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

# DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN DEL MAULE

**REALIZADO POR:**
**Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH)**

## DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

## S.D.T. N° 409

## SANTIAGO, JULIO 2018

**Director General de Aguas (S)**
**Sr. Miguel Silva Rodriguez**

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

**Profesionales participantes**
**Diego San Miguel Cornejo**
**Heriberto Moya Gutiérrez**
**Daniela Fredes Muñoz**

**Estudiantes colaboradores**
**Genesis Ulloa Palominos**

# CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES ..... 6
ÍNDICE DE TABLAS ..... 9
I. INTRODUCCIÓN ..... 11
II. OBJETIVOS ..... 14
II.1 OBJETIVO GENERAL ..... 14
II.2 OBJETIVO ESPECIFICOS ..... 14
III. ANTECEDENTES DEL MEDIO FÍSICO VII REGIÓN ..... 15
III.1 FISIOGRAFÍA ..... 15
III.2 SUELOS ..... 17
III.3 HIDROLOGÍA ..... 17
III.3.1 HIDROLOGÍA DE CUENCAS ..... 18
III.4 GEOLOGÍA ..... 21
III. 4.1 GENERALIDADES ..... 21
III. 4.2 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA POR SECTOR ACUÍFERO ..... 26
III. 4.3 GEOLOGIA ECONÓMICA REGIONAL ..... 35
III.5 HIDROGEOLOGÍA ..... 38
III. 5.1 HIDROGEOLOGIA REGIONAL ..... 38
III. 5.2 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA POR ACUÍFERO ..... 42
III.6 RESTRICCIÓ N Y VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS ..... 74
III. 6.1 RESTRICCIÓN ACUÍFEROS ..... 74
III. 6.2 VULNERABILIDAD ACUÍFEROS ..... 77
III.7 USOS Y PRESIONES SOBRE EL AGUA- POSIBLES FUENTES CONTAMINANTES ..... 91
III.7.1 USOS Y PRESIONES VII REGIÓN ..... 92
III 7.2 CONTAMINACIÓN ..... 94
IV. METODOLOGÍA ..... 97
IV.1 SELECCIÓN DE POZOS PARA MUESTREO ..... 97
IV.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS ..... 98
IV.3 TERRENO ..... 99
IV.3.1 ACTIVIDADES A REALIZAR PREVIO AL TERRENO ..... 99
IV.3.2 ACTIVIDAD A REALIZAR EN TERRENO ..... 99
IV.3.3 ACTIVIDADES A REALIZAR POST-TERRENO ..... 100

IV.4 MUESTREO ..... 100
IV.5 USO DE EQUIPOS Y MATERIALES ..... 101
IV.6 METODOLOGÍAS ANALÍTICAS ..... 102
IV.7 ANÁLISIS Y RESULTADOS QUÍMICOS ..... 104
IV.8 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFERO SEGÚN ÍNDICE DE CALIDAD 105
IV. 8.1 ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA DEL ÍNDICE DE CALIDAD 107
IV. 8.2 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD ..... 109
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES ..... 114
V.1 DATOS REGISTRADOS EN TERRENO ..... 114
V.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES EN TERRENO Y LABORATORIO ..... 114
V.1.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y PROFUNDIDADES ..... 116
V.1.3 DATOS DE TERRENO ACUÍFEROS SHAC ..... 118
V.1.4 DATOS DE TERRENO ACUÍFEROS PRELIMINARES ..... 141
V.2 CALIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS ..... 143
V.3 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS ..... 151
V.3.1 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS ACUÍFEROS SHAC ..... 153
V.4 CONCENTRACIONES QUÍMICAS ESPECÍFICAS Y COMPARACIÓN CON NORMAS ..... 165
V.4.1 LÍMITES DE DETECCIÓN ..... 165
V.4.2 RESULTADOS POR ACUÍFERO SHAC ..... 167
V.4.3 RESULTADOS POR ACUÍFERO PRELIMINAR ..... 170
V.4.4 RESUMEN DE RESULTADOS COMPARADOS CON NORMAS NCh409 Y NCh1333 ..... 175
V. 4.5 NITRATOS ..... 177
V. 4.6 SULFATO ..... 181
V. 4.7 CLORURO ..... 183
V. 4.9 MAGNESIO ..... 185
V. 4.10 SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES ..... 186
V. 4.11 ARSÉNICO ..... 189
VI. CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS ..... 203
VI.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS LOCALES ..... 203
VI.1.1. OCURRENCIA NATURAL CARACTERIZACIÓN DE POSIBLES CONTAMINANTES DE ORIGEN NATURAL ..... 204

VI.1.2. CARACTERIZACIÓN DE POSIBLES CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTRÓPICO ..... 205
VI.1.2. PARÁMETROS LOCALES POR ACUÍFERO ..... 206
VI.2 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD POR APR ..... 207
VII. CONCLUSIONES ..... 211
VIII. RECOMENDACIONES ..... 213
IX. BIBLIOGRAFÍA ..... 217

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES


Ilustración 1: Dominios morfoestructurales y división política- administrativa de Chile. Enmarcado con color rojo se representa la zona de estudio. Editado de Mapa Geológico de Chile: Versión digital (SERNAGEOMIN, 2003) ..... 16
Ilustración 2: Mapa de Cuencas Hidrográficas de la Región Del Maule. (DGA, 2008) ..... 20
Ilustración 3: Mapa geológico de la Región Del Maule. Modificado de SERNAGEOMIN ..... 23
Ilustración 4: Mapa "Acuíferos VII Región. Distribución geográfica de acuíferos SHAC y preliminares. Creación propia. ..... 27
Ilustración 5: Mapa "Acuíferos costeros VII Región. Distribución geográfica. Creación propia ..... 31
Ilustración 6: Ubicación de principales yacimientos en explotación. Extraído de Anuario de Minera, SERNAGEOMIN, 2016 ..... 36
Ilustración 7: Mapa "Productividad de pozos Región del Maule". Modificado Carta Hidrogeológica de Chile, 1986. ..... 40
Ilustración 8: Mapa "Importancia Hidrogeológica Región del Maule". Modificado Carta Hidrogeológica de Chile, 1986. ..... 41
Ilustración 9: Mapa "Distribución de pozos Acuífero Mataquito". Creación propia. ..... 43
Ilustración 10: Mapa "Distribución de acuíferos Acuífero Maule". Creación propia. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Ilustración 11: Mapa "Acuíferos en la Cuenca Del Maule". Extraído (DGA, 2010). ..... 51
Ilustración 12: Mapa "Estudio geofísico Región Del Maule". Extraído (DGA, 2010) ..... 53
Ilustración 13: Mapa "Acuífero Belco y Arenal", creación propia. ..... 57
Ilustración 14: Mapa "Distribución de pozo Acuífero Cauquenes". En esta imagen se incluye tanto Cauquenes Norte como Sur. Solamente Cauquenes Norte es preliminar. Creación propia. ..... 59
Ilustración 15: Mapa "Distribución de pozos Acuífero Purapel". Creación propia. ..... 63
Ilustración 16: Mapa "Acuífero Los Puercos". Creación propia. ..... 65
Ilustración 17: Esquema idealizado de las fuentes de recarga en el acuífero Los Puercos. Extraído (DGA, 2013) 66
Ilustración 18: Mapa "Distribución de pozos Acuífero Playa Junquillar". Creación propia. ..... 68
Ilustración 19: Situación geográfica del sector acuífero Dunar de Putú. Extraído (DGA, 2014) ..... 69
Ilustración 20: Perfil N-S de geofísica en el acuífero Costero Dunar de Putú. Extraído (DGA,2014). ..... 69
Ilustración 21: Situación del acuífero Aluvial de Huenchullamí. Extraído (DGA, 2014) ..... 70
Ilustración 22: Mapa "Distribución de pozos Acuífero Dunas de Chanco". Creación propia. ..... 72
Ilustración 23: Situación del sector acuífero Aluvial Reloca. Extraído (DGA, 2014). ..... 73
Ilustración 24: Mapa "Acuíferos con restricción VII Región", elaboración propia. ..... 76
Ilustración 25: Mapa "Vulnerabilidad Región del Maule", editado de Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y Sitios prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad en la Región del Maule, (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 78
Ilustración 26: Vulnerabilidad del acuífero SHAC Mataquito. Modificado. (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 81
Ilustración 27: Vulnerabilidad del acuífero SHAC Maule Medio. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005). ..... 82
Ilustración 28: Vulnerabilidad del acuífero SHAC Maule Medio. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 83
Ilustración 29: Vulnerabilidad del acuífero SHAC Cauquenes y del acuífero preliminar Cauquenes Alto. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005). ..... 84
Ilustración 30: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Maule Alto. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 85
Ilustración 31: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Los Puercos. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 86
Ilustración 32: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Vichuquén. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 86
Ilustración 33: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Nilahue Alto. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 87

Ilustración 34: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Playa Junquillar. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005) .. 87
Ilustración 35: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Dunas de Chanco. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005). 88
Ilustración 36: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Pelluhue. Modificado. (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 89
Ilustración 37: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Maule Bajo. Modificado. (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 89
Ilustración 38: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Purapel. Modificado. (SERNAGEOMIN, 2005) ..... 90
Ilustración 39: Diagrama de las interacciones en una cuenca hidrográfica. Extraído (DGA, 2014). ..... 91
Ilustración 40: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas. Extraído (DGA, 2017) ..... 97
Ilustración 41: Equipo utilizado en terreno. Extraído (geotech) ..... 101
Ilustración 42 : Equipo utilizado en terreno. Extraído (HANNA CHILE) ..... 102
Ilustración 43: Equipo utilizado en terreno. Extraido (YSI) ..... 102
Ilustración 44: Clasificación de los diversos tipos de agua según Diagrama de Piper. ..... 105
Ilustración 45: Esquema y diagrama de flujo de la metodología. Editado de (DGA, 2009) ..... 109
Ilustración 46: Gráfico "Cálculo de Índice de Calidad mediante interpolación lineal entre clases". (DGA, 2009). ..... 112
Ilustración 47: Fotografías Muestro en APR Aguas del Valle. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Ilustración 48: Pozos APR estudiados en acuíferos SHAC- VII Región. Creación propia. ..... 115
Ilustración 49 : Pozos APR estudiados en acuíferos preliminares- VII Región. Creación propia. ..... 115
Ilustración 50: Pozos APR por comuna- VII Región. Creación propia. ..... 116
Ilustración 51: Mapa "Distribución de pozos APR estudiados en Acuíferos VII Región". Creación propia. ..... 117
Ilustración 52: Gráfico "Profundidad- Nivel Estático de pozo APR- Acuífero Mataquito". Creación propia. .... 120
Ilustración 53: Gráfico "Profundidad- Nivel Dinámico de pozo APR- Acuífero Mataquito". Creación propia. .. 121
Ilustración 54: Mapa "pH pozos APR Estudiados- Acuífero Mataquito". Creación propia. ..... 122
Ilustración 55: Mapa "Conductivad eléctrica pozos APR Estudiados- Acuífero Mataquito". Creación propia. . 123
Ilustración 56: Mapa "Temperatura Pozos APR Estudiados- Acuífero Mataquito". Creación propia. ..... 124
Ilustración 57: Mapa "Potencial Oxido- Reducción Pozos APR Estudiados- Acuífero Mataquito". Creación propia. ..... 125
Ilustración 58: Gráfico "Profundidad- Nivel Estático pozos APR- Acuífero Maule Medio- parte 1". Creación propia. ..... 130
Ilustración 59: Gráfico "Profundidad- Nivel Estático pozos APR- Acuífero Maule Medio- parte 2". Creación propia. ..... 131
Ilustración 60: Gráfico "Profundidad- Nivel Dinámico pozos APR- Acuífero Maule Medio- parte 1". Creación propia. ..... 132
Ilustración 61: Gráfico "Profundidad- Nivel Dinámico pozos APR- Acuífero Maule Medio- parte 2". Creación propia. ..... 133
Ilustración 62: Mapa "pH pozos APR Estudiados-Maule Medio". Creación propia ..... 134
Ilustración 63: Mapa "Conductividad Pozos APR Estudiados- Maule Medio". Creación propia. ..... 135
Ilustración 64: Mapa "Temperatura Pozos APR Estudiados- Maule Medio". Creación propia. ..... 136
Ilustración 65: Mapa "Potencial Oxido- Reducción pozos APR estudiados- Maule Medio". Creación propia. .... 137
Ilustración 66: Gráfico "Profundidad/ Nivel Estático Acuífero Cauquenes". Creación propia. ..... 139
Ilustración 67: Mapa "Propiedades fisicoquímicas pozo APR estudiado- Cauquenes". Creación propia. ..... 140
Ilustración 68: Gráfico "Distribución porcentual de Error de Balance Iónico. Región del Maule. Creación propia. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Ilustración 69 : Secuencia de Chebotarev. Extraído (Taucare, 2017) ..... 151
Ilustración 70: Composición de las aguas subterráneas, a medida de la interacción agua-roca. Extraído (Taucare, 2017) ..... 152
Ilustración 71: Diagrama de Piper "Pozos APR estudiados en el acuífero Mataquito". Creación propia. ..... 154

Ilustración 72: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Mataquito ilustrado mediante diagramas de Stiff. Creación propia. ..... 155
Ilustración 73: Diagrama de Piper "Pozos APR estudiados Acuífero Maule Medio". No se tienen datos de los pozos Carmen Oriente, Chiripa panimavida, Queribajo, San Victor Lamas y Santa Cecilia Retiro. ..... 158
Ilustración 74: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Maule Medio ilustrado mediante diagramas de Stiff. Creación propia ..... 159
Ilustración 75: Diagrama de Piper "Pozos APR estudiados Acuífero Cauquenes". Creación propia. ..... 161
Ilustración 76: Composición aguas de pozo APR estudiado de acuífero Cauquenes ilustrado mediante diagramas de Stiff. Creación propia. ..... 162
Ilustración 77: Diagrama de Piper "Pozos APR preliminares estudiados en la VII Región". Creación propia. ..... 163
Ilustración 78: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuíferos preliminares ilustrado mediante diagramas de Stiff. Creación propia. ..... 164
Ilustración 79: Mapa "Concentración de Nitrato Pozos APR Región del Maule". Se destacan áreas con potencial contaminación difusa ..... 178
Ilustración 80: Mapa "Concentración de Amonio Pozos APR Región del Maule". Se destacan áreas con potencial contaminación difusa ..... 181
Ilustración 81: Mapa "Concentración de Sulfato Pozos APR Región del Maule". Se destaca área de latencia a la contaminación. ..... 183
Ilustración 82: Mapa "Concentración de Cloruro Pozos APR Región del Maule". Creación propia. ..... 184
Ilustración 83: Mapa "Concentración de Magnesio Pozos APR Región del Maule. Creación propiaa ..... 186
Ilustración 84: Mapa "Concentración de Magnesio Pozos APR Región del Maule. Creación propia ..... 188
Ilustración 85: Mapa "Concentración de Arsénico Pozos APR Región del Maule. Creación propia. ..... 189
Ilustración 86: Contaminantes naturales típicos de aguas superficiales y subterráneas de Chile (DGA, 2009) ... 205

