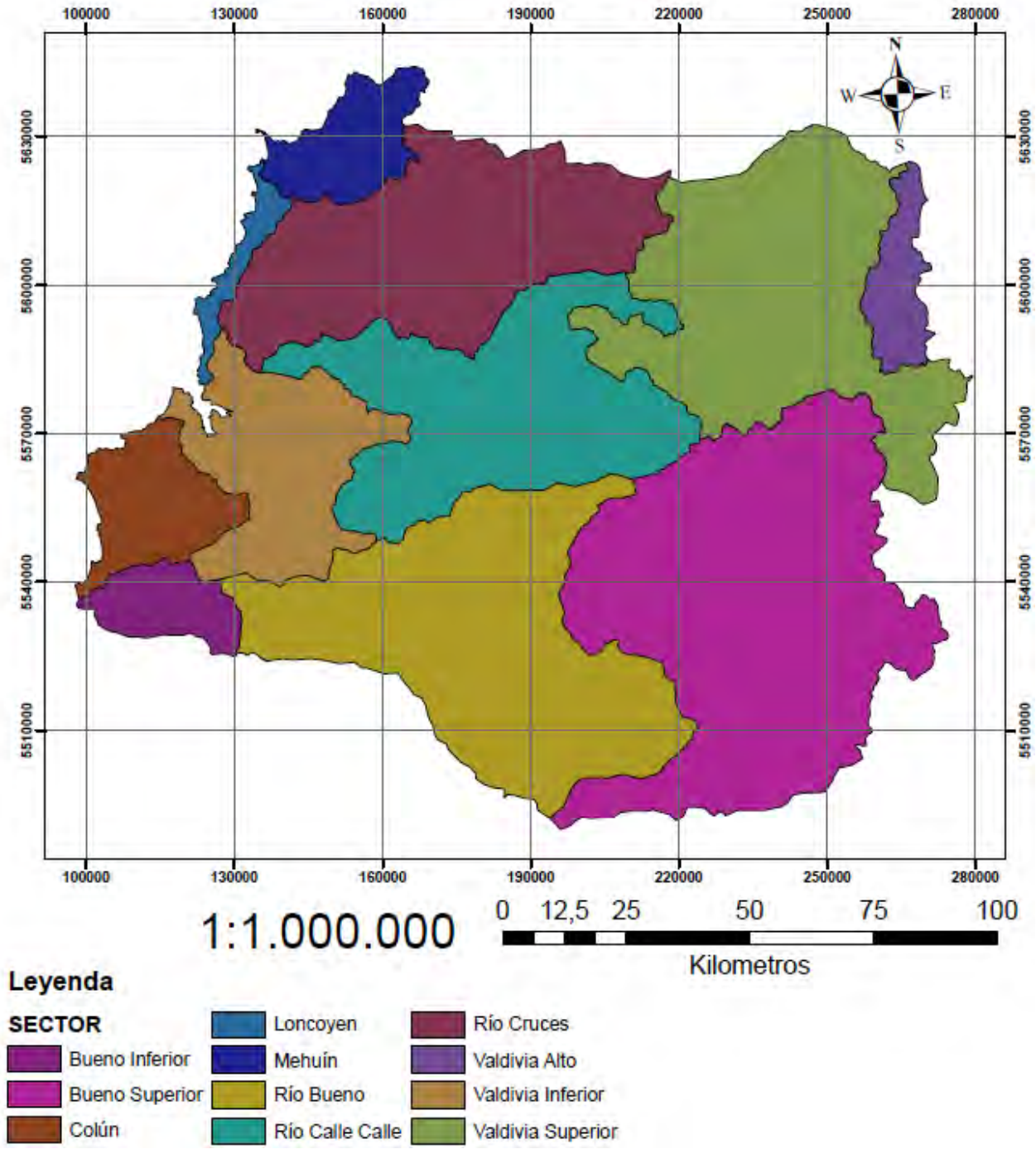


Ilustración 11: Mapa de División de acuíferos en la Región de los Ríos, Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4: Oferta de recursos hídricos v/s demanda comprometida Región de los Ríos, Fuente: DGA 2014 (Informe técnico DARH N°208)

Sector	Recarga m3/año	Recarga l/s	Derechos Aprobados m3/año	Derechos Aprobados l/s	Solicitudes m3/año	Solicitudes l/s	Total m3/año	Total l/s
Bueno Inferior	31.187.696	989	12.930	1	25.229	4	38.159	5
Bueno Superior	204.258.204	6.477	12.406.288	506	8.617.254	270	21.023.541	777
Colún	30.674.505	973	-	-	-	-	-	-
Loncoyen	7.078.245	224	1.261	0			1.261	0
Mehuín	17.093.443	542	62.758	10	214.843	7	277.601	17
Río Calle Calle	286.470.659	9.084	17.164.405	633	3.026.734	138	20.191.139	770
Río Cruces	330.486.926	10.480	118.240.372	4.494	20.232.254	790	138.472.626	5.284
Valdivia Alto	18.107.019	574	-	-	-	-	-	-
Valdivia Inferior	53.650.431	1.701	3.032.397	131	1.838.660	53	4.871.057	184
Valdivia Superior	557.568.472	17.680	9.034.140	322	9.516.105	325	18.550.244	646
Río Bueno	306.890.035	9.731	157.566.694	6.961	27.226.662	1.146	184.793.356	8.107

IV.5.4.1 Vulnerabilidad de Acuíferos

La vulnerabilidad un sistema se define como este 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 específica* 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*.

Métodos de estimación de la vulnerabilidad

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

Método SGFRA-BGR *(Hölting et al., 1995)*:

Este método, conocido informalmente en Chile como BGR, estima la vulnerabilidad de un acuífero con un método de puntaje acumulativo, que considera los siguientes factores:

S : Permeabilidad del suelo orgánico o agrícola, en superficie.
R : Litología de cada estrato en la zona no saturada.

E : Espesor en metros de cada estrato hasta la zona no saturada.
W : Tasa de percolación o recarga al acuífero.

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 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).

A continuación, se incluye un mapa en el que se presentan las distintas categorías de vulnerabilidad de los acuíferos a nivel regional.

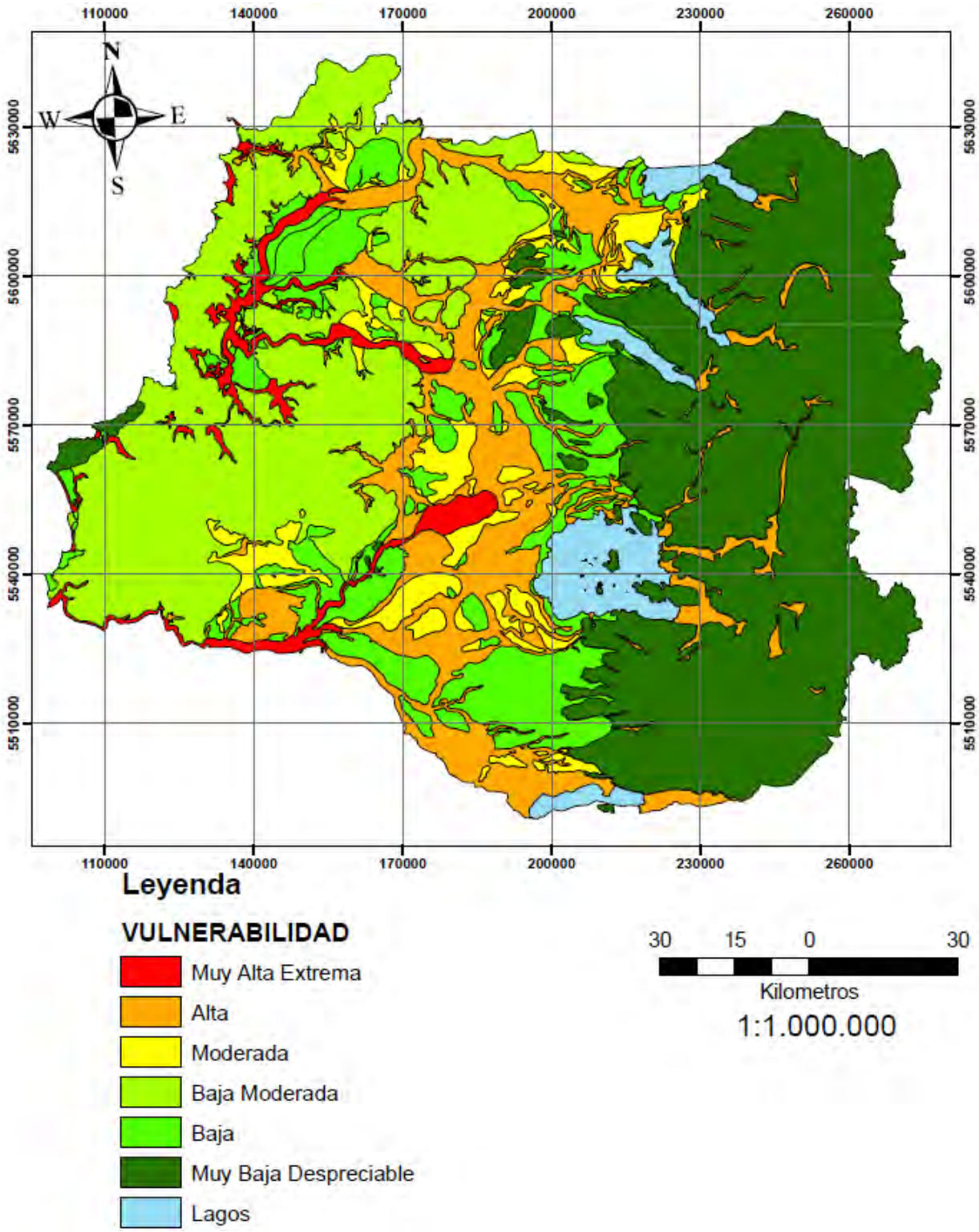


Ilustración 12: Mapa de Vulnerabilidad de la Región de los Ríos, Fuente: Elaboración propia

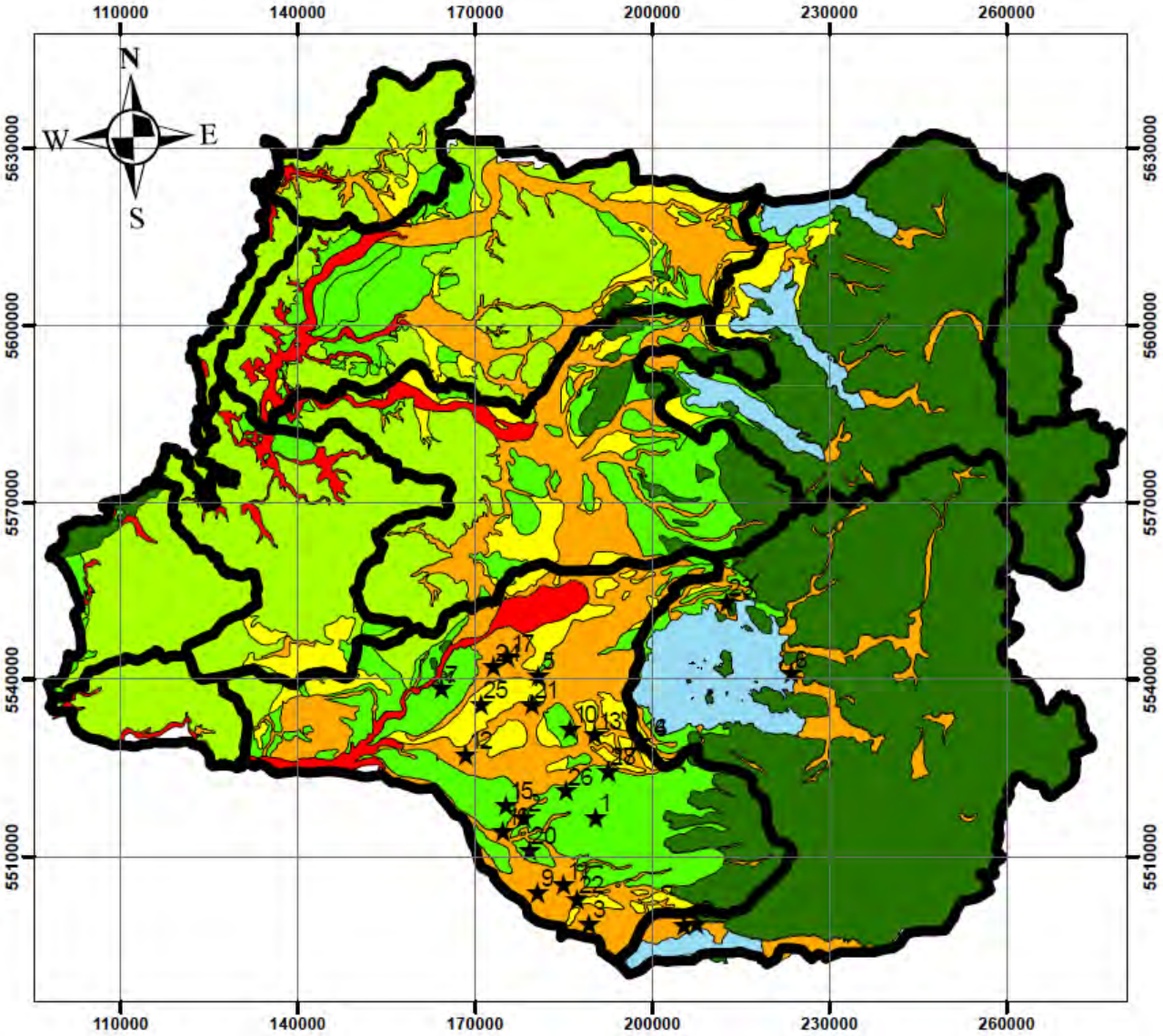
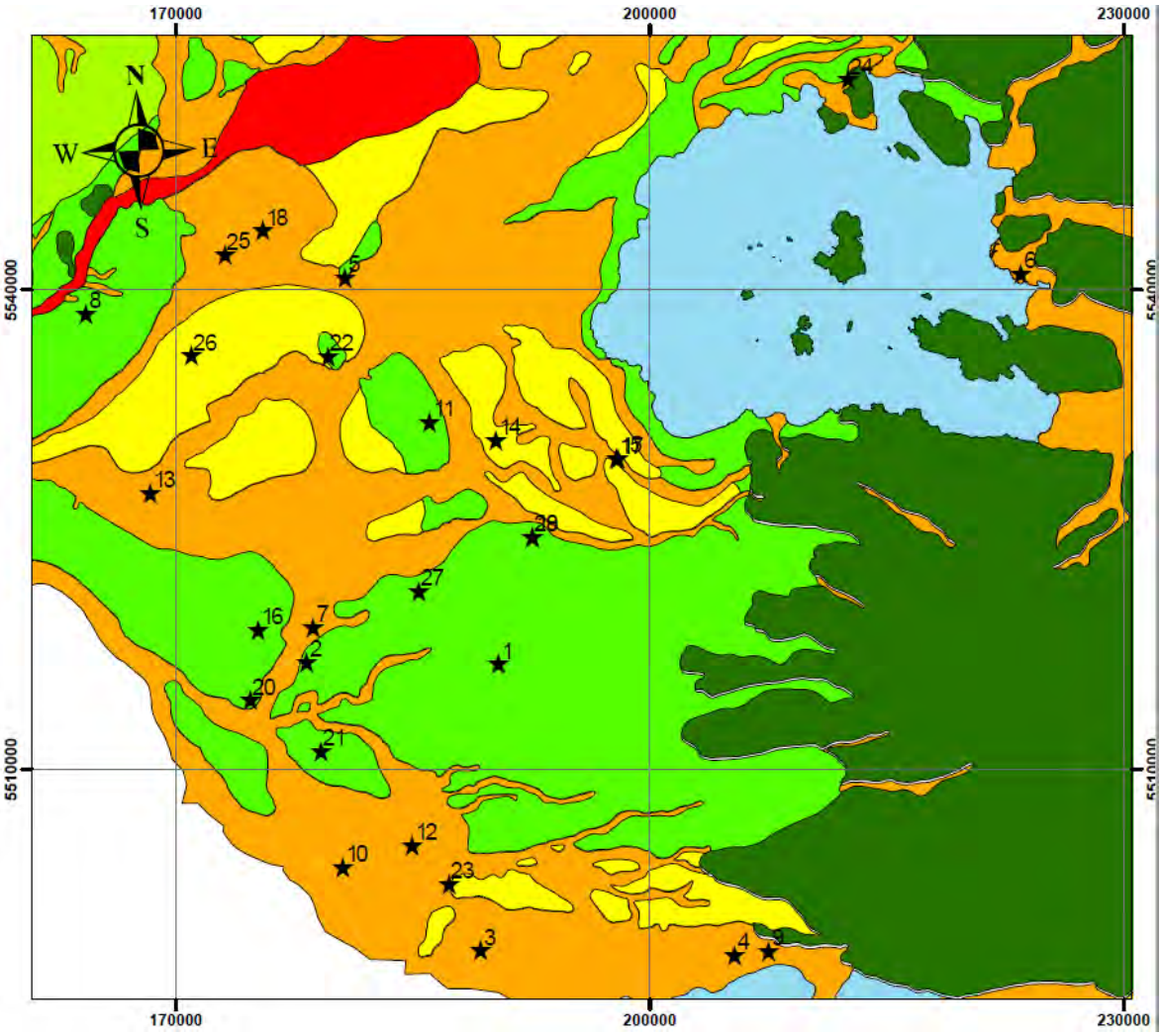


Ilustración 13: Mapa de Vulnerabilidad de la Región de los Ríos con división de acuíferos, Fuente: Elaboración propia



Leyenda

1 Folilco Río Bueno	10 Carimallin	19 Los Leones
2 Futahuente	11 Cayurruca	20 Marriamo
3 Trehuaco	12 Champulli	21 Nolgehue
4 Mantihue	13 Curaco	22 Pataguas de Pilmaiquen
5 Huape	14 El Meli	23 Ponhuipa
6 Calcurrupe	15 Ignao	24 Puerto Las Rosas
7 Cun Cun	16 Litran	25 Rofuco Alto
8 Auquinco	17 Llifen	26 Traiguen
9 Boquial 1-2-Ticahua	18 Los Esteros de Niscon	27 Trapi
		28 Vivanco

Ilustración 14: Zona ampliada de mapa de vulnerabilidad, con distribución de pozos en la Región de los Ríos, Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Resumen de vulnerabilidad para cada acuífero. Fuente: Elaboración propia.

Simbologia	Nombre del APR	Vulnerabilidad	Acuifero
★[1]	Río Folilco	Baja	Río Bueno
★[2]	Futahuente	Baja Moderada	Río Bueno
★[3]	Trehuaco	Alta	Río Bueno
★[4]	Mantihue	Alta	Bueno Superior
★[5]	Huape	Baja Moderada	Río Bueno
★[6]	Calcurrupe	Alta	Bueno Superior
★[7]	Cun Cun	Alta	Río Bueno
★[8]	Auquinco	Baja Moderada	Río Bueno
★[9]	Boquial 1-2 Ticahua	Alta	Bueno Superior
★[10]	Carimallin	Alta	Río Bueno
★[11]	Cayurruca	Baja Moderada	Río Bueno
★[12]	Champulli	Alta	Río Bueno
★[13]	Curaco	Alta	Río Bueno
★[14]	El Meli	Moderado	Río Bueno
★[15]	Ignao	Alta	Río Bueno
★[16]	Litran	Baja Moderada	Río Bueno
★[17]	Llifen	Alta	Río Bueno
★[18]	Los Esteros de Niscon	Alta	Río Bueno
★[19]	Los Leones	Alta	Río Bueno
★[20]	Marriamo	Baja Moderada	Río Bueno
★[21]	Nolgehue	Baja Moderada	Río Bueno
★[22]	Pataguas de Pilmaiquen	Baja Moderada	Río Bueno
★[23]	Ponhuipa	Alta	Río Bueno
★[24]	Puerto Las Rosas	Baja Moderada	Bueno Superior
★[25]	Rofuco Alto	Alta	Río Bueno
★[26]	Traiguen	Moderado	Río Bueno
★[27]	Trapi	Baja Moderada	Río Bueno
★[28]	Vivanco	Baja Moderada	Río Bueno

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 Ilustración 15. Además, se consideró la elección de pozos que sean continuamente usados y cuenten con posibilidad de acceso, en donde contenga al menos un pozo por provincia, un pozo por acuífero en una distribución espacial homogénea priorizando los pozos con menor profundidad.

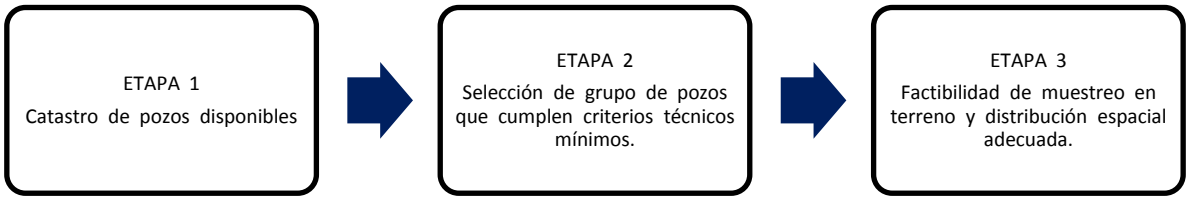


Ilustración 15: Etapas de selección de los pozos de muestre de aguas subterráneas (DGA, 2017).

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 105 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 105 pozos APR en la zona de estudio. Los que serán utilizados para obtener los resultados el presente estudio.

V.2. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS

Con el objetivo de determinar la actual condición fisicoquímica de las aguas subterráneas en la Región del Biobío e identificar la presencia de sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa. Se seleccionaron 3 conjuntos de parámetros a medir: fisicoquímicos, iones mayoritarios y microelementos metálicos (Tabla 4). Además, durante la campaña de muestreo se obtiene la profundidad de los niveles estáticos y dinámicos de cada pozo encuestado.

Tabla 6: Listado de parámetro controlados en las muestras de aguas subterráneas del presente estudio. SGS: Laboratorio Ambiental SGS Chile Ltda. (Externo a la DGA); LADGA: Laboratorio Ambiental Dirección General de Aguas.

Categoría	N° de parámetros medidos	Parámetros
Fisicoquímico (análisis en terreno)	4	Temperatura, pH, conductividad eléctrica., potencial de óxido reducción.
Iones (análisis en laboratorio SGS)	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 (TSD), Sulfato (SO_4^{2-}).
Microelementos (análisis en laboratorio LADGA)	15	Plata (Ag), Aluminio (Al), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), 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 (SGS) contratado mediante licitación pública ID N° 1019-10-LE19. El trabajo contratado para este estudio incluyó la visita a terreno de 28 pozos ubicados dentro de la región, la toma de muestras de aguas subterráneas para el análisis de iones y la posterior entrega de informes de análisis en los formatos y plazos establecidos en las bases de licitación.

V.3. USO DE EQUIPOS Y MATERIALES

V.3.1. MATERIALES DE MUESTREO

Los materiales para cada muestreo y medición in situ fueron provistos por el laboratorio SGS Chile Ltda. y los envases necesarios se preparan de acuerdo con los parámetros establecidos en la normativa vigente en sus diferentes tipos y tamaños (Tabla 5).

Tabla 7: Tipos de envases utilizados. Fuente: DGA, 2018a

Material Muestreo	
Botellas plásticas 1 L	Botellas aséptico EDTA S/T
Botellas plásticas 1/2 L	Botellas aséptico EDTA C/T
Botellas de vidrio transparente 1 L	Materiales para equipos
Botellas boca ancha/frasco 1 L	Buffer pH 4
Botellas de vidrio ámbar 200 ml	Buffer pH 7
Botellas de vidrio ámbar 1 L	Buffer pH 10
Gel pack	Solución de limpieza electrodo pH
Cajas de COOLER	Solución estándar conductividad 1413 µS/cm
Preservante HNO3	Solución estándar conductividad 12.88 µS/cm
Preservante HCl	Agua grado reactivo
Preservante H2SO4	Solución Zero
Preservante NaOH	Papel pH
Preservante ZnAc	Filtros MILLEX para uso en terreno

V.3.2. EQUIPOS

Para el presente estudio se utilizaron los siguientes equipos para el monitoreo.

Tabla 8: Equipos para medición en terreno. Fuente: DGA, 2018a

Equipo	Marca	Modelo	Parámetro	Rango de Lectura	Precisión del sensor
Sonda Multiparmétrica	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 asoluta 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	Geotech	ET	N.A	100 m o superior	N.A.

V.4. METODOLOGÍAS ANALÍTICAS

Las metodologías utilizadas por los Laboratorios Ambientales de SGS de los diferentes parámetros, se presentan las tablas a continuación (Tabla 7 y 8, respectivamente).

Tabla 9: Parámetros medidos y las respectivas metodologías utilizadas por el Laboratorio Ambiental SGS

Parámetro	Metodología de análisis
Aniones	Standard Methods 4110 B Ed.22, 2012
Elementos	Standard Methods 3120 B Ed.22, 2012, EPA 200.7
Nitrato	Standard Methods 4500-NO_3 B Ed.22, 2012
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	Standard Methods 2320 B Ed.22, 2012
Fosfato	Standard Methods 4500-P E Ed.22, 2012
Solidos Totales Disueltos	Standard Methods 2540 C Ed.22, 2012
Amoniáco	Standard Methods 4500-NH3 BD Ed.22, 2012
Balance Iónico Total	Cálculo

Tabla 10: Parámetros medidos y las respectivas metodologías utilizadas por el Laboratorio Ambiental de la DGA.

Parámetro	Metodología de análisis
Plata	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012
Aluminio	Standard Methods 3111 D Ed.22, 2012
Arsénico	Standard Methods 3114 B Ed.22, 2012
Cadmio	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012
Cobalto	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012
Cromo	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012
Cobre	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012
Hierro	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012
Mercurio	Standard Methods 3112 B Ed.22, 2012
Manganeso	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012
Molibdeno	Standard Methods 3111 D Ed.22, 2012

Parámetro	Metodología de análisis
Níquel	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012
Plomo	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012
Selenio	Standard Methods 3114 C Ed.22, 2012
Zinc	Standard Methods 3111 B Ed.22, 2012

V.5. 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 VIII Región.
- Contactar a los responsables del acceso a los pozos y coordinar el día y hora de visita.
- Revisar rutas de acceso a los distintos puntos y programación de los listados de pozos a visitar cada día.
- Elaborar e imprimir fichas para el registro de datos levantados en terreno.
- Preparar materiales necesarios para la toma de muestras y mantención de éstas en terreno.
- Coordinar el correcto ingreso de muestras al Laboratorio Ambiental de la DGA, de acuerdo con el instructivo LADGA- 5.8-02-07: "Procedimiento Ingreso de Muestras."

V.6. OBTENCIÓN DE MUESTRAS

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, SGS Chile Ltda., aplicó el instructivo definido en su Sistema Gestión Integral (SGI) "Muestreo aguas subterráneas" (Código: I-ENV.OI-005).

V.7. 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 miliequevalentes/litro (meq/L). El error de balance iónico no debe ser mayor a 5% (en términos absolutos) según la expresión que se presenta a continuación (DGA, 2009):

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

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

- Parámetros fisicoquímicos medidos en terreno: gráficas de esferas sobre cartografía.
- Iones mayoritarios: diagrama de Stiff (Ver Ilustración 16) y diagrama de Piper. Para su construcción se utilizó el software EASY QUIM v5.0 (2012).
- Microelementos: gráficos de barra comparando con estándares de calidad de agua para consumo humano (NCh 409/2005) y aguas para riego (NCh 1333)

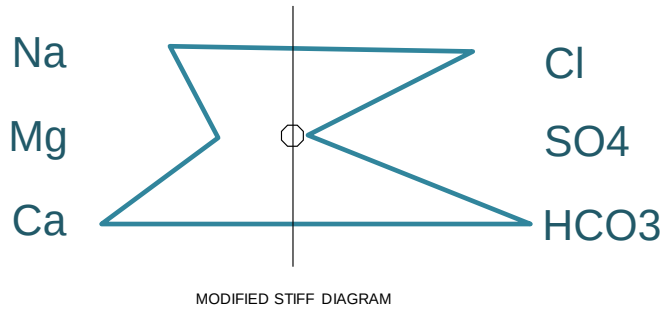
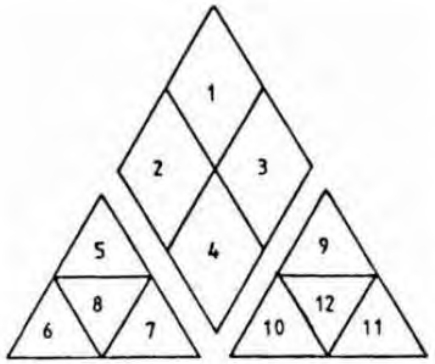


Ilustración 16: Ejemplo diagrama de Stiff con los iones considerados.

La interpretación de los diagramas de Piper (Ilustración 17) 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.

Ilustración 17: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.

V.8. 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. Nº183 (DGA, 2009) llamado "Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos", que diseñó un Índice de Calidad que fue aplicado en tres sectores acuíferos diferentes: Aconcagua, Los Choros y El Loa.

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

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

V.8.1. ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA

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

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

- Mediante el análisis conjunto de la información de calidad química y otras clasificaciones que asocian el origen o explicación de esta calidad se puede complementar el Índice de Calidad, para determinar si la calidad tiene un origen natural o antrópico, industrial, agrícola, procedente de asentamientos humanos, etc.
- Para que los resultados sean comparables a nivel nacional, los parámetros seleccionados en la metodología de cálculo del Índice de Calidad corresponden a parámetros de análisis común, ofreciendo, además, la posibilidad de incluir algunos parámetros específicos de carácter local como podrían ser para determinados sectores el Arsénico, el Boro, el Aluminio, el Hierro, entre otros.
- Es posible realizar la comparación temporal de la calidad química de las aguas de un mismo acuífero, observando los cambios ocurridos en el tiempo, en relación, por ejemplo, al periodo anterior o la línea base.
- Para facilitar la comprensión e interpretación, los resultados del Índice de Calidad se representan en mapas que permiten la lectura también de personas no especialistas.

A continuación, se resume de manera general el esquema metodológico (Ilustración 18) 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.