# ÍNDICE DE TABLAS


Tabla 1: Descripción litológica del "Mapa Geológico Región del Maule" ..... 25
Tabla 2: Editada de Producción de minerales metálicos por región, según tipo de mineral, año 2016. Anuario de la Minería de Chile. SERNAGEOMIN ..... 35
Tabla 3: Rango de permeabilidad en el acuífero Mataquito para un estudio de un total de 173 pozos. Modificado (DGA, 2012) ..... 46
Tabla 4: Situación de los Sectores Hidrogeológicos del Acuífero del Maule. Situación de recarga neta y demanda comprometida para cada sector hidrogeológico. Modificada (DGA, 2010) ..... 54
Tabla 5: Balance hídrico resultante de la calibración. Modificada (DGA, 2011). ..... 55
Tabla 6: Resumen Transmisividades(T) y Permeabilidades(K) cuenca del Río Maule. Modificada (DGA, 2010) ..... 55
Tabla 7: Coeficiente de almacenamiento y permeabilidad por sector acuífero. Modificada (DGA, 2010) ..... 56
Tabla 8: Permeabilidad (K) del acuífero Esteros Belco y Arenal (DGA, 2013). ..... 58
Tabla 9: Coeficiente de almacenamiento, para los sectores Cauquenes Norte y Cauquenes Sur (DGA, 2010) ..... 61
Tabla 10: Transmisividad y permeabilidad (DGA, 2010). ..... 61
Tabla 11: Valores por Sector acuífero de transmisividad. (DGA, 2013) ..... 62
Tabla 12: Transmisividad (T), Permeabilidad (K) y Coeficiente de almacenamiento (S) sub- cuenca Purapel de la cuenca del Río Maule. Modificada (DGA, 2010). ..... 64
Tabla 13: Coeficiente de almacenamiento (S), transmisividad y permeabilidad acuífero Los Puercos (DGA, 2013) 65
Tabla 14: Permeabilidad para cada sub-cuenca del acuífero Los Puercos. Modificada (DGA, 2013) ..... 66
Tabla 15: Transmisividad y coeficiente de almacenamiento (S) Dunas de Putú. Modificado (DGA, 2014). ..... 70
Tabla 16: Oferta de Recursos Hidricos en el Sector acuífero Esteros Belco y Arenal. Modificada (DGA, 2015)... 75
Tabla 17: Demanda comprometida en el Sector acuífero Esteros Belco y Arenal. Modificada (DGA, 2015)..... 75
Tabla 18: Oferta de Recursos Hidricos en el Sector acuífer Mataquito- Teno Lontué Modificada (DGA, 2015). . 75
Tabla 19: Demanda comprometida en el Sector acuífer Mataquito- Teno Lontué. Modificada (DGA, 2015). ..... 75
Tabla 20: Descripción de cada categoría de vulnerabilidad. Modificado de SERNAGEOMIN (Espinoza, 2005) ..... 79
Tabla 21: Porcentaje de categoría de vulnerabilidad. Editada de (Espinoza, 2005). ..... 80
Tabla 22: Usos y presiones significativas en la Región del Maule. Extraída (DGA, 2014) ..... 94
Tabla 23: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la Región del Maule. Laboratorio Ambiental SGS Chile Ltda: Laboratorio externo a DGA ..... 99
Tabla 24: Metodologías de Muestreo- Serie Norma Chilena NCh 411. Extraído y modificado de Licitación: "Servicio de muestreo y análisis aguas subterráneas Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Maule"- MOP (SGS, 2017) ..... 101
Tabla 25: Metodología de Análisis utilizadas en el laboratorio SGS. Modificada (SGS) ..... 104
Tabla 26: Relación entre Clases de Calidad y Valores de Corte. ..... 110
Tabla 27: Criterios para establecer el IC general (DGA, 2009) ..... 112
Tabla 28: Pozos APR estudiados en el Acuífero Mataquito. Creación propia ..... 119
Tabla 29: Pozos APR estudiados en el Acuífero Maule Medio. Creación propia ..... 129
Tabla 30: Datos de terreno del Acuífero Maule Alto. Creación propia. ..... 141
Tabla 31: Datos de terreno Acuífero Maule Bajo. Creación propia. ..... 141
Tabla 32: Datos de terreno Acuífero Dunas de Chanco. Creación propia. ..... 141
Tabla 33: Datos de terreno Acuífero Playa Junquillar. Creación propia. ..... 142

TABLA 34: DATOS DE TERRENO ACUÍFERO PURAPEL. CREACIÓN PROPIA. ..... 142
TABLA 35: DATOS DE BALANCE IÓNICO DE LOS POZOS APR ESTUDIADOS EN LA REGIÓN DEL MAULE. DE LOS POZOS CARMEN ORIENTE, CHIRIPA PANIMAVIDA, QUERIBAJO, SAN VICTOR LAMAS Y SANTA CECILIA RETIRO NO SE TIENEN DATOS. ..... 149
TABLA 36: ERROR ADMISIBLE SEGÚN LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA DE POZO APR. EXTRAÍDO (CUSTODIO. E, 1983) ..... 149
TABLA 37: ORIGEN PRINCIPAL DE ALGUNOS IONES. HIDROGEOLOGÍA: CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGÍA SUBTERRÁNEA. EXTRAÍDO (FCIHS, 2009) ..... 153
TABLA 38 : RESUMEN DE DATOS MEDIDOS Y ANALIZADOS EN LAS MUESTRAS DE LOS POZOS APR DEL ACUÍFERO MATAQUITO. CREACIÓN PROPIA. ..... 167
TABLA 39: RESUMEN DE DATOS MEDIDOS Y ANALIZADOS EN LAS MUESTRAS DE LOS POZOS APR DEL ACUÍFERO MAULE MEDIO. CREACIÓN PROPIA. ..... 168
TABLA 40: RESUMEN DE DATOS MEDIDOS Y ANALIZADOS EN LAS MUESTRAS DEL POZO APR DEL ACUÍFERO CAUQUENES. CREACIÓN PROPIA. ..... 169
TABLA 41: DATOS MEDIDOS Y ANALIZADOS EN LAS MUESTRAS DEL POZO APR DEL ACUÍFERO MAULE ALTO. CREACIÓN PROPIA 170
TABLA 42: DATOS MEDIDOS Y ANALIZADOS EN LAS MUESTRAS DEL POZO APR DEL ACUÍFERO MAULE BAJO. CREACIÓN PROPIA. 171
TABLA 43: DATOS MEDIDOS Y ANALIZADOS EN LAS MUESTRAS DEL POZO APR DEL ACUÍFERO DUNAS DE CHANCO. CREACIÓN PROPIA. ..... 172
TABLA 44: DATOS MEDIDOS Y ANALIZADOS EN LAS MUESTRAS DEL POZO APR DEL ACUÍFERO PLAYA JUNQUILLAR. CREACIÓN PROPIA. ..... 173
TABLA 45: DATOS MEDIDOS Y ANALIZADOS EN LAS MUESTRAS DEL POZO APR DEL ACUÍFERO PURAPEL. CREACIÓN PROPIA. ..... 174
TABLA 46: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS POZOS APR DE LA VII REGIÓN CON LA NORMA NCH 409 – NCH 133. ..... 176
TABLA 47: CLASIFICACIÓN DE POZOS APR ESTUDIADOS SEGÚN LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y LOS SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES EN BASE A LA NORMA NCH1333 PARA AGUAS DE RIEGO. (*) EN 5 POZOS DE LOS ESTUDIADOS NO SE TIENEN DATOS DE ANÁLISIS DE SÓLIDOS DISUELTOS. ..... 177
TABLA 48: POZOS APR ESTUDIADOS SOBRE LA NORMA DE AGUA POTABLE NCH409. CREACIÓN PROPIA. ..... 178
TABLA 49: POZOS APR ESTUDIADOS SOBRE LA NORMA DE AGUA POTABLE NCH409. CREACIÓN PROPIA. ..... 180
TABLA 50 : POZO APR ESTUDIADO CERCANO AL VALOR MÁXIMO ESTIPULADO POR LA NORMA. CREACIÓN PROPIA. ..... 182
TABLA 51: POZOS APR ESTUDIADOS CERCANO AL VALOR MÁXIMO ESTIPULADO POR LA NORMA. CREACIÓN PROPIA..... 187
TABLA 52: POZOS APR ESTUDIADOS SOBRE LO ESTIPULADO POR LA NORMA NCH 409(0,01 MG/L). CREACIÓN PROPIA ..... 190
TABLA 53: MINERALES DE ARSÉNICO MÁS FRECUENTES. EXTRAÍDO DE LILLO J, PELIGROS GEOQUÍMICOS ..... 192
TABLA 54: CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN ALGUNOS DE LOS MINERALES MÁS COMUNES. EXTRAÍDO DE LILLO J, PELIGROS GEOQUÍMICOS. REFERENCIAS DE LA TABLA A) BAUR Y ONISHI, 1969, B)BOYLE Y JONASSON,1973, C) PICHLER ET AL., 1999). ..... 193
TABLA 55: RESUMEN CON LOS METALES PESADOS ASOCIADOS A DISTINTAS ACTIVIDADES ANTRÓPICAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE SANTIAGO, Y PARÁMETROS QUÍMICOS QUE PUDIERAN ESTAR RELACIONADOS A ESTAS ACTIVIDADES..... 206
TABLA 56: POZOS APR QUE NO HAN SIDO CONSIDERADOS EN EL PRESENTE ESTUDIO, PERO QUE SON RELEVANTES DE ESTUDIAR.213
TABLA 57: POZOS APR QUE NO HAN SIDO CONSIDERADOS EN EL PRESENTE ESTUDIO, CERCANOS A POZOS CONTAMINADOS DE ARSÉNICO. ..... 214

# I. INTRODUCCIÓN

El agua es el fundamento de la vida ya que sin agua no hay vida, es por lo tanto un motor económico, social y ambiental para el desarrollo. En el planeta el porcentaje de agua subterránea es menor que el 2% del monto total de agua, esto es de suma importancia considerando que representa el 98% del agua apta para consumo humano (Ibanez, y otros 2006). Así también, cuenta con múltiples usos, según la United States Geological Survey USGS (2005) el aprovechamiento de este recurso puede ser a través de industria, agricultura, doméstico, suministro público, riego, minería, potencia termoeléctrica y acuicultura. Por lo que es de vital importancia identificar, distinguir y analizar el recurso hídrico.

En este contexto nace la Dirección General de Aguas (DGA), según las disposiciones establecidas en el art. 129, bis 3, del código de aguas, como 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 y hoya hidrográfica de Chile.

En nuestro país las aguas subterráneas son muy importantes como fuente de agua potable para la población urbana y rural, y para la actividad minera y agricultura de las regiones del norte y centro del país (Banco Mundial, 2011), sin dejar de mencionar las interacciones de este sistema con aquellos superficiales, ya sean bióticos o abióticos (DGA, 2018).

De acuerdo al Banco Mundial (2011) la sostenibilidad de los acuíferos en Chile se encuentran en riesgo, debido a un sobre otorgamiento de derechos de aprovechamiento que excede la capacidad de explotación, y además, porque existe una deficiente gestión de su calidad, la cual merma aún más la disponibilidad del recurso al ser un sistema particularmente vulnerable. Esta gestión deficiente se atribuye, entre otras razones, a la falta de información respecto a su cantidad y calidad (DGA, 2018)

La Dirección General de Aguas cuenta con un diagnóstico de calidad de agua para las regiones IV[1], V[2], RM[3] y VI[4].Estos diagnósticos no sólo permitieron levantar información de calidad de agua y difundirla, sino que además contribuyó con la densificación de la red pues a estos pozos se les asignó un código BNA, el cual permite almacenar la información de calidad de los seguimientos que se realicen. A la fecha se han codificado 332 pozos APR y se han realizado dos informes de seguimientos de la V región (Minuta N°37/2017) y la VI región (Minuta N°20/2017) (DGA, 2018).

La VII Región es una de las regiones de mayor importancia a nivel nacional desde el punto de vista del desarrollo agrícola. Dentro de esta región, la cuenca que posee una mayor superficie corresponde a la del río Maule, en la que, a pesar de presentar un aumento de la demanda de agua dulce, los montos de la recarga son también altos y renovables anualmente. Es así como en esta cuenca se ha hecho cada vez más uso de los recursos hídricos, tanto superficial como subterráneos, destinados a satisfacer las necesidades productivas, así como también el abastecimiento de agua potable para el consumo humano.

Tomando en cuenta todo lo anterior y considerando que con el paso de los años son cada vez más los derechos de aguas subterráneas otorgados, se vuelve una necesidad realizar un catastro de las condiciones de calidad de las aguas.

El presente estudio tiene como objetivo realizar un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la VII Región del Maule, para esto fue necesario realizar un monitoreo de 148 servicios de Agua Potable Rural (APR), obtener datos de las condiciones fisicoquímicas y relacionarlos con la geología de la zona, para

[1] Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la Región Lib. Bernardo O'Higgins" (S.D.T. N°368 de 2015 y S.D.T N°383 de 2016)
[2] "Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas en la región Metropolitana – Complementario Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos Región Metropolitana de Santiago" (S.D.T. N° 390 de 2016)
[3] "Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Valparaíso" (S.D.T. N° 382 de 2016)
[4] " Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la Región de Coquimbo" (S.D.T. N°397 de 2017)

posteriormente generar un estudio hidrogeológico y determinar el índice de calidad (IC) por pozo.

Como parte importante del trabajo se realizó una campaña de terreno, que consistió en el monitoreo y recolección de muestras durante los meses de octubre y principalmente noviembre del año 2017.

# II. OBJETIVOS

## II.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este informe es realizar un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la VII Región del Maule, a partir del análisis de datos obtenido de las aguas subterráneas provenientes de pozos de Agua Potable Rural (APR).

## II.2 OBJETIVO ESPECIFICOS

1. Determinar el grado de influencia de contaminantes en las aguas subterráneas.
2. El levantamiento de la información hidrogeológica acerca de pozos que no cumplen las normas de calidad de aguas NCh1333 (agua de riego y otras) y NCh409 (agua potable).
3. Relacionar la geología con la hidrología de la zona de estudio con el fin de identificar las fuentes de contaminación de los acuíferos.
4. Proponer recomendaciones para la gestión del recurso hídrico en base a los resultados de calidad obtenidos.

# III. ANTECEDENTES DEL MEDIO FÍSICO VII REGIÓN

## III.1 FISIOGRAFÍA

La zona de estudio, como resultado de la configuración tectónica de Chile central y de la orogénesis de los Andes, presenta tres zonas morfoestructurales bien diferenciadas, que son, de oeste a este, la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal, dispuestas paralelas entre sí, y alineadas norte-sur (DGA, 2014).

La Cordillera de los Andes se forma como consecuencia de la subducción de la Placa Oceánica bajo la Placa Continental, extendida desde Venezuela hasta la Antártida (Ramos, 1988). A los 35º30'S, comienza la Zona Volcánica Sur, la cual presenta una depresión de la elevación y del espesor cortical hacia el sur. No obstante, La Cordillera de los Andes en la Región del Maule, posee una actividad volcánica anómalamente mayor que otras regiones andinas, con grandes edificios volcánicos (Puratich, 2010).

Por su parte, la Depresión Intermedia constituye el área principal de acumulación de sedimentos cuaternarios, representados por depósitos fluviales, fluvio-glaciares y glaciares.

La Cordillera de la Costa, se deprime bruscamente desde los 34° S, se desarticula e incluso desaparece totalmente en algunos sectores. En la vertiente occidental se desarrollan varios niveles de terrazas, que presentan espesores variables de relleno cuaternarios y terciarios superiores, de tipo sedimentario marino (DGA, 1986b).