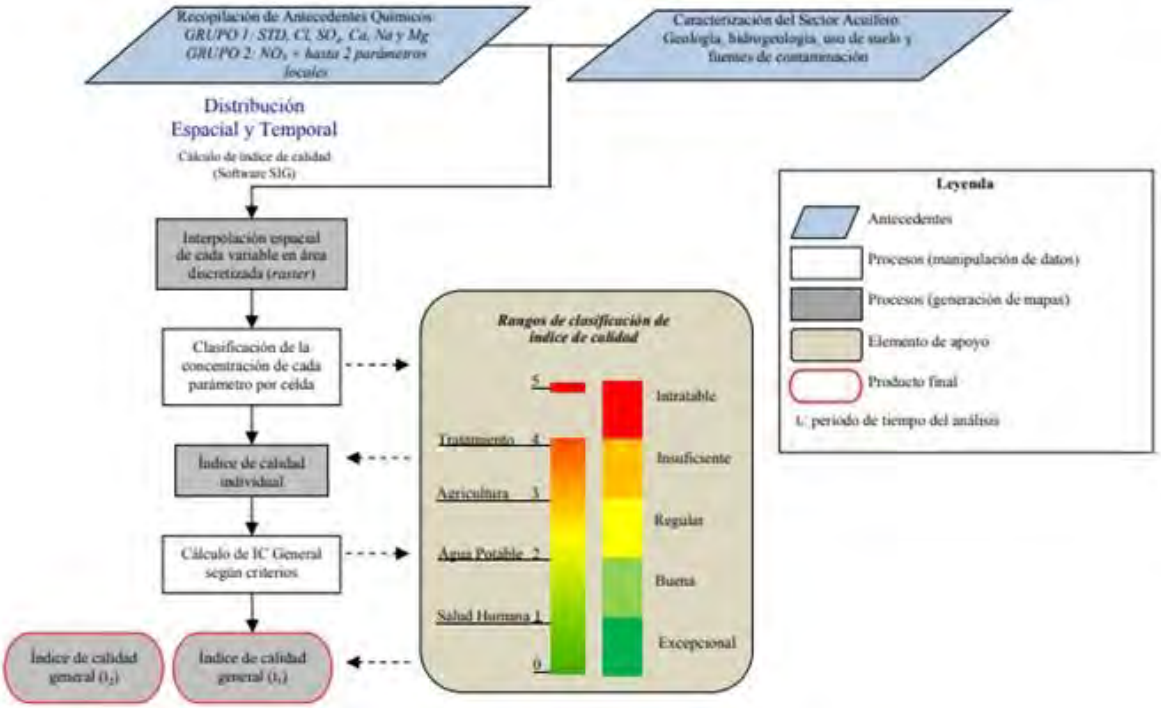


Ilustración 18: Esquema y diagrama de flujo de metodología de cálculo del Índice de Calidad de aguas subterráneas
Fuente: Modificado de DGA (2009).

V.8.2. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD

La metodología contempla trabajar con dos grupos de parámetros (Tabla 9), 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 este, ya sea por causas naturales o artificiales.

Tabla 11: 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 10 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 12: 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.8.2.1. 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. Este se obtiene mediante la interpolación lineal de las concentraciones contrastadas con los valores de corte definidos para cada parámetro (VC1, VC2, VC3 y VC4), obteniendo un IC individual de valor discreto entre 1 y 5, que corresponden a las 5 categorías de calidad del parámetro, de mejor a peor, respectivamente (ver Ilustración 19).

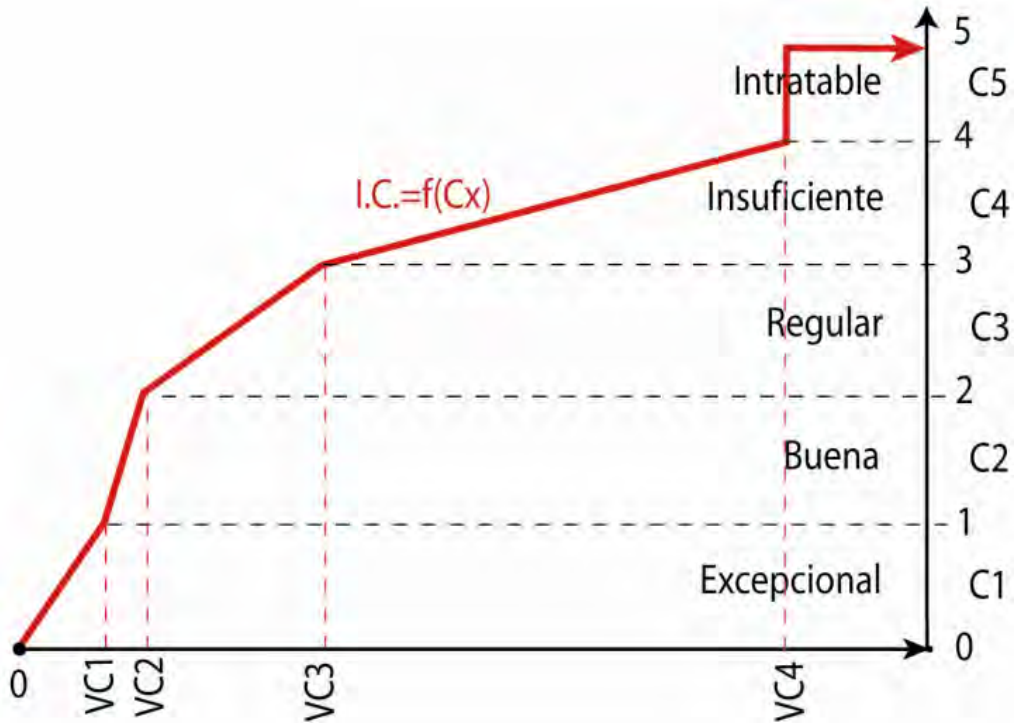


Ilustración 19: Cálculo del Índice de Calidad (IC) mediante interpolación lineal entre clases. Fuente: DGA (2009).

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 11.

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

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

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

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

disponibles y de su efectividad de remoción de cada parámetro, considerando aspectos técnicos y económicos.

Los parámetros con concentraciones por sobre el valor de corte 4 son clasificados como Intratables (C5). Hay que considerar que al haber adoptado un valor intermedio de remoción para la definición del valor de C4, las aguas de esta clase no se 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).

Tabla 13: 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	Intratable	VC5	Aguas que no se pueden tratar. De ser posibles serían mediante procesos muy costosos o complejos.

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
Arsénico	mg/L	0.01	0.01	0.1	4

V.8.2.2. CÁLCULO DEL IC GENERAL

A partir de los IC individuales se calcula posteriormente el Índice de Calidad general (IC general) del pozo y sector acuífero mediante la aplicación de los criterios que se detallan a continuación (Tabla 12). (DGA, 2009).

Tabla 14: 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	$Si\ 1 < IC_{individual} \leq 4$ $IC_{general} = \underset{i=parametro}{Max}\left(IC_i\right)$
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Excepcional	→	IC general es el promedio aritmético del IC individual de todos los parámetros	$Si\ IC_{individual} \leq 1$ $IC_{general} = \frac{\sum_{i=parametro} IC_i}{n^o\ parametros}$

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. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES EN TERRENO Y LABORATORIO

La totalidad de los pozos muestreados (28) corresponden a fuentes utilizadas para el abastecimiento de la población rural pertenecientes al Programa Agua Potable Rural (APR) construidos por la Dirección de Obras Hidráulicas MOP. A continuación, se muestran fotografías de uno de los puntos de muestreo visitado durante este estudio.

Ilustración 20: Gráfico de torta con la cantidad de muestras obtenidas por sector acuífero. Fuente: Elaboración propia

La ubicación de las muestras de pozos APR consideradas para el presente estudio se presenta a continuación en la Ilustración 21.

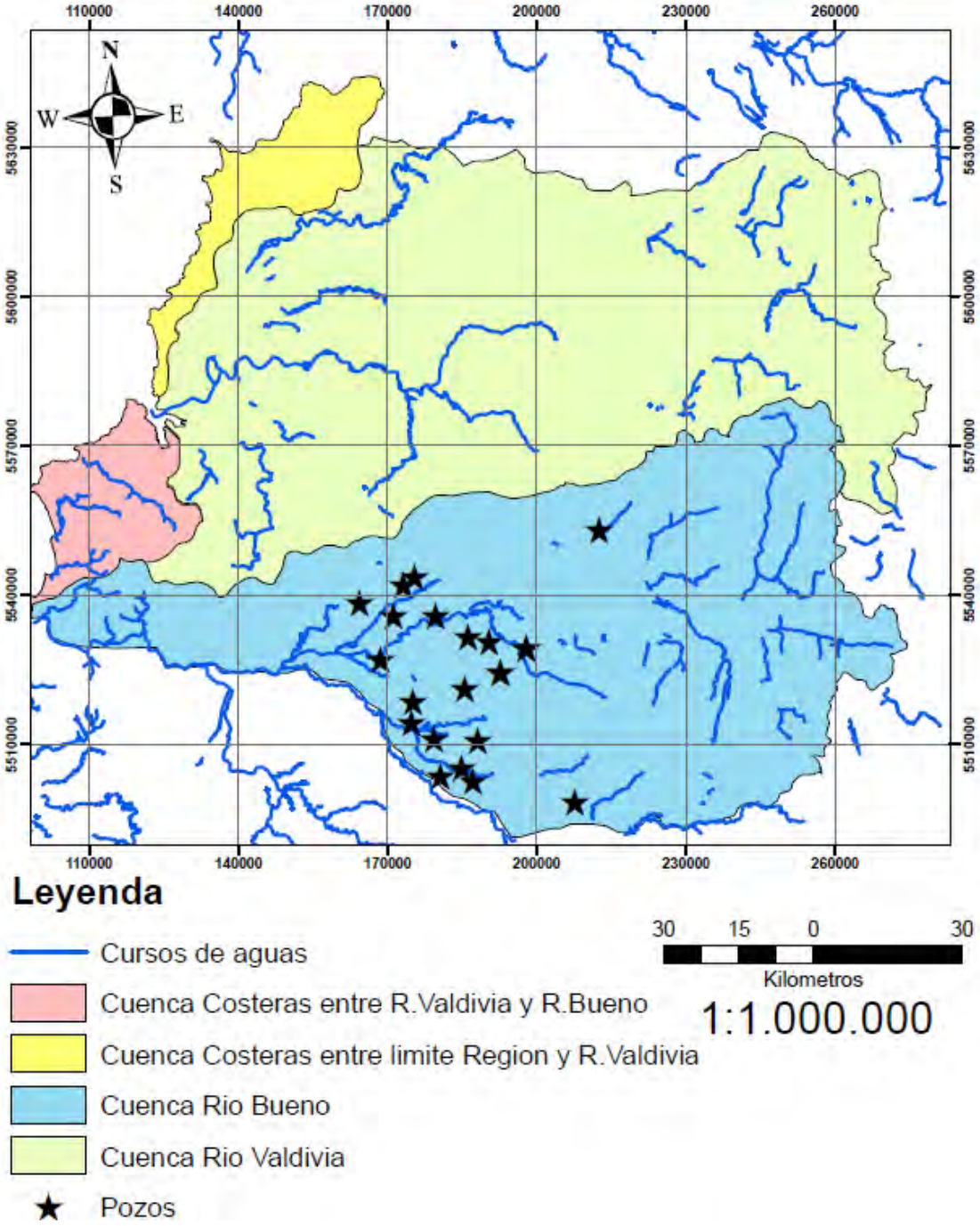


Ilustración 21: Muestreo de pozos pertenecientes al programa de Agua Potable Rural (APR) realizado para este estudio durante el año 2019 con mapa de referencia de fondo. Fuente: Elaboración Propia.

VI.1.2. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

VI.1.2.1. ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO BUENO

Como se mencionó anteriormente, la Región de los Ríos está dividida en 4 cuencas, donde solo en la cuenca del Río Bueno se realizó la toma de muestras, y preliminarmente en 11 acuíferos, de los cuales solo se realizó toma de muestras en 2 (Rio Bueno y Bueno Superior). A continuación, se presentan los valores de profundidad de nivel estático y dinámico, pH, Temperatura, Conductividad eléctrica obtenidos en cada pozo, así como también su distribución y al acuífero asociado. (Ver Tabla 15). 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 las Ilustraciones 22, 23, 24 y 25 se observa la distribución espacial de los pozos APR muestreados, que aprovechan el acuífero de la cuenca del Río Bueno, y los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica y temperatura) obtenidos en cada uno de los pozos.

Según los valores de pH obtenidos, se observa que solo 1 pozo de los muestreados presenta aguas más ácidas que lo permitido por la norma de agua potable y que ninguno de ellos presenta valores más alcalinos que lo permitido por dicha norma. En la Ilustración 23, se señalan en rojo y anaranjado los pozos con valores más ácidos que lo permitido. A pesar de que no se registraron pozos con valores de pH superiores, encontrándose los mayores valores en solo 1 pozo que registro un pH de 7,98.

Los valores de conductividad eléctrica son relativamente bajos en todo el acuífero (en su mayoría menores a 300 µS/cm). En relación con lo expuesto en la Norma N°1333 (para agua de riego), estas aguas corresponden a aguas "*con las cuales generalmente no se observarán efectos perjudiciales*" por tener conductividades eléctricas menores a 750 µS/cm. Límites aceptados para este valor no se encuentran especificados en la Norma NCh N°409 (Calidad de agua potable), pero sí se norma el Total de Sólidos Disueltos (TDS) que suele estar relacionado con la conductividad. Los valores de TDS medidos son menores a 175 mg/L, siendo el límite aceptado 1500 mg/L, por lo que cumplirían los requisitos de agua potable.

Además, respecto a las temperaturas registradas, los valores fluctúan entre 12,40 y 16,20°C.

Tabla 15: Tabla resumen de los niveles estáticos, dinámicos y los parámetros fisicoquímicos tomados en terreno de cada uno de los pozos del acuífero del Biobío, ordenados según el acuífero al que corresponden. Fuente: Elaboración propia.

Numero de pozo	Nombre pozo	Acuifero	Prof. Pozo (m)	Prof. Nivel estatico (m)	Prof. Nivel dinamico (m)	T (°C)	pH	Conductividad Electrica (µS/cm)	Total solidos disueltos
9	Boquial	Bueno Superior	62	49,00	40	16,10	7,35	111,8	101
4	Mantilhue	Bueno Superior	59	48,00	31	12,40	7,14	166,8	100
24	Puerto Las Rosas	Bueno Superior	60	54,5	46,74	15,80	**6,40**	346	116
6	Calcurrupe	Bueno Superior	42	35,51	35,36	15,50	7,30	168	88
23	Ponhuipa	Río Bueno	93	55,1	53,5	13,80	7,50	120	100
10	Carimallin	Río Bueno	65	50,75	42,61	13,90	7,60	137	105
3	Trehuaco	Río Bueno	60	54,2	52	12,80	6,70	114	90
2	Futahuente	Río Bueno	61,5	45,21	44,7	13,60	7,50	206	98
12	Champulli	Río Bueno	62	55,19	46,4	13,00	7,01	173	131
7	Cun Cun	Río Bueno	62	54,73	53,55	16,20	7,98	265	156
20	Marriamo	Río Bueno	90	72,2	70,18	14,30	7,80	252	175
1	Folilco Río Bueno	Río Bueno	-	-	-	14,14	7,39	253	163
13	Curaco	Río Bueno	85	70	67,74	15,10	7,70	261	114
21	Nolgehue	Río Bueno	-	-	-	15,90	7,60	334	152
26	Traiguen	Río Bueno	80	63,78	63,5	16,20	6,70	260	94
22	Pataguas de Pilmaiquen	Río Bueno	100	80,3	78,5	14,10	7,20	104	144
27	Trapi	Río Bueno	100	88,7		13,20	7,40	242	146
11	Cayurruca	Río Bueno	100	80,3	79	13,20	7,20	182	116
16	Litrán	Río Bueno	-	-	-	13,40	7,20	224	128
18	Los Esteros Niscon	Río Bueno	-	-	-	13,20	7,20	158	97
19	Los Leones	Río Bueno	105	-	-	13,58	7,65	153	96
28	Vivanco	Río Bueno	100	85,01	84,26	14,69	7,63	200	138
5	Huape Roi Roi	Río Bueno	87	64,16	63,6	12,40	7,40	209	112
25	Rofuco Alto	Río Bueno	60-90	51,33-81,33	48,6-78,6	14,70	7,18	180	78
8	Auquinco	Río Bueno	100	82,12	79,23	15,00	7,10	275	131
17	Llifen	Río Bueno	40	37,12	34,74	14,30	7,20	361	132
15	Ignao	Río Bueno	100	88,98	86,44	14,70	7,13	263	110
14	El Meli	Río Bueno	74	68,53	64,7	13,50	7,14	279	127

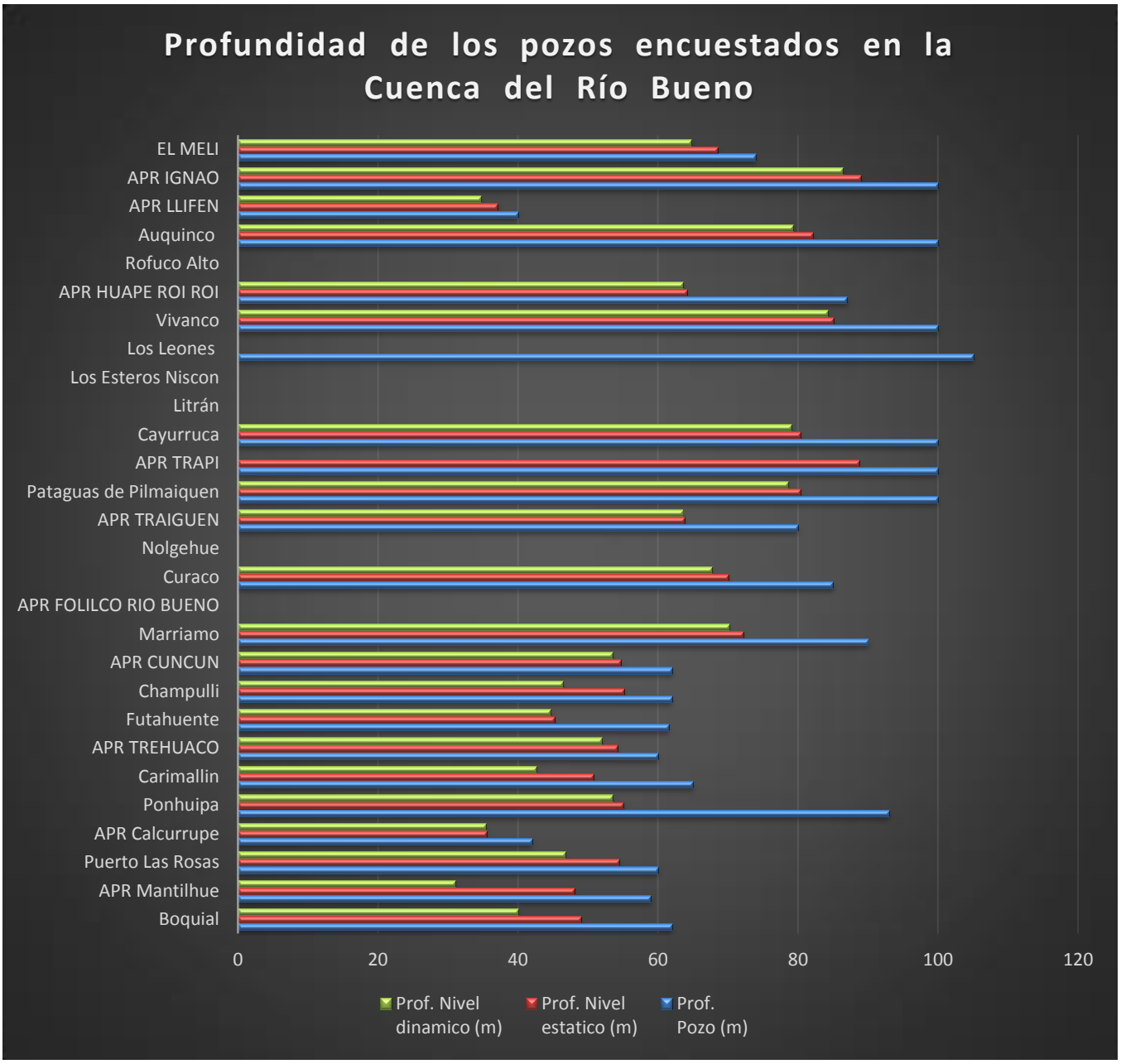


Ilustración 22: Grafico de profundidades de los pozos estudiados. Fuente: Fabricación propia.

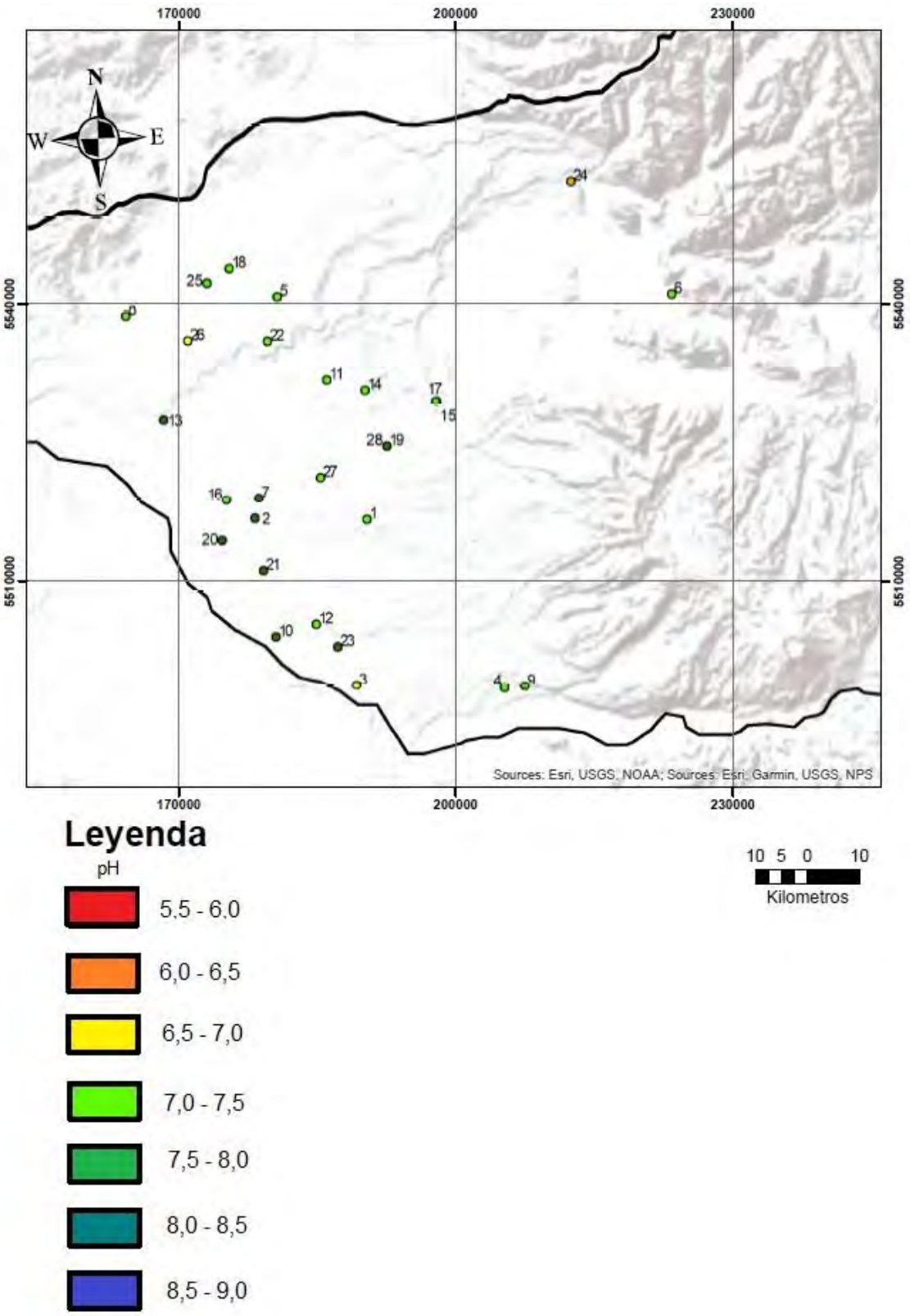


Ilustración 23: Mapa de distribución de pH en pozos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

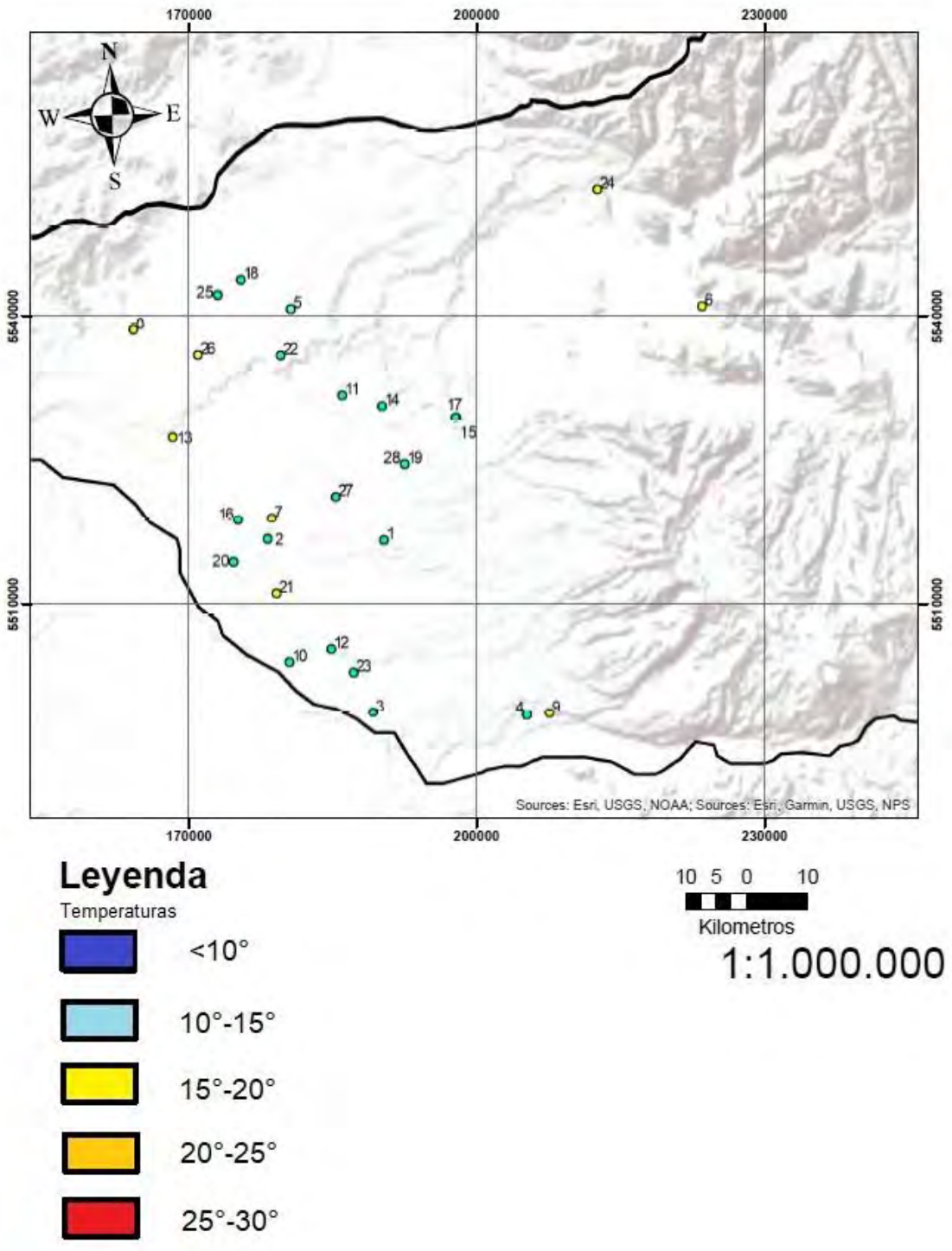


Ilustración 24: Mapa de distribución de Temperaturas en pozos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

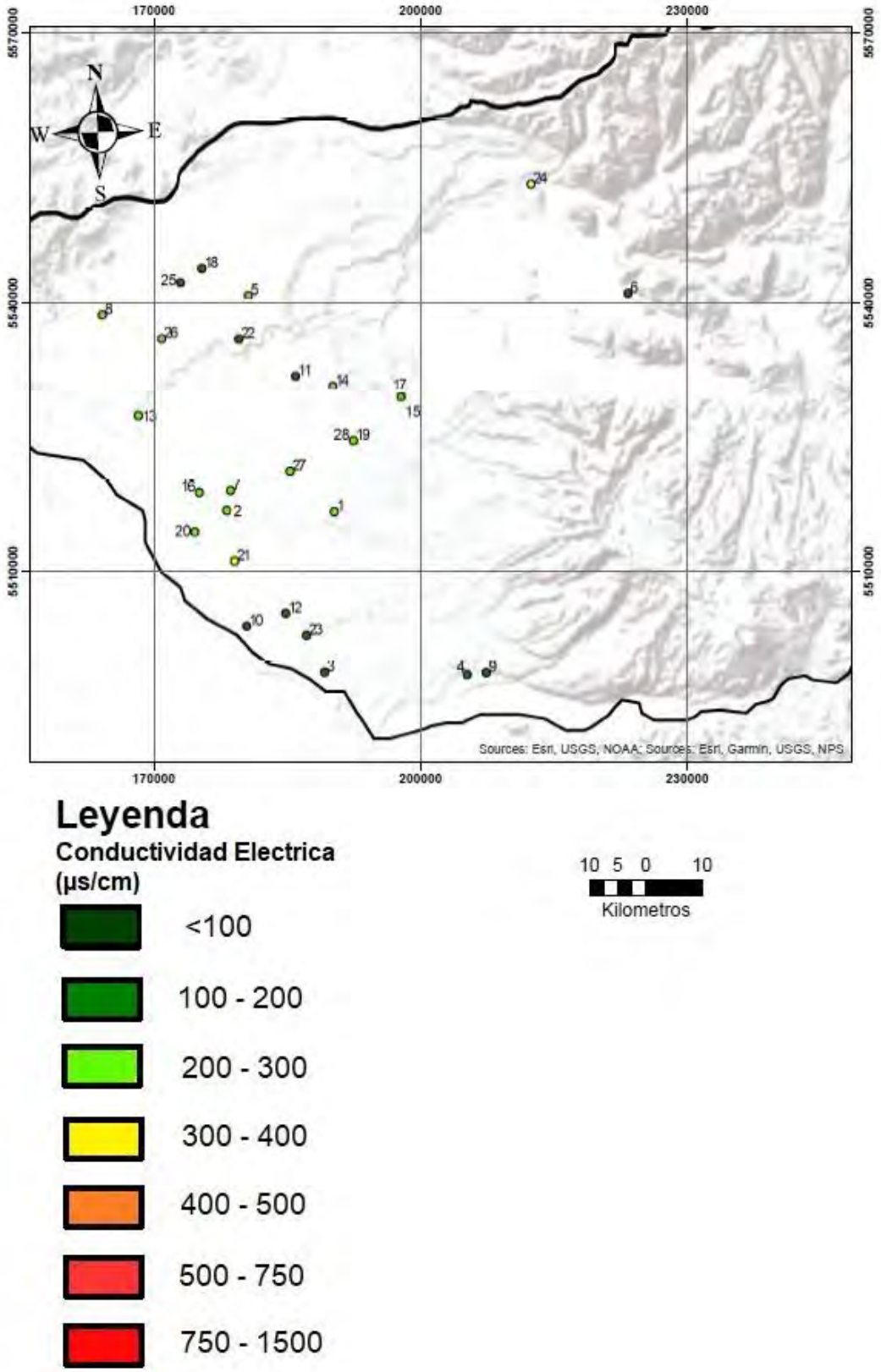


Ilustración 25: Mapa de distribución de Conductividad eléctrica en pozos de estudio. Fuente: Elaboración propia

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. El error máximo 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, correspondientes a 28 pozos, se detectó que en 21 casos (75,00%) los errores son menores al 3%, en 5 casos (17,85%) los errores se encuentran entre 3 y 5% y por último, en 2 casos (7,14%) el error es mayor al 5%. Las dos muestras con errores superiores a 5% corresponden a: APR FOLILCO RIO BUENO (-14,31%), APR TRAIGUEN (5,32%). (Ilustración 26).

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 tener en cuenta las contribuciones iónicas menores (Custodio y Llamas, 1976).

A continuación, se presenta un gráfico de torta que resume los resultados de los errores de Balance Iónico (%) de la totalidad de muestras consideradas en este estudio (28 en total).

Ilustración 26: Grafico de errores de Balance iónico. Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Tabla de Balances iónicos de cada pozo. Fuente: Elaboración propia

Nombre del Pozo	Balance Ionico
Boquial	0,51
Mantilhue	2,96
Ponhuipa	-3,49
Carimallin	-3,18
Trehuaco	-1,10
Futahuente	-2,03
Champulli	0,91
Cun Cun	-0,83
Marriamo	-2,98
Folilco Ríp Bueno	-14,31
Curaco	0,11
Nolgehue	-0,20
Traiguen	5,33
Pataguas de Pilmaiquen	-0,63
Trapi	1,70
Cayurruca	3,60
Litrán	1,04
Los Esteros Niscon	-0,51
Los Leones	-2,39
Vivanco	-3,16
Huape Roi Roi	-1,30
Rofuco Alto	1,20
Auquinco	0,62
Llifen	-4,29
Ignao	0,03
El Meli	1,45
Puerto Las Rosas	1,02
Calcurrupe	-1,99

VI.3. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS

Con el objetivo de tener una caracterización y clasificación general de la composición química de las aguas subterráneas muestreadas en la Región de los Ríos 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 esperaría aguas de lluvia más ricas en Cl, Na y K, y a medida que las precipitaciones se internan en el continente se esperaría un enriquecimiento en las concentraciones de iones tales como SO_4, HCO_3 y Ca. La disminución del contenido de NaCl esta inversamente proporcional a la distancia desde la costa donde se produzca la precipitación, y se ve amplificado por efecto de una orografía abrupta, (como lo es la Cordillera de la Costa).

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, como norma general, 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, p.289). (Ver Ilustración 27).

En el caso de los cationes se esperaría 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.

	------Recorrido y tiempo de permanencia en el acuífero ------ >>>>>				
Aniones predominantes:	HCO_3^- -->	HCO_3^- --> $SO_4^=$	$SO_4^=$-->	$SO_4^=$--> Cl^-	Cl^-
	---------- Aumento de la salinidad --------->>>>>>>				

Ilustración 27: Secuencia de Chevotareb. Fuente: Sánchez (2012).

La composición de las aguas subterráneas está condicionada por diversos factores, tanto naturales como antropogénicos. En la Tabla 17 se enlistan los orígenes más comunes de los diferentes parámetros mayoritarios analizados tradicionalmente para caracterizar la composición de aguas subterráneas.

Tabla 17: Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea. Fuente: Custodio y Llamas (1976).

Tipos	Ion	Orígenes
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 ($SO4^{2-}$)	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 ($HCO3^-$)	Disolución de CO2 atmosférico o del suelo, disolución de calizas y dolomitas (ayudado por CO2 o por ácidos naturales), hidrólisis de silicatos.
	Nitrato ($NO3^-$)	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. ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO BUENO

A partir de la información presentada en el diagrama Piper que se observa en la Ilustración 28, la composición catiónica de las muestras de los pozos pertenecientes a este acuífero es

principalmente cálcica a magnésica, con una tendencia a mayores concentraciones de calcio. Por su parte, la composición aniónica es marcadamente bicarbonatada, esto podría ser indicativo de que corresponde a agua con relativamente poco tiempo de permanencia en el subsuelo y, por lo tanto, que ha tenido poca interacción con roca. En términos generales las aguas muestreadas en este acuífero tienen una composición bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sódica.

La composición bicarbonatada de las muestras puede proceder de la disolución del CO_2 atmosférico o del suelo por parte del agua de lluvia. Por otra parte, esta composición puede proceder de la hidrólisis de silicatos ayudada por el CO_2 (Custodio y Llamas, 1976), esta última hipótesis es concordante con la litología presente aguas arriba en donde abundan las lavas basálticas, andesíticas y dacíticas, así como también intrusivos granodioríticos, dioríticos y tonalíticos.

En la Ilustración 29 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. Se puede apreciar una clara tendencia aguas arriba de la cuenca a poseer una composición de aguas bicarbonatadas cálcicas, la cual aguas debajo de la cuenca posee una composición bicarbonatada sódica.

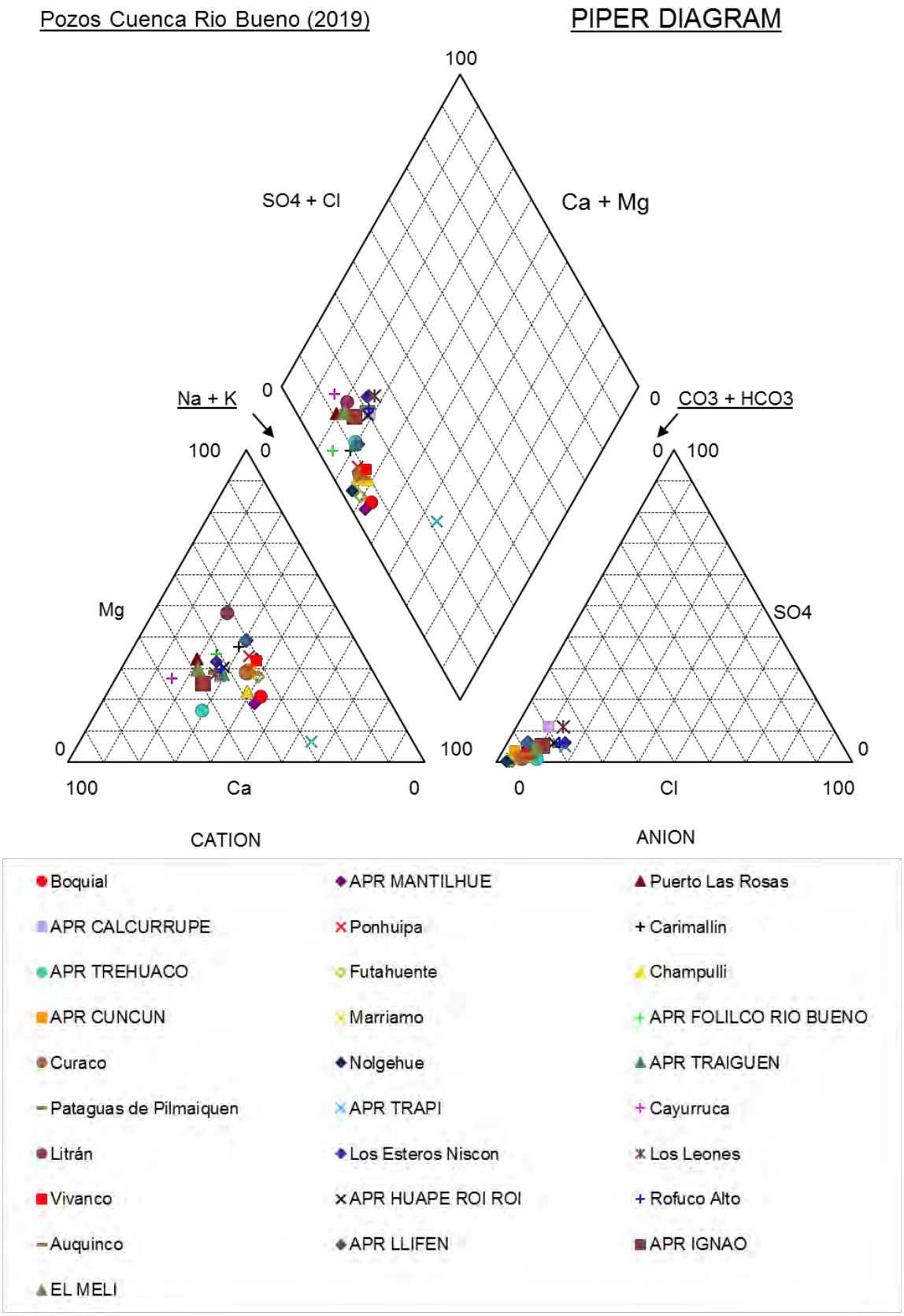


Ilustración 28: Diagrama de Piper de pozos en estudio. Fuente: Elaboración propia.

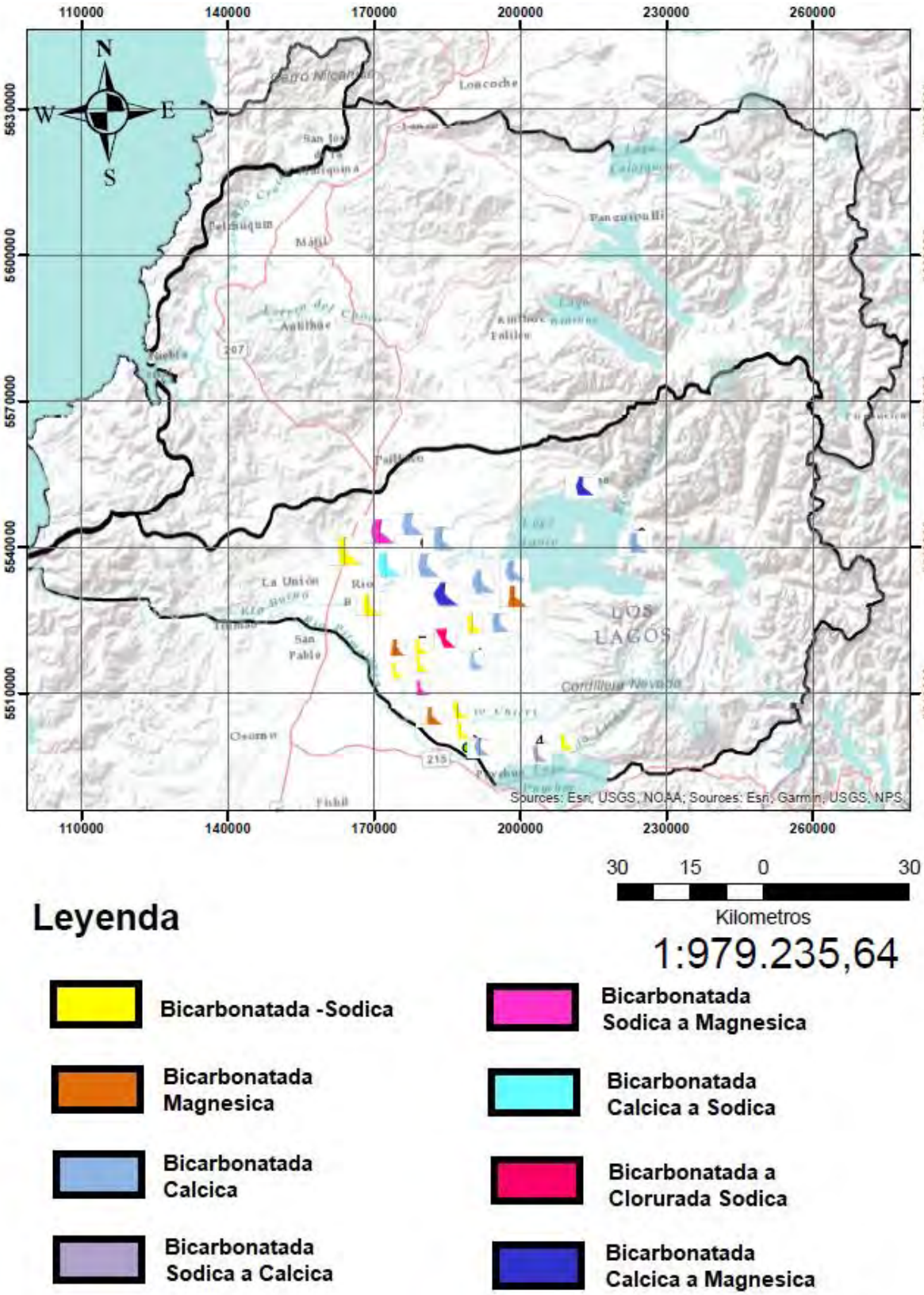


Ilustración 29: Mapa con Diagramas Stiff de cada pozo. Fuente: Elaboración propia.

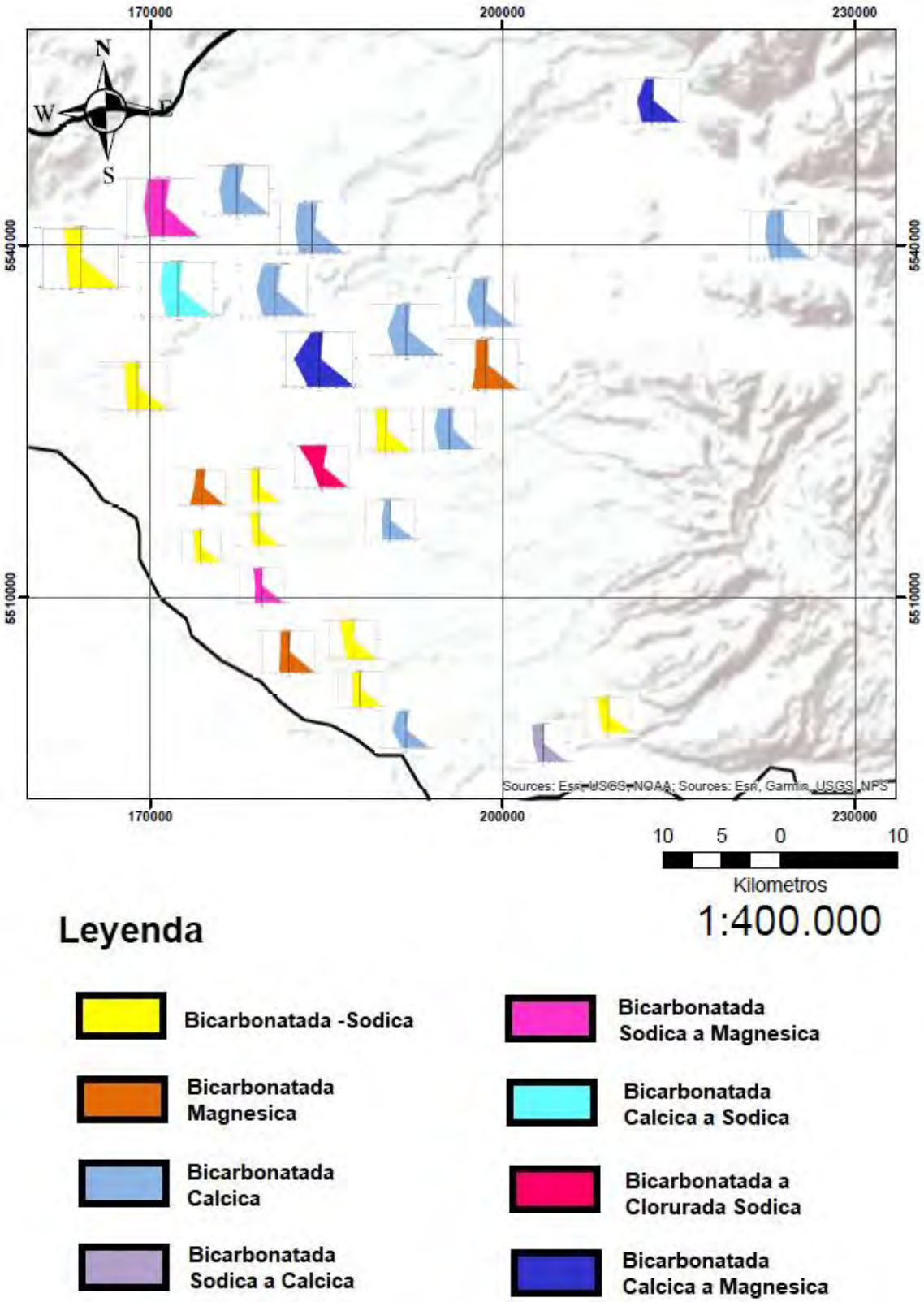


Ilustración 30: Mapa ampliado con Diagramas Stiff de cada pozo. Fuente: Elaboración propia.

VI.4. CONCENTRACIONES QUÍMICAS ESPECÍFICAS Y COMPARACIÓN CON LA NORMA CHILENA

VI.4.1. LÍMITES DE DETECCIÓN

Tabla 18: Límites de detección para los parámetros medidos. Los elementos mayoritarios fueron medidos por SGS, mientras que los metales, por LADGA. Fuente: DGA 2019.

Parámetro		Límite detección (mg/L)
Alcalinidad Total	($CaCO_3$)	< 2
Sulfato	(SO_4^{-2})	< 0,2
Cloruro	(Cl^-)	< 0,02
Bicarbonato	($HCO_3^{-)}$	< 2
Sodio	(Na^+)	< 0,01
Potasio	(K^+)	< 0,01
Calcio	(Ca^{+2})	< 0,01
Magnesio	(Mg^{+2})	< 0,01
Fosfato	(PO_4^{-3})	< 0,06
Nitrato	(NO_3^-)	< 0,01
Amonio	(NH^{4+})	< 0,02
Solidos Totales Disueltos	(SDT)	< 5,0
Arsénico	(As)	< 0,001
Cadmio	(Cd)	< 0,01
Cobalto	(Co)	< 0,01
Cobre	(Cu)	< 0,01
Hierro	(Fe)	< 0,01
Mercurio	(Hg)	< 0,0005
Manganeso	(Mn)	< 0,01
Níquel	(Ni)	< 0,01
Plomo	(Pb)	< 0,005
Selenio	(Se)	< 0,001
Zinc	(Zn)	< 0,01
Molibdeno	(Mo)	< 0,01
Cromo	(Cr)	< 0,03
Plata	(Ag)	< 0,01
Aluminio	(Al)	< 0,05

VI.4.2. RESULTADOS POR ACUÍFERO

En este apartado se muestra un resumen de los elementos mayoritarios obtenidos para cada muestra por el Laboratorio SGS ordenados según el acuífero y sub-acuífero al que pertenecen.

VI.4.2.1. ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO BUENO

Tabla 19: Concentración química de elementos mayoritarios y Solidos Disueltos Totales (SDT) de los pozos encuestados en la cuenca del río Bueno. Fuente: Elaboración propia

Nombre pozo	Acuifero	Alcalinidad total (mg/L)	Bicarbonato (mg/L)	Calcio (mg/L)	Cloruro (mg/L)	Fosfato (mg/L)	Magnesio (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Nitrogeno (Amonio) (mg/L)	Potasio (mg/L)	SDT (mg/L)	Sulfato (mg/L)
Boquial	Bueno Superior	66,3	80,9	9,87	2,34	0,32	3,53	1,01	0,02	1,23	101	1,27
APR Mantilhue	Bueno Superior	80,2	97,8	13	2,15	0,34	3,89	0,33	0,02	1,23	100	0,29
Puerto Las Rosas	Bueno Superior	71,1	86,7	15	3,44	0,09	6,32	2,32	0,02	2,22	116	3,93
APR Calcurrupe	Bueno Superior	39,6	48,3	7,81	3,24	0,07	2,99	0,18	0,02	1,76	88	5,42
Ponhuipa	Río Bueno	57,5	70,1	7,43	2,96	0,86	4,74	2,74	0,02	1,54	100	1,13
Carimallin	Río Bueno	61,3	74,7	8,17	2,71	1,04	5,42	0,01	0,12	1,77	105	2,24
APR TREHUACO	Río Bueno	33	40,3	7,74	2,82	0,3	1,45	1,05	0,09	1,15	90	0,47
Futahuente	Río Bueno	73,9	90,1	9,4	2,44	1,24	4,76	0,01	0,23	2,2	98	0,2
Champulli	Río Bueno	40,9	49,8	6,45	2,41	0,25	2,29	2,37	0,02	3,87	131	0,77
APR CUNCUN	Río Bueno	79,7	97,2	11	2,09	1,37	5,82	0,01	0,14	2,48	156	3,12
Marriamo	Río Bueno	85,5	104,2	11	2,5	1,32	5,56	0,01	0,18	3,1	175	1
APR FOLILCO RIO BUENO	Río Bueno	76,2	92,8	10	2,04	0,62	5,09	0,01	1,26	2,72	163	0,39
Curaco	Río Bueno	64,6	78,7	9,79	3,14	1,05	4,85	1,59	0,3	2,37	114	1,13
Nolgehue	Río Bueno	107,4	131	13	2,14	1,61	8,52	0,06	0,42	3,54	152	0,36
APR TRAIGUEN	Río Bueno	42,4	51,6	8,99	3,05	0,39	3,58	4,21	0,02	2,37	94	1,06
Pataguas de Pilmaiquen	Río Bueno	39,1	47,7	9,01	5,24	0,18	3,56	6,27	0,02	1,3	144	2,61
APR TRAPI	Río Bueno	93,8	114,4	14	14,36	1,6	2,01	3,07	0,28	2,23	146	5,87
Cayurruca	Río Bueno	76,7	93,5	23	6	0,36	6,47	10,06	0,02	1,69	116	3,55
Litrán	Río Bueno	53	64,6	7,94	4,63	0,76	7,33	0,04	0,65	3,17	128	3,33
Los Esteros Niscon	Río Bueno	41,9	51	9,52	6,19	0,39	4,36	7,87	0,02	2,05	97	3,21
Los Leones	Río Bueno	43,9	53,5	9,93	5,41	0,37	3,84	6,31	0,02	2,64	96	6,36
Vivanco	Río Bueno	77,4	94,4	10	4,64	0,34	6,39	5,87	0,28	3,13	138	2,33
APR HUAPE ROI ROI	Río Bueno	45,9	56	9,97	5,31	0,34	4,49	10,53	0,02	1,59	112	3,52
Rofuco Alto	Río Bueno	37,8	46,1	8,01	4,99	0,14	3,44	1,94	0,02	1,7	78	2,84
Auquinco	Río Bueno	89,3	108,8	13	3,87	0,48	6,54	0,01	0,43	3,1	131	2,39
APR LLIFEN	Río Bueno	83,5	101,8	11	3,99	0,13	8,54	0,01	1,46	2,14	132	5,72
APR IGNAO	Río Bueno	54,5	66,4	13	4,66	0,2	4,04	6,59	0,02	2,35	110	3,39
EL MELI	Río Bueno	77,2	94,1	18	5,64	0,11	6,7	6,93	0,02	2,21	127	3,82

VI.4.3. RESUMEN DE RESULTADOS COMPARADOS CON LA NORMA NCh409 y NCh1333

Tabla 20: Resumen de parámetros medidos, sus límites de detección, los límites máximos permitidos por las normas Chilenas (NCh 409 y 1333) y la cantidad de pozos en la región con valores fuera de norma.

Parámetro		Unidad	LD	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	1	0
Alcalinidad Total	($CaCO_3$)	mg/L	2	No se incluye	No se incluye	-	-
Sulfato	(SO_4^{-2})	mg/L	0,2	500,00	250,00	0	0
Cloruro	(Cl^-)	mg/L	0,02	400,00	200,00	0	0
Bicarbonato	(HCO_3^-)	mg/L	2	No se incluye	No se incluye	-	-
Sodio*	(Na^+)	%	0,01	No se incluye	35	-	1
Potasio	(K^+)	mg/L	0,01	No se incluye	No se incluye	-	-
Calcio	(Ca^{+2})	mg/L	0,01	No se incluye	No se incluye	-	-
Magnesio	(Mg^{+2})	mg/L	0,01	125	No se incluye	0	-
Fosfato	(PO_4^{-3})	mg/L	0,06	No se incluye	No se incluye	-	-
Nitrato	($NO_3^{-)}$	mg/L	0,01	50	No se incluye	0	-
Amonio	(NH^{4+})	mg/L	0,02	1,5	No se incluye	0	-
Solidos Totales Disueltos	(SDT)	mg/L	5,0	1500	**	0	0
Arsénico	(As)	mg/L	0,001	0,01	0,10	1	0
Cadmio	(Cd)	mg/L	0,01	0,01	0,01	0	0
Cobalto	(Co)	mg/L	0,02	No se incluye	0,05	-	0
Cobre	(Cu)	mg/L	0,01	2,0	0,20	0	0
Hierro	(Fe)	mg/L	0,02	0,3	5,00	10	1
Mercurio	(Hg)	mg/L	0,001	0,001	0,001	0	0
Manganeso	(Mn)	mg/L	0,01	0,1	0,20	10	6
Níquel	(Ni)	mg/L	0,03	No se incluye	0,20	-	0
Plomo	(Pb)	mg/L	0,02	0,05	5,00	2	0
Selenio	(Se)	mg/L	0,001	0,01	0,020	0	0
Zinc	(Zn)	mg/L	0,01	3,0	2,00	0	0
Molibdeno	(Mo)	mg/L	0,25***	No se incluye	0,010	-	N/D
Cromo	(Cr)	mg/L	0,03	0,05	0,1	0	0
Plata	(Ag)	mg/L	0,01	No se incluye	0,2	-	0
Aluminio	(Al)	mg/L	0,6	No se incluye	5,00	-	0
					Total (****)	24	8

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

**** Clasificación de aguas según su salinidad (SDT y Conductividad eléctrica) según Norma NCh N°1333 se muestra en la Tabla 24.**

***** Límite de detección para el molibdeno es mayor al umbral establecido por la Norma NCh N°1333**

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

Tabla 21: 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 (µS/cm)	N° de Pozos	Rango (mg/l)	N° de Pozos
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	CE ≤ 750	28	SDT ≤ 500	28
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	750 < CE ≤ 1500	0	500 < SDT ≤ 1000	0
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso	1500 < CE ≤ 3000	0	1000 < SDT ≤ 2000	0
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadoso	3000 < CE ≤ 7500	0	2000 < SDT ≤ 5000	0

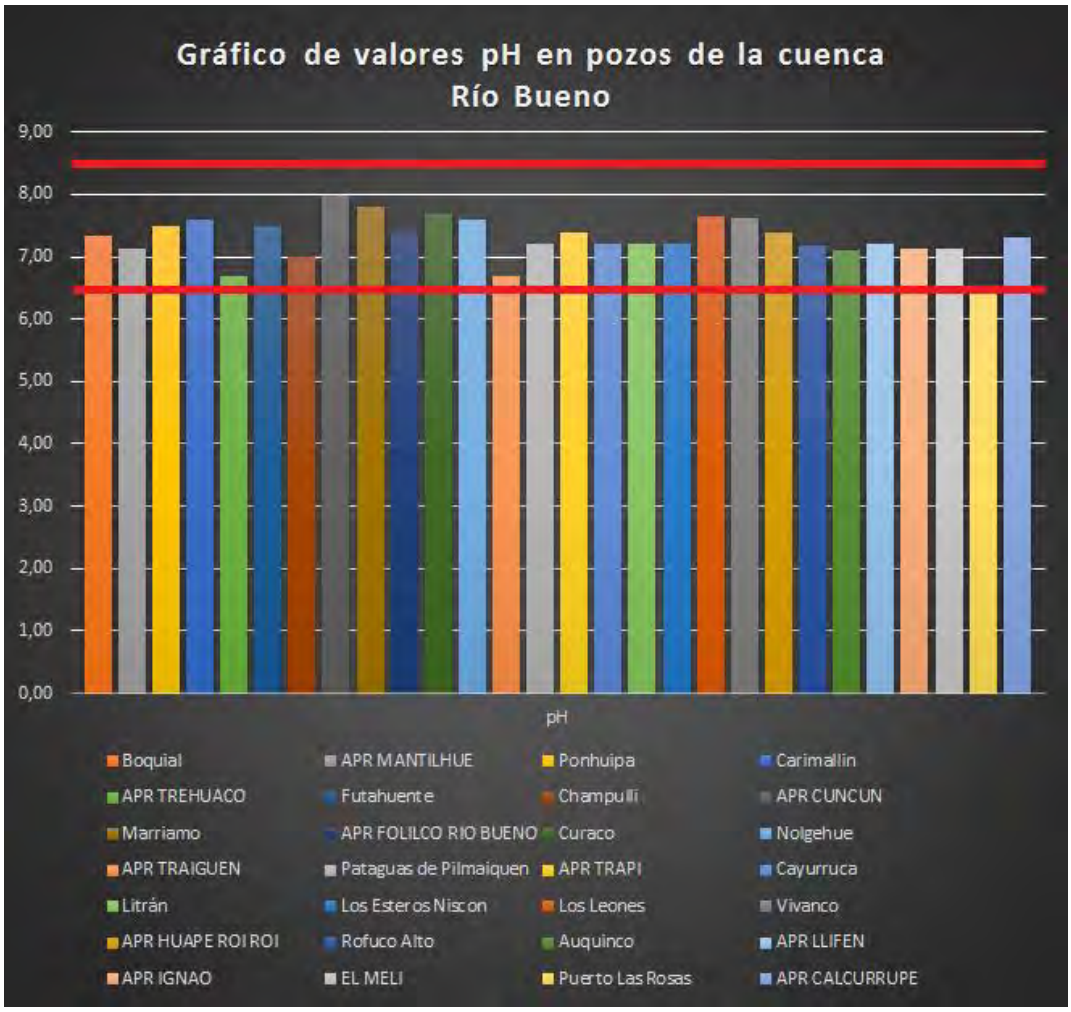


Ilustración 31: Grafico de valores pH en pozos de la cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

VI.4.4. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS NORMADOS

En este apartado se presentan las concentraciones obtenidas de las sustancias que están normadas por la normativa Chilena vigente para agua potable y/o para agua de riego, (NCh N°409 y N°1.333, respectivamente).