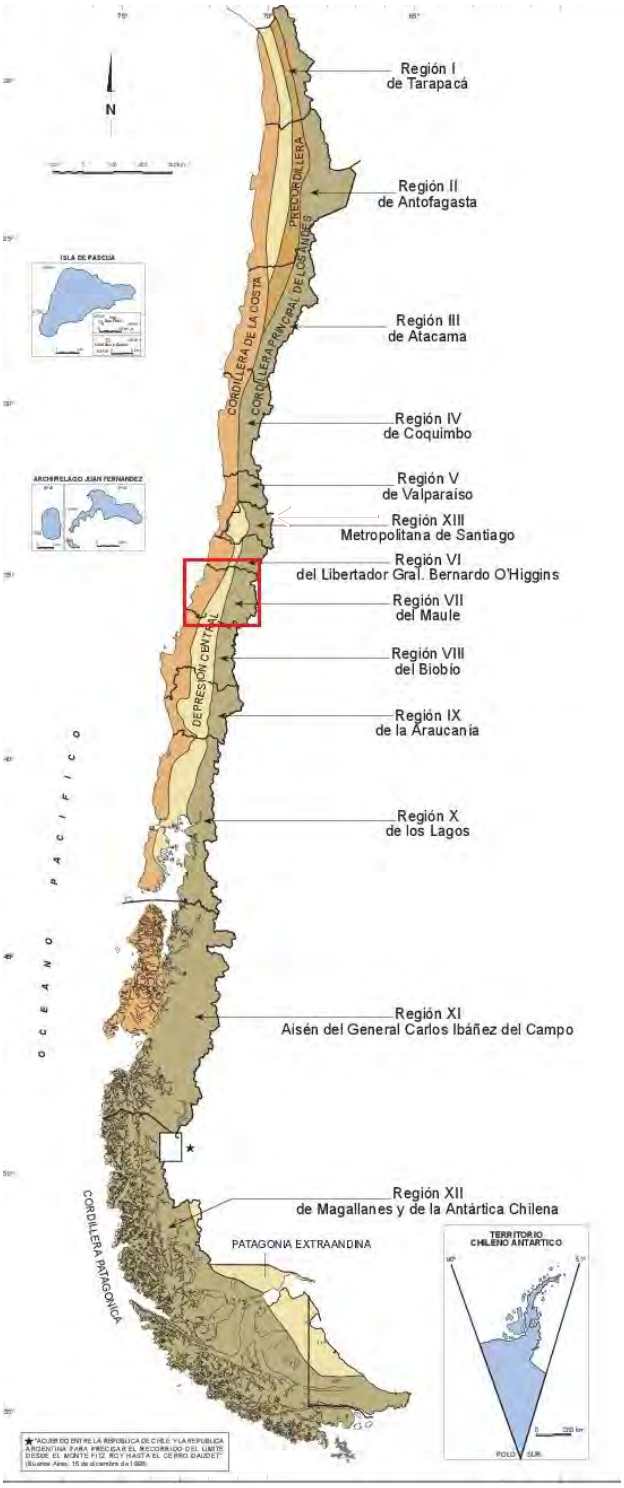



**Ilustración 1: Dominios morfoestructurales y división política- administrativa de Chile. Enmarcado con color rojo se representa la zona de estudio. Editado de Mapa Geológico de Chile: Versión digital (SERNAGEOMIN, 2003)**

## III.2 SUELOS

Chile posee muchos tipos de suelos, sin embargo todos son relativamente jóvenes, por lo que tienen en común la importancia las características heredadas de los materiales originales y que ninguno de los procesos formadores de suelos logra extremarse demasiado debido a las moderadas temperaturas del país (DGA, 1986b).

Se distinguen 2 grandes grupos de suelos, por un lado los áridos al norte de los 37°S, en donde los procesos formativos están inhibidos por la deficiencia hídrica superficial generalizada y por otro los suelos húmedos al sur de los 37°, donde el agua es suficiente y abundante (DGA, 1986b).

En la Región del Maule se desarrolla, especialmente en la Depresión Intermedia, un suelo de transición, llamado pardo- no cálcico o alfisol, neutro, que se genera a expensas de la estepa. Este suelo establecido sobre aluviones, tiene buen drenaje, es de textura liviana y de alta productividad al ser regado y fertilizado. La franja costanera, favorecida por las precipitaciones, presenta los suelos de pradera costanera (molisoles). En la franja precordillerana, donde las precipitaciones son abundantes y las temperaturas reducidas, se generan suelos más nuevos (inceptisoles), llamados pardo- forestales, generalmente neutros, cuyo espesor disminuye con la altura (DGA, 1986b).

## III.3 HIDROLOGÍA

La hidrología puede comprenderse como el resultado, en cuanto a la existencia de recursos hídricos superficiales y subterráneos, de la conjugación de los fenómenos climáticos, actuales y pretéritos (DGA, 1986b).

Una cuenca hidrográfica es una parte de la superficie terrestre cuyas aguas afluyen todas a un mismo río, lago o mar. En el caso de la región del Maule las cuencas principales son exorreicas, es decir, desembocan en el mar.

En la zona central de Chile, las cuencas de los ríos se amplían considerablemente, al adquirir importancia el desarrollo de la Depresión Intermedia. La Cordillera de Los Andes, muy alta en este sector, tiene gran importancia como acumulador de nieve, por lo que la alimentación de los ríos se debe primordialmente al derretimiento de esta en el periodo primavera- verano (DGA,1986a). Por esta razón, los valles por los que escurren los ríos, presentan morfologías de origen glacial, con forma de U y laderas abruptas incididas por la acción fluvial (Astaburuaga, 2014).

### III.3.1 HIDROLOGÍA DE CUENCAS

La cuenca del Río Maule es la de mayor importancia en la región. Los principales tributarios al Río Maule son los ríos Loncomilla, Melado, Perquilauquén, Claro, Putagán, Achibueno, Longaví, Ancoa y Cauquenes (DGA, 2014).

### III. 3.1.1 CUENCA DEL RÍO MAULE

Se ubica entre los paralelos 35°05' y 36°30' de latitud sur y los meridianos 70°25' y 72°30' de longitud oeste. En sus primeros tramos, el río Maule escurre en dirección noroeste. Luego, a unos 40 Km de su nacimiento, recibe por el norte al río Cipreses, que nace en la laguna Invernada. Más abajo, a unos 30 Km del punto anterior, recibe su principal afluente cordillerano, el Melado, el cual le entrega los aportes de toda la zona alta de la parte sur de la cuenca (DGA, 2014).

El río Melado nace en la laguna del Dial y a través de los ríos Troncase y de La Puente capta las aguas del cordón divisorio, de modo que su caudal es poco menor al Maule mismo. Luego de atravesar la depresión intermedia y junto a las primeras estribaciones de la Cordillera de la Costa, el Maule recibe como afluentes al río Loncomilla desde el sur y al río Claro desde el norte (DGA, 2014).

### III. 3.1.2 CUENCA DEL RÍO LONCOMILLA

El Loncomilla se forma por la unión de los ríos Longaví y Perquilauquén, siendo este último el que se ubica más al sur en el sistema hidrográfico. A su vez, el Perquilauquén capta las aguas de los contrafuertes de la Cordillera de la Costa a través de los ríos Cauquenes y Purapel. El río Loncomilla recibe más tarde los aportes de los ríos Achibueno, que a su vez recibe los aportes del río Ancoa, y Putagán (DGA, 2014).

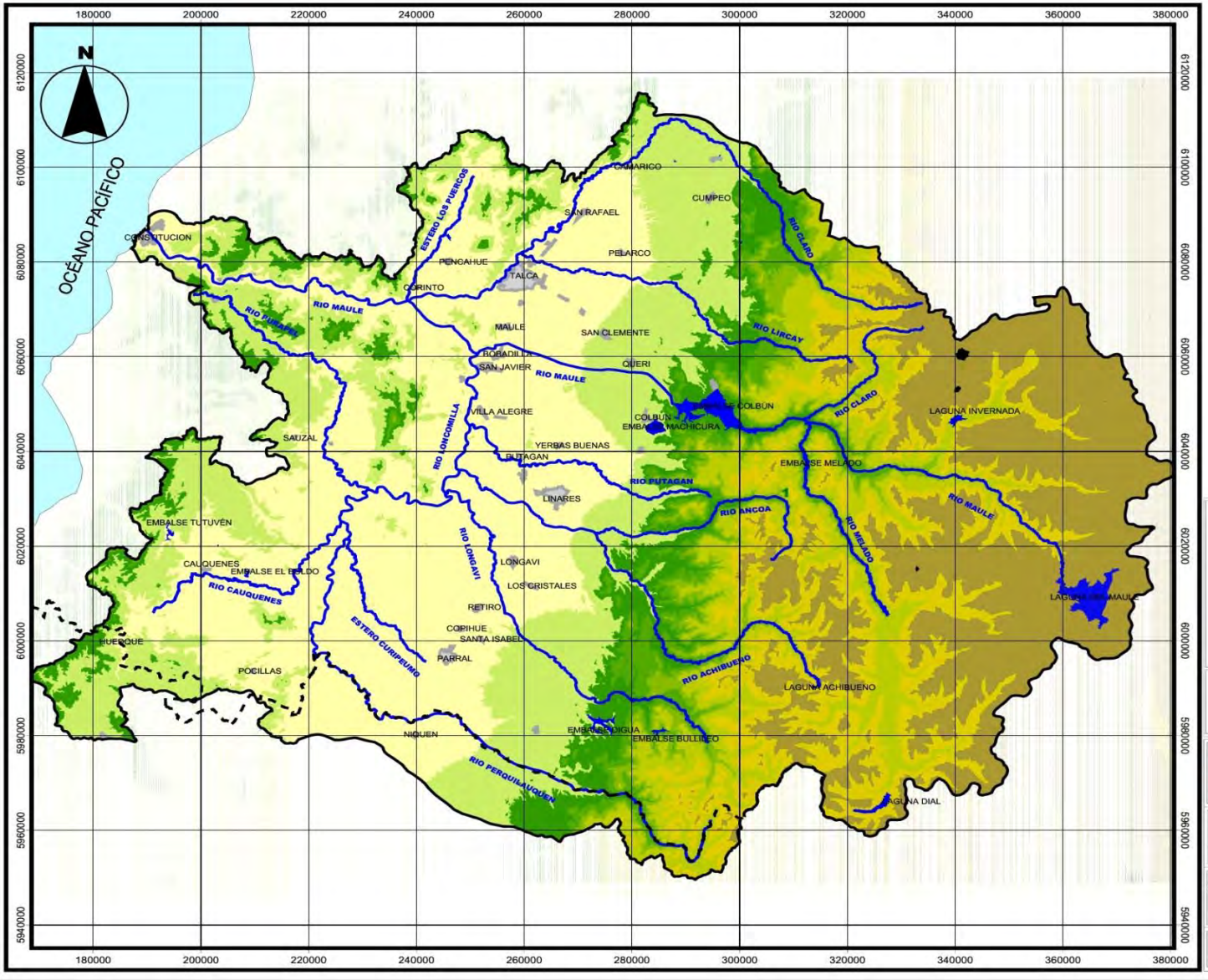



**Ilustración 2: Mapa de Cuencas Hidrográficas de la Región Del Maule. (DGA, 2008)**

## III.4 GEOLOGÍA

### III. 4.1 GENERALIDADES

Como se comentó anteriormente, La Región del Maule posee 3 morfologías principales La Cordillera de la Costa, La Depresión Intermedia y La Cordillera de los Andes. Se reconocen en las tres regiones rocas metamórficas, intrusivas, depósitos volcano-sedimentarios, depósitos sedimentarios consolidados y depósitos no consolidados (DGA, 2014).

La Cordillera de la Costa se define como una unidad independiente, con la aparición de la Depresión Central desde Santiago hacia el sur. En su borde occidental se compone principalmente de basamento cristalino y metamórfico paleozoico, mientras que hacia el este afloran rocas intrusivas del Mesozoico Inferior, en su extremo oriental la Cordillera de la Costa presenta mayores elevaciones. El borde oriental está compuesto de secuencias estratificadas volcánicas y sedimentarias Mesozoicas (Thomas, 1958; Wall et al., 1999; Sellés y Gana, 2001; Bravo, 2001; Sernageomin, 2003). Además, afloran rocas metamórficas en el área que pertenecen al período Silúlico-Carbonífero, ubicándose en una franja N-S hacia el sector costero (DGA, 2014).

La Depresión Central, ubicada entre los 33ºS y los 40ºS, consiste en una cuenca rellena de depósitos aluviales y volcánicos Pleistocenos a Holocenos (Thiele, 1980, Araneda et al., 2000, Rauld, 2002), su basamento corresponde a rocas Mesozoicas y Cenozoicas, distribuidas en el sector occidental y oriental, respectivamente, el basamento es observable en cerros islas que sobresalen de la superficie, con alturas entre 650 y 480 m s.n.m. y cordones que cortan la depresión formando angosturas y cuestas (Farías et al., 2008). El límite oriental de la depresión, se encuentra en contacto, aparentemente por falla, con niveles basales de la Formación Abanico (Falla Infiernillo, según Fock et al.(2006)) o por discordancia erosiva (Fock, 2005)

La Cordillera Principal consiste en su parte occidental por rocas Cenozoicas de la Formación Abanico, deformadas y plegadas, rocas de la Formación Cola de Zorro

y secuencias volcánicas levemente plegadas provenientes del arco volcánico actual, mientras que la vertiente oriental de la Cordillera Principal chilena consiste en rocas de la Formación Abanico y secuencias Mesozoicas fuertemente deformadas (Fock, 2005; Farías et al., 2008), estas rocas se encuentran en contacto por un sistema de fallas de vergencia Este (Falla el Fierro; Davidson et al., 1972) y retrocorrimientos.

Es importante destacar los sedimentos no consolidados de edad Cuaternario depositados en ambientes de origen fluvial, fluvioglacial, glacial, coluvial y lacustre los cuales rellenan las cuencas. Existiendo además en la Cordillera de la Costa terrazas marinas desarrolladas probablemente durante el Pleistoceno y Holoceno (DGA, 2014).