VI.4.4.1. 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.
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 continuaran 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, o 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 bebes. 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 serán analizadas considerando 3 umbrales a 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.

Tabla 22: Concentraciones de Nitrato en pozos de la cuenca del Río Bueno

Nombre pozo	Nitrato (mg/L)
Boquial	1,01
Mantilhue	0,33
Puerto Las Rosas	2,32
Calcurrupe	0,18
Ponhuipa	2,74
Carimallin	0,01
Trehuaco	1,05
Futahuente	0,01
Champulli	2,37
Cun Cun	0,01
Marriamo	0,01
Folilco Río Bueno	0,01
Curaco	1,59
Nolgehue	0,06
Traiguen	4,21
Pataguas de Pilmaiquen	6,27
Trapi	3,07
Cayurruca	10,06
Litrán	0,04
Los Esteros Niscon	7,87
Los Leones	6,31
Vivanco	5,87
Huape Roi Roi	10,53
Rofuco Alto	1,94
Auquinco	0,01
Llifen	0,01
Ignao	6,59
El Meli	6,93

Como se aprecia en la Tabla 22. Las concentraciones de Nitrato de 26 pozos está en niveles bajos a los 10 mg/L, existiendo solo 2 pozos que presentan niveles superiores a este límite: Cayurruca (10,06 mg/L) y APR HUAPE ROI ROI (10,53). Mientras que ninguno registra valores atribuibles a niveles de alerta.

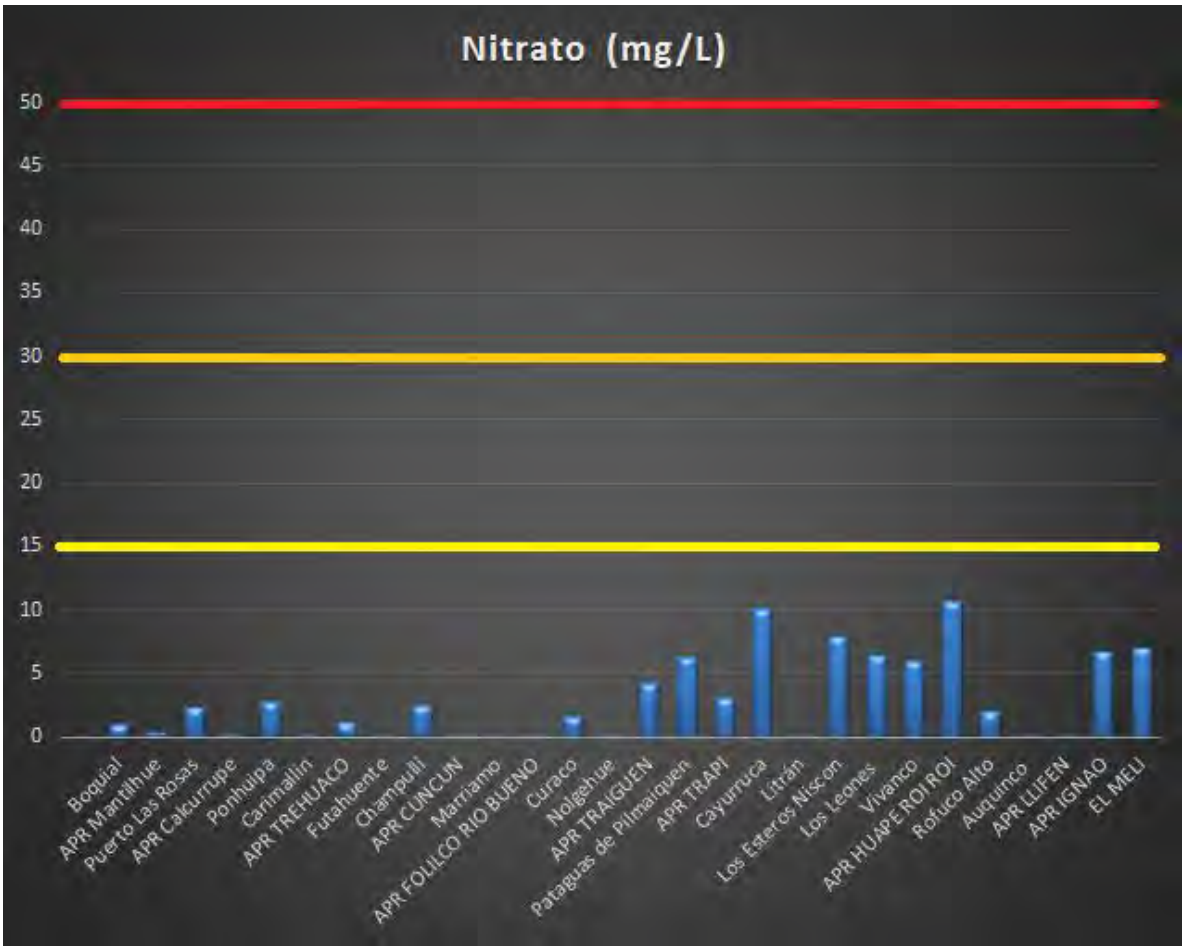
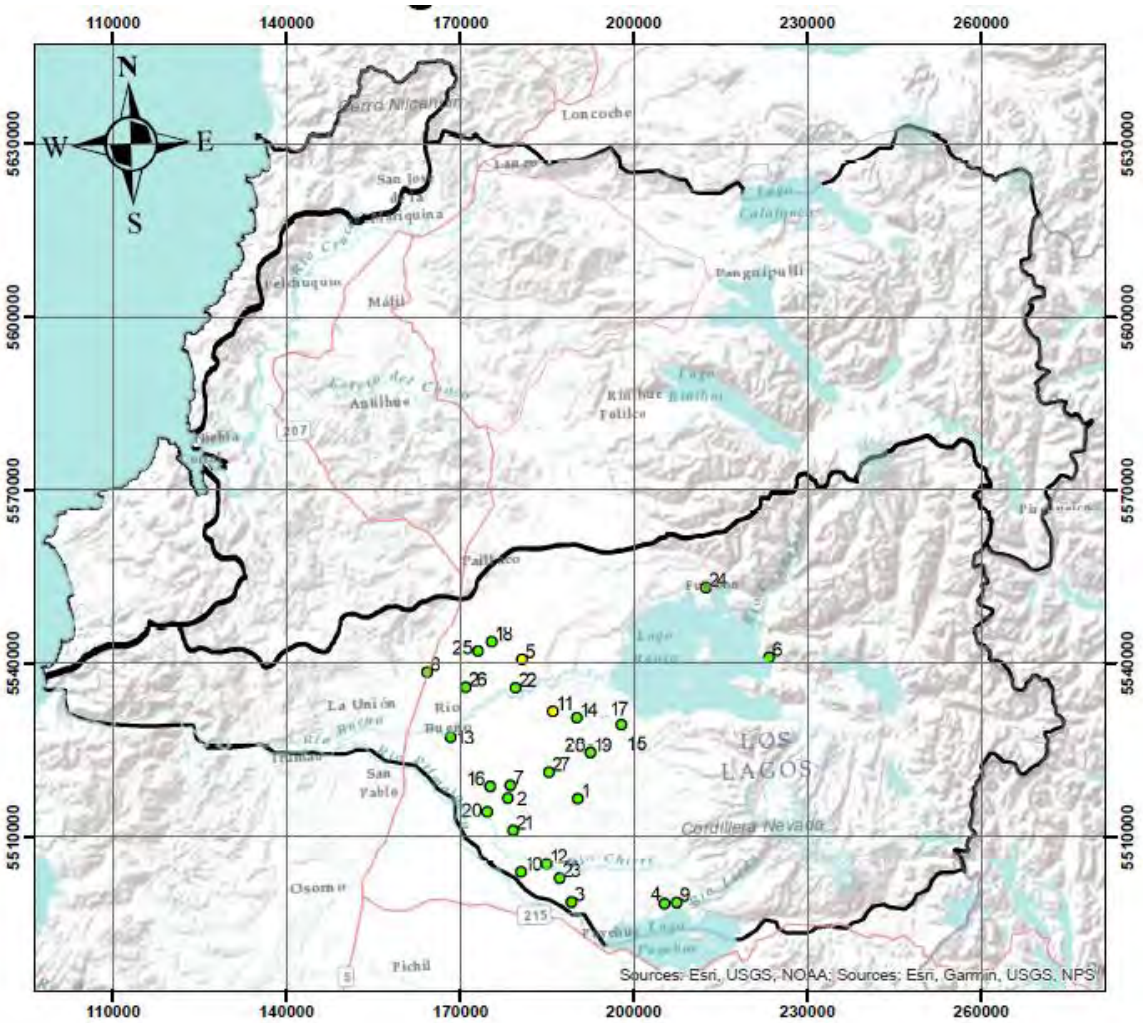


Ilustración 32: Grafico de Concentraciones de Nitrato. Fuente: Elaboración propia.



Leyenda

- >50,00 (mg/L)
- 30,01 - 50,00(mg/L)
- 10,01 - 30,00(mg/L)
- 0,00 - 10,00 (mg/L)
- Limite cuencas

30 15 0 30

Kilometros

1:1.000.000

Leyenda

1	Folilco Río Bueno	11	Cayurruca	21	Nolgehue
2	Futahuente	12	Champulli	22	Pataguas de Pilmaiquen
3	Trehuaco	13	Curaco	23	Ponhuipa
4	Mantihue	14	El Meli	24	Puerto Las Rosas
5	Huape	15	Ignao	25	Rofuco Alto
6	Calcurrupe	16	Litran	26	Traiguen
7	Cun Cun	17	Llifen	27	Trapi
8	Auquinco	18	Los Esteros de Niscon	28	Vivanco
9	Boquial 1-2-Ticahua	19	Los Leones		
10	Carimallin	20	Marriamo		

Ilustración 33: Mapa de distribución de concentraciones de Nitrato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

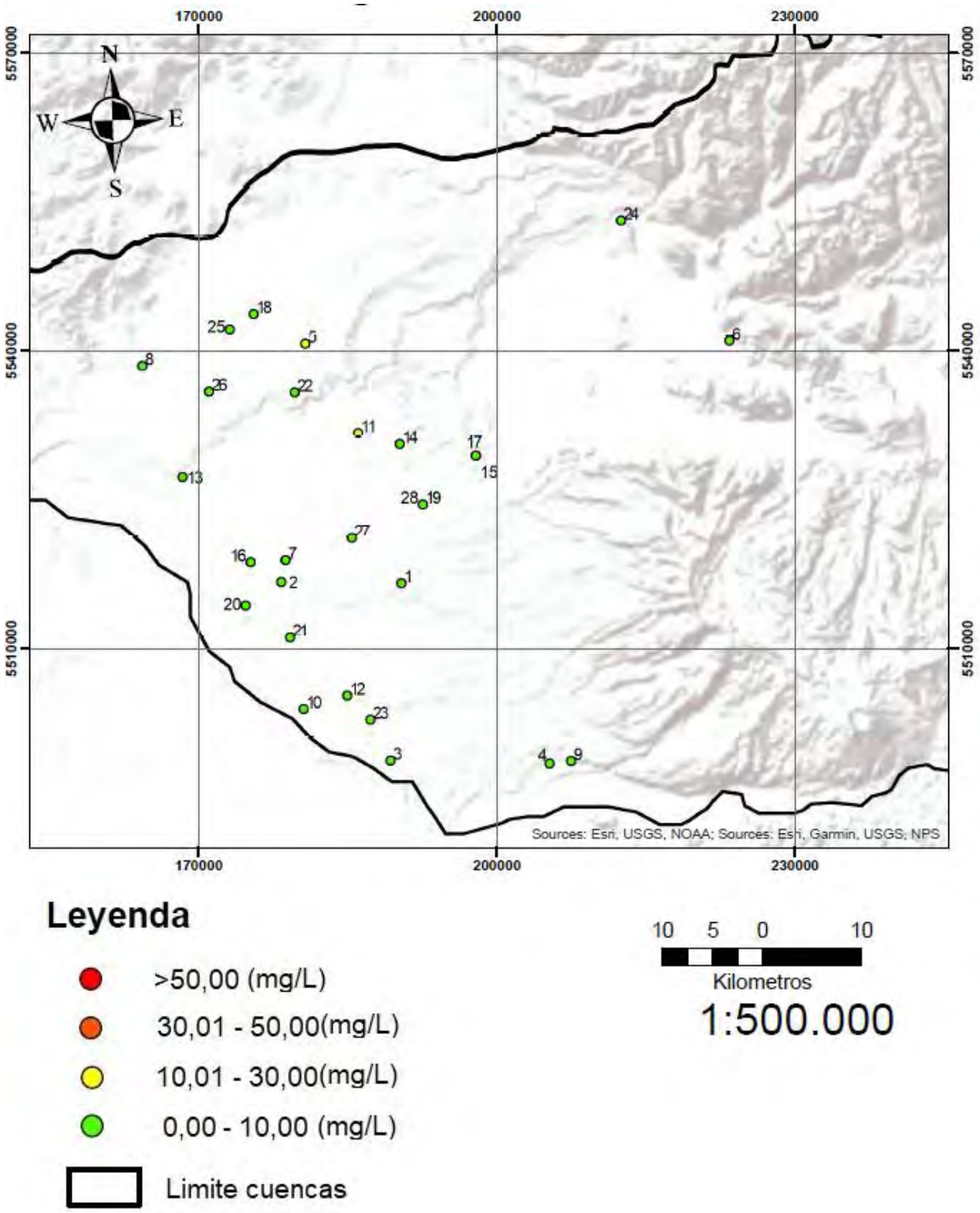


Ilustración 34: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Nitrato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

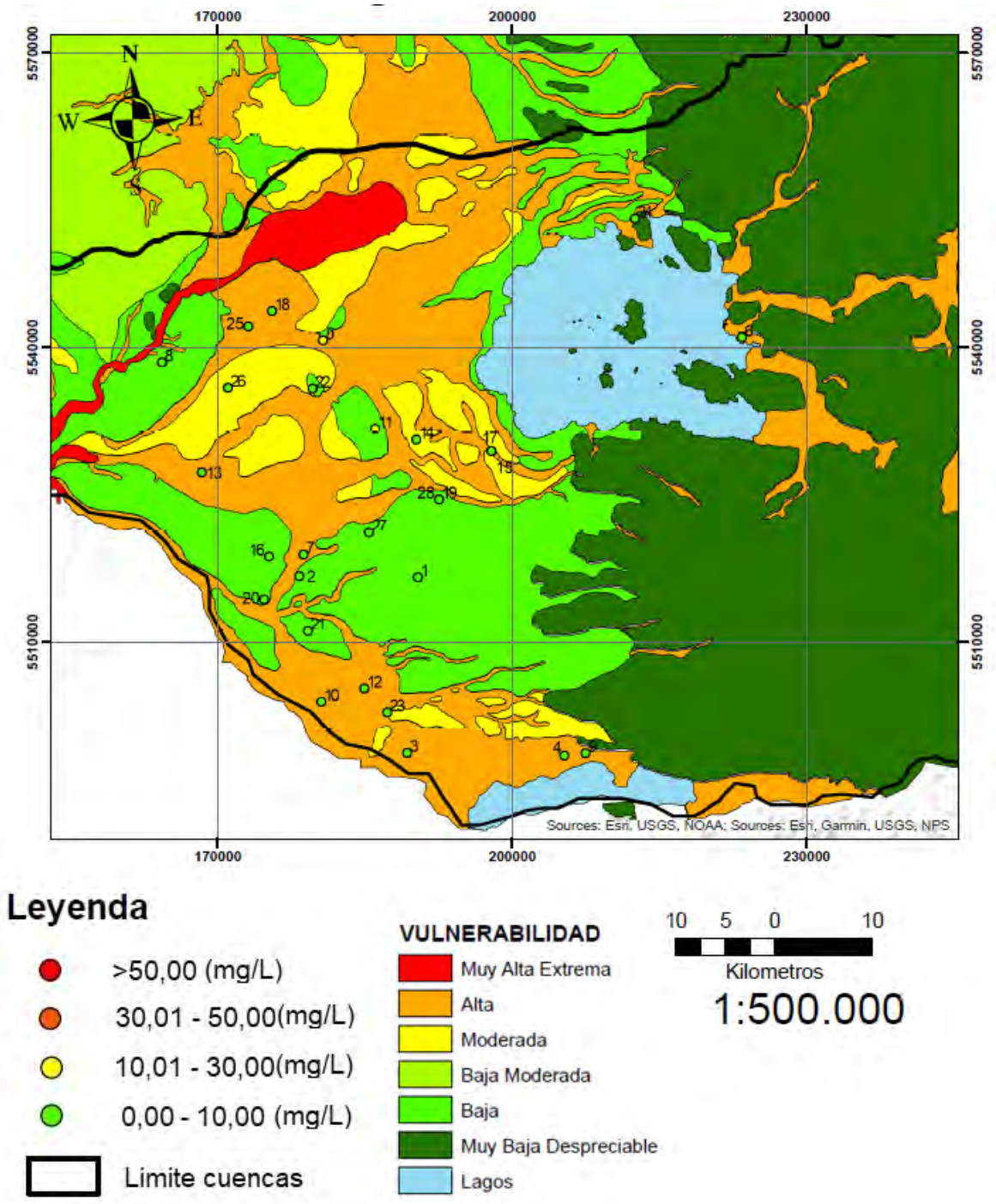


Ilustración 35: Mapa de vulnerabilidad de acuiferos y distribución de concentraciones de Nitrato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

VI.4.4.2. SULFATO

Los sulfatos ($SO4^{-2}$) después de los bicarbonatos, son los principales aniones presentes en el agua; los cuales pueden presentarse de manera natural o como consecuencia de descargas de aguas industriales y por la utilización de fertilizantes agrícolas. Cuando los sulfatos se presentan de manera natural es posible que su origen se deba a algún depósito natural de minerales o por depositación atmosférica (Castro G. Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierrita de Ticul, Yucatán, 2008).

El ión sulfato procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias de la descomposición de substancias orgánicas, etc. Sin embargo, la disolución de yeso, anhidrita y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno, representa frecuentemente el aporte cuantitativamente más significativo de este ión a las aguas subterráneas. El ión 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 H_2S mientras que en soluciones alcalinas predomina el ión HS^{-}. La mayoría de las aguas subterráneas sulfurosas presentan contenidos apreciables de HS^{-} ó H_2S que incluso a Concentración muy baja le confieren al agua un mal olor.

La normativa Chilena vigente estipula un límite 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 región de los Ríos del total de 28 pozos APR estudiados se tiene que todos están por debajo de este límite alcanzando los valores máximos de Sulfatos en Los Leones (6,36 mg/L) y los mínimos en Futahuente (0,2mg/L), por lo que todos los pozos muestreados cumplen la normativa chilena. En la Ilustración 36 se observa que algunos pozos presentan máximos más altos que el promedio de los pozos, lo cual se podría atribuir a contaminación por actividad antrópica o a factores geológicos locales.

Tabla 23: Concentraciones de Sulfato en pozos de la cuenca del Río Bueno

Nombre pozo	Sulfato (mg/L)
Boquial	1,27
Mantilhue	0,29
Puerto Las Rosas	3,93
Calcurrupe	5,42
Ponhuipa	1,13
Carimallin	2,24
Trehuaco	0,47
Futahuente	0,2
Champulli	0,77
Cun Cun	3,12
Marriamo	1
Folilco Río Bueno	0,39
Curaco	1,13
Nolgehue	0,36
Traiguen	1,06
Pataguas de Pilmaiquen	2,61
Trapi	5,87
Cayurruca	3,55
Litrán	3,33
Los Esteros Niscon	3,21
Los Leones	6,36
Vivanco	2,33
Huape Roi Roi	3,52
Rofuco Alto	2,84
Auquinco	2,39
Llifen	5,72
Ignao	3,39
El Meli	3,82

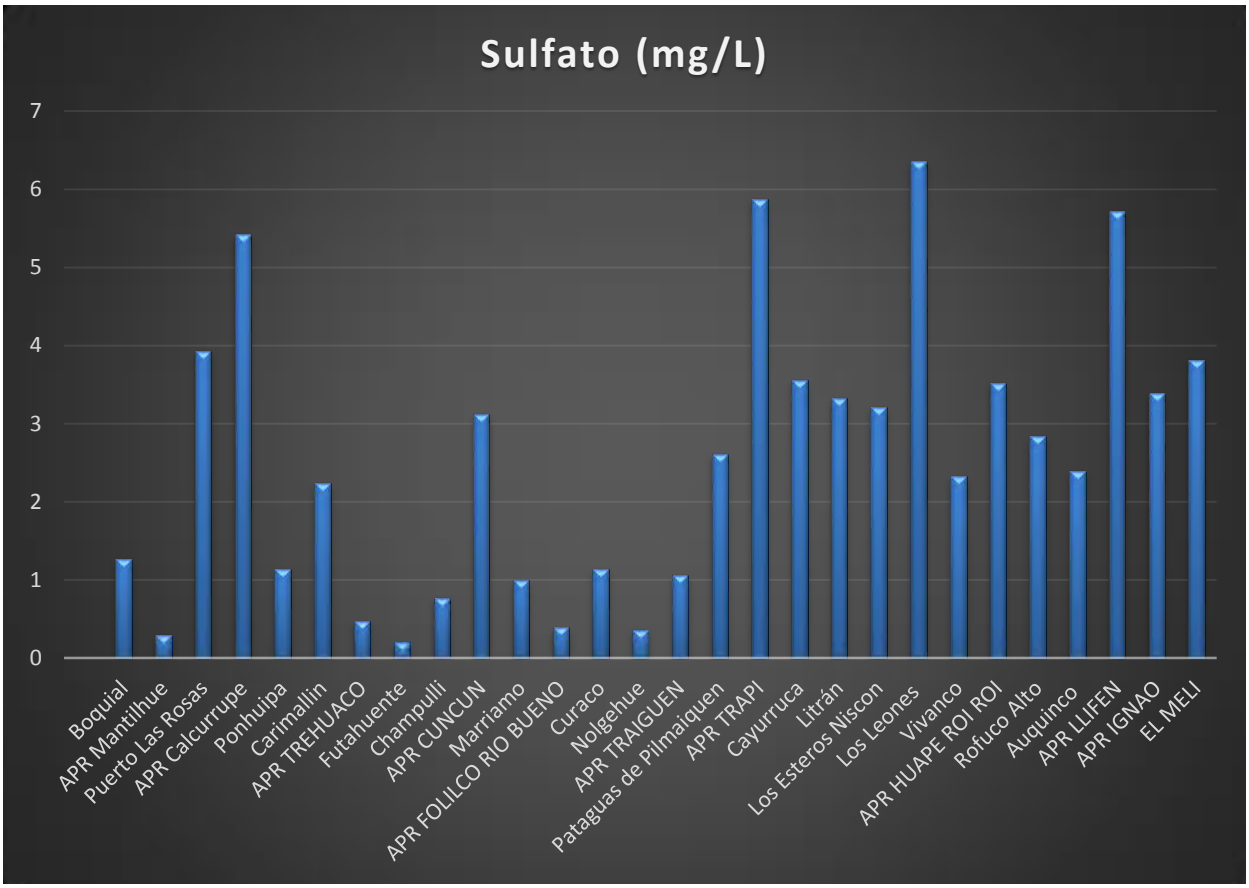
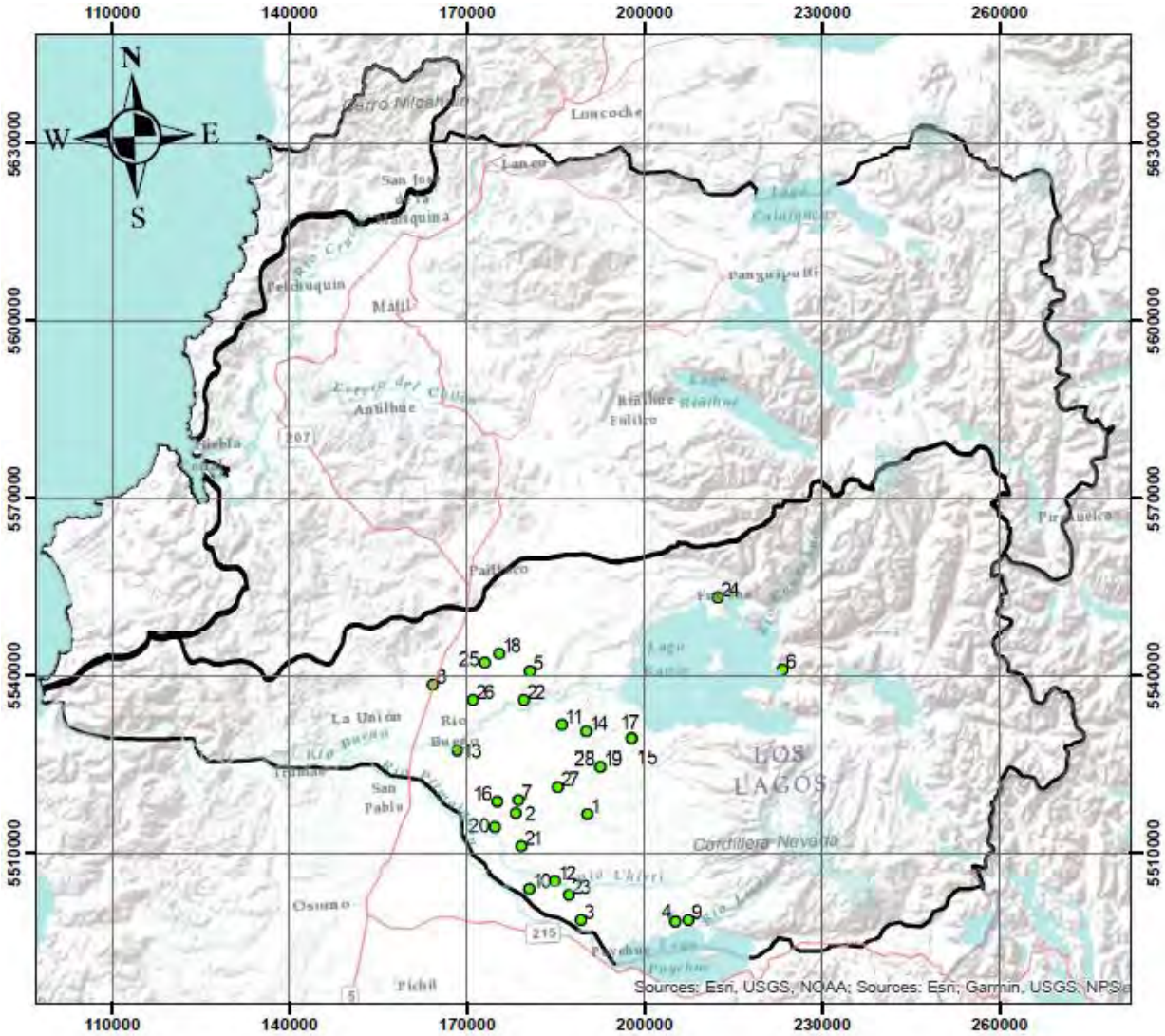


Ilustración 36: Grafico de concentraciones de Sulfato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.



Leyenda

- >30,00 (mg/L)
- 20,01 - 30,00 (mg/L)
- 10,01 - 20,00 (mg/L)
- 0,00 - 10,00 (mg/L)
- Limite cuencas

30 15 0 30

Kilometros

1:1.000.000

Leyenda

1	Folilco Río Bueno	11	Cayurruca	21	Nolgehue
2	Futahuente	12	Champulli	22	Pataguas de Pilmaiquen
3	Trehuaco	13	Curaco	23	Ponhuipa
4	Mantihue	14	El Meli	24	Puerto Las Rosas
5	Huape	15	Ignao	25	Rofuco Alto
6	Calcurrupe	16	Litran	26	Traiguen
7	Cun Cun	17	Llifen	27	Trapi
8	Auquinco	18	Los Esteros de Niscon	28	Vivanco
9	Boquial 1-2-Ticahua	19	Los Leones		
10	Carimallin	20	Marriamo		

Ilustración 37: Mapa de distribución de concentraciones de Sulfato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

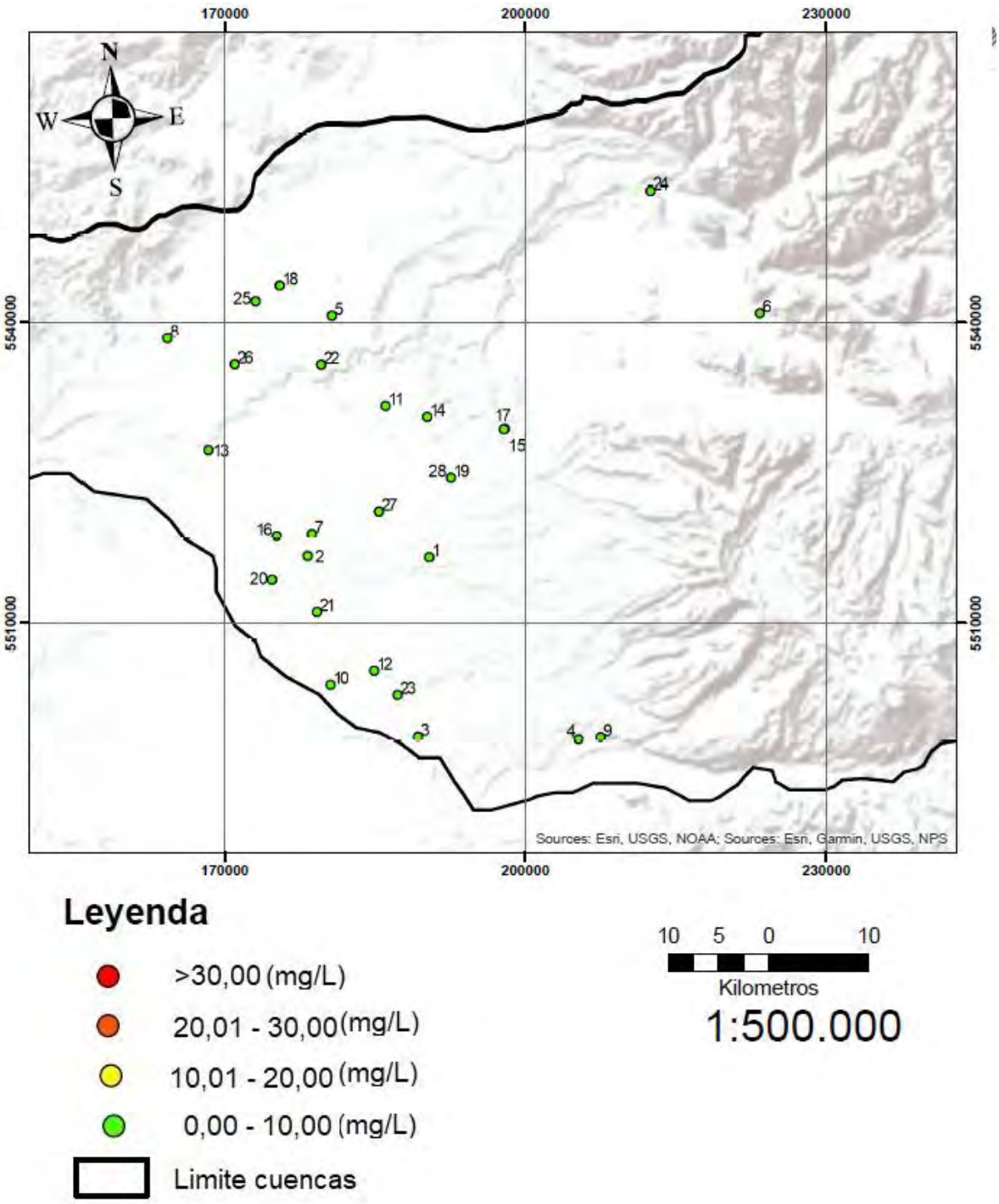


Ilustración 38: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Sulfato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

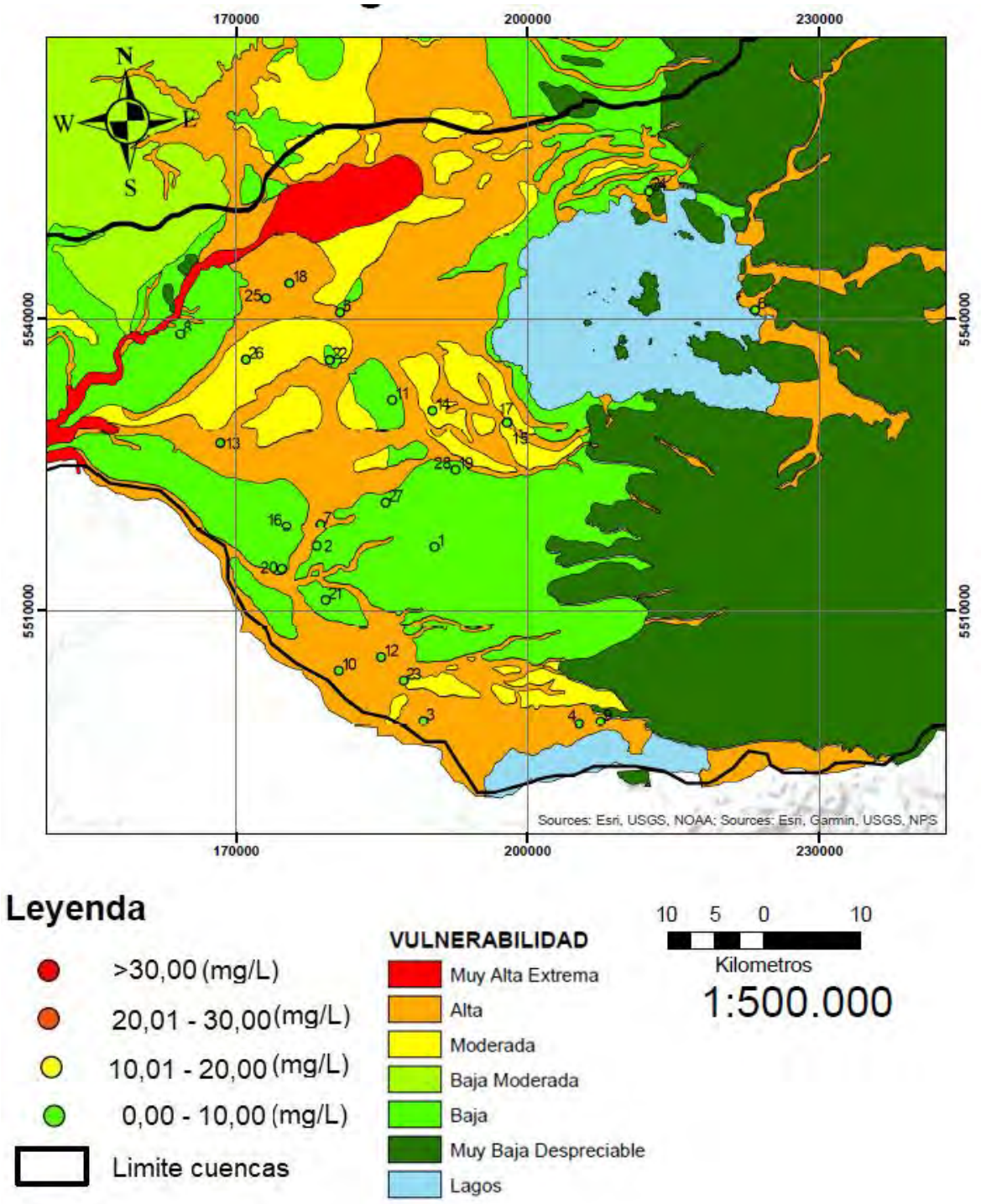


Ilustración 39: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Sulfato en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

VI.4.4.3. CLORURO

El ion cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal, por lo tanto, es conocido como un Ion conservativo. En aguas dulces su concentración va 10-250 mg/l en dulces; 18.000-20.000 mar; salmueras, hasta 200.000.

El origen de las aguas cloruradas es la lluvia (núcleos de condensación), hasta 100 ppm normalmente <30 ppm. Disminuye con distancia al mar, 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 10mg/L y valores máximos que no superan los 50 mg/L (Ver Tabla 29). Por lo tanto, ninguna de las muestras excede los límites establecidos por la norma para agua potable ni para agua de riego. En la Ilustración 41 se presentan las concentraciones de cloruro en mg/L de cada uno de los pozos muestreados para el presente estudio. Los valores máximos de Cloruros se encuentran en APR TRAPI (14,36 mg/L) y los mínimos en APR FOLILCO Río Bueno (2,04 mg/L). En la Ilustración 40 se observa que algunos pozos presentan máximos más altos que el promedio de los pozos, lo cual se podría atribuir a contaminación por actividad antrópica o a factores geológicos locales.

Tabla 24: Concentraciones de Cloruro en pozos de la cuenca del Río Bueno

Nombre pozo	Cloruro (mg/L)
Boquial	2,34
Mantilhue	2,15
Puerto Las Rosas	3,44
Calcurrupe	3,24
Ponhuipa	2,96
Carimallin	2,71
Trehuaco	2,82
Futahuente	2,44
Champulli	2,41
Cun Cun	2,09
Marriamo	2,5
Folilco Río Bueno	2,04
Curaco	3,14
Nolgehue	2,14
Traiguen	3,05
Pataguas de Pilmaiquen	5,24
Trapi	14,36
Cayurruca	6
Litrán	4,63
Los Esteros Niscon	6,19
Los Leones	5,41
Vivanco	4,64
Huape Roi Roi	5,31
Rofuco Alto	4,99
Auquinco	3,87
Llifen	3,99
Ignao	4,66
El Meli	5,64

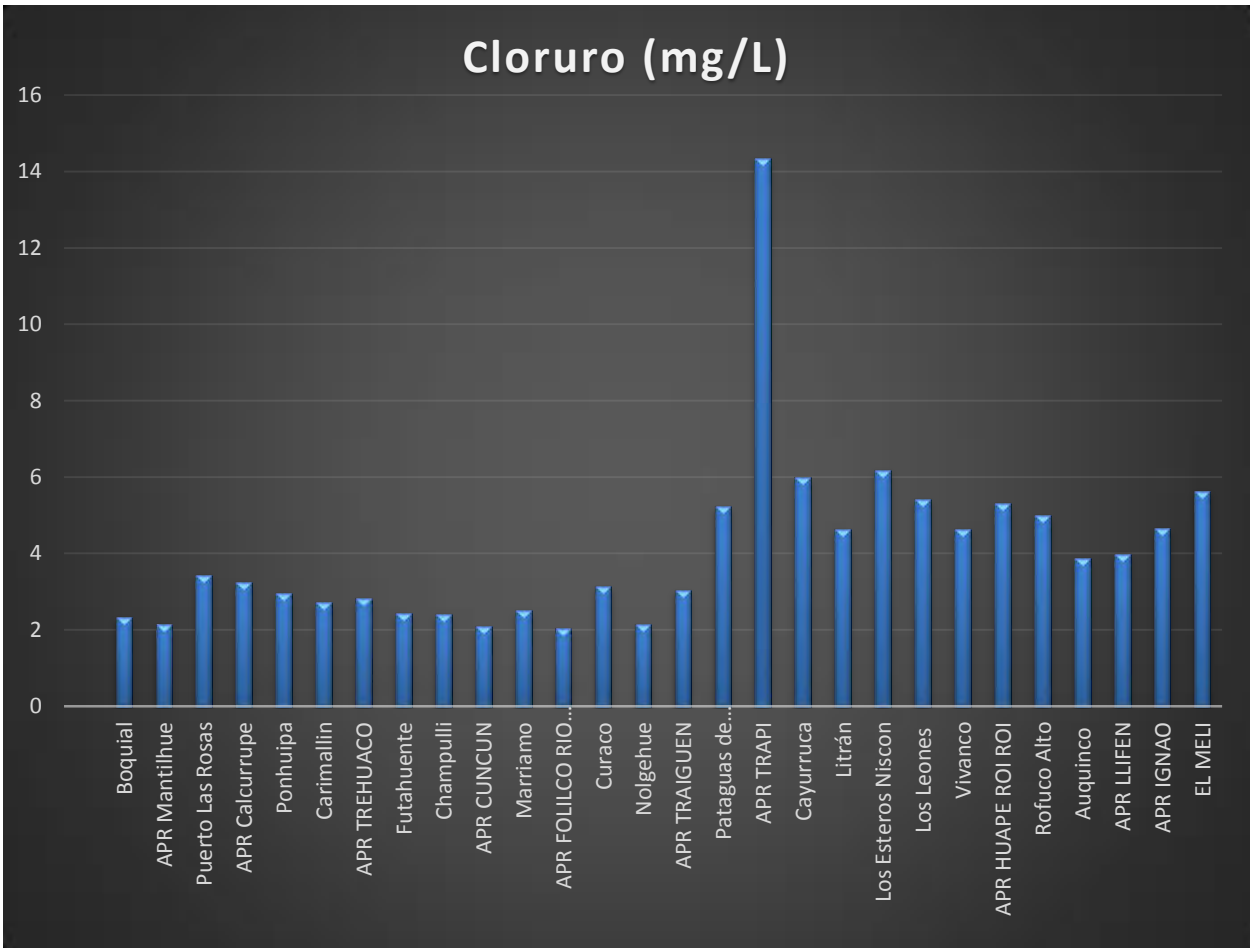
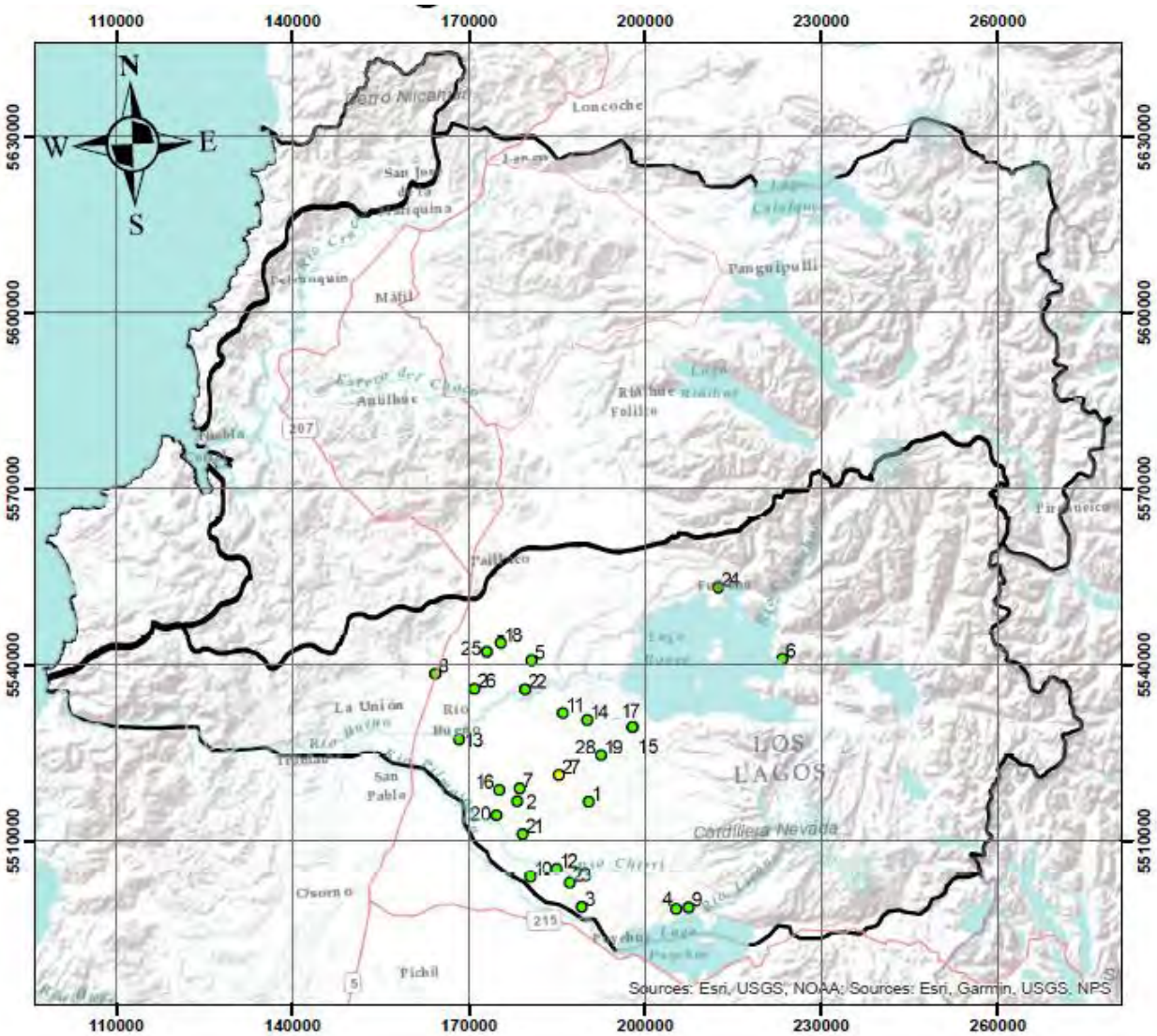


Ilustración 40: Grafico de concentraciones de Cloruro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.



Leyenda

- 30,01 - 50,00(mg/L)
- 20,01 - 30,00(mg/L)
- 10,01 - 20,00 (mg/L)
- 0,00 - 10,00 (mg/L)
- Limite cuencas

30 15 0 30

Kilometros

1:1.000.000

Leyenda

1	Folilco Río Bueno	11	Cayurruca	21	Nolgehue
2	Futahuente	12	Champulli	22	Pataguas de Pilmaiquen
3	Trehuaco	13	Curaco	23	Ponhuipa
4	Mantihue	14	El Meli	24	Puerto Las Rosas
5	Huape	15	Ignao	25	Rofuco Alto
6	Calcurrupe	16	Litran	26	Traiguen
7	Cun Cun	17	Llifen	27	Trapi
8	Auquinco	18	Los Esteros de Niscon	28	Vivanco
9	Boquial 1-2-Ticahua	19	Los Leones		
10	Carimallin	20	Marriamo		

Ilustración 41: Mapa de distribución de concentraciones de Cloruro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

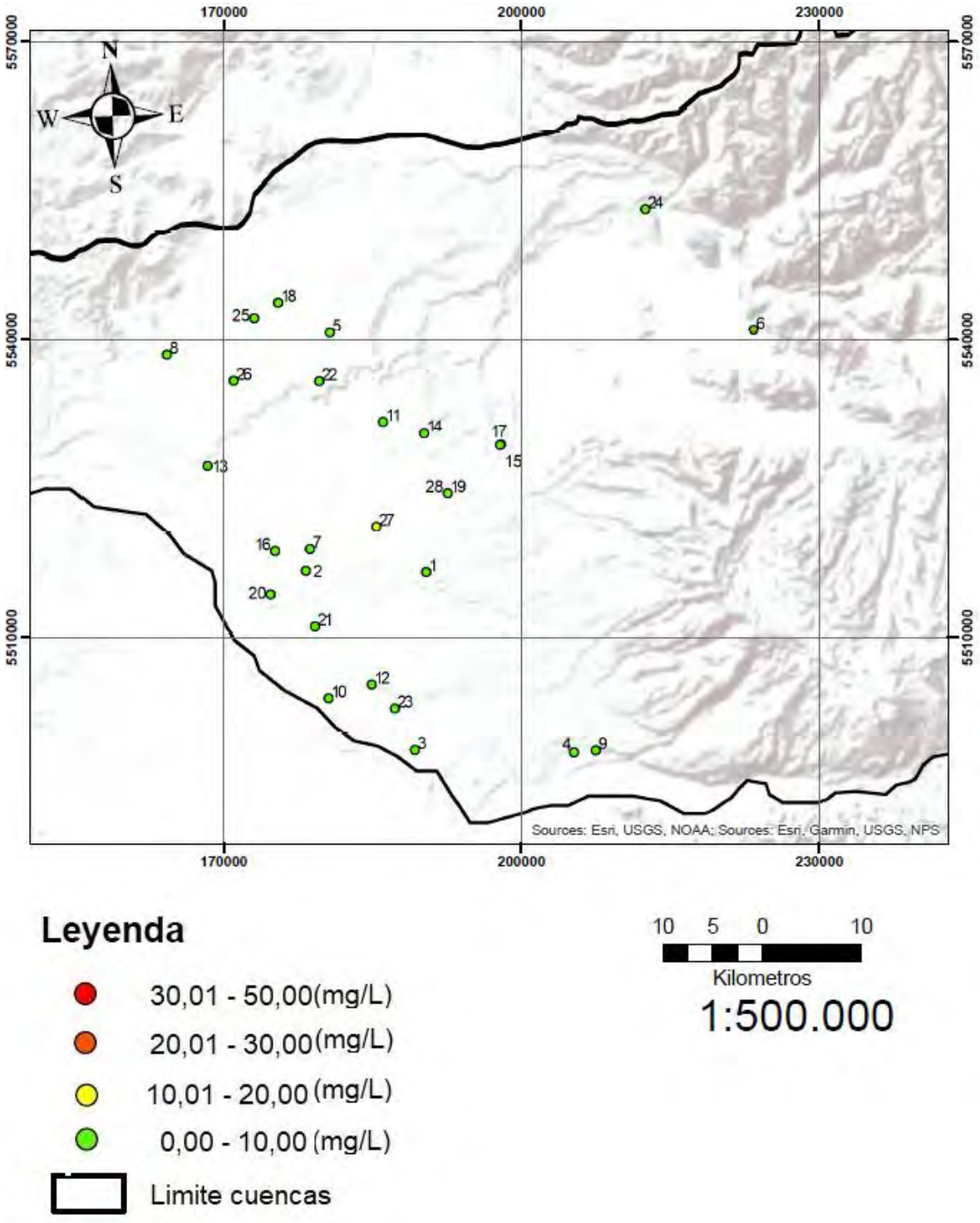


Ilustración 42: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Cloruro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

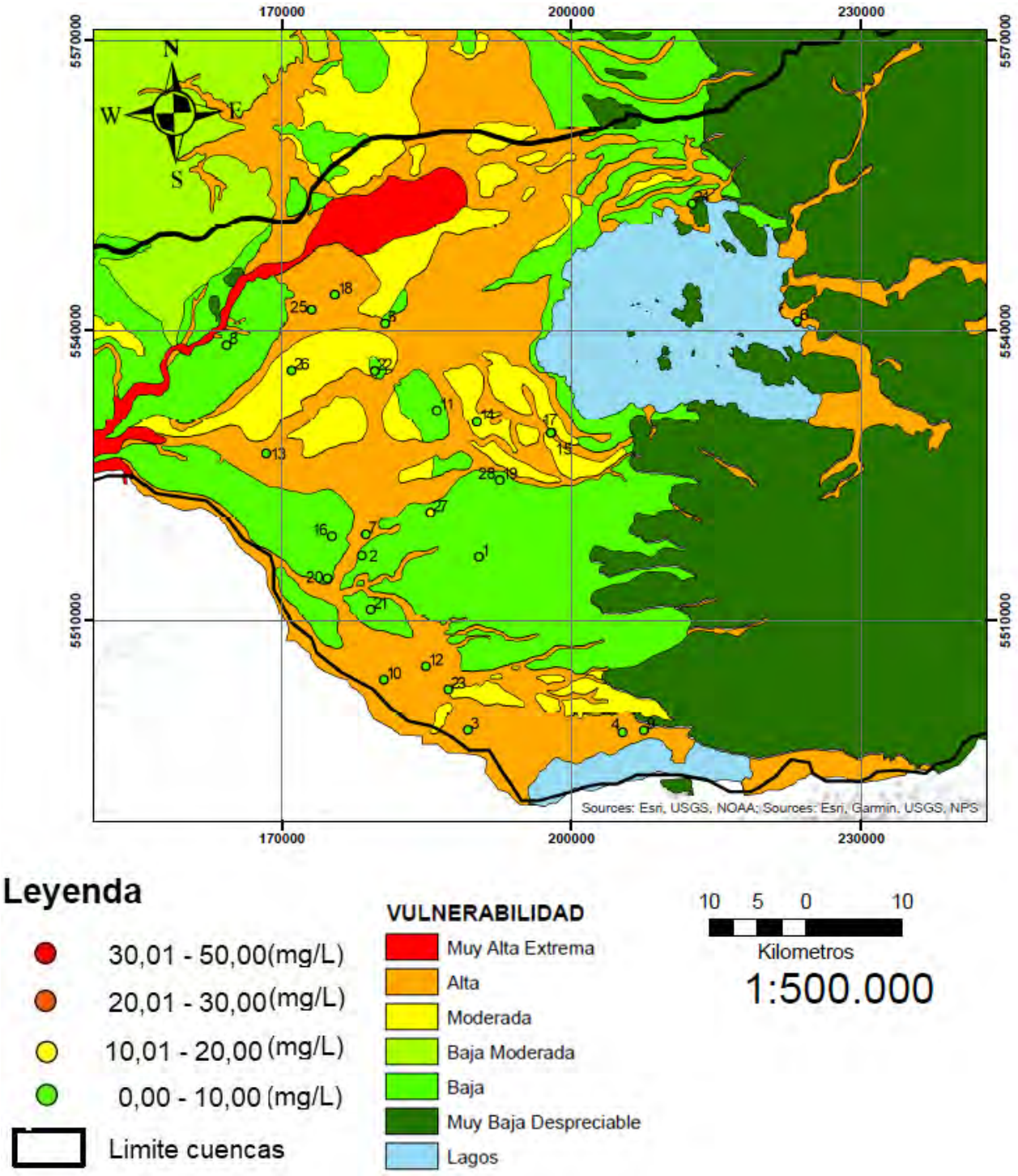


Ilustración 43: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Cloruro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia.

VI.4.4.4. MAGNESIO

El magnesio se encuentra disuelto en forma de ion de forma natural en el agua. Según Custodio y Llamas (1976) este mineral 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.

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 Mg 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. En el caso de los APR estudiados, la totalidad de los pozos son aguas naturales, por lo tanto, no se está en terrenos calcáreos.

Como se logra apreciar en la Tabla 25. En la región de los Ríos se tiene que todos los pozos APR registran valores de concentración de Magnesio por debajo del límite estipulado por la normativa chilena. Los valores máximos de Cloruros se encuentran en APR LLIFEN (8,54 mg/L) y los mínimos en APR TRAHUACO (1,45 mg/L).

Tabla 25: Concentraciones de Magnesio en pozos de la cuenca del Río Bueno

Nombre pozo	Magnesio (mg/L)
Boquial	3,53
Mantilhue	3,89
Puerto Las Rosas	6,32
Calcurrupe	2,99
Ponhuipa	4,74
Carimallin	5,42
Trehuaco	1,45
Futahuente	4,76
Champulli	2,29
Cun Cun	5,82
Marriamo	5,56
Folilco Río Bueno	5,09
Curaco	4,85
Nolgehue	8,52
Traiguen	3,58
Pataguas de Pilmaiquen	3,56
Trapi	2,01
Cayurruca	6,47
Litrán	7,33
Los Esteros Niscon	4,36
Los Leones	3,84
Vivanco	6,39
Huape Roi Roi	4,49
Rofuco Alto	3,44
Auquinco	6,54
Llifen	8,54
Ignao	4,04
El Meli	6,7

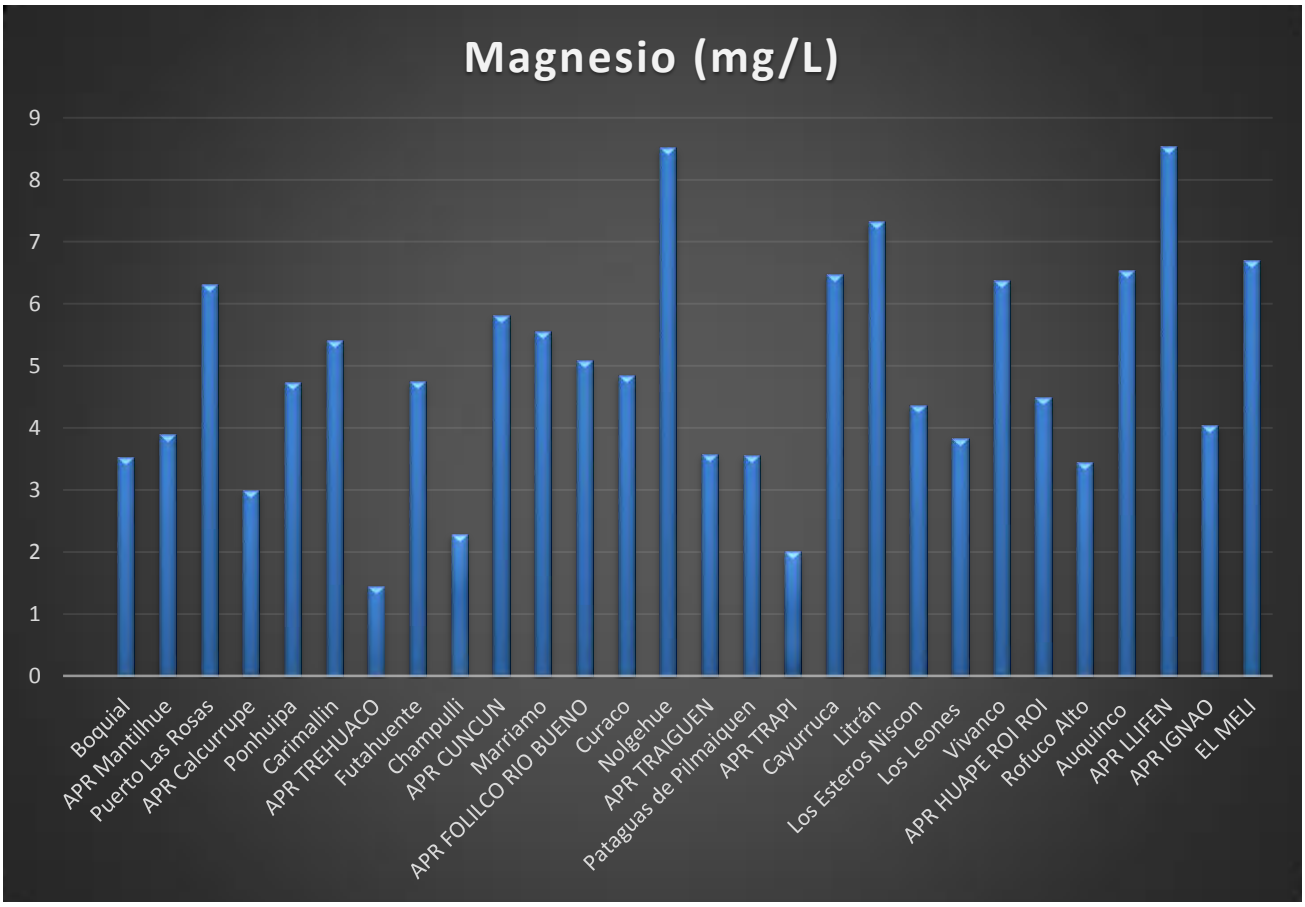
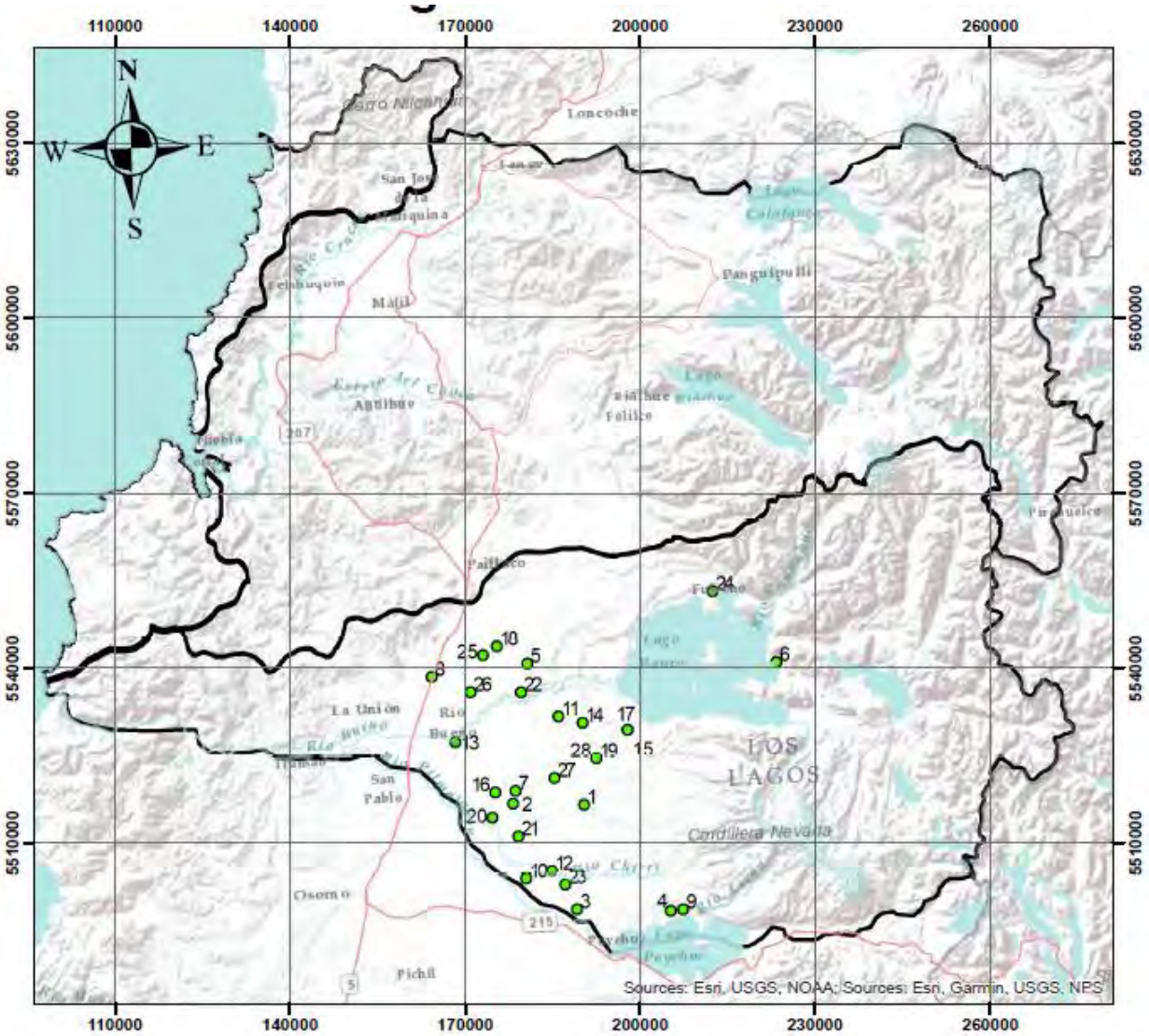