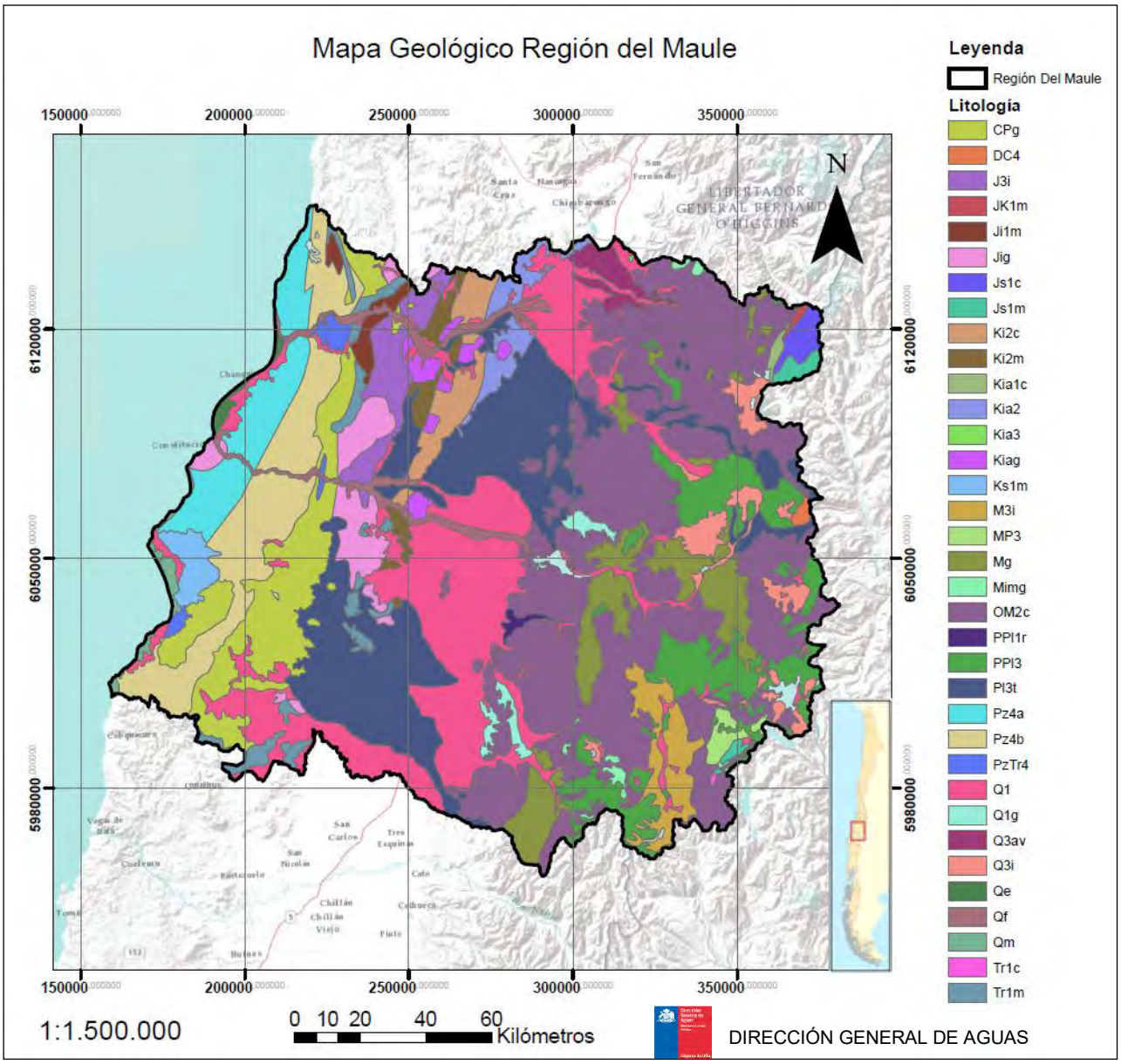



**Ilustración 3: Mapa geológico de la Región Del Maule. Modificado de SERNAGEOMIN**

| Simbología | Tiempo Geológico | Descripción Litológica |
|---|---|---|
| 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". |
| J3i | Jurásico | Secuencias volcánicas continentales y marinas; lavas y aglomerados basálticos a andesiticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y aglomerados continentales |
| JK1m | Jurásico superior- Cretacico Inferior | Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas. |
| Ji1m | Jurásico Inferior- Medio | Secuencias sedimentarias marinas lirotales o de plataforma: caliza, areniscas calcáreas, lutitas, conglomerados y areniscas con intercalaciones volcanoclásticas y lávicas.; basaltos almohadillados. |
| Jig | Jurásico Inferior (202-178 Ma) | Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. |
| Js1c | Jurásico superior | Secuencias sedimentarias continentales y transicionales, en partes lacustres: brechas sedimentarias, conglomerados y areniscas rojas con intercalación de tobas y niveles evaporíticos. |
| Js1m | Jurásico Medio- Superior | Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, areniscas, lutitas calcáreas, en parte bituminosas, con intercalaciones epiclásticas y niveles evaporíticos superiores; en las regiones V a VII: formaciones Cerro Calera, Río Colina y Nacientes del Teno |
| Ki2c | Cretácico Inferior- Cretácico Superior | Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escases intercalciones marinas; brechas sedimentarias y volcánicas, lavas andesíticas, ocoitas, conglomerados, areniscas, limolitas calcáreas lacustres con flora fósil; localmente calizas fosilíferas marinas en la base. |
| Ki2m | Cretácico Inferior (Neocomiano). | Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas andesititcas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas. |
| Kia1c | Cretácico Inferior Alto. (Aptino. Cenomaniano). | Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres: areniscas, congloremerados, limolitas, calcilutitas y brechas sedimentarias con intercalaciones de tobas. |
| Kia2 | Cretácico Inferior Alto- Cretácico Superior bajo | Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas. |
| Kia3 | Cretácico Inferior Alto | Secuencias y complejas volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas, escasas intercalaciones sedimentarias. |
| Kiag | Cretácico Inferior alto- Cretácico superior bajo (123-84 Ma) | Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. |
| Ks1m | Cretácico Superior | Secuencias sedimentarias marinas de plataforma, litorales o transicionales; areniscas, conglomerados, lutitas, calizas extraclásticas y oolíticas, sucesiones turbidíticas. Regiones VII y VIII: Formación Quiriquina |
| M3i | Mioceno Inferior- Medio | Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesitico-basálticas a dacíticas. En la cordillera principal, regiones I a VIII: complejos volcánicos Doña Ines y de Ojos Maricunga; formaciones Cerro Las Tórtolas y Farellones. |
| MP3 | Mioceno- Plioceno | Basaltos de "plateau" y rocas piroclásticas intermedias a ácidas. En la cordillera principal, región VII y Cordillera Patagónica. |
| Mg | Mioceno (18-6 Ma) | Granodioritas, dioritas y tonalitas. En la Cordillera Principal, regiones VII a X. |
| Mimg | Mioceno Inferior- Medio (22-16 Ma) | Granodioritas, dioritas y tonalitas. En la Cordillera Principal, regiones VII a X. |
| OM2c | Oligoceno- Mioceno | Secuencias volcanosedimentarias; lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. |
| PPl1r | Plioceno- Pleistoceno | Depositos de remoción en masa; brechas polimicticas con matriz de arena/limo en proporción variable, de flujo o deslizamiento gravitacional. |
| 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. |

| Simbología | Tiempo Geológico | Descripción Litológica |
|---|---|---|
| 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. |
| Pz4a | Silúrico?- Carbonífero | Esquistos muscoviticos y metabasitas, metachert y serpentinitas con metamorfismo de alto gradiente P/T (Serie occidental) y metamorfismo del Carbonífero temprano. En la Cordillera de la Costa, regiones VI a IX |
| Pz4b | Silúrico?- Carbonífero | Pizarras, filitas y metaareniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T (Serie Ocidental) del Carbonífero temprano. En la Cordillera de la Costa, regiones VI a IX. |
| 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. |
| Q1g | Pleistoceno- Holoceno | Depósitos morrenicos, fluvioglaciales y glacilacustres; mdiamictos de bloques de matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. |
| Q3av | Cuaternario | Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos- basáltico a daciticos; principalmente calcoalcalinos; |
| Q3i | Cuaternario | Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico- basálticos a dacíticos; principalmente calcoalcalinos. |
| Qe | Pleistoceno- Holoceno | Depósitos eólicos; arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes tanto activos como inactivos. En las regiones I a VII: dunas de Santo domingo y Quivolgo. |
| Qf | Pleistoceno- Holoceno | Depósitos fluviales; gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación. |
| Qm | Pleistoceno- Holoceno | Depósitos litorales; arenas y gravas de playas actuales |
| Tr1c | Triásico Superior | Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres, en parte transicionales: conflomerados, brechas, areniscas, lutitas e intercalaciones calcáreas. |
| Tr1m | Triásico Superior | Secuencias sedimentarias marinas y transicionales: areniscas, conglomerados, limolitas y calizas. |

**Tabla 1: Descripción litológica del "Mapa Geológico Región del Maule"**

### III. 4.2 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA POR SECTOR ACUÍFERO

La mayoría de los acuíferos que se ubican dentro del territorio nacional se han dividido en Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC). Por definición, un SHAC es un acuífero o parte de un acuífero, cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión de forma independiente (DGA, 2013). En otras palabras, la división de un acuífero en uno o más SHAC permite estudiar su comportamiento hidrogeológico y administrar el recurso hídrico asociado de manera independiente.

En la Región del Maule se reconocen 4 sistemas acuíferos de aprovechamiento común SHAC principales, siendo estos:

- Mataquito
- Maule Medio
- Esteros Belco y Arenal
- Cauquénes

Un acuífero preliminar es un tipo de acuífero en que su área está delimitado en base a estudios preliminares, es decir, determinación de recarga mediante precipitación media por un coeficiente de infiltración dado mapas geológicos globales, pero que estos datos no se han relacionado con la geofísica o datos hidrogeológicos de detalle. En la Región del Maule, se han identificado 10 acuíferos preliminares, los cuales son:

- Acuífero cordillerano: Maule Alto
- Acuífero costero: Los Puercos
- Acuífero costero: Vichuquén
- Acuífero costero: Nilahue Alto
- Acuífero costero: Playa Junquillar
- Acuífero costero: Dunas de Chanco
- Acuífero costero: Pelluhue

- Acuífero costero: Maule Bajo
- Acuífero Depresión: Cauquénes Alto
- Acuífero Depresión: Purapel

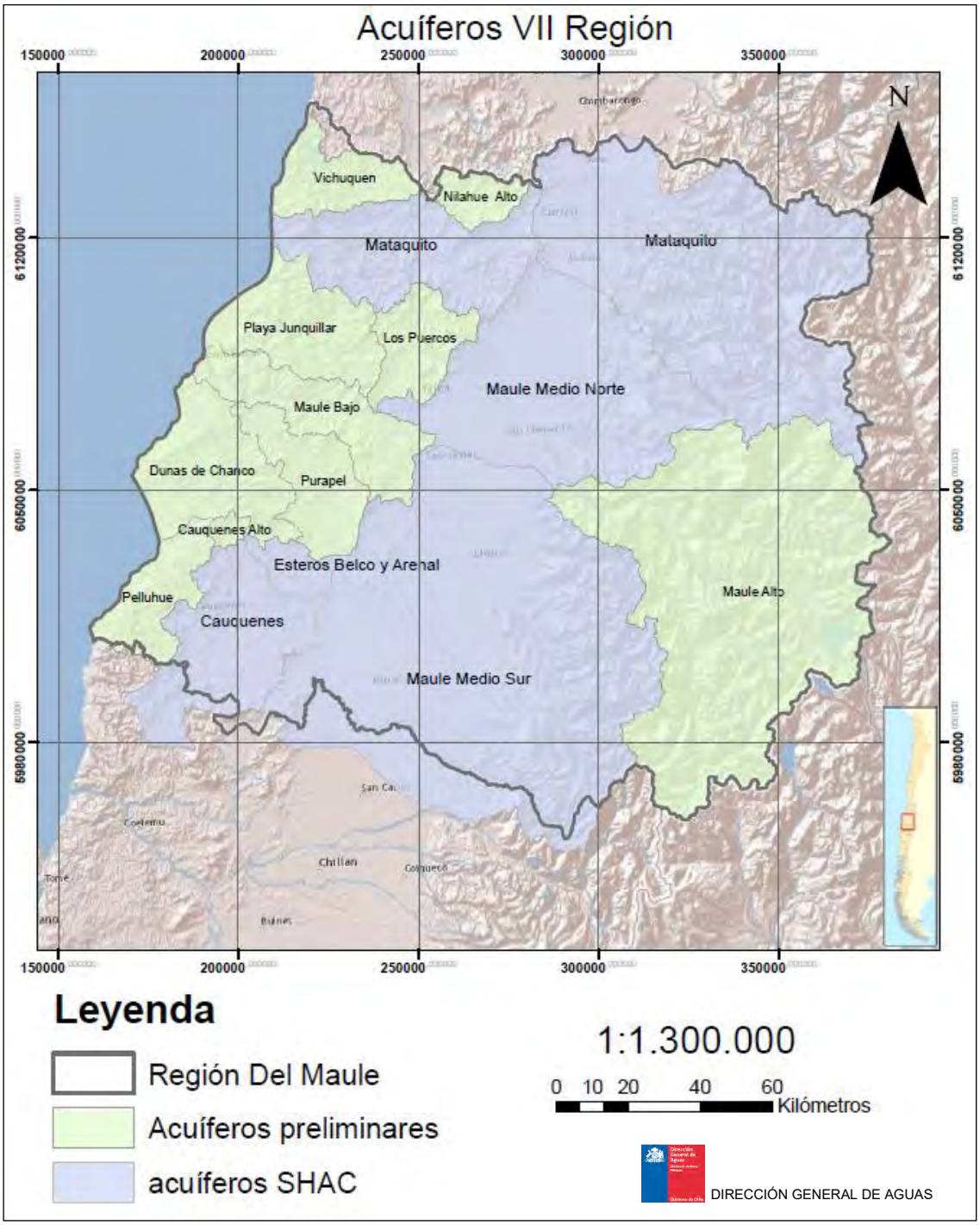



**Ilustración 4: Mapa "Acuíferos VII Región. Distribución geográfica de acuíferos SHAC y preliminares. Creación propia.**

### III.4.2.1. GEOLOGÍA AREA ACUÍFEROS SHAC

#### III.4.2.1.1 GEOLOGÍA ACUÍFERO MATAQUITO

Los ríos Tena y Lontué, nacientes en la Cordillera de Los Andes confluyen en la zona occidental de la depresión intermedia para dar origen al río Mataquito, este avanza hacia el poniente a través de la Cordillera de la Costa y las planicies costeras hasta desembocar al mar en la localidad de llaca (DGA, 1986a).

En los valles de los ríos Tena y Lontué en el área precordillerana se observan sedimentos glaciales morrénicos, erodados posteriormente, dando origen a niveles aterrazados con secuencias sedimentarias y volcánicas; Mientras que en las cercanías de la costa correspondiente al cuaternario y constituyente del acuífero, presenta materiales detríticos de arenas, conglomerados y limos. Esta formación se dispone suprayacente sobre un basamento paleozoico formado por pizarras, filitas, esquistos, metabasitas y granitoides pertenecientes a las formaciones Pz4a, Pz4b y CPg (DGA, 1986a).

#### III.4.2.1.2 GEOLOGÍA ACUÍFERO MAULE

En siguiente descripción se incluyen los acuíferos Maule Alto, Medio y Bajo, siendo solo Maule Medio un acuífero SHAC, mientras que Maule Alto y Bajo son preliminares.

En este acuífero se distinguen unidades de rocas o materiales consolidados y unidades de depósitos no consolidados, estos últimos son los de mayor interés desde el punto de vista hidrogeológico.

Las unidades de rocas presentes en la zona de estudio son: basamiento granítico palezoico superior (Pzg), stocks aplíticos (Tr/Jsa), Intrusivos Graníticos (Jig), Formación Coya-Machalí (KTcm), Formación Lo Valle (KTlv), Cuerpos Intrusivos Subvolcánicos (Tisv)[5].

[5] Carta hidrogeológica de Chile, hoja Talca (SERNAGEOMIN, 1995)

En los depósitos no consolidados se engloban todas las unidades sedimentarias que conforman el relleno del Valle Central en la región del Maule; éstas incluyen una gran variedad de depósitos que, según su granulometría, varían desde ripios de bolones hasta arcillas; genéticamente, son el resultado de procesos deposicionales fluviales aluviales y fluvioaluviales cuaternarios.

#### III.4.2.1.3 GEOLOGÍA ACUÍFERO ESTEROS BELCO Y ARENAL

El área se caracteriza por estar formada por depósitos volcánicos, al oeste granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda, biotita y localmente de muscovita pertenecientes al carbonífero- pérmico. Mientras que al este, depósitos piroclásticos, principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. En la VII Región aflora las formaciones Ignimbrita Pudahuel y Toba Loma Seca[6].