Ilustración 44: Grafico de concentraciones de Magnesio en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia



Leyenda

- 20,01 - 30,00 (mg/L)
- 15,01 - 20,00 (mg/L)
- 10,01 - 15,00 (mg/L)
- 0,00 - 10,00 (mg/L)
- Limite cuencas

30 15 0 30

Kilometros

1:1.000.000

Leyenda

1	Folilco Río Bueno	11	Cayurruca	21	Nolgehue
2	Futahuente	12	Champulli	22	Pataguas de Pilmaiquen
3	Trehuaco	13	Curaco	23	Ponhuipa
4	Mantihue	14	El Meli	24	Puerto Las Rosas
5	Huape	15	Ignao	25	Rofuco Alto
6	Calcurrupe	16	Litran	26	Traiguen
7	Cun Cun	17	Llifen	27	Trapi
8	Auquinco	18	Los Esteros de Niscon	28	Vivanco
9	Boquial 1-2-Ticahua	19	Los Leones		
10	Carimallin	20	Marriamo		

Ilustración 45: Mapa de distribución de concentraciones de Magnesio en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

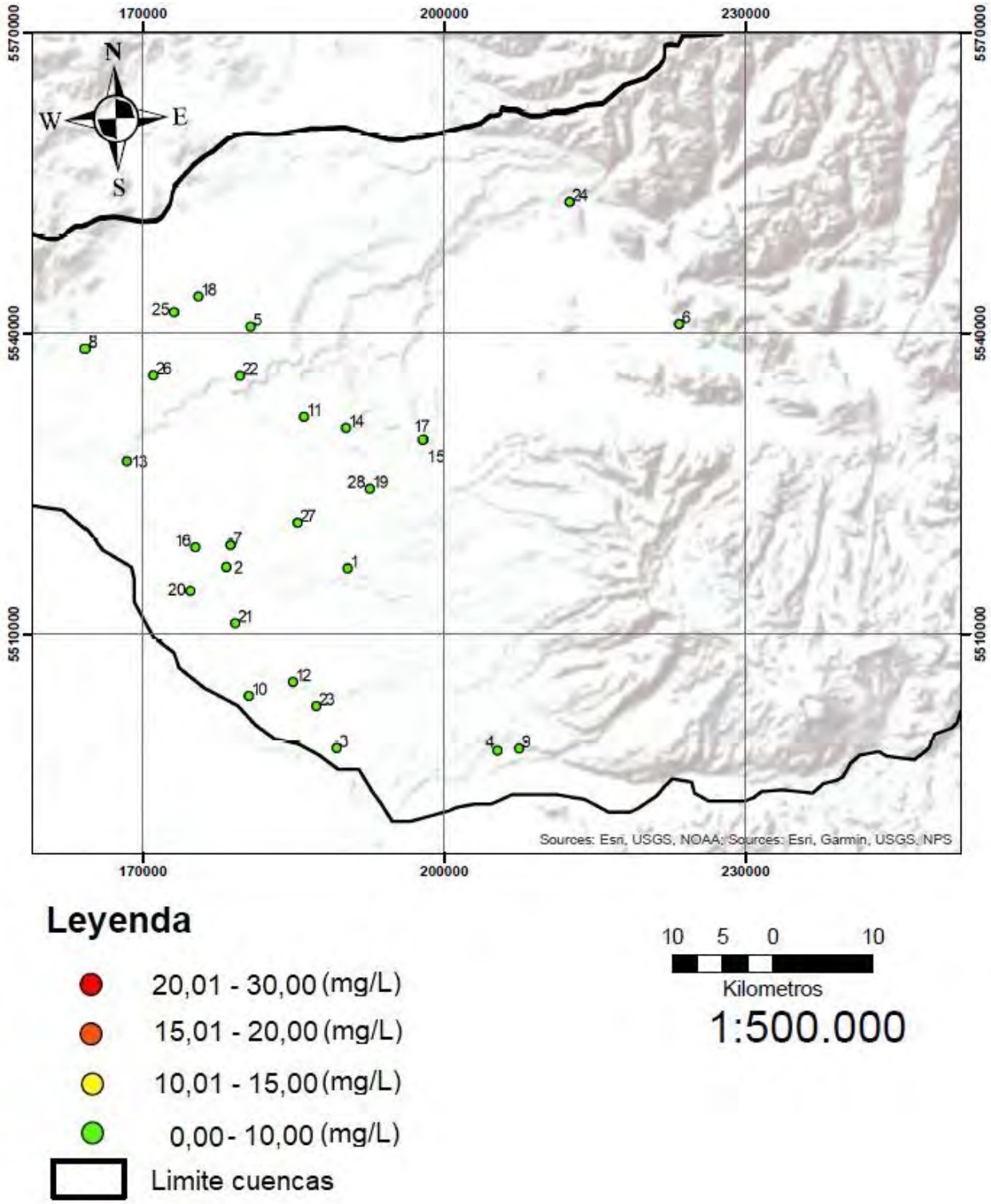


Ilustración 46: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Magnesio en los pozos de la Cuenca Río Bueno.
Fuente: Elaboración propia

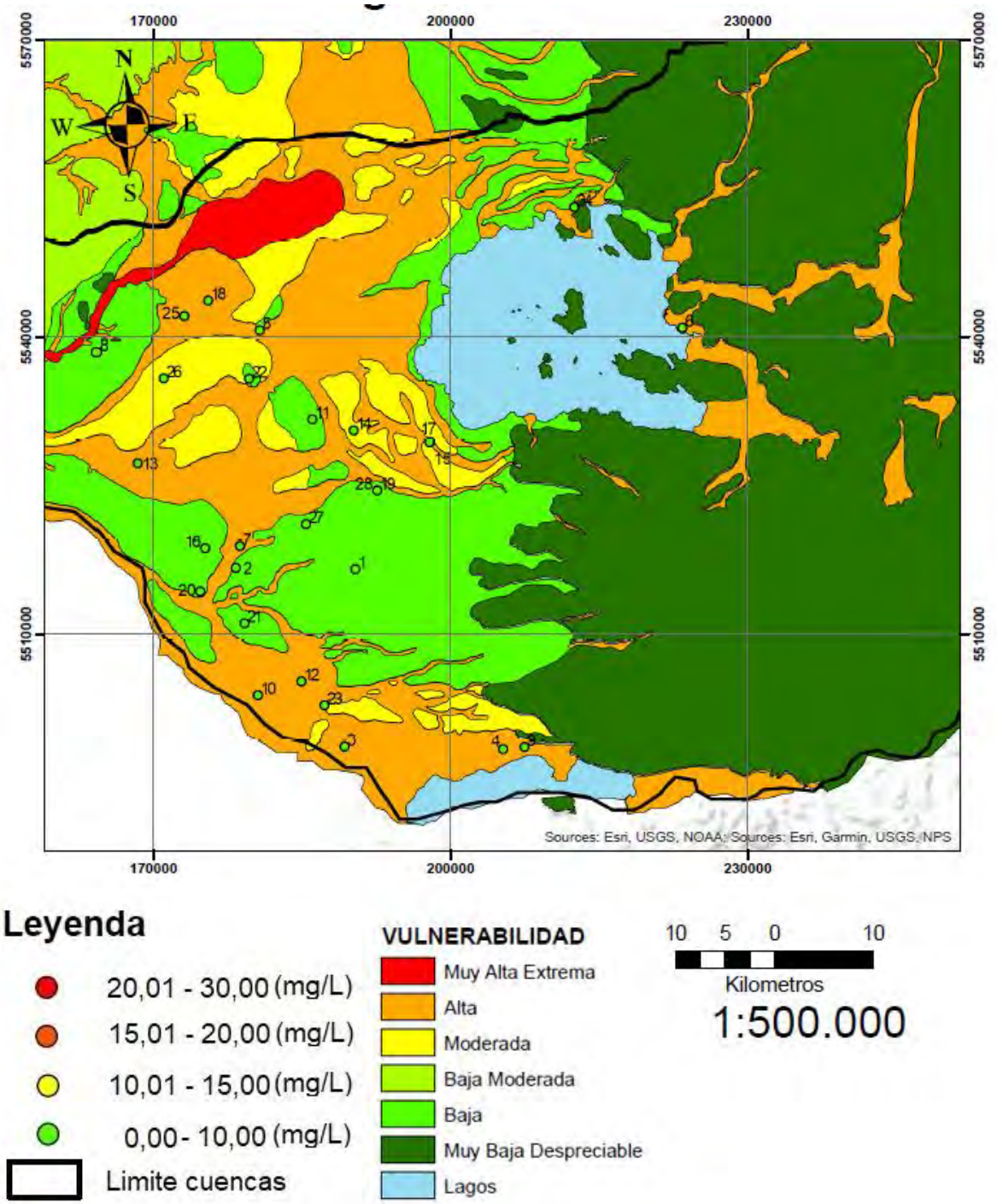


Ilustración 47: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Magnesio en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

VI.4.4.5. ARSÉNICO

La siguiente información fue extraída y modificada de “Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas” realizado por Javier Lillo.

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).

Es común que los acuíferos con contenidos altos de arsénico tengan un origen ligado a procesos geoquímicos naturales, lo cual los diferencia de los acuíferos contaminados de forma antropogénica en que 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.

El contenido de arsénico es controlado por tres factores:

- 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 para el agua de riego (NCh N°1333) como se aprecia en la tabla 26 E ilustración 48, todos los pozos cumplen la norma con excepción de APR Mantihue (0,018 mg/L), mientras que el resto posee valores inferiores a 0,006 mg/L.

Tabla 26: Concentraciones de Arsénico en pozos de la cuenca del Río Bueno.

Nombre pozo	Arsénico (mg/L)
Boquial	0,006
Mantilhue	0,018
Puerto Las Rosas	0,001
Calcurrupe	0,001
Ponhuipa	0,006
Carimallin	0,004
Trehuaco	0,002
Futahuente	0,003
Champulli	0,001
Cun Cun	0,002
Marriamo	0,001
Folilco Río Bueno	0,003
Curaco	0,001
Nolgehue	0,004
Traiguen	0,001
Pataguas de Pilmaiquen	0,001
Trapi	0,001
Cayurruca	0,002
Litrán	0,001
Los Esteros Niscon	0,001
Los Leones	0,001
Vivanco	0,004
Huape Roi Roi	0,001
Rofuco Alto	0,001
Auquinco	0,003
Llifen	0,001
Ignao	0,001
El Meli	0,001

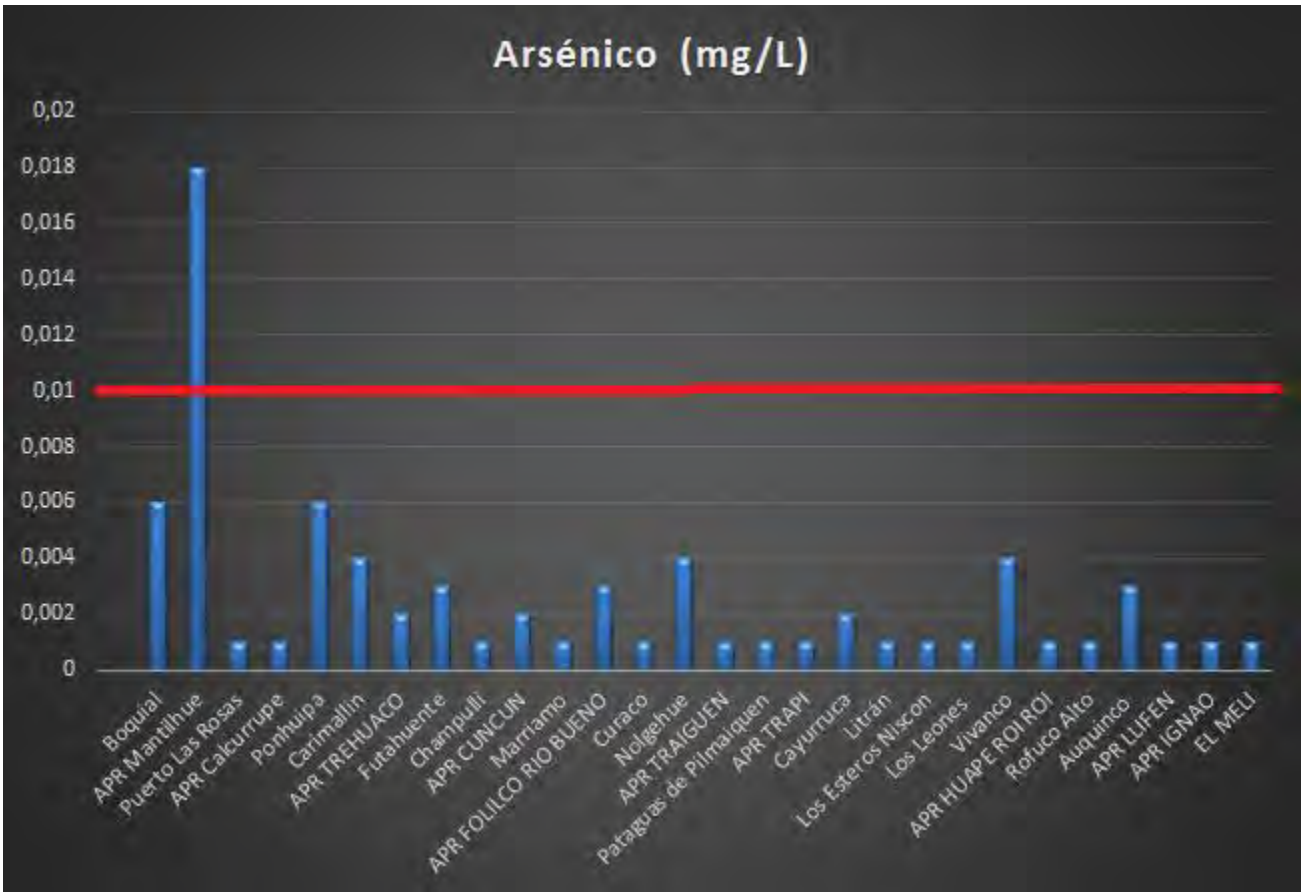
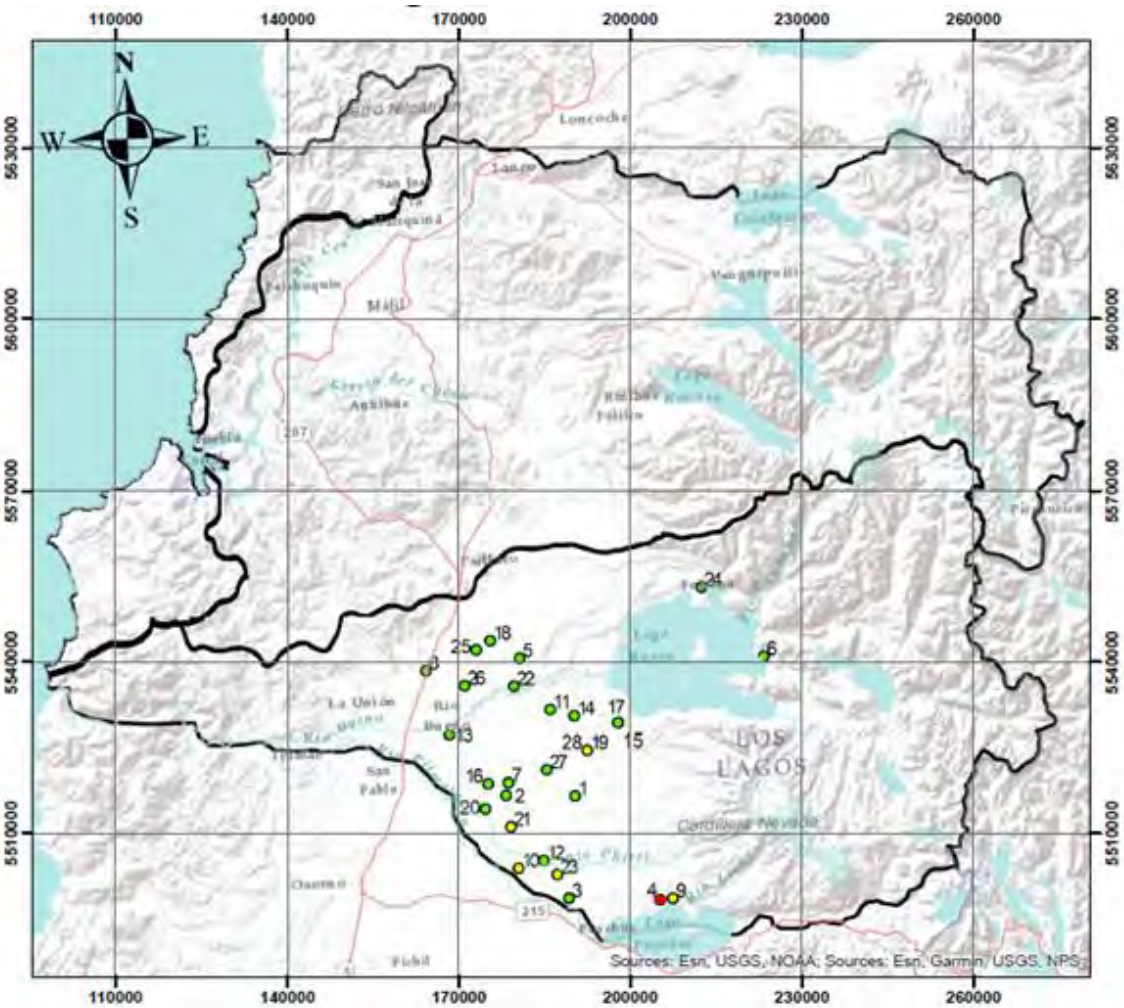


Ilustración 48: Grafico de concentraciones de Arsénico en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia



Leyenda

- >0,01 (mg/L)
- 0,008 - 0,01 (mg/L)
- 0,004 - 0,008 (mg/L)
- 0,001 - 0,004 (mg/L)
- Limite cuencas

30 15 0 30

Kilometros

1:1.000.000

Leyenda

1	Folilco Río Bueno	11	Cayurruca	21	Nolgehue
2	Futahuente	12	Champulli	22	Pataguas de Pilmaiquen
3	Trehuaco	13	Curaco	23	Ponhuipa
4	Mantihue	14	El Meli	24	Puerto Las Rosas
5	Huape	15	Ignao	25	Rofuco Alto
6	Calcurrupe	16	Litran	26	Traiguen
7	Cun Cun	17	Llifen	27	Trapi
8	Auquinco	18	Los Esteros de Niscon	28	Vivanco
9	Boquial 1-2-Ticahua	19	Los Leones		
10	Carimallin	20	Marriamo		

Ilustración 49: Mapa de distribución de concentraciones de Arsénico en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

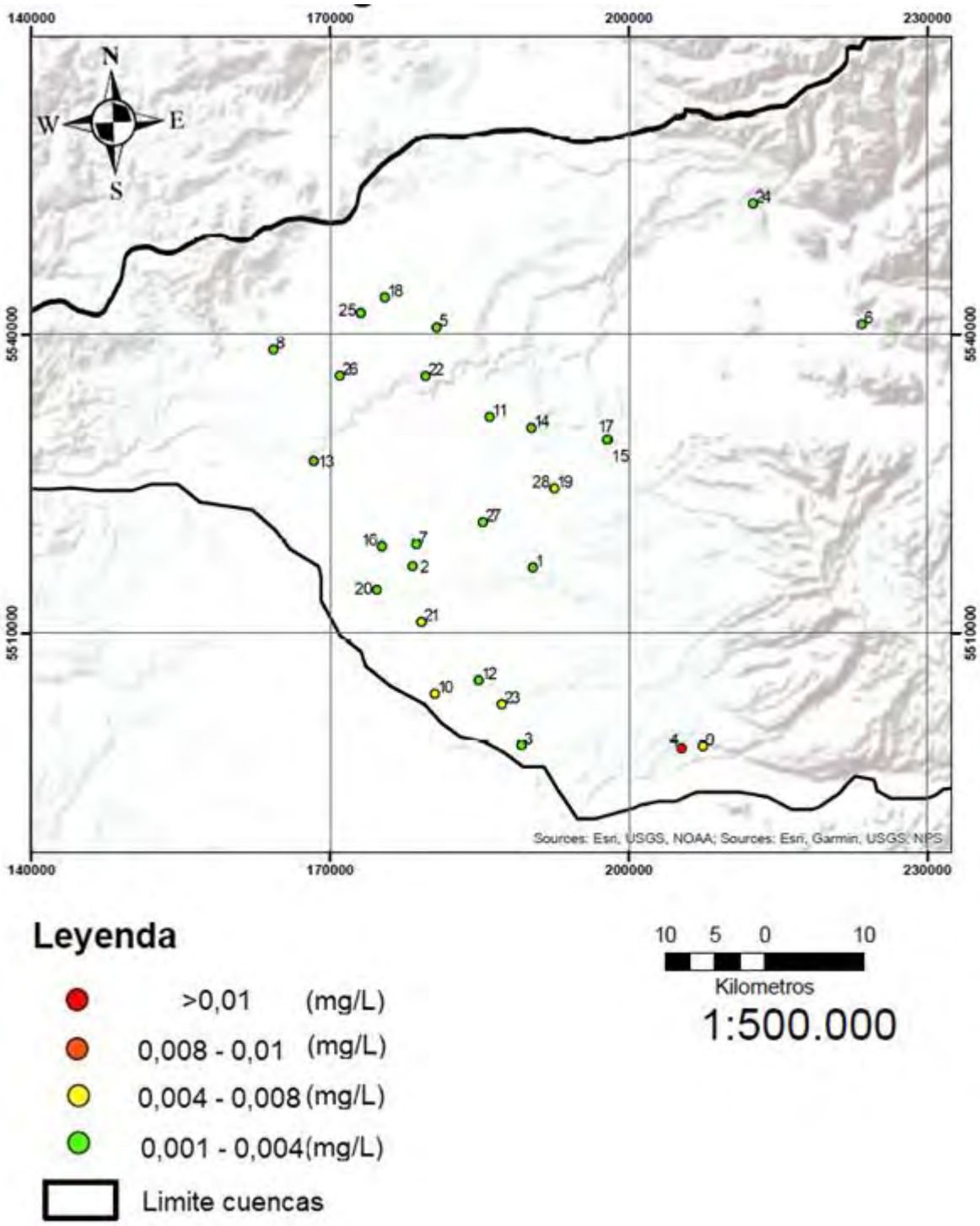


Ilustración 50: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Arsénico en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

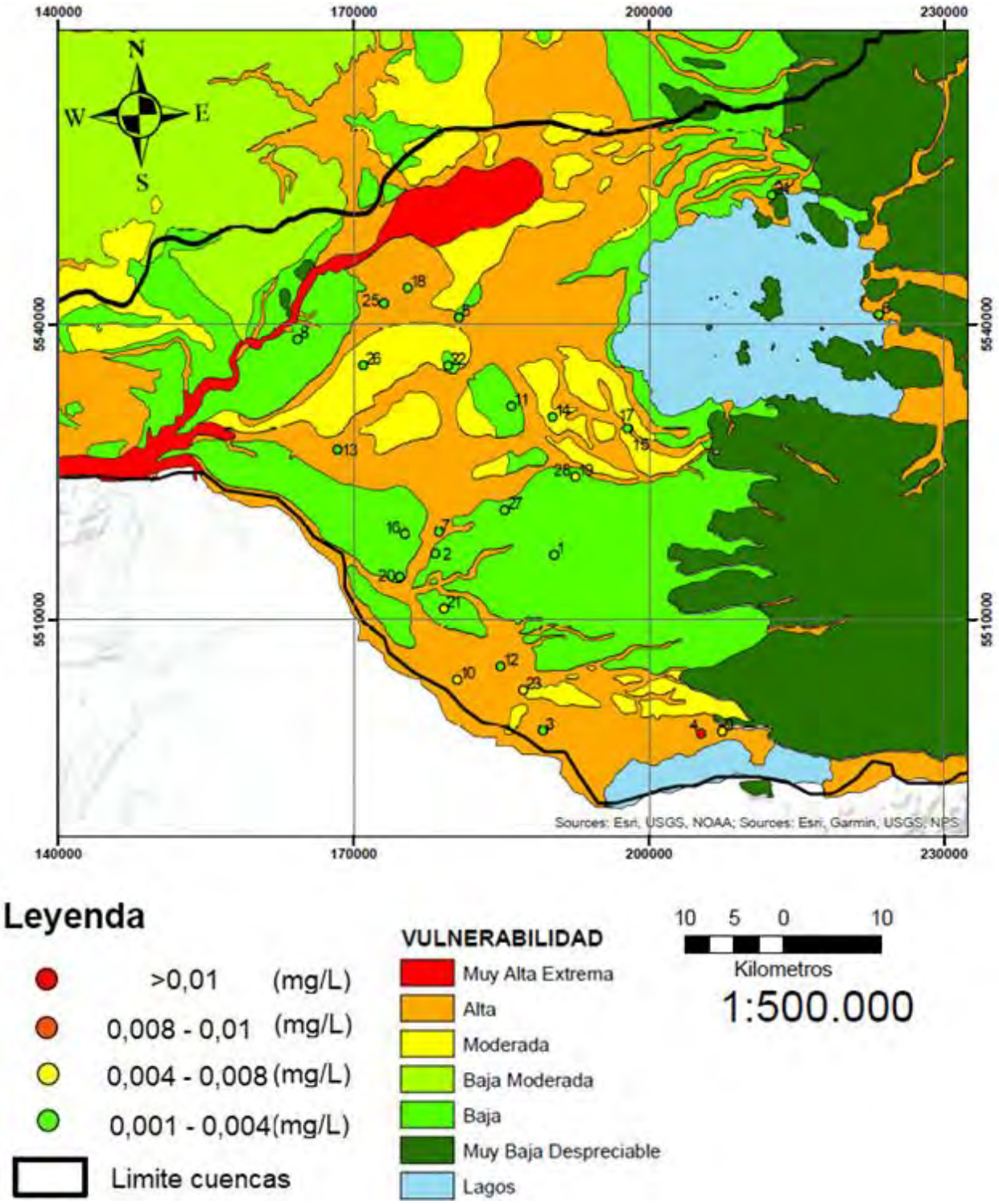


Ilustración 51: Mapa de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Arsénico en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

VI.4.4.6. 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 50mg/. El hierro ocurre de manera natural en acuíferos pero los niveles de aguas subterráneas pueden aumentar por disolución de rocas ferrosas. En aguas subterráneas se reduce a su forma de hierro II, esta forma es 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 0,03 mg/L para el agua potable (NCh N°409) y 5,00para el agua de riego (NCh N°1333) como se aprecia en la tabla 27 E ilustración 52, 10 pozos poseen muestras con valores de concentración de Arsénico mayores a la normativa chilena con un notable valor máximo en APR FOLILCO RÍO BUENO (7,86 mg/L). Lo cual debido al carácter del Hierro puede ser atribuido a existencia de contenidos altos de Hierro sería de origen natural en las aguas.

Tabla 27: Concentraciones de Hierro en pozos de la cuenca del Río Bueno

Nombre pozo	Hierro (mg/L)
Boquial	0,01
Mantilhue	0,01
Puerto Las Rosas	0,01
Calcurrupe	0,84
Ponhuipa	0,01
Carimallin	0,35
Trehuaco	0,01
Futahuente	0,01
Champulli	0,01
Cun Cun	0,05
Marriamo	0,03
Folilco Río Bueno	7,86
Curaco	0,01
Nolgehue	0,71
Traiguen	0,01
Pataguas de Pilmaiquen	0,01
Trapi	0,21
Cayurruca	0,01
Litrán	1,49
Los Esteros Niscon	0,02
Los Leones	0,01
Vivanco	3,55
Huape Roi Roi	0,01
Rofuco Alto	1,26
Auquinco	3,18
Llifen	3,38
Ignao	0,01
El Meli	0,59

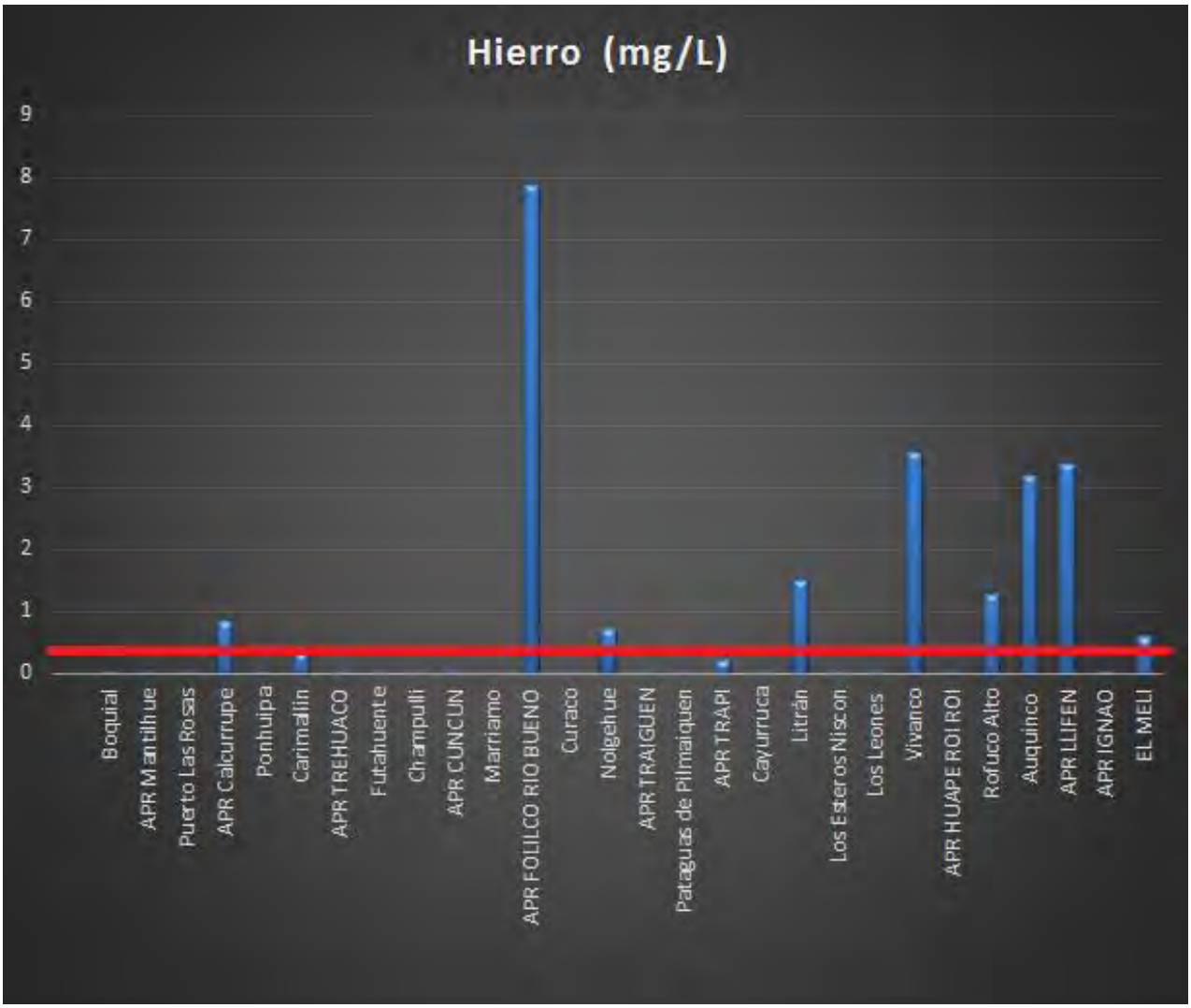
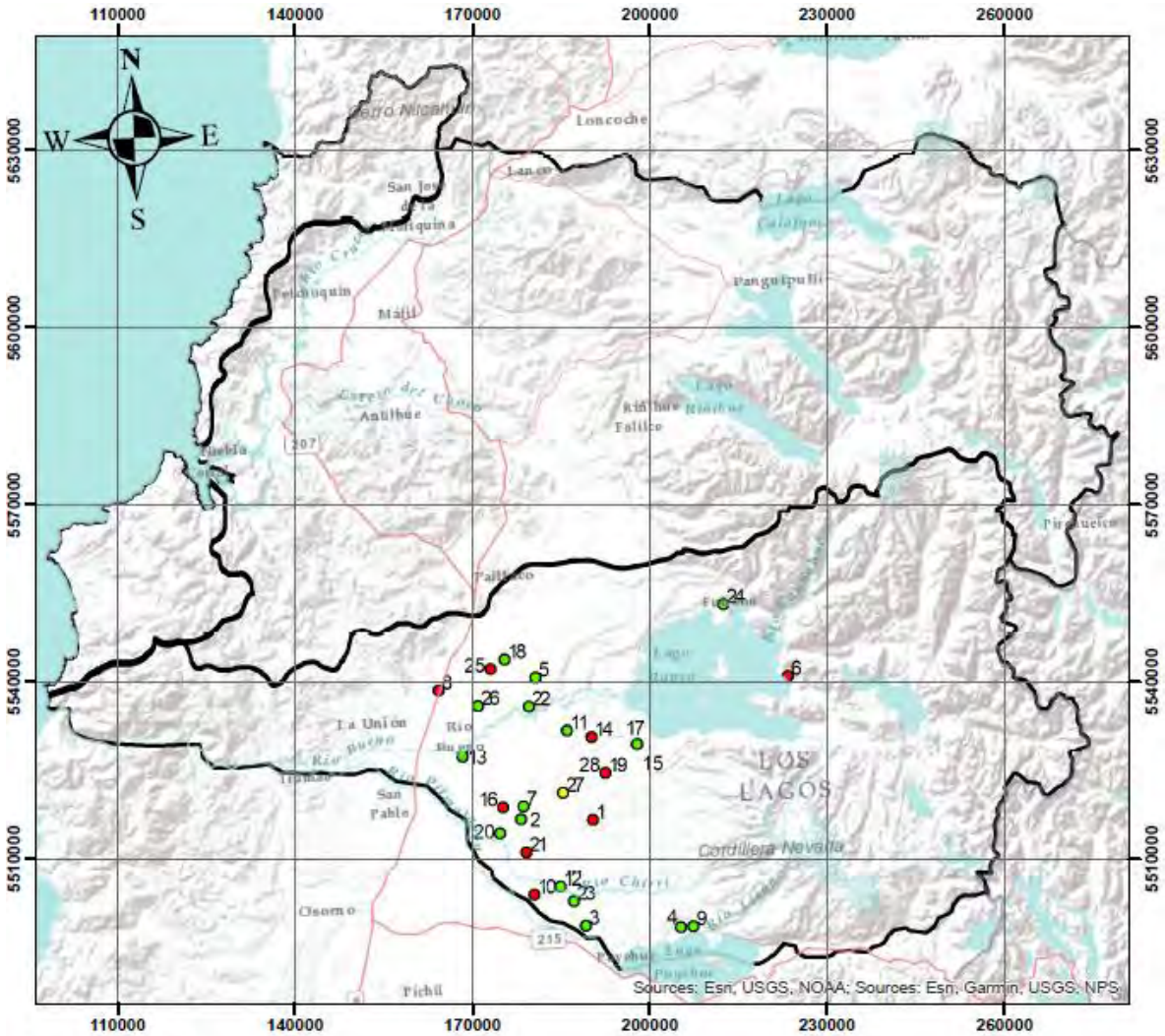


Ilustración 52: Grafico de concentraciones de Hierro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia



Leyenda

- >0,30 (mg/L)
- 0,24 - 0,30 (mg/L)
- 0,12 - 0,24 (mg/L)
- 0,02 - 012 (mg/L)
- Limite cuencas

30 15 0 30

Kilometros

1:1.000.000

Leyenda

1	Folilco Río Bueno	11	Cayurruca	21	Nolgehue
2	Futahuente	12	Champulli	22	Pataguas de Pilmaiquen
3	Trehuaco	13	Curaco	23	Ponhuipa
4	Mantihue	14	El Meli	24	Puerto Las Rosas
5	Huape	15	Ignao	25	Rofuco Alto
6	Calcurrupe	16	Litran	26	Traiguen
7	Cun Cun	17	Llifen	27	Trapi
8	Auquinco	18	Los Esteros de Niscon	28	Vivanco
9	Boquial 1-2-Ticahua	19	Los Leones		
10	Carimallin	20	Marriamo		

Ilustración 53: Mapa de distribución de concentraciones de Hierro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

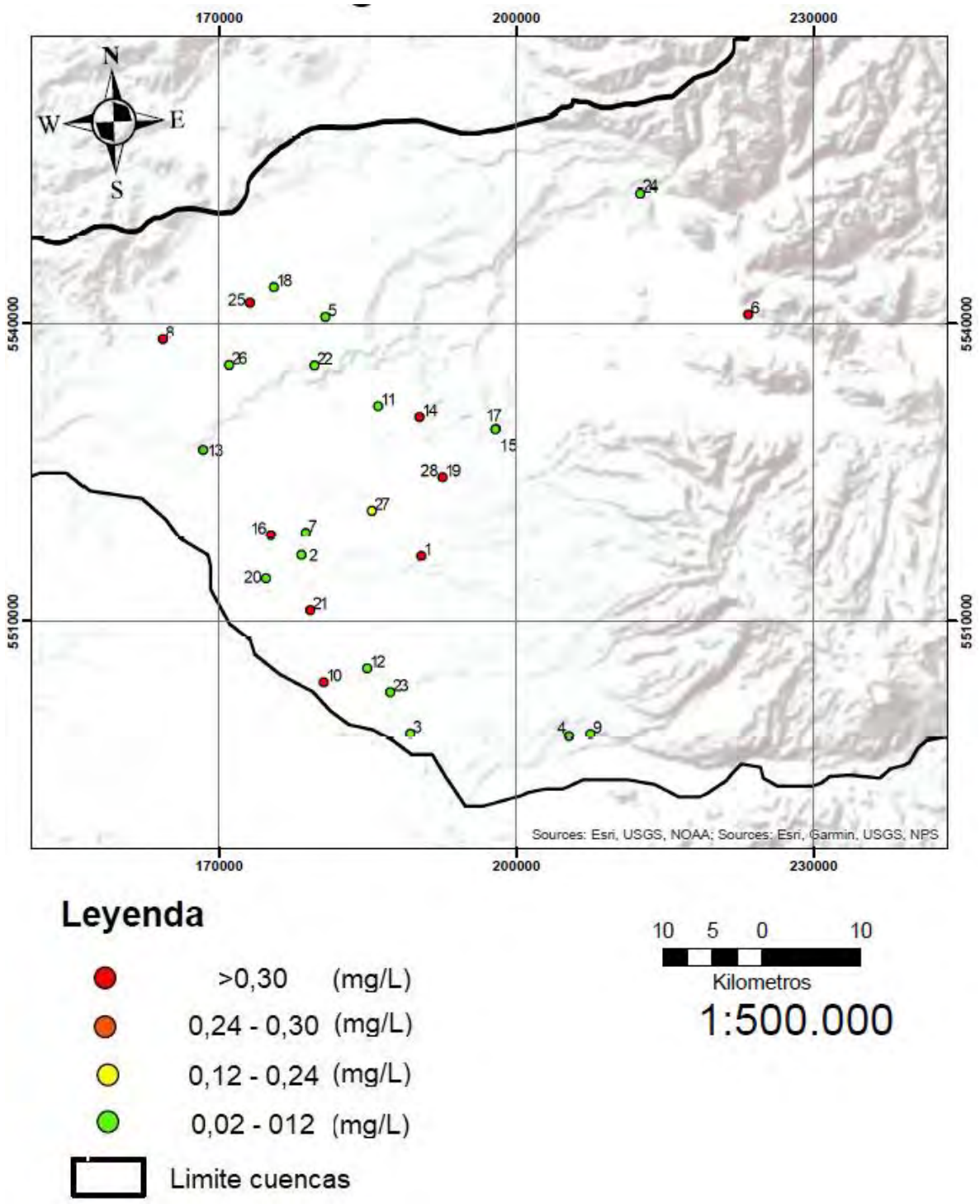


Ilustración 54: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Hierro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

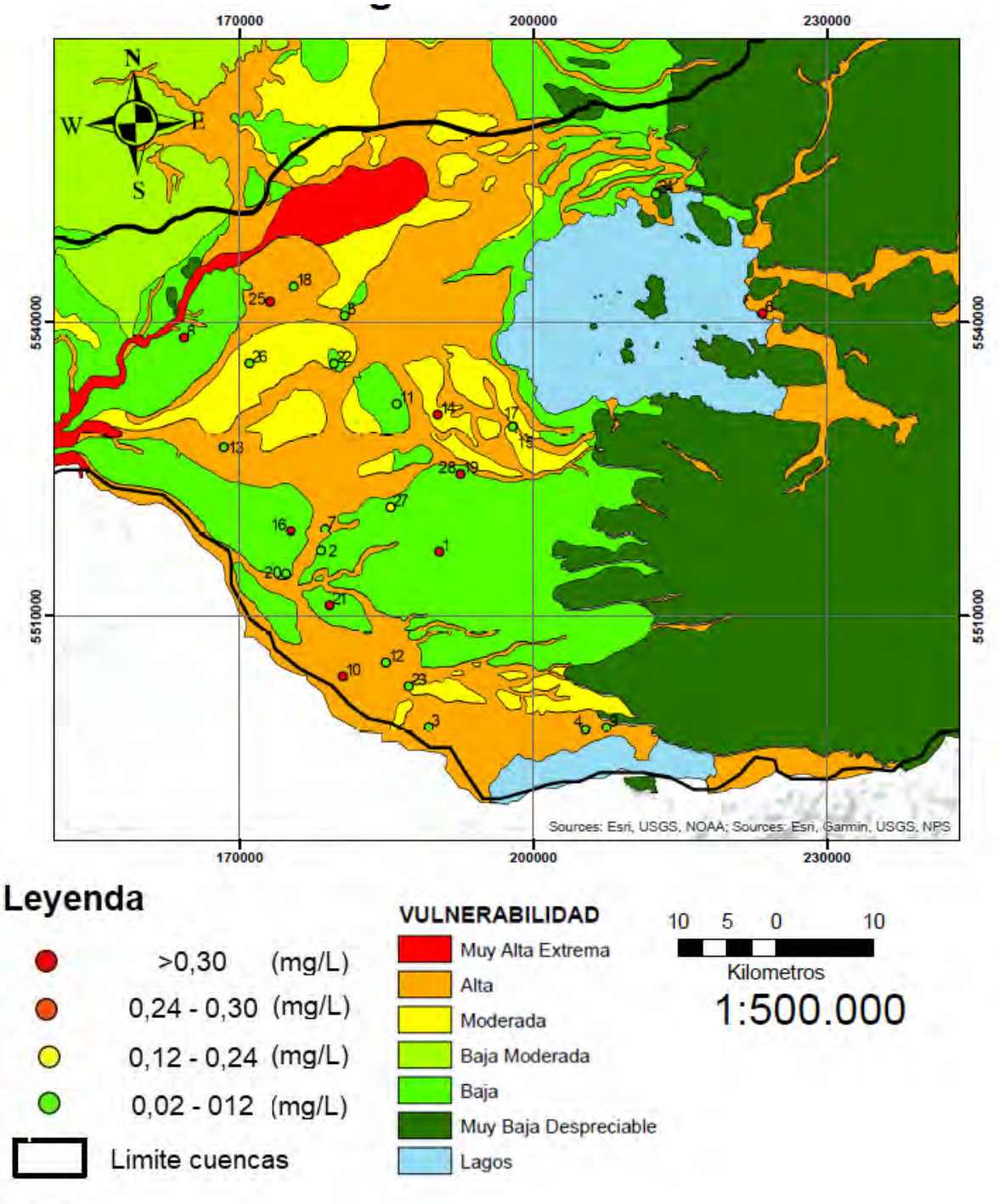


Ilustración 55: Mapa ampliado de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Hierro en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

VI.4.4.7. 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 puede llegar a los 1,50 mg/L o mas (Doula M.K., 2006)

Si bien la presencia de esta sustancia en el agua y su consumo no tiene efectos nocivos para la salud, al igual que el Hierro, tiene efectos adversos en la operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento y en el aspecto del agua.

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 10 pozos superan el valor de la normativa siendo el mayor valor de Manganeso el medido en APR FOLILCO RÍO BUENO.

Tabla 28: Concentraciones de Manganeso en pozos de la cuenca del Río Bueno

Nombre pozo	Manganeso (mg/L)
Boquial	0,01
Mantilhue	0,10
Puerto Las Rosas	0,01
Calcurrupe	0,05
Ponhuipa	0,01
Carimallin	0,53
Trehuaco	0,01
Futahuente	0,01
Champulli	0,01
Cun Cun	0,13
Marriamo	0,16
Folilco Río Bueno	0,72
Curaco	0,01
Nolgehue	0,51
Traiguen	0,01
Pataguas de Pilmaiquen	0,01
Trapi	0,01
Cayurruca	0,01
Litrán	0,40
Los Esteros Niscon	0,01
Los Leones	0,01
Vivanco	0,56
Huape Roi Roi	0,01
Rofuco Alto	0,01
Auquinco	0,61
Llifen	0,14
Ignao	0,01
El Meli	0,02

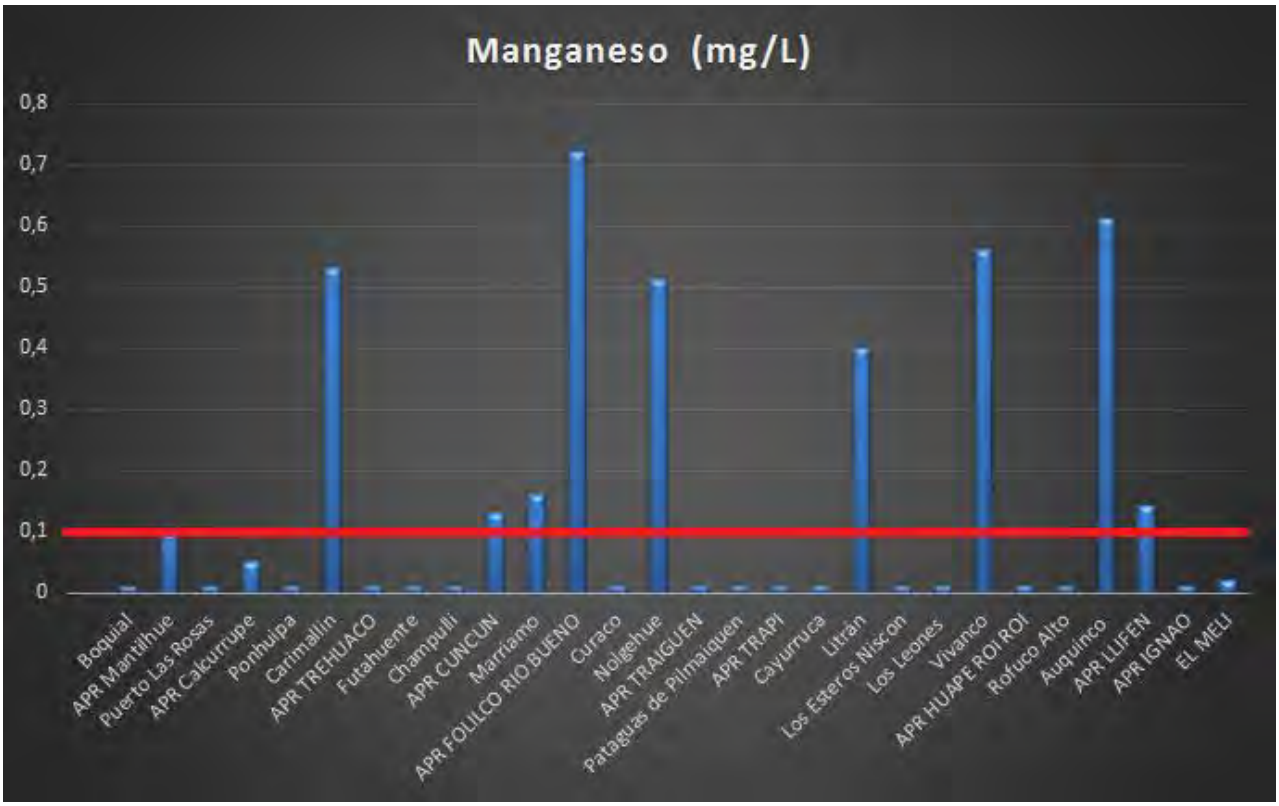
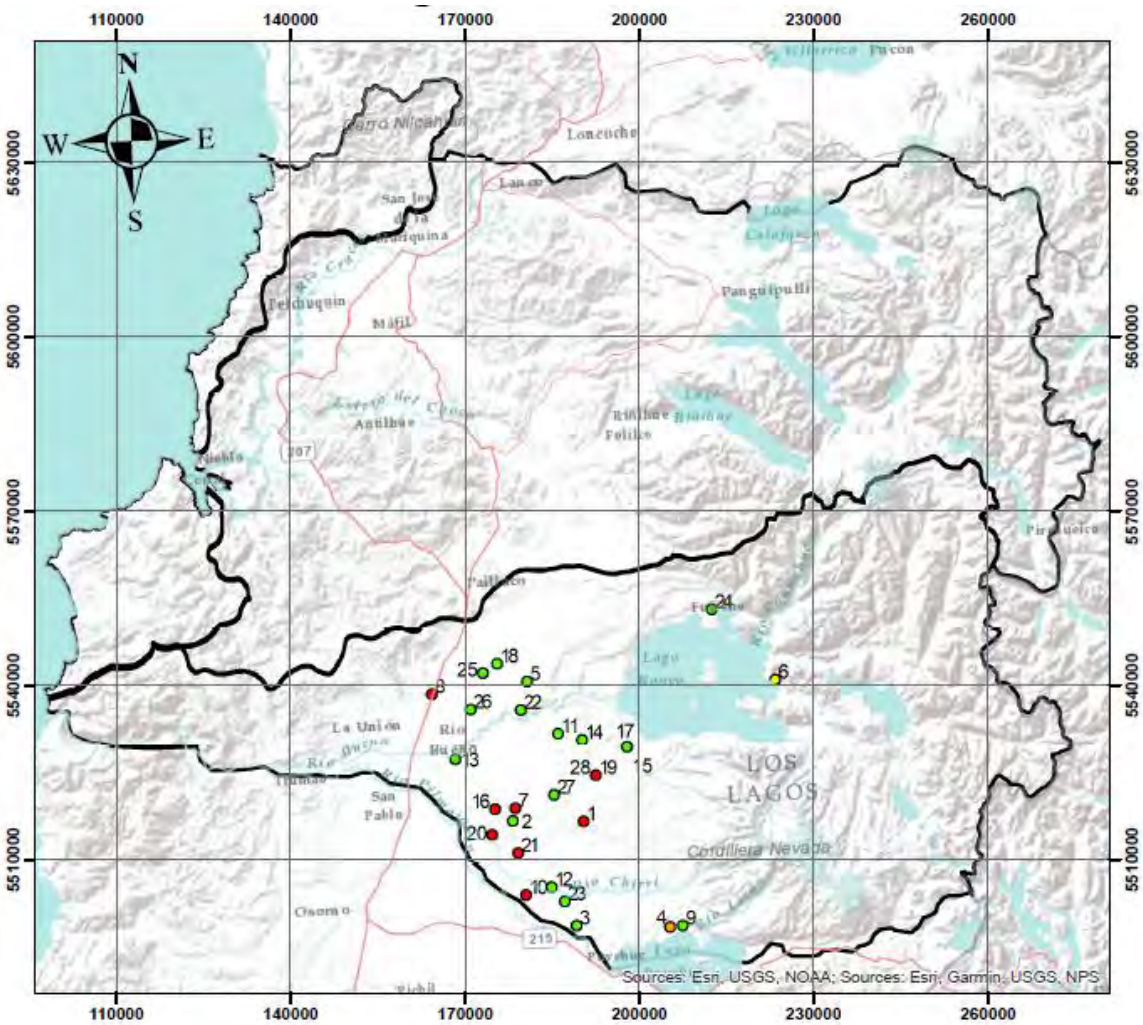


Ilustración 56: Grafico de concentraciones de Manganeso en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia



Leyenda

- >0,10 (mg/L)
- 0,08 - 0,10 (mg/L)
- 0,04 - 0,08 (mg/L)
- 0,01 - 0,04 (mg/L)
- Limite cuencas

30 15 0 30

Kilometros

1:1.000.000

Leyenda

1	Folilco Río Bueno	11	Cayurruca	21	Nolgehue
2	Futahuente	12	Champulli	22	Pataguas de Pilmaiquen
3	Trehuaco	13	Curaco	23	Ponhuipa
4	Mantihue	14	El Meli	24	Puerto Las Rosas
5	Huape	15	Ignao	25	Rofuco Alto
6	Calcurrupe	16	Litran	26	Traiguen
7	Cun Cun	17	Llifen	27	Trapi
8	Auquinco	18	Los Esteros de Niscon	28	Vivanco
9	Boquial 1-2-Ticahua	19	Los Leones		
10	Carimallin	20	Marriamo		

Ilustración 57: Mapa de distribución de concentraciones de Manganeso en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

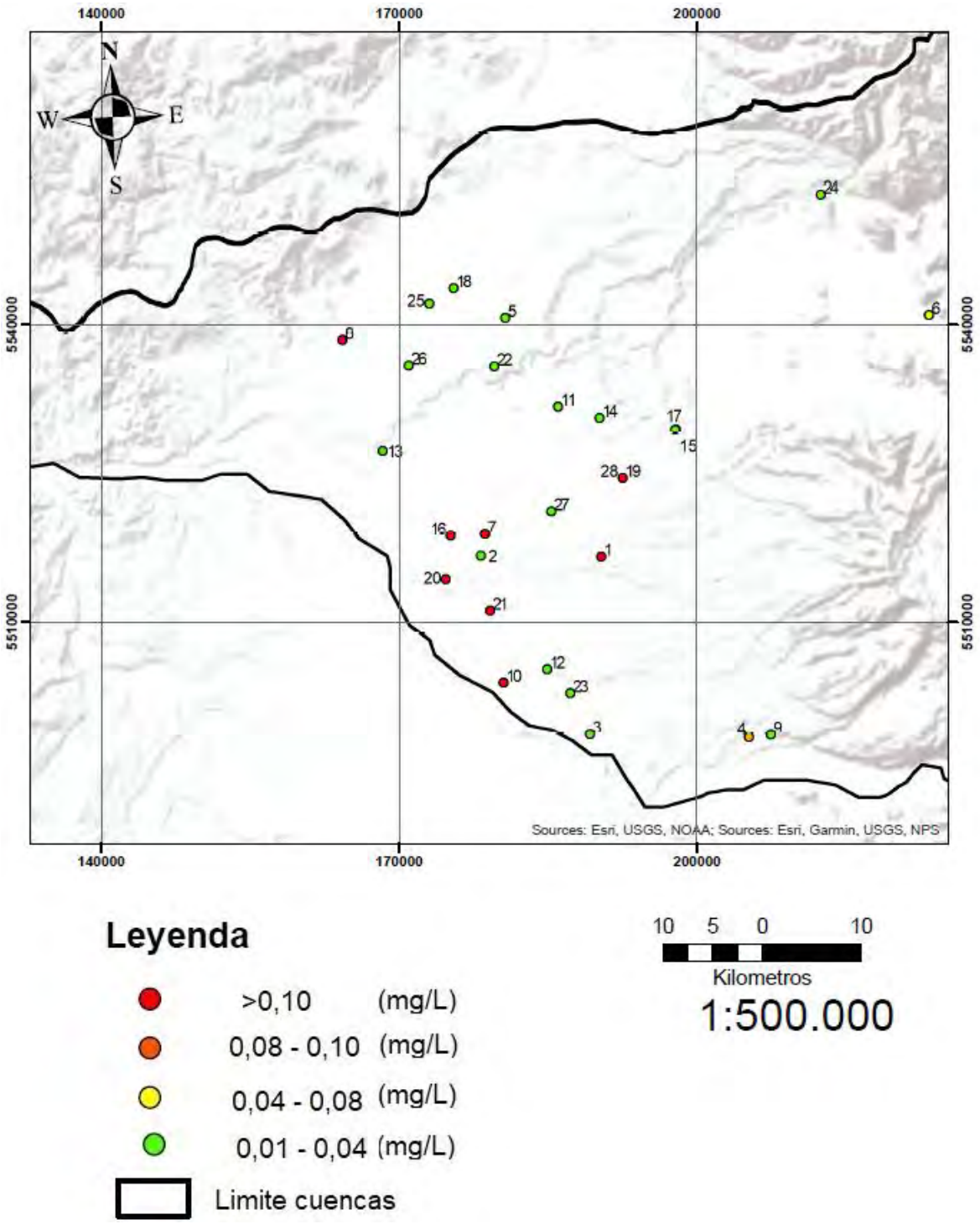


Ilustración 58: Mapa ampliado de distribución de concentraciones de Manganeso en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