#### III.4.2.1.4 GEOLOGÍA ACUÍFERO CAUQUÉNES

En la Cordillera de la Costa se encuentran rocas metamórficas, las cuales se caracterizan por tener una litología de pizarras, filitas y metaareniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T (Serie Oriental), pertenecientes al carbonífero temprano. En la depresión se concentran los depósitos volcánicos de granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita y depósitos piroclásticos, principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. Se observan abundantes sedimentos del Pleistoceno- Holoceno rellenando la cuenca, depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa, abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciares con intercalación de depósitos volcánicos (DGA, 2013).

### III.4.2.2. GEOLOGÍA ACUÍFEROS PRELIMINARES

Los acuíferos costeros son Los Puercos, Vichuquén, Nilahue Alto, Playa Junquillar, Dunas de Chanco, Pelluhue y Maule Bajo. Mientras que los acuíferos preliminares de la Depresión son Cauquénes Alto y Purapel.

[6] Mapa Geológico Centro Chile (SERNAGEOMIN, 2003)

Los acuífero costero Maule bajo y Cauquenes Alto ya han sido incluidos en la descripción geológica del Acuífero Maule y Cauquénes respectivamente.

La caracterización geológica de los acuíferos costeros se extrajo principalmente del informe “Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras del Libertador General Bernardo O’Higgins, Del Maule y Del Bío-Bío” (DGA, 2014)

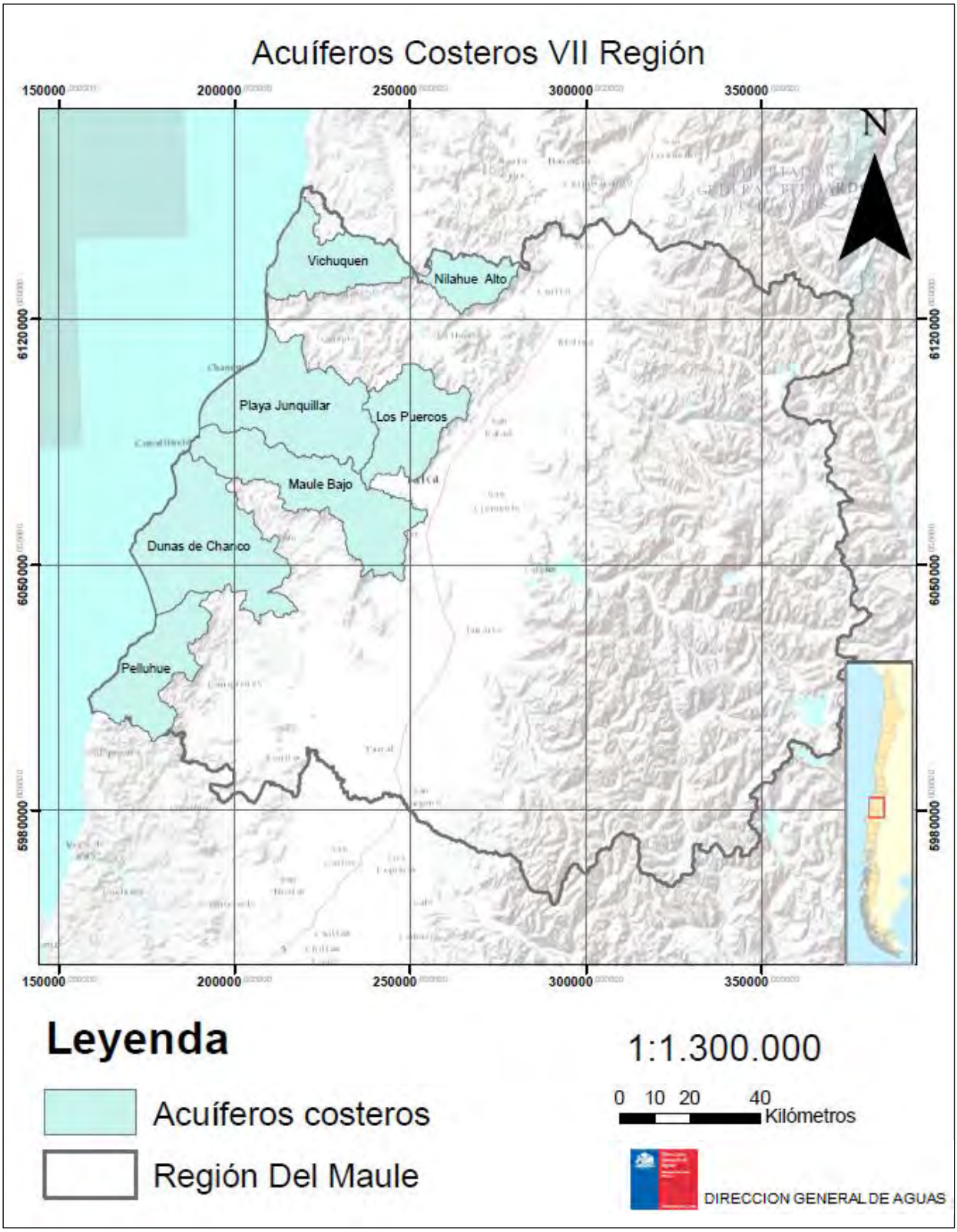



**Ilustración 5: Mapa "Acuíferos costeros VII Región. Distribución geográfica. Creación propia**

### III.4.2.2.1 GEOLOGÍA ACUÍFEROS COSTEROS

En general, en la zona costera afloran materiales cuaternarios rodeados de formaciones paleozoicas constituidas por pizarras, filitas, esquistos y metabasitas.

Los materiales cuaternarios corresponden a las formaciones Q1 y Qe. La primera se caracteriza por depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. Los segundos son depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes tanto activos como inactivos (DGA, 2014).

Los materiales paleozoicos están representados por las formaciones Pz4a y Pz4b. La primera está formada por esquistos muscovíticos y metabasitas, metachert y serpentinitas con metamorfismo de alto gradiente P/T. La segunda por pizarras, filitas y metaareniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T del Carbonífero temprano (DGA, 2014).

#### III. 4.2.2.1.1 ACUÍFERO PRELIMINAR LOS PUERCOS

Al este de Los Puercos, afloran rocas del Jurásico Inferior, depósitos de dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. En la zona central se aprecian secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas del Cretácico Inferior alto- Cretácico Superior bajo. Seguidas hacia el este por rocas del Pleistoceno, depósitos piroclásticos, principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. En la depresión central y valles de la cordillera principal, en la VII Región aflora la Ignimbrita Pudahuel y Toba Loma Seca.

Al norte del acuífero se observan secuencias volcánicas y sedimentarias marinas, compuestas de lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas del Cretácico Inferior (Neocomiano).

En la precordillera aparecen secuencias y complejos volcánicos continentales definidos por lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas

andesíticas a riolíticas, escasas intercalaciones sedimentarias pertenecientes Cretácico Inferior alto.

En la depresión central, se tienen rellenos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados, abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos del Pleistoceno-Holoceno[7].

### III. 4.2.2.1.2 ACUÍFERO PRELIMINAR PLAYA JUNQUILLAR

Posee dos sectores acuíferos que son relevantes en la zona de estudio:

El sector acuífero costero Dunas de Putu, definido como Cuaternario se extiende en una franja costera desde el norte de la población de Constitución, en el río Maule, hasta Las Lomas. Cerca de esta última el acuífero limita y conecta con el correspondiente al río Huenchullami.

El sector acuífero Aluvial Huenchullamí se ha definido en base a la distribución del aluvial del río Huenchullamí, pero se ha diferenciado por su extensión hacia el interior y su morfología aluvial, bien distinta del anterior

Dunas de Putú, se trata de la zona costera donde afloran materiales cuaternarios rodeados de formaciones paleozoicas constituidas por pizarras, filitas, esquistos y metabasitas. Los materiales cuaternarios corresponden a las formaciones Q1 y Qe. La primera se caracteriza por depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. Los segundos son depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes tanto activos como inactivos. Estos últimos forman la gran extensión dunar de Putú. Los materiales paleozoicos están representados por las formaciones Pz4a y Pz4b. La primera está formada por esquistos muscovíticos y metabasitas, metachert y serpentinitas con

[7] Mapa Geológico Centro Chile (SERNAGEOMIN, 2003)

metamorfismo de alto gradiente P/T. La segunda por pizarras, filitas y metaareniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T del Carbonífero temprano. (DGA, 2014)

El acuífero Aluvial Huenchullamí correspondiente al Cuaternario, presenta materiales detríticos de arenas, conglomerados y limos. Esta formación se dispone suprayacente sobre un basamento paleozoico formado por pizarras, filitas, esquistos, metabasitas y granitoides pertenecientes a las formaciones Pz4a, Pz4b y CPg (DGA, 2014).

#### III. 4.2.2.1.3 ACUÍFERO PRELIMINAR DUNAS DE CHANCO

La geología viene representada por una formación aluvial del cuaternario depositada sobre el cretácico marino de la formación Ks1m. Esta última está constituida por secuencias sedimentarias marinas de plataforma, litorales o transicionales: areniscas, conglomerados, lutitas, calizas extraclásticas y oolíticas y sucesiones turbidíticas. En esta zona corresponde a la formación Quiriquina, la cual ha sido profusamente estudiada. En concreto está compuesta por un conglomerado basal de un metro de espesor con clastos centimétricos del basamento. Sobreyacente al conglomerado existe una secuencia de aproximadamente 25 m de areniscas pardas de grano fino a grueso y un alto contenido de fósiles. Sobre las areniscas pardas, se encuentran las areniscas glauconíticas con una potencia de 20 m, de grano fino, color verde y sin fósiles. Estas rocas se encuentran en estado fresco sólo en cortes de caminos, en otros lugares aflora meteorizada, argilizada en varios grados y con alto contenido de minerales ferrosos. Los fósiles en la arenisca parda han permitido datar esta formación como Cretácico Superior.

En el último tramo de la desembocadura del río, aparecen materiales del cuaternario marino formados por arenas y conglomerados de playa. En el límite este del acuífero afloran las pizarras y filitas de la formación Pz4b del silúrico-carbonífero (DGA, 2014).

### III.4.2.2.2 GEOLOGÍA ACUÍFEROS PRELIMINARES DE LA DEPRESIÓN

Estos acuíferos son litológicamente de depósitos de granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de moscovita del carbonífero- Pérmico. Depósitos piroclásticos, principalmente riolíticos, asociados a calderas de colpaso. Ignimbrita de Pudahuel y Toba Loma Seca[8].

## III. 4.3 GEOLOGIA ECONÓMICA REGIONAL

La geología económica es una rama de la geología que estudia la distribución y formación de recursos minerales que se encuentran en o sobre la corteza terrestre, concentrados por procesos geológicos. Se consideran los minerales metálicos (Cu, Au, Ag, Mo, Fe, Ni, Cr, Vn, U, etc.), minerales no metálicos y materiales industriales (Zn, Li, sales, carbonatos, fluorita, asbestos, granito, arcillas, etc.) , las piedras preciosas y semipreciosas (diamante, lapislázuli, ágata, granate, jaspe, circón, etc.), combustibles fósiles (hulla, antracita, petróleo, gas natural, etc.) y recursos Hídricos (aguas subterránea, termales, etc.).

La Región del Maule no cuenta con producción de minerales metálicos, en comparación a otras regiones de Chile, como se muestra en la siguiente tabla:

| Región | Cu(tmf) | Mo(tmf) | Au(kg) | Ag(Kg) | Fe (mineral tm) | Fe(tmf) | Pb (tmf) | Zn(tmf) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Total | 5.326.376 | 55.834 | 46.333 | 1.501.436 | 14.619.987 | 9.008.873 | 1.110 | 42.870 |
| Arica y Parinacota | 2.090 | - | - | - | - | - | - | - |
| Tarapaca | 614.859 | 3.710 | - | - | - | - | - | - |
| Antofagasta | 2.947.929 | 29.575 | 22.167 | 917.214 | - | - | - | - |
| Atacama | 491.785 | 1.998 | 11.030 | 136.794 | 13.267.462 | 8.120.367 | - | - |
| Coquimbo | 487.704 | 7.166 | 6.680 | 124.155 | 1.352.525 | 888.506 | - | - |
| Valparaíso | 274.400 | 3.894 | 970 | 81.014 | - | - | - | - |
| Metropolitana | 307.203 | 2.548 | 3.324 | 69.864 | - | - | - | - |
| Lib. Gral. Bernardo O' Higgins | 499.752 | 6.943 | 1.350 | 109.394 | - | - | - | 9.223 |
| Maule | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Bio- Bio | - | - | - | - | - | - | - | - |
| La Araucanía | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Los Rios | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Los Lagos | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Aysen del Gral. Carlos Ibañez del Campo | 654 | - | 812 | 63.010 | - | - | 1.110 | 33.647 |
| Magallanes y de la Antártica Chilena | - | - | - | - | - | - | - | - |

**Tabla 2: Editada de Producción de minerales metálicos por región, según tipo de mineral, año 2016. Anuario de la Minería de Chile. SERNAGEOMIN**

[8] Mapa Geológico Centro Chile (SERNAGEOMIN, 2003)

A continuación se describen la producción de minerales no metálicos y materiales industriales de la Región del Maule[9]:

**Ilustración 6: Ubicación de principales yacimientos en explotación. Extraído de Anuario de Minera, SERNAGEOMIN, 2016**

[9] Anuario de Minería de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, 2016

- Arcilla designa una amplia variedad de materiales terrosos, compuestos por los denominados minerales de arcilla, que son silicatos hidratados de alúminica, con cantidades variables de hierro, magnesio, sodio, calcio y potasio. Se forman por descomposición (hidrólisis) de minerales de las rocas y son similares las que resultan de la descomposición de rocas félsicas o máficas. Se clasifican el grupo del caolín, grupo de las smectitas (montmorillonita), grupo de las illitas y grupo de las cloritas. Las producidas en Chile reciben los nombres de: caolín, arcilla plástica, arcilla bauxítica, bentonita y arcilla común.
- El carbonato de Calcio, se ha empleado la denominación carbonato de calcio para referirse a un conjunto de materiales naturales: caliza, coquina y carbonato de calcio blanco, compuestos principalmente por el mineral calcita, $CaCO_3$.
- Caliza Desde un punto de vista litológico, la caliza es una roca carbonatada, compacta, más bien blanda, normalmente fosilífera, de colores entre gris claro y gris oscuro, y también blanco grisáceo, con contenidos superiores a 50% $CaCO_3$, y cantidades variables de arena, arcilla y materia orgánica.
- Perlita es un vidrio volcánico de composición intermedia a ácida, variable entre los tipos litológicos de andesita y riolita, que contiene entre un 2% y un 5% de agua de combinación. La principal característica es su variedad vítrea o disgregada, es su capacidad de expansión, hasta 20 veces su volumen en presencia de calor, debido a que tiene en su interior pequeñas burbujas y grietas perlíticas con aire y agua, las que al ser sometidas a alta temperatura, crepitan, aumentando su volumen.
- Pumicita es un vidrio volcánico de colores claros y de estructura vesicular, que constituye un grupo que incluye la ceniza volcánica y la piedra pómez. Se utiliza principalmente en construcción para la elaboración de cemento, cal hidráulica y paneles livianos; en obras civiles como estabilizado de carreteras, y en la industria manufacturera como filtrante, absorbente y abrasivo industrial.