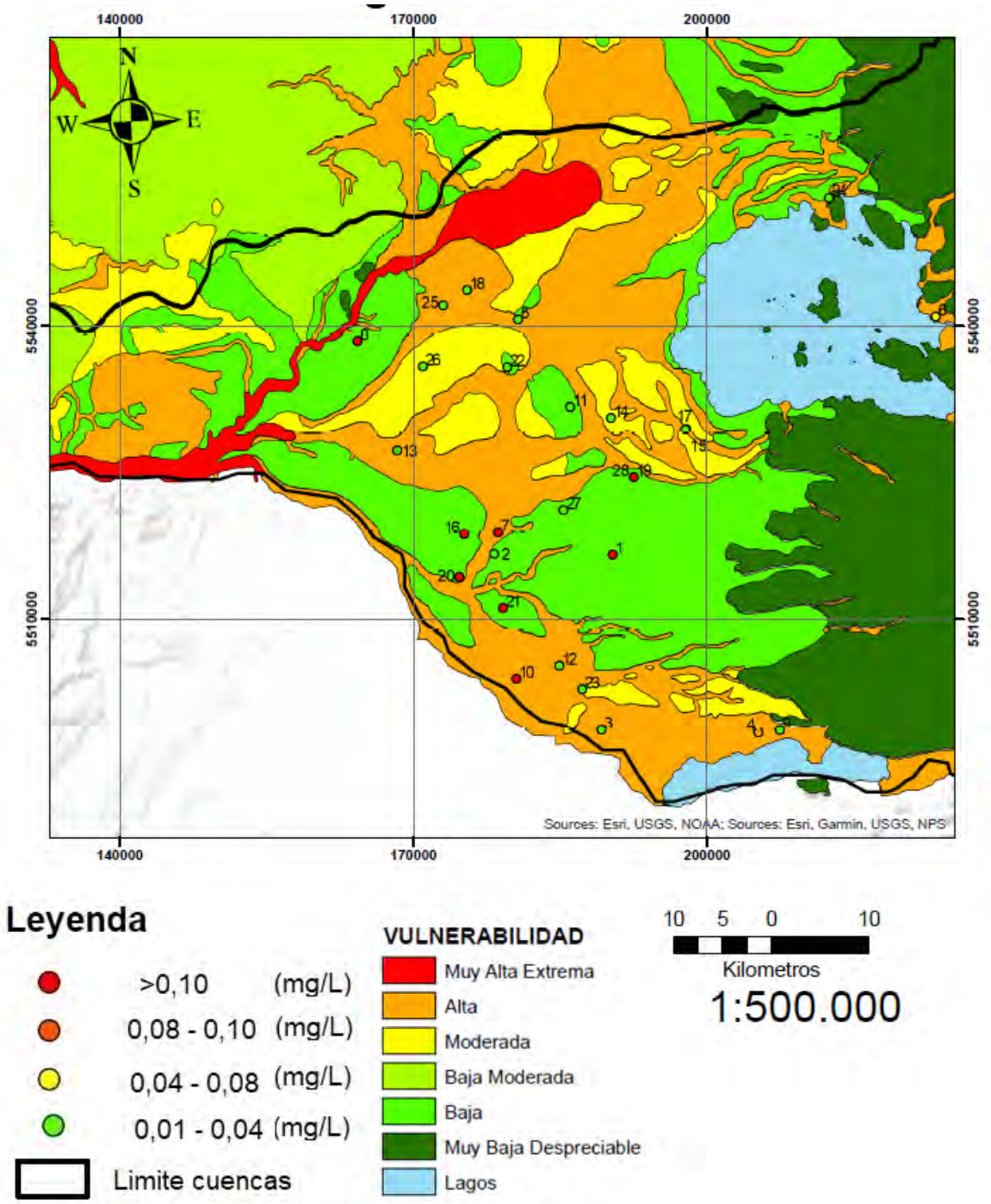


Ilustración 59: Mapa ampliado de vulnerabilidad de acuíferos y de distribución de concentraciones de Manganeso en los pozos de la Cuenca Río Bueno. Fuente: Elaboración propia

VII. CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

VII.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS LOCALES

La elección de los parámetros químicos locales se realizó en base a los siguientes pasos mencionados por la DGA (2009), en su estudio "Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos", Estos son:

1. Recopilación de antecedentes de posibles efectos que eleven el valor de la concentración de parámetros químicos en el sector acuífero, para ello, en la Región de los Ríos, se interpretaron los posibles efectos, tales como:
    a. Efectos de origen natural: geología, volcanes, interacción con agua de río, termas y mar,
    b. Efectos de origen antrópico: derrames industriales, depósitos de residuos industriales líquidos (RILes), vertederos, actividades agrícolas, ganaderas, etc,
2. Analizar fuentes contaminantes, en cuanto a parámetros químicos asociados y valores propuestos por normas nacionales e internacionales de agua potable y riego, y su porcentaje de remoción mediante un tratamiento tradicional para agua potable,
3. Selección de dos parámetros siguiendo uno o más criterios establecidos, Entre estos:
    a. Parámetros más abundantes con respecto a una de las normas consideradas,
    b. Parámetros más riesgosos para la salud,
    c. Parámetros minoritarios de mayor concentración,
    d. Parámetros no correlacionados y representativos de actividades antrópicas distintas,

En la metodología diseñada por la DGA (2009) se propone que en los contaminantes naturales típicos de aguas subterráneas en la Región de Biobío son:

a. Hierro y Manganeso (Considerados en la NCh N°409)
b. Aluminio, Níquel y Asbesto (No considerados en la NCh N°409)

A partir de las concentraciones de metales obtenidas en los análisis realizados por el LADGA los parámetros seleccionados para incluir en el cálculo del Índice de Calidad son:

Tabla 29: Parámetros fisicoquímicos estudiados.

Parámetros Físico-químicos	
Cloruros (Cl)	Arsénico (As)
Sulfato (SO_4)	Sodio (Na)
Magnesio (Mg)	Calcio (Ca)
Nitrato (NO_3)	

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 Ríos cuenta en un 98% con clasificación "excepcional" y "buena". Por

otra parte, existe 1 pozos, a saber, APR Mantilhue (acuífero mantilhue) con calidad “Regular” debido al parámetros arsénico.

Tabla 30: Índice de Calidad para pozos Región de los Ríos

Nombre Pozo	IC general
Boquial	Excepcional
APR MANTILHUE	Regular
Ponhuipa	Excepcional
Carimallin	Excepcional
APR TREHUACO	Excepcional
Futahuente	Excepcional
Champulli	Excepcional
APR CUNCUN	Excepcional
Marriamo	Excepcional
APR FOLILCO RIO BUENO	Excepcional
Curaco	Excepcional
Nolgehue	Excepcional
APR TRAIGUEN	Excepcional
Pataguas de Pilmaiquen	Excepcional
APR TRAPI	Excepcional
Cayurruca	Buena
Litrán	Excepcional
Los Esteros Niscon	Excepcional
Los Leones	Excepcional
Vivanco	Excepcional
APR HUAPE ROI ROI	Buena
Rofuco Alto	Excepcional
Auquinco	Excepcional
APR LLIFEN	Excepcional
APR IGNAO	Excepcional
EL MELI	Excepcional
Puerto Las Rosas	Excepcional
APR CALCURRUPE	Excepcional

VIII. CONCLUSIONES

El presente estudio permite obtener información acerca del estado fisicoquímico actual de las aguas subterráneas de la Región de los Ríos a partir del monitoreo de 28 pozos APR efectuado en el periodo agosto-diciembre de 2019, los cuales pertenecen en su totalidad a la cuenca Río bueno.

Los resultados indicaron que la composición química de los acuíferos es principalmente bicarbonatada, variando de magnésica a sódica en la cuenca Río Bueno. 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 1 de ellos que presentó un valor fuera de lo establecido (6,4) en la Norma N°409.

La superación de la normativa vigente se dio principalmente en el pH (1 pozo), Manganeso (10 pozos), Hierro (10 pozos) y Arsénico (1 pozo) para la Normativa de agua potable (NCh N°409), cabe mencionar que esta comparación es solo referencial ya que la muestras son representativas de la fuente, es decir el acuífero, y no dan cuenta de la calidad del agua post sistema de potabilización .

A continuación, se presenta en la Tabla 31 un resumen con los pozos que presentan parámetros fuera de la Norma N°409 para agua potable. Mientras que para el Sulfato, Nitrato, Cloruro y Magnesio ningún pozo registro valores por sobre la normativa vigente.

Tabla 31: Resumen de pozos con valores mayores a la normativa chilena. Fuente: Elaboración propia.

Nombre del Pozo	pH	Arsénico (mg/L)	Manganeso (mg/L)	Hierro (mg/L)
Boquial	7,35	0,006	<0,01	<0,01
Mantilhue	7,14	**0,018**	**0,1**	<0,01
Ponhuipa	7,50	0,006	<0,01	<0,01
Carimallin	7,60	0,004	**0,53**	**0,35**
Trehuaco	6,70	0,002	<0,01	<0,01
Futahuente	7,50	0,003	<0,01	<0,01
Champulli	7,01	<0,001	<0,01	<0,01
Cun Cun	7,98	0,002	**0,13**	0,05
Marriamo	7,80	0,001	**0,16**	0,03
Folilco Río Bueno	7,39	0,003	**0,72**	**7,86**
Curaco	7,70	0,001	<0,01	<0,01
Nolgehue	7,60	0,004	**0,51**	**0,71**
Traiguen	6,70	<0,001	<0,01	<0,01
Pataguas de Pilmaiquen	7,20	<0,001	<0,01	<0,01
Trapi	7,40	<0,001	<0,01	0,21
Cayurruca	7,20	0,002	<0,01	<0,01
Litrán	7,20	0,001	**0,4**	**1,49**
Los Esteros Niscon	7,20	<0,001	<0,01	0,02
Los Leones	7,65	<0,001	<0,01	<0,01
Vivanco	7,63	0,004	**0,56**	**3,55**
Huape Roi Roi	7,40	<0,001	<0,01	<0,01
Rofuco Alto	7,18	<0,001	<0,01	**1,26**
Auquinco	7,10	0,003	**0,61**	**3,18**
Llifen	7,20	<0,001	**0,14**	**3,38**
Ignao	7,13	<0,001	<0,01	<0,01
El Meli	7,14	<0,001	0,02	**0,59**
Puerto Las Rosas	**6,40**	0,001	<0,01	<0,01
Calcurrupe	7,30	<0,001	0,05	**0,84**

En relación con la presencia 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 produce debido al bajo pH en conjunto con una alta concentración de CO2 (escaso contenido de Oxígeno disuelto). 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 estas, ya que al contacto con el oxígeno precipitan generando incrustación y en algunas ocasiones obstrucción de las tuberías o válvulas, entre otros. Con respecto al alto contenido de Arsénico encontrado en Mantilhue se puede pensar que su alto nivel se debe a la alta cantidad de material piroclastico proveniente de la gran cantidad de volcanes de la zona. Por otro lado, cabe mencionar que el Nitrato en la Región de los Ríos presenta valores bajos de este compuesto en relación a otra regiones que debido a intervención antropogénica, principalmente el uso de fertilizantes, por lo que se puede inferir que la actividad agrícola en la región es lo suficientemente baja como para no generar un impacto en la calidad de aguas con respecto a la contaminación por Nitrato.

A partir del cálculo de índice de calidad de los 28 pozos APR se aprecia que el 89,3% de los pozos estudiados (25 pozos) cuenta con una clasificación excepcional, mientras que el 7,1% (2 pozos) cuenta con calidad buena y finalmente sólo un 3,6% (1 pozo) corresponde a una clasificación Regular.

Finalmente, debido a que no fue posible realizar actividades de muestreo y análisis en la Cuenca del Río Valdivia y Cuenca Costera entre Río Bueno y Río Valdivia, este Departamento en su próxima licitación, la cual se realizará durante el año 2020, esta incluirá los pozos pendientes, de manera de complementar los resultados obtenidos en el presente informe.

IX. RECOMENDACIONES

Se sugieren lo siguiente:

- Considerar los niveles permeables de los pozos en futuros diagnósticos con el fin de determinar variaciones composicionales de las aguas según la profundidad.
- Aplicar toma de muestras al resto de los pozos APR de la Región excluidos en esta campaña, con el fin de generar una caracterización de la calidad de todas las cuencas. (Tabla 33 e Ilustración 60)
- Implementar un seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en donde se detectaron pozos cuyas concentraciones sobrepasaron la Norma de agua potable (NCh409/2005), dando preferencia a los pozo que superaron el máximo permitido para el parámetro de Arsénico (1 pozo) y para los pozos que registraron altos valores de Hierro y Manganeso según la evaluación técnica y económica.

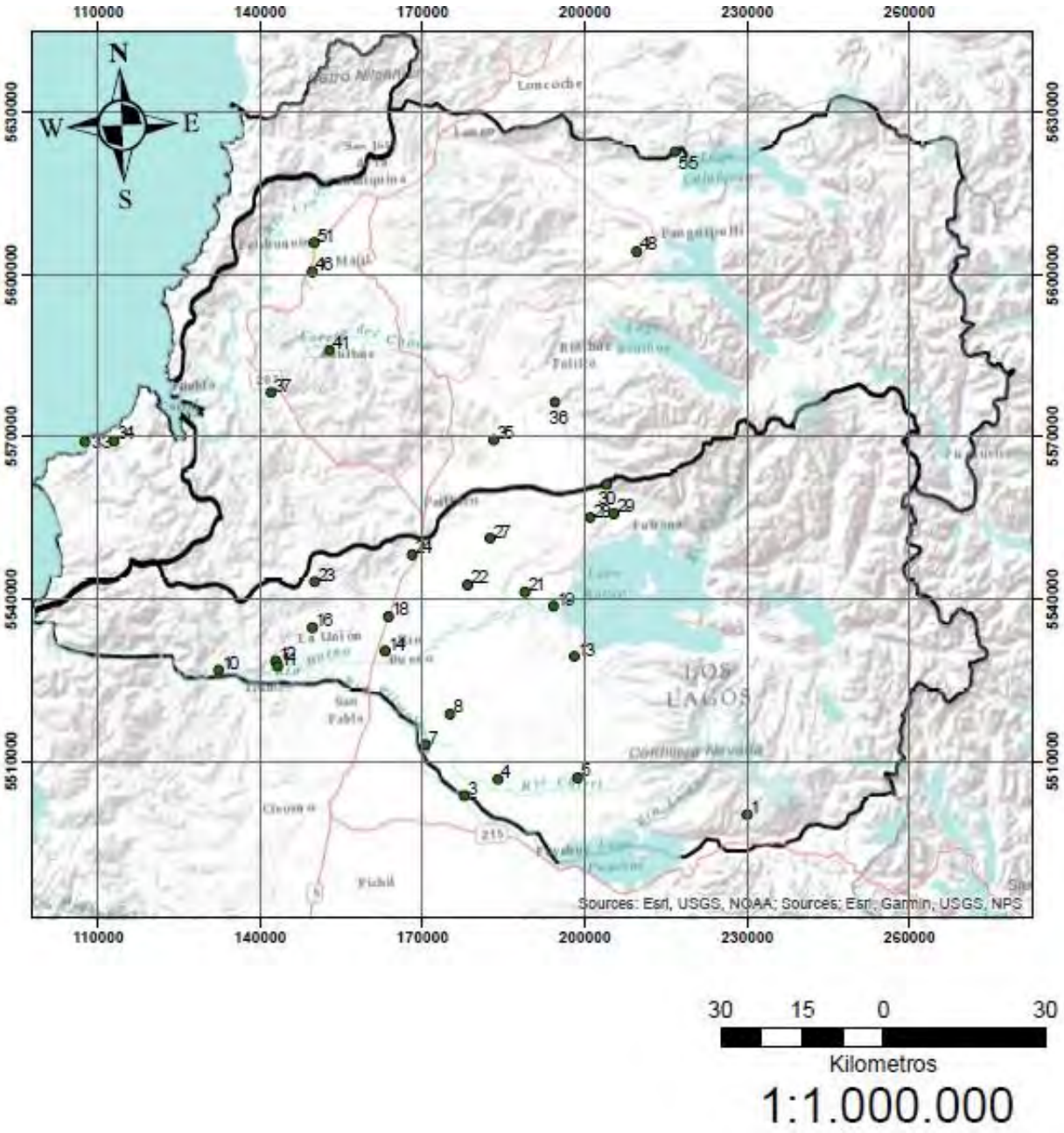
Tabla 32: Resumen de pozos de seguimiento recomendado. Fuente: Elaboración propia.

Nombre del Pozo	Comuna	Parametro
APR MANTILHUE	Rio Bueno	Asy Mn
Carimallin	Rio Bueno	Mn y Fe
APR CUNCUN	Rio Bueno	Mn
Marriamo	Rio Bueno	Mn
APR FOLILCO RIO BUENO	Rio Bueno	Mn y Fe
Nolgehue	Rio Bueno	Mn y Fe
Litrán	Rio Bueno	Mn y Fe
Vivanco	Rio Bueno	Mn y Fe
Rofuco Alto	La Unión	Fe
Auquinco	La Unión	Mn y Fe
APR LLIFEN	Lago Ranco	Mn y Fe
EL MELI	Rio Bueno	Fe
Puerto Las Rosas	Lago Ranco	Fe
APR CALCURRUPE	Lago Ranco	pH

Tabla 33: Pozos APR pendientes de monitoreo en la Región de los Ríos

Región	COMUNA	Nombre APR	BNA	Este_UTM_WGS84	Norte_UTM_WGS84
XIV	RIO BUENO	APR LITRAN	No	175204	5518609
XIV	LAGO RANCO	APR IGNAO	No	198129	5529298
XIV	PAILLACO	Manao	No	697245	5501932
XIV	RIO BUENO	Champulli	No	693066	5509306
XIV	PAILLACO	APR PICHIRROPULLI	No	168111	5548136
XIV	PAILLACO	APR ARCOIRIS	No	182557	5551195
XIV	FUTRONO	APR DOLLINCO	No	201036	5555002
XIV	FUTRONO	APR SANTA FILOMENA	No	205366	5555742
XIV	FUTRONO	APR NONTUELU ALTO	No	204004	5561119
XIV	RIO BUENO	Cun Cun	No	687216	5521271
XIV	LOS LAGOS	APR EL SALTO	No	183213	5569369
XIV	LOS LAGOS	APR QUILQUILCO	No	194534	5576289
XIV	RIO BUENO	Los Copihues	No	702486	5533281
XIV	PUYEHUE	Pilmaiquen Traiguen	No	683144	5540294
XIV	VALDIVIA	APR LAS GAVIOTAS	No	142024	5578108
XIV	LA UNION	Cuinco	No	704543	5549028
XIV	PAILLACO	Santa Rosa Chica	No	707662	5549345
XIV	PAILLACO	El Maiten	No	698282	5561357
XIV	PAILLACO	Lumaco Paillaco	No	688815	5567889

Región	COMUNA	Nombre APR	BNA	Este_UTM_WGS84	Norte_UTM_WGS84
XIV	LOS LAGOS	Las Huellas	No	705755	5580260
XIV	VALDIVIA	APR PISHUINCO	No	152859	5585878
XIV	LOS LAGOS	Colo Colo	No	698909	5582431
XIV	VALDIVIA	Cabo Blanco	No	650820	5594947
XIV	LOS LAGOS	Los Colihues	No	689726	5584259
XIV	LOS LAGOS	Pancul	No	689245	5585903
XIV	PANGUIPULLI	Choshuenco	No	750265	5586344
XIV	VALDIVIA	Arenal Santa Elvira	No	654179	5595614
XIV	PANGUIPULLI	Lumaco-Panguipulli	No	719413	5601477
XIV	LA UNION	Tralcao	No	660426	5605348
XIV	MARIQUINA	APR PUFUDI	No	149671	5600454
XIV	PANGUIPULLI	APR Camino a CHAUQUeN	No	729152	5606932
XIV	PANGUIPULLI	Chauquén Bajo	No	728777	5605867
XIV	PANGUIPULLI	APR PUYEHUE	No	209593	5604203
XIV	MARIQUINA	APR PELCHUQUIN	No	150044	5605870
XIV	PANGUIPULLI	Coz Coz	No	737002	5610754
XIV	PANGUIPULLI	Ancacomoe	No	730353	5612350
XIV	PAILLACO	Santa Rosa Grande	No	707662	5549345
XIV	LA UNION	Pampa Negron	No	672692	5535017
XIV	PANGUIPULLI	APR130	No	216752	5622655
XIV	LA UNION	APR111	No	163716	5536646
XIV	LA UNION	APR112	No	150103	5543159
XIV	LA UNION	APR113	No	149675	5534674
XIV	LA UNION	APR114	No	188981	5541167
XIV	LA UNION	APR115	No	142899	5528494
XIV	LA UNION	APR116	No	178354	5542522
XIV	LA UNION	APR117	No	132429	5526770
XIV	LA UNION	APR118	No	163126	5530311
XIV	LA UNION	APR119	No	194301	5538671
XIV	LA UNION	APR120	No	143282	5527429
XIV	RIO BUENO	APR18	No	230000	5500000
XIV	RIO BUENO	APR131	No	198702	5506859
XIV	RIO BUENO	APR132	No	170571	5512992
XIV	RIO BUENO	APR133	No	183964	5506517
XIV	RIO BUENO	APR134	No	177777	5503548
XIV	CORRAL	APR107	No	107647	5569064
XIV	CORRAL	APR108	No	113116	5569220


110000
140000
170000
200000
230000
260000
5630000
5600000
5570000
5540000
5510000
N
W
E
S
Loncoche
Lago Calafquen
Pucatrihue
Panguipulli
Lago Riñihue
Futrono
Lago Ranco
La Union
San Pablo
LOS LAGOS
Cordillera Nevada
Fidhil
Sources: Esri, USGS, NOAA; Sources: Esri, Garmin, USGS, NPS
30 15 0 30
Kilometros
1:1.000.000

Leyenda

1	APR108	15	Los Copihues	29	Santa Filomena	43	Choshuenco
2	Manao	16	APR113	30	Nontuelu Alto	44	Cabo Blanco
3	APR134	17	Pampa Negron	31	El Maiten	45	Arenal Santa Elvira
4	APR133	18	APR111	32	Lumaco Paillaco	46	Pufudi
5	APR131	19	APR119	33	APR107	47	Lumaco-Panguipulli
6	Champulli	20	Pilmaiquen Traiguen	34	APR108	48	Puyehue
7	APR132	21	APR114	35	El Salto	49	Tralcao
8	Litran	22	APR116	36	Quilquilco	50	Chauquen Bajo
9	Cun Cun	23	APR112	37	Las Gaviotas	51	Pelchuquin
10	APR117	24	APR Pichirropulli	38	Las Huellas	52	Camino a Chauquen
11	APR120	25	Cuinco	39	Colo Colo	53	Coz Coz
12	APR115	26	Santa Rosa Chica y Grande	40	Los Colihues	54	Ancacomoe
13	Ignao	27	Arcoiris	41	Pishuinco	55	APR130
14	APR118	28	Dollinco	42	Pancul		

Ilustración 60: Mapa de distribución de pozos sin medir en Región de los Ríos. Fuente: Elaboración propia.

X. REFERENCIAS

Aceñolaza, Florencio & Aceñolaza, Guillermo F.. (2005). La Formación Puncoviscana y unidades estratigráficas vinculadas en el Neoproterozoico - Cámbrico Temprano del Noroeste Argentino. Latin American journal of sedimentology and basin analysis. 12. 65-87.

Amphos 21. 2012, ESTUDIO CUENCAS PRINCIPALES REGIÓN DE LOS RÍOS.

Antinao, J & McDonough, M. 1999. Antecedentes Estratigráficos y Geocronológicos para una Edad Interglacial (MIO 5e-5c) de la Terraza Pleistocena de "Cancagua", Valdivia, Chile. XIV Congreso Geológico Argentino, Actas I, pp. 55-56.

Banco Mundial. (2019). Quality Unknown - The invisible water crisis. Washington, DC: World Bank Group.

Barozzi, R.; Lemke, R. 1966. El suelo de fundación de Valdivia. : *Instituto de Investigaciones Geológicas,* No. 1, 1 mapa escala 1:7.500.

Cembrano, J y Lara, L., (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. Tectonophysics, 471, 96–113.

Cifuentes, I. 1989. The 1960 Chilean Earthquakes. Journal of Geophysical Research 94 (B1): 665-680.

Custodio, E,; Llamas M,R, (1976), Hidrología subterránea, Ediciones Omega, Barcelona, 2 Vol: 1-2350 (2ª, edic, 1985).

Dirección General de Aguas (DGA), (2019), Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de las Regiones del Ñuble y del Biobío, Ministerio de Obras Públicas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH), S,D,T N°418, Santiago.

Doyel, W., Moraga, A. y Falcon, E. 1960. Relaciones entre la geología de Valdivia (Chile) y los daños causados por los terremotos del 22 de mayo de 1960. Informe preliminar (Inedito). Instituto de Investigaciones Geologicas en conjunto con United States Geological Survey. 19 p., mapa escala 1:12.500. Santiago

Duhart, P.; Martin, M.; Muñoz, J.; Crignola, P.; McDonough, M. 1997. Acerca de la edad del Protolito del Basamento Metamórfico de la Cordillera de la Costa de la Xª Región: edades preliminares $^{207}Pb/^{206}Pb$ en circones detríticos. *In Congreso Geológico Chileno, No. 8, Actas*, Vol. 2, p. 1267-1270. Antofagasta.

Duhart, Paul, McDonough, Michael, Muñoz, Jorge, Martin, Mark, & Villeneuve, Michael. (2001). El Complejo Metamórfico Bahía Mansa en la cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30'-42°00'S): geocronología K-Ar, 40Ar/39Ar y U-Pb e implicancias en la evolución del margen sur-occidental de Gondwana. *Revista geológica de Chile*, *28*(2), 179-208.

Drever, J,I, (1997), The geochemistry of Natural Waters, Prentice Hall, 3ª ed, 436 pp.

El suelo de fundación de Valdivia / por Rolando Barozzi G y Richard W. Lemke. Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas, 1966. 1 mapa: col; 89 x 61 cm. pleg. 30 x 22 cm. + leyenda 1 h. de 89 x 61 cm. pleg. 30 x 22 cm.

ELGUETA, S. y MPODOZIS, C. 2012. Evolucón Tectono-Sedimentaria de la Cuenca del Río Cruces (Valdivia) durante el Neógeno. En XIII Congreso Geológico de Chile. Actas: 649- 651. Antofagasta.

Geomorfología / Reinaldo Börgel Olivares. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 1983. 182 p. : il. (Algunas col.), diagrs., mapas; 27 cm. + 1 mapa pleg. col. en bolsillo.

Glodny, Johannes & Echtler, Helmut & Collao, Santiago & Ardiles, Mary & Buron, Pablo & Figueroa, Oscar. (2008). Differential Late Paleozoic active margin evolution in South-Central Chile (37° S–40° S)–the Lanalhue Fault Zone. Journal of South American Earth Sciences. 26. 397-411. 10.1016/j.jsames.2008.06.001.

Illies, H. 1970. Geología de los alrededores de Valdivia y Volcanismo y Tectonica en márgenes del Pacifico de Chile.

Karzulovic, J. 1960. Informe sobre las aguas subterráneas de Valdivia. IIG. Publicacion No. 12. 17 p. Santiago.

Kehew, A,E, (2001), Applied Chemical Hydrogeology, Prentice Hall, 368 pp.

Lavenu, Alain, & Cembrano, José. (1999). Estados de esfuerzo compresivo plioceno y compresivo-transpresivo pleistoceno, Andes del sur, Chile (38-42º30'S). *Revista geológica de Chile*, *26*(1), 67-87.

Martínez-Pardo, R., Pino, M., 1979. Edad, paleoecología y sedimentología del Mioceno marino de la Cuesta Santo Domingo, Provincia de Valdivia, X Región, Congreso Geológico Chileno N° 2: Actas, H 103–124.

McDonough, W.; Duhart, P,; Antinao,J.; Elgueta, S.; Crignol,P. 1998b. Geologia Preliminar Area de Valdivia.

Melnick, Daniel & Bookhagen, Bodo & Strecker, Manfred & Echtler, Helmut. (2009). Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco Peninsula, Chile. Journal of Geophysical Research. 114. 10.1029/2008JB005788.

Mella B., Mauricio; Quiroz P. David. 2010. Geología del área Temuco - Nueva Imperial, región de la Araucanía, Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica (n.122): 46 p., 1 mapa pleg.col; 2 h. pleg en texto, Santiago. Coordenadas: 38º30' - 39º00'S / 72º30'-73º00'W.

Moreno, M., Li, S., Melnick, D. *et al.* Chilean megathrust earthquake recurrence linked to frictional contrast at depth. *Nature Geosci* **11,** 285–290 (2018) doi:10.1038/s41561-018-0089-5

Muñoz, J., Troncoso, R., Duhart, P., Crignola, P., Farmer, L., Stern, C.R., 2000. The relation of the mid-Tertiary coastal magmatic belt in south-central Chile to the late Oligocene increase in plate convergence rate. Revista Geológica de Chile, 27 (2), 177-203.

MERCER JH (1976) Glacial history of southernmost South America. Quat. Res. 6: 125-166

Muñoz, J.; Moreno, H. 2002. Geología y turismo en la región de Los Lagos, Chile: El circuito alrededor del Lago Llanquihue [CD]. En Simposio Internacional de Geología Ambiental para Planificación del Uso del Territorio, Puerto Varas, Chile, 4-6 Noviembre 2002

Peri, M. ; Rivera, S. 1991. Mineralización aurífera en Ramón, Valdivia, Región de Los Lagos, Chile. In Congreso Geológico Chileno, No 6, Actas, Vol. 1, p.166-168. Viña del Mar.

PORTER S (1981) Pleistocene glaciation in the southern Lake District of Chile. Quat. Res. 16: 263-292.

Radic, Juan Pablo. (2010). Las cuencas cenozoicas y su control en el volcanismo de los Complejos Nevados de Chillan y Copahue-Callaqui (Andes del Sur, 36-39°S). *Andean geology*, *37*(1), 220-246.

Rojas, C. 1990. La terraza fluvial de “Cancagua” en la ciudad de Valdivia: Nuevos antecedentes estratigráficos y granulométricos. *Revista Geográfica de Chile Terra Australi*, No 32, p. 7-24.

Smith, G. 1991. Facies sequences and geometries in continental volcaniclastic sediments. *In* Sedimentation in Volcanic Settings (Fisher, R. V. and Smith, G.A.; editors). Society for Sedimentary Geology, Special Publication No. 45, p. 109-121. Tulsa.

Smith, G.; Lowe, D. 1991. Lahars: Volcano-Hydrologic Events and Deposition in the Debris Flow-Hyperconcentrated Flow Continuum. *In* Sedimentation in Volcanic Settings (Fisher, R.V. and Smith, G.A.; editors). *Society for Sedimentary Geology*, Special Publication No. 45,p. 59-70. Tulsa, Oklahoma.

Villarroel, M. 2014. Preferencias hidromorfológicas e hidrodinámicas de la Microalga Didymosphenia geminata en ríos del sur de Chile. Memoria de Título para optar al título de Ingeniero civil en obras civiles, Departamento de Ingeniería en obras civiles, Universidad de Santiago de Chile.

Wetzel, R. (2001). Limnology: Lake and River Ecosystems. San Diego: Elsevier