- Recursos silíceos se utiliza para referirse a aquellas rocas, minerales y sedimentos, compuestos principalmente por sílice, SiO2, en diferentes variedades cristalográficas, que son utilizados, en distintas aplicaciones tecnológicas, tanto por sus propiedades químicas (SiO2 sobre 94%), como físicas (cristalinidad, transparencia, dureza, fracturamiento).
- El cuarzo es el mineral de mayor abundancia en la corteza terrestre, ya que se encuentra, como mineral esencial o accesorio, en sedimentos y en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.
- Arena es un material sedimentario compuesto, principalmente, por fragmentos de cristales de cuarzo, con proporciones menores de micas, feldespato, fragmentos líticos y arcillas.

## III.5 HIDROGEOLOGÍA

### III. 5.1 HIDROGEOLOGIA REGIONAL

Según el estudio Mapa hidrogeológico Nacional y Mapa Hidrogeológico de Chile realizados por la Dirección General de Aguas (DGA, 1986a - 1986b), Chile territorial se presenta organizado en provincias y subprovincias hidrogeológicas, en donde las 3 provincias presentadas (altiplánica, andina vertiente Pacifico, y cuencas costeras) responde a patrones de escurrimiento características del continente sudamericano.

Según los estudios recopilados, en Chile los rellenos sedimentarios cuaternarios (volcanoclásticos, sedimentarios fluviales, fluvioglaciales, aluviales, aluvionales, lacustres, eólicos y laháricos) son de importancia hidrogeológica, debido a que son acuíferos de elevada productividad, es decir, que pueden proporcionar importantes cantidades de aguas los que se concentran en estos depósitos. Los acuíferos más importantes corresponden a depósitos fluviales, marginales a los principales sistemas hidrográficos (Mataquito, Lontué, Loncomilla y Maule) y a depósitos fluvioaluviales conexos al río Claro, Lontué y Maule. Estos contienen acuíferos freáticos o libres a semiconfinados (DGA, 1995).

La VII Región se encuentra en la sub provincia Central Sur y la sub provincia Costeras Exorreicas.

### III. 5.1.1. SUBPROVINCIA CENTRAL SUR

En esta zona (33° a 42° S), la ocurrencia de acuíferos está ligada al desarrollo de la unidad fisiográfica de la Depresión Intermedia. Las napas subterráneas, alimentadas por los cauces superficiales, derretimiento e infiltración directa de lluvias, ya no están limitadas a los cauces de los ríos, sino que ocupan amplios sectores del relleno cuaternario no consolidado de la depresión. Dicho relleno es muy heterogéneo, y está constituido esencialmente por material de acarreo fluvial, y más al sur, fluvioglacial, proveniente de la Cordillera de Los Andes. El escurrimiento superficial, en dirección Cordillera- Mar, es de naturaleza libre a semiconfinada, y localmente confinada debido a la existencia de importantes depósitos impermeables arcillosos y/o volcánicos. (DGA, 1986b)

Los rellenos presentan espesores variables, de pocos metros en los sectores precordilleranos hasta algunos cientos de metros en el centro de la depresión, y decrecientes hacia la Cordillera de la Costa, donde el agua subterránea tiende a aflorar. (DGA, 1986b)

### III. 5. 1. 2 SUBPROVINCIA DE CUENCAS COSTERAS EXORREICAS

Los rellenos de las cuencas costeras, son por lo general más finos que los rellenos de la Depresión Intermedia, tienen espesores de hasta 100 m, y son alimentados por las precipitaciones de la Cordillera de la Costa. Los pozos tienen productividades medianas (1 a 4 $m^3$/h/m). La calidad del agua es buena, salvo excepciones donde se produce intrusión salina, y se usa casi exclusivamente con fines domésticos, con un bajo grado de explotación (DGA, 1986b).

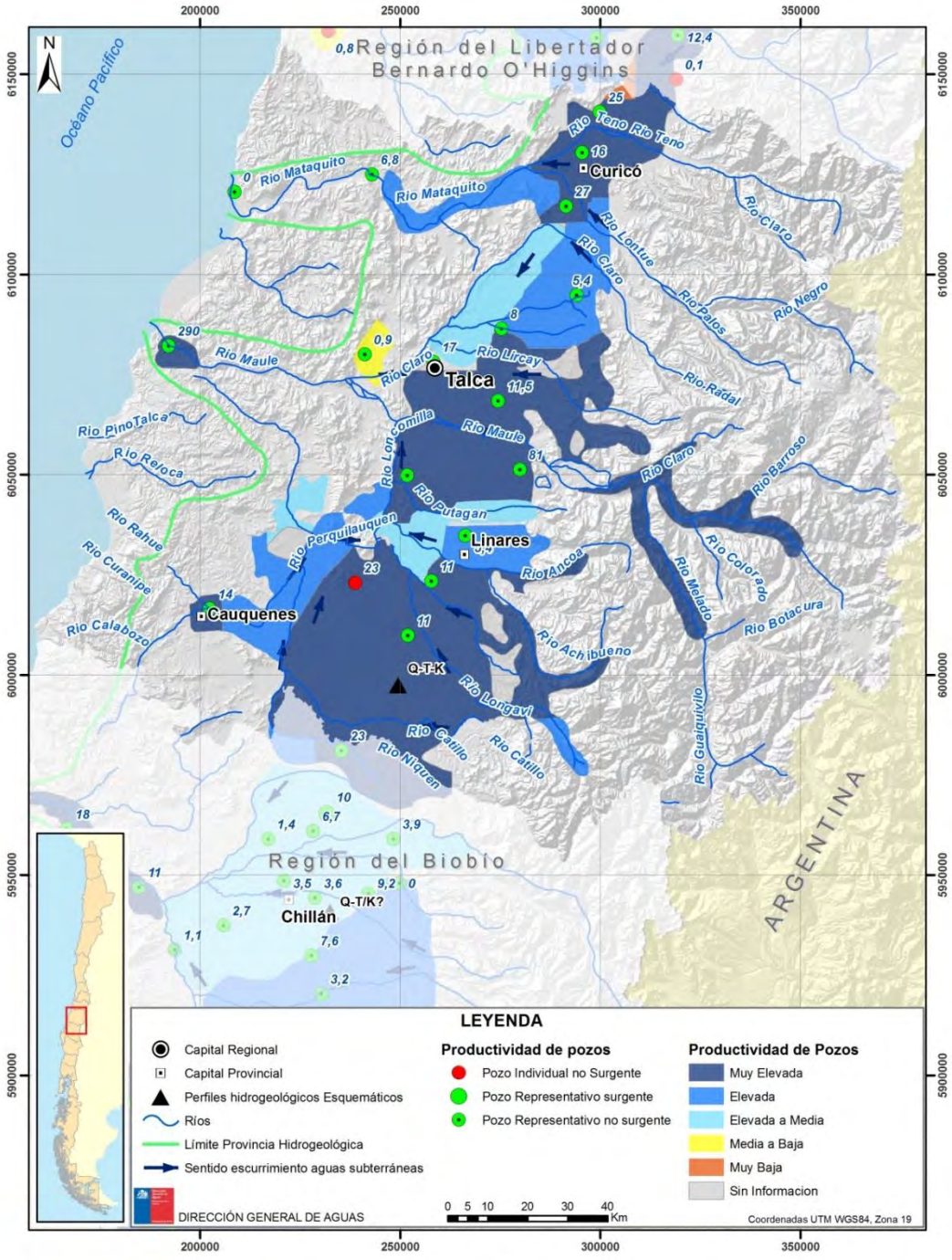



**Ilustración 7: Mapa "Productividad de pozos Región del Maule". Modificado Carta Hidrogeológica de Chile, 1986[10].**

[10] Surgencia: Afloramiento de agua subterránea.

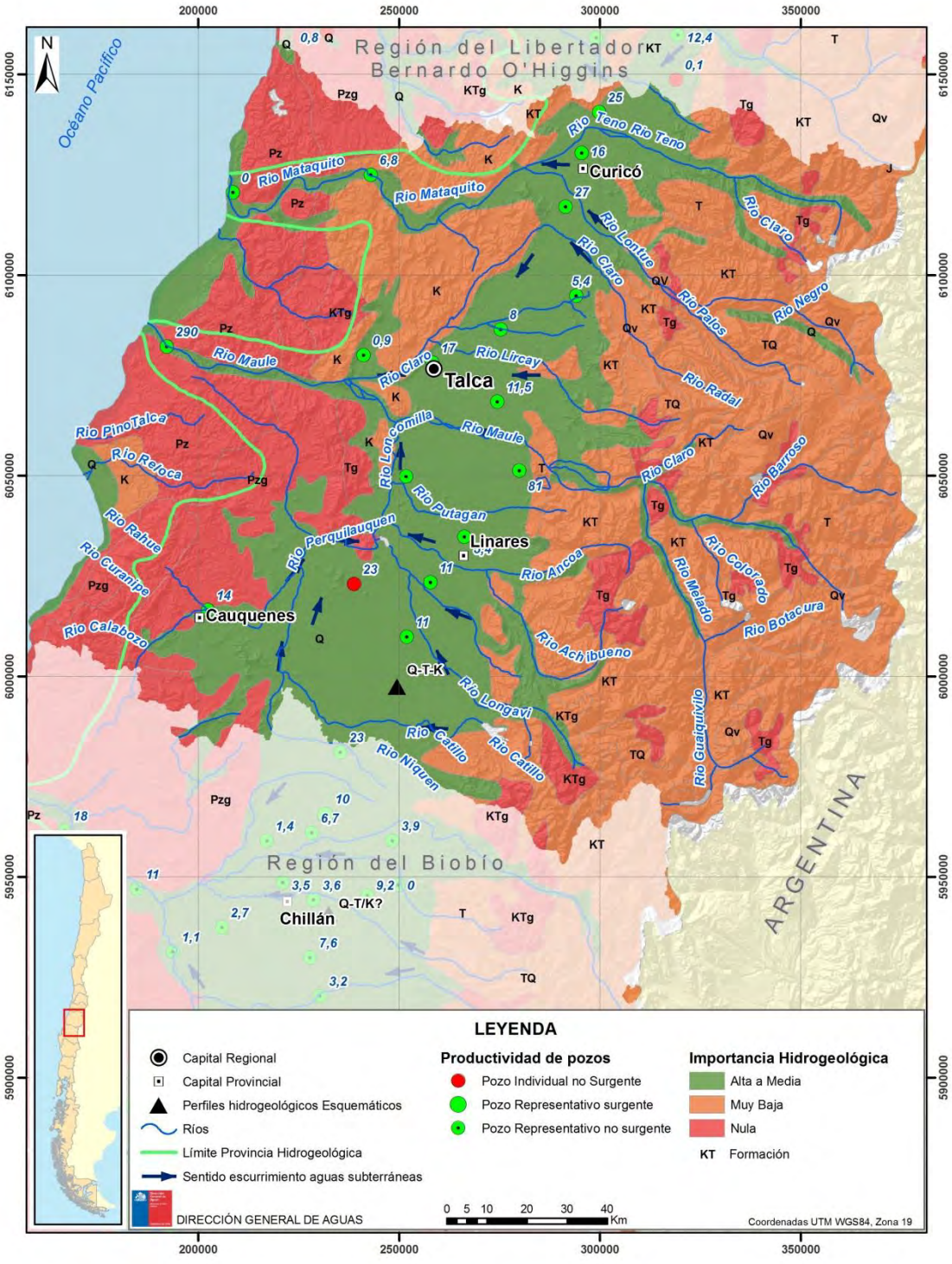



**Ilustración 8: Mapa "Importancia Hidrogeológica Región del Maule". Modificado Carta Hidrogeológica de Chile, 1986.**

## III. 5.2 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA POR ACUÍFERO

En la Región del Maule se reconocen 14 acuíferos. En las secciones siguientes se presenta la información recolectada sobre diferentes aspectos hidrogeológicos de los acuíferos de la región. La información, según sea el caso, ha sido copiada textualmente o bien adaptada y editada desde su fuente original.

### III. 5.2.1. HIDROGEOLOGÍA ACUÍFERO MATAQUITO

- Unidades Hidrogeológicas:

La primera unidad está compuesta por medios intergranulares de bajo contenido de finos (<30 %), posee una permeabilidad moderada a alta. Esta unidad está compuesta por bolones, gravas, arenas gruesas a finas, limos y poca arcilla, por lo cual presenta una permeabilidad media (1-10 m/día), Siendo la unidad con mayor potencial hidrogeológico. Se encuentran principalmente los depósitos sedimentarios de origen fluvial que se distribuyen en los cauces de los ríos Teno, Lontué y Mataquito. Superficialmente, se ubican en la llanura del Valle Central, al Este de la Cordillera de la Costa y al Oeste del borde preandino (DGA, 2012).Secundariamente la conforman depósitos de origen no fluvial, es decir, depósitos sedimentarios fluvio-aluvionales, gravitacionales, coluviales, eólicos costeros y marinos aterrazados. Estos depósitos, rellenan valles de la Cordillera de la Costa y serranías intermedias (DGA, 2012).

La segunda unidad hidrogeológica de la cuenca del río Mataquito, corresponde a depósitos de mala selección con abundantes arcillas (>30 %) con una permeabilidad moderada a baja. Superficialmente, se reconocen en mayor medida en el Valle Central, y subordinadamente en valles de drenaje secundarios en los sectores de la Cordillera de la Costa y Serranías Intermedias. Bajo esta denominación también se han incluido depósitos lacustres representados por arcillas y arcillas limosas (DGA, 2012).

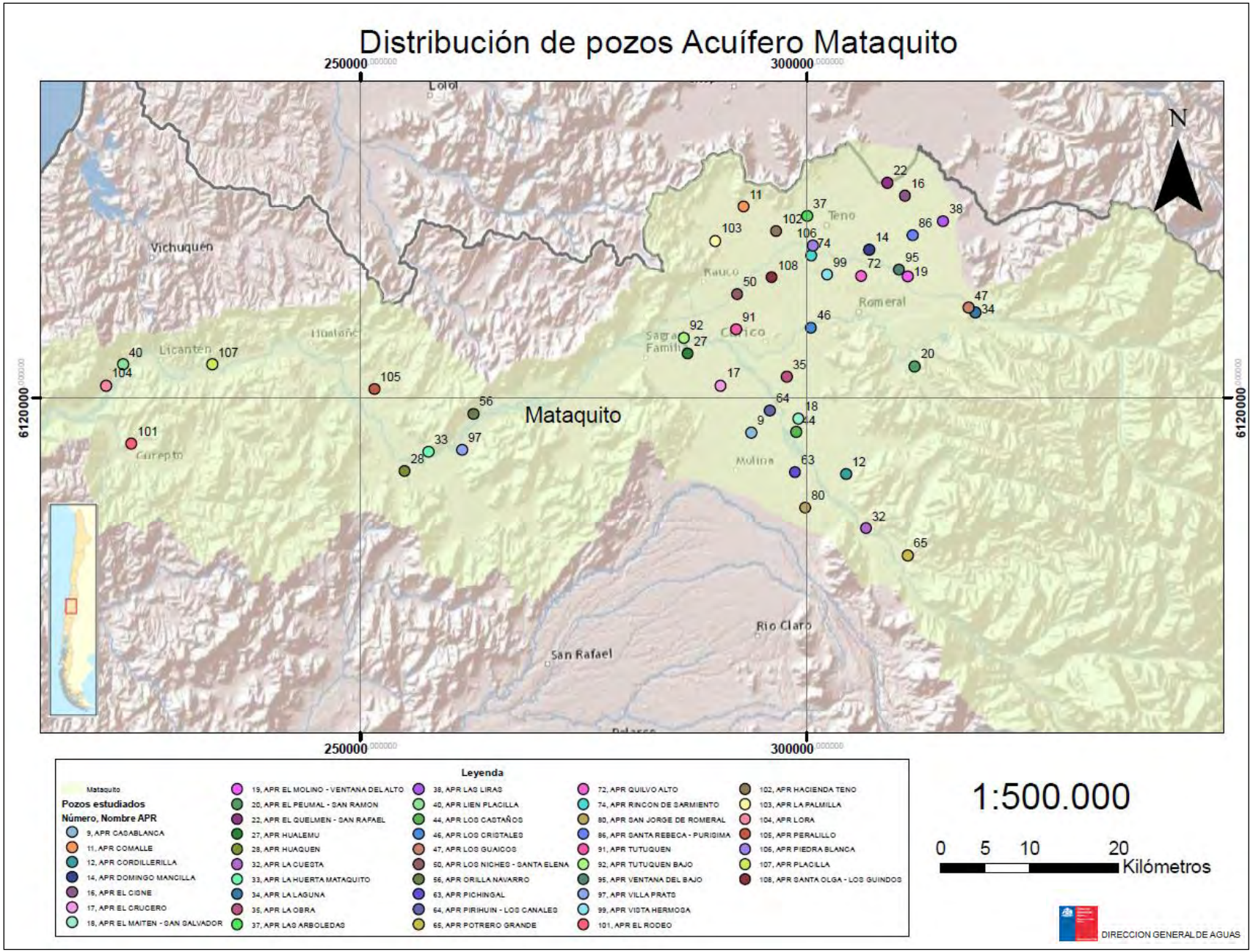



**Ilustración 9: Mapa "Distribución de pozos Acuífero Mataquito". Creación propia.**

La tercera unidad corresponde a rocas consolidadas de tipo intrusiva, metamórfica y, en menor proporción, sedimentarias y volcanoclásticas. Afloran en la parte oeste de la cuenca del río Mataquito y corresponden a rocas con una porosidad primaria muy reducida a nula, con permeabilidades inferiores a 10-4 m/d. Sin embargo, se puede considerar la existencia de eventuales porosidades secundarias, las cuales dependen de la presencia de fracturas; que en su mayoría correspondiente a diaclasamientos de poca continuidad.

Los antecedentes hidrogeológicos del acuífero Mataquito fueron obtenidos a partir de los siguientes trabajos:

1. “Carta hidrogeológica de Chile”, realizada por Ingenieros consultores en coordinación con el Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA, 1986).
2. “Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional” realizado por Ingenieros Consultores en coordinación con el Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA, 1986a).
3. “Carta hidrogeológica de Chile”, realizada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 1995), con el objetivo de proporcionar una visión general de la distribución espacial de los acuíferos y su ubicación y a determinar y caracterizar los factores o agentes que condicionan su ocurrencia, movimiento y rendimiento.
4. “Estudio hidrogeológico Cuenca del Río Mataquito” realizado por Aquaterra Ingenieros Limitada” en coordinación La División de Estudios y Planificación (DGA, 2012). Con el objetivo de levantar información hidrogeológica y, a partir de ello, el desarrollo de un modelo conceptual y numérico (de flujo) del acuífero de la cuenca del río Mataquito.

- Descripción de acuífero:

En el sector de la desembocadura del río Mataquito, las formaciones acuíferas corresponden a depósitos de arenas de origen marino o fluvial. La potencia de

estos rellenos varía entre 10 a 15 m, existiendo allí un acuífero de napa libre (DGA, 1986a).

En los valles de los ríos Teno y Lontué en los cauces se han depositado sedimentos fluviales gruesos tipo bolones y ripio, con potencias menores a 10 m. En los cursos medio e inferior de estos ríos, antes de su acceso al valle central, su granulometría es semejante aunque algo menos gruesa. Es una unidad permeable pero de bajo interés hidrogeológico por su escasa capacidad de almacenamiento (DGA, 1986a).

En el valle central se detecta una zona acuífera de características semiconfinadas. Esta zona estaría limitada superiormente por una capa de arcilla y en ciertos sectores por limos arenosos y arcilla que poseerían limitadas características acuíferas. La zona acuífera principal presenta una secuencia interestratificada de sedimentos gruesos y medios tipos balones, ripios y gravas en una matriz arenosa (DGA, 1986a).

En la zona correspondiente a los pequeños valles tributarios a los ríos Tena y Lontué, se infiere la existencia de sedimentos finos del tipo limo y arcillas con intercalación de arenas en baja proporción. Los sedimentos depositados en el valle del río Mataquito aguas abajo de la confluencia de los ríos Tena y Lontué, tienen una potencia entre 50 y 60 m. En profundidad, estos sedimentos se caracterizan por estar interestratificados, conformando una secuencia de acuíferos y acuífijos; los primeros constituidos por fracciones del tipo balones, ripio y arena, y los segundos por limos y arcillas (DGA, 1986a).

A la salida de la Cordillera de Los Andes, los niveles estáticos son bastantes profundos. Paulatinamente a medida que se avanza hacia aguas abajo, el nivel estático va ascendiendo (DGA, 1986a).

- Parámetros elásticos

Los rellenos acuíferos del valle del río Mataquito y de sus tributarios Tena y Lontué, presentarían un coeficiente de permeabilidad medio a alto. En los bordes del valle central y en el interfluvio de los ríos Tena y Lontué, las transmisibilidades son del orden de los 1000 $m^2$/día. En el resto del valle las transmisividades son mayores alcanzando incluso valores del orden de 8000 $m^2$/día. El valle del Mataquito presenta transmisividades inferiores a 1000 $m^2$/día. (DGA, 1986a)

En el 2012, se realizó un estudio para 173 pozos, con los valores obtenidos se pudo visualizar los rangos entre los cuales fluctúa la permeabilidad en la zona de estudio, en la tabla siguiente se muestra un resumen (DGA, 2012). En promedio el coeficiente de permeabilidad se ha calculado por sobre $1{,}0*10^{-4}$ m/s, lo que muestra la buena potencialidad de los rellenos para ser explotados.

| Rango de permeabilidad (m/s) | Cantidad de pozos |
|---|---|
| $< 1{,}14*10^{-4}$ | 39 |
| $1{,}14*10^{-4}$-$2{,}28*10^{-4}$ | 36 |
| $2{,}28*10^{-4}$-$3{,}43*10^{-4}$ | 27 |
| $3{,}43*10^{-4}$-$5{,}72*10^{-4}$ | 27 |
| $5{,}72*10^{-4}$-$1{,}13*10^{-3}$ | 24 |
| $>1{,}13*10^{-3}$ | 20 |

**Tabla 3: Rango de permeabilidad en el acuífero Mataquito para un estudio de un total de 173 pozos. Modificado (DGA, 2012)**

Se tienen coeficientes de almacenamiento asociados a 3 sectores: Lontué, Teno y Molina. Estas entregan como resultado valores oscilantes entre 0,15 y 0,25. Considerándose un valor estimado en torno al 18% como valor representativo y conservador (DGA, 2012).

- Recarga y Descarga

Se considera la interacción de sectores de riego, cauces superficiales, embalses y pozos de bombeo.

Según el “Estudio e Implementación de Modelos Hidrológicos Acoplados a SIG para el Manejo y Planificación, Cuencas de Maule- Mataquito. (GCF, CNR, 2006), las aguas subterráneas están destinadas a Agua Potable (3,2%), Industrial (28,2%) y Riego (68,7%). Además, el único embalse es El Planchón, ubicado en la

zona cordillerana, en la cabecera de la cuenca del río Teno. Sin embargo, la influencia de este embalse en el régimen natural del río Teno es poco significativa. Por otra parte, es importante considerar los aportes provenientes de las cuencas de cabecera o laterales y la entrada de escorrentía superficial.

Según el modelo de balance hídrico del año 2012 se estableció que un caudal de explotación aprox. de 8,5 $m^3/s$ produciría una variación de volumen del acuífero en torno al 5 %.

### III. 5.2. 2. HIDROGEOLOGÍA ACUÍFERO MAULE

- Unidades Hidrogeológicas

La primera unidad son depósitos fluviales actuales, terrazas fluviales, abanico fluvial actual del Maule, depósitos coluviales, forman acuíferos libres principalmente, niveles variables entre 3 y 30 m, caudales específicos entre 1 y 20 m, con caudales específicos entre 1 y 20 L/s/m (Espinoza, 2005)

La segunda unidad son depósitos cineríticos, fluvioaluviales, interserranos, abanico de Linares, con niveles estáticos variables y caudales específicos entre 1 y 20 lt/s/m (Espinoza, 2005).

La tercera unidad está compuesta por depósitos cineríticos, fluviales, abanico actual del Maule. Condiciona acuíferos confinados, niveles someros, a veces surgentes. (Espinoza, 2005)

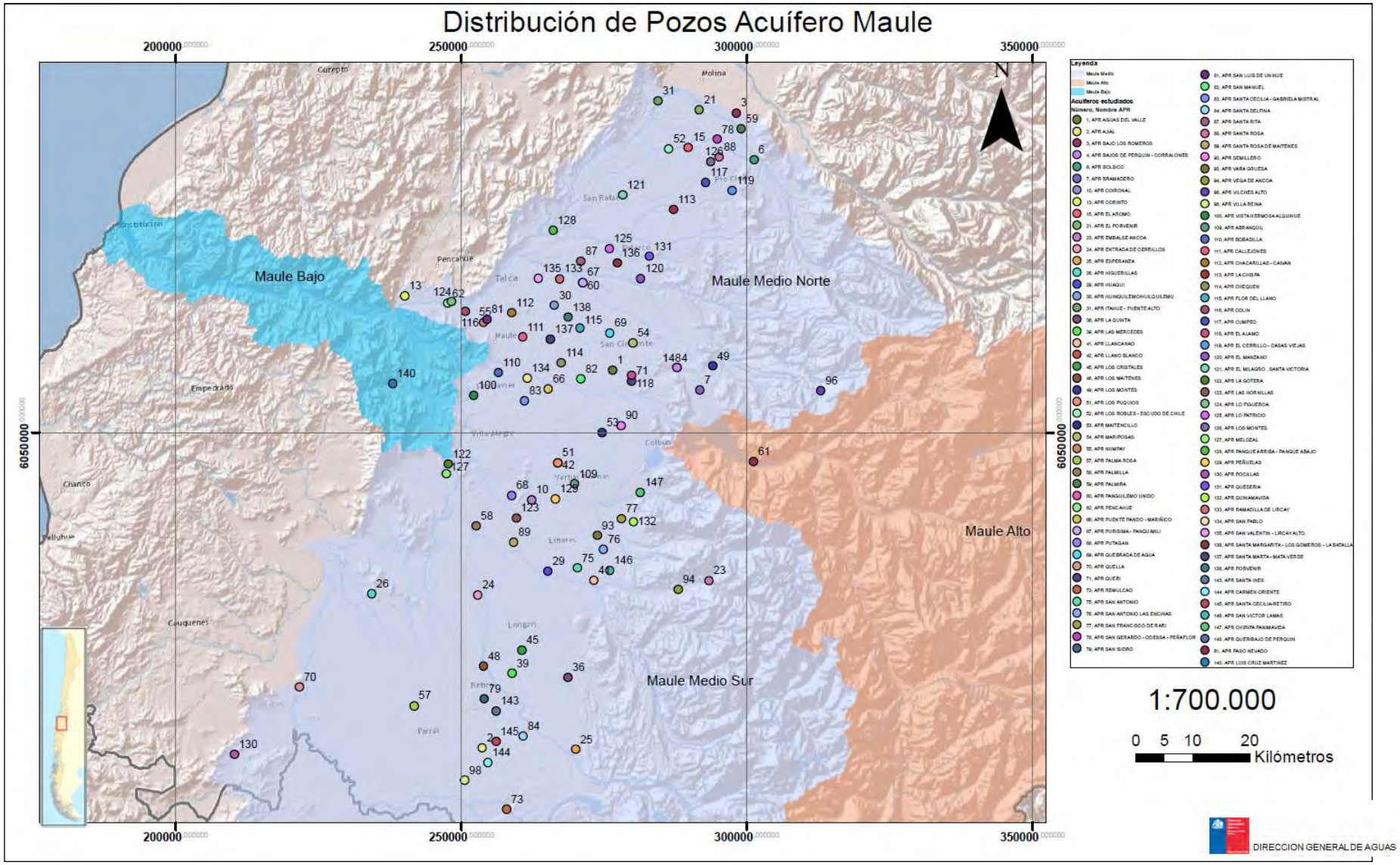



Ilustración 10: Mapa “Distribución de Acuífero Maule”. Creación propia

La cuarta unidad son rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias. Las cuales no presentan acuíferos conocidos. (Espinoza, 2005)

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

1. “Modelación hidrogeológica cuenca río Maule” realizado por División de Estudios y Planificación (DGA, 2011). Este trabajo tiene como objeto implementar un modelo hidrogeológico de tipo preliminar en el acuífero de la depresión intermedia del río Maule, como trabajo complementario al modelo conceptual definido en el informe DGA: SDT 319, Agosto 2011 “Balance Hídrico Preliminar Acuífero Río Maule”.
2. “Levantamiento de información hidrogeológica para modelación cuenca del río Maule” realizado por GCF Ingenieros Limitada (DGA, 2010). Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una interfaz SIG en ambiente MapObject, que permite el ingreso de información, preparación de los datos, construcción de topología y observación de los resultados del modelo de simulación hidrológico operacional Modelo Genérico (M.A.G.I.C.) desarrollado por la Dirección General de Aguas.
3. “Balance hídrico preliminar acuífero río Maule” realizado por División de Estudios y Planificación (DGA, 2011). Este trabajo tiene como objetivo avanzar en el conocimiento del balance hídrico del acuífero, con el objeto de satisfacer las necesidades crecientes por derechos de agua subterránea, ya sea como respaldo del uso agrícola en periodos secos, como para aumentar superficies regadas y otros usos permanentes.
4. “Carta Hidrogeológica de Chile, Hoja Talca, Región VII” realizada por Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 1995). Este trabajo tiene por objetivo proporcionar una visión general de la distribución espacial de los acuíferos y su ubicación y a determinar y caracterizar los factores o agentes que condicionan su ocurrencia, movimiento y rendimiento.

- Descripción del acuífero

Para la zona en estudio se identificaron 9 sistemas hidrográficos importantes e independientes: Claro, Lircay, Maule, Putagán, Achibueno-Longaví, Perquilauquén-Ñiquén, Cauquenes, Purapel y Los Puercos, sin embargo, debido a su extensión, algunos sistemas de los mencionados anteriormente no presentan un desarrollo hidrogeológico homogéneo, por lo que se determinó su subdivisión en 2 o más sectores (DGA, 2011).

Tal es el caso del sistema Perquilaquén-Ñiquén, donde el sector norte de esta subcuenca (asociado al cauce del río Perquilauquén) presenta una morfología distinta respecto al sector sur (asociado al cauce del río Ñiquén). Bajo este criterio, también se estimó conveniente dividir el sistema Achibueno-Longaví en 3: Achibueno, Liguay y Longaví Sur (DGA, 2011).

Además, el criterio de sectorización incorporó una variable administrativa, por cuanto es necesario que cada acuífero esté asociado a alguna zona de explotación identificada. De este modo se determinó subdividir, por ejemplo, el sistema Maule en 2: Maule Norte y Maule Sur, divididos por el cauce del río Maule (DGA, 2011).

En el estudio “modelación hidrogeológica cuenca Río Maule” (DGA, 2011) se concluyó que, en general, el acuífero de la cuenca del Maule presenta características homogéneas, salvo en la zona de los cauces aledaña a la Cordillera de la Costa donde se observa la presencia de lentes arcillosos producto de la depositación de sedimentos finos arrastrados por los ríos y que se encuentran con la barrera que representa la Cordillera de la Costa, lo que permite concluir la existencia de al menos 4 estratos.

Existen acuíferos libres en gran parte del área de estudio, presentándose en todos los tipos de depósitos. En los depósitos fluviales actuales, en las terrazas actuales y en los abanicos del río Maule (actuales y antiguos) se presentan abarcando el depósito en su totalidad, con excepción de algunas zonas en que existen

antecedentes estatigraficos locales que indican presencia de acuíferos confinados, semiconfinados y cubiertos, de poca extensión (Espinoza, 2005).

Los acuíferos cubiertos se encuentran principalmente en los depósitos cineríticos, donde alcanzan una gran extensión areal. Se encuentran en la zona norte de la zona de estudio y en las cercanías de Talca (Espinoza, 2005).

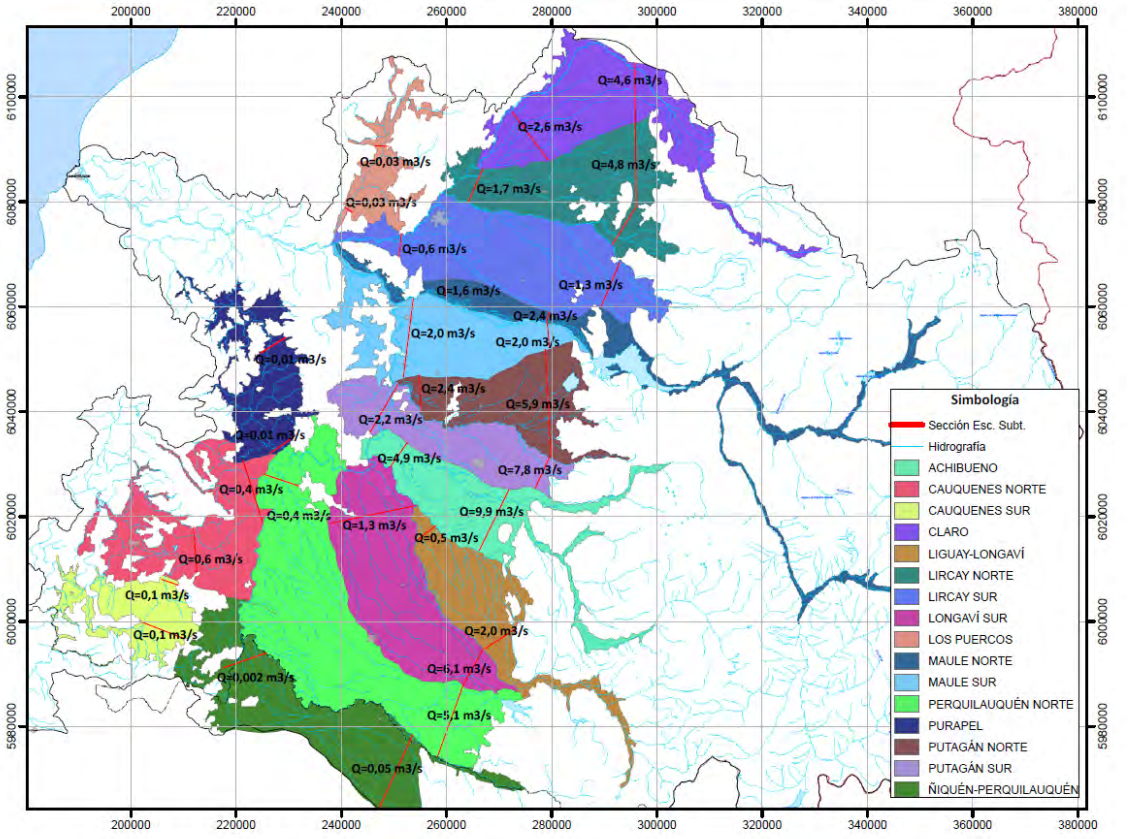



**Ilustración 11: Mapa "Acuíferos en la Cuenca Del Maule". Extraído (DGA, 2010).**

Los acuíferos confinados aparecen de forma puntual en los depósitos cineríticos, al sur del río Lircay, en terrazas fluviales del río Lircay y en el abanico del Maule, al sur de Villa Alegre. (Espinoza, 2005)

Los acuíferos semiconfinados se encuentran también en los depósitos cineríticos, donde capas superficiales de cenizas de espesor variable cubren a las unidades acuíferas. Estos depósitos se ubican en el extremo norte del área de estudio, al norte de los esteros Pangue y Pelarco. También se encuentran cubriendo un área extensa del abanico de Linares, así también se encuentran presentes en otros

depósitos puntuales, como las terrazas fluviales, el abanico del Maule y abanico fluvial antiguo del Maule (Espinoza, 2005).

No se tienen antecedentes en la zona de estudio de la existencia de acuíferos en roca.

A continuación se presentan perfiles de la zona de estudio, realizados a través de un estudio geofísico en el año 2010.

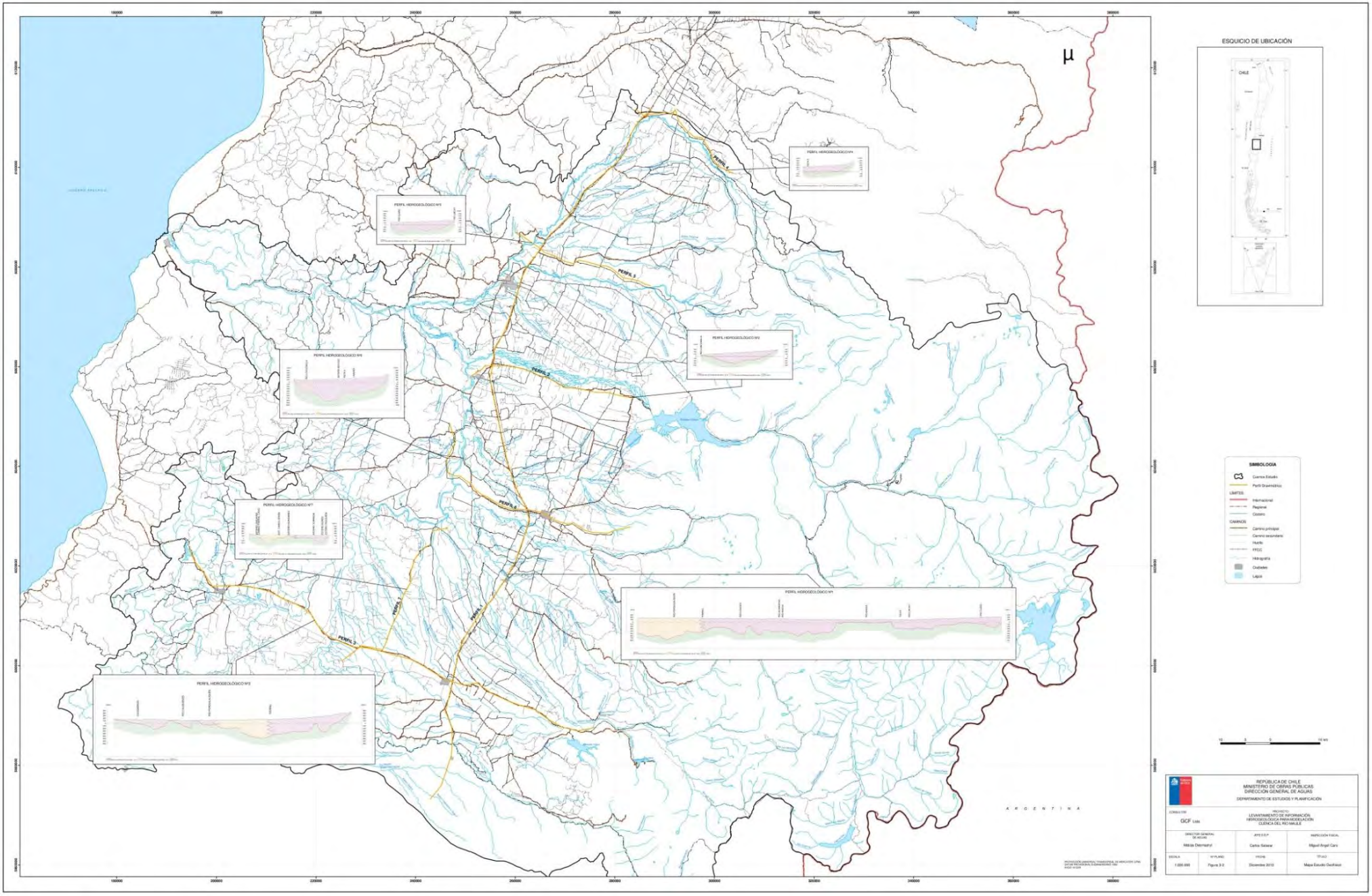



**Ilustración 12: Mapa "Estudio geofísico Región Del Maule". Extraído (DGA, 2010)**

- Recargas y descargas

La recarga del acuífero se produce a través de 3 componentes principales: el flujo subterráneo proveniente de todos los rellenos sedimentarios de las cuencas cordilleranas y pre-cordilleranas; la recarga superficial propiamente tal, que se compone de la precipitación y la recarga por agricultura; y la recarga producida por los ríos, principalmente en los conos de deyección que producen los cauces en la entrada a la depresión intermedia (DGA, 2011).

Las descargas en este caso, y bajo el supuesto de explotación despreciable sobre el acuífero, todas las entradas al sistema salen a través de descargas naturales, que en el caso del acuífero del Maule, ocurren principalmente por afloramientos de los ríos en las partes bajas (los sistemas de ríos Claro-Lircay, Loncomilla y Maule) y una magnitud poco significativa como flujo subterráneo en la zona de la confluencia de los río Claro y Maule (DGA, 2011). Por otro lado se tiene que según la recopilación de derechos otorgados al 2014 en la región del Maule se tiene un total de 147 según los expedientes en Catastro Público de Aguas (CPA).

Los resultados del balance hídrico realizado en el 2011 muestran que para el acuífero de la depresión intermedia del río Maule, la recarga neta es de 58 $m^3/s$.

| Sector Hidrogeológico | Recarga Neta ($m^3/s$) | Demanda Comprometida($m^3/s$) |
|---|---|---|
| Maule Norte | 15 | 7 |
| Maule Sur | 43 | 13 |

**Tabla 4: Situación de los Sectores Hidrogeológicos del Acuífero del Maule. Situación de recarga neta y demanda comprometida para cada sector hidrogeológico. Modificada (DGA, 2010)**

Para realizar el balance hídrico, se considera que los flujos de agua subterráneas se transmiten en la dirección Este-Oeste, hasta encontrar lo límites del acuífero en el cordón de la Cordillera de la Costa, donde aflora por el río Claro. Al sur del Maule, entre el río Maule y el río Longaví, se mantiene la dirección del flujo de agua subterránea Este-Oeste mostrándose gran influencia de los ríos Maule, Achibueno y Longaví que fluyen paralelos a las líneas de flujo del acuífero, y teniendo como punto de salida el río Loncomilla al oeste, que drena este sector superficialmente hacia la desembocadura. En la zona sur del Maule, sin considerar

la subcuenca del río Cauquenes, el acuífero drena en la dirección Sureste-Noroeste en dirección del río Loncomilla (DGA, 2011).

| Componente | Entradas($m^3/s$) | Salidas ($m^3/s$) |
|---|---|---|
| Flujo Subterráneo | 11 | 2 |
| Recarga Superficial | 30 | 2 |
| Infiltración/ Afloramiento Ríos | 43 | 82 |
| TOTAL | 84 | 84 |

**Tabla 5: Balance hídrico resultante de la calibración. Modificada (DGA, 2011).**

- Parámetros elásticos

Para la determinación de los parámetros elásticos de los acuíferos asociados a la cuenca del rio Maule, se empleó la información de planos de construcción de aproximadamente 205 pozos, los cuales cuentan con antecedentes como estratigrafía del material atravesado, habilitación y datos de la prueba de bombeo de gasto variable (DGA, 2010).

| Sector | T ($m^2/d$) | K (m/s) |
|---|---|---|
| Río Claro desde San Rafael hacia agua arriba | 360 | $1,8*10^{-4}$ |
| Río Lircay- Talca | 570 | $2,1*10^{-4}$ |
| Río Maule desde conf. c/río Claro hacia aguas arriba y río Loncomilla hasta Villa Alegre | 110 | $7,3*10^{-5}$ |
| Río Putagán- Linares- Yerbas Buenas- Colbun | 760 | $2,9\text{-}10^{-4}$ |
| Río Loncomilla- Río Perquilauquén hasta conf. c/río Purapel -Río Ñiquén | 360 | $1,4\text{-}10^{-4}$ |

**Tabla 6: Resumen Transmisividades(T) y Permeabilidades(K) cuenca del Río Maule. Modificada (DGA, 2010)**

Los valores de permeabilidad en toda la cuenca del rio Maule son bastante similares, en torno a los $2*10^{-4}$ m/s, salvo en el sector sur de la cuenca donde se presentan valor inferiores al resto de la Región (DGA, 2010-2011). En relación con los coeficientes de almacenamiento, no existen datos de terreno para calcularlo. En razón de esto, se ha revisado la estratigrafía de los pozos que la poseen y se han estimado esos valores de acuerdo que fueron obtenidos principalmente de la observación de la estratigrafía de los pozos (DGA, 2010).

| Sector | S | K |
|---|---|---|
| Claro | 0,10-0,20 | $1,8*10^{-4}$ |
| Lircay Norte | 0,15-0,22 | $2,0*10^{-4}$ |
| Lircay Sur | 0,15-0,22 | $2,1*10^{-4}$ |
| Maule Norte | 0,15-0,20 | $7,5*10^{-4}$ |
| Maule Sur | 0,18-0,22 | $1,9*10^{-4}$ |
| Putagán Norte | 0,10-0,20 | $1,5*10^{-4}$ |
| Putagán Sur | 0,10-0,20 | $1,8*10^{-4}$ |
| Achibueno | 0,12-0,20 | $3,2*10^{-4}$ |
| Liguay- Longaví | 0,10-0,15 | $9,7*10^{-5}$ |
| Longaví Sur | 0,12-0,15 | $1,2*10^{-4}$ |
| Perquilauquén Norte | 0,08-0,12 | $1,1*10^{-4}$ |
| Ñiquén- Perquilauquén | 0,05-0,09 | $1,0*10^{-6}$ |

**Tabla 7: Coeficiente de almacenamiento y permeabilidad por sector acuífero. Modificada (DGA, 2010)**

### III. 5.2. 3. HIDROGEOLOGIA ACUÍFERO ESTEROS BELCO Y ARENAL

Los datos fueron obtenidos de “Modelación hidrogeológica de la Cuenca del Río Cauquenes, Región Del Maule” realizado por GCF Ingenieros en coordinación con la Dirección General de Aguas (DGA, 2013).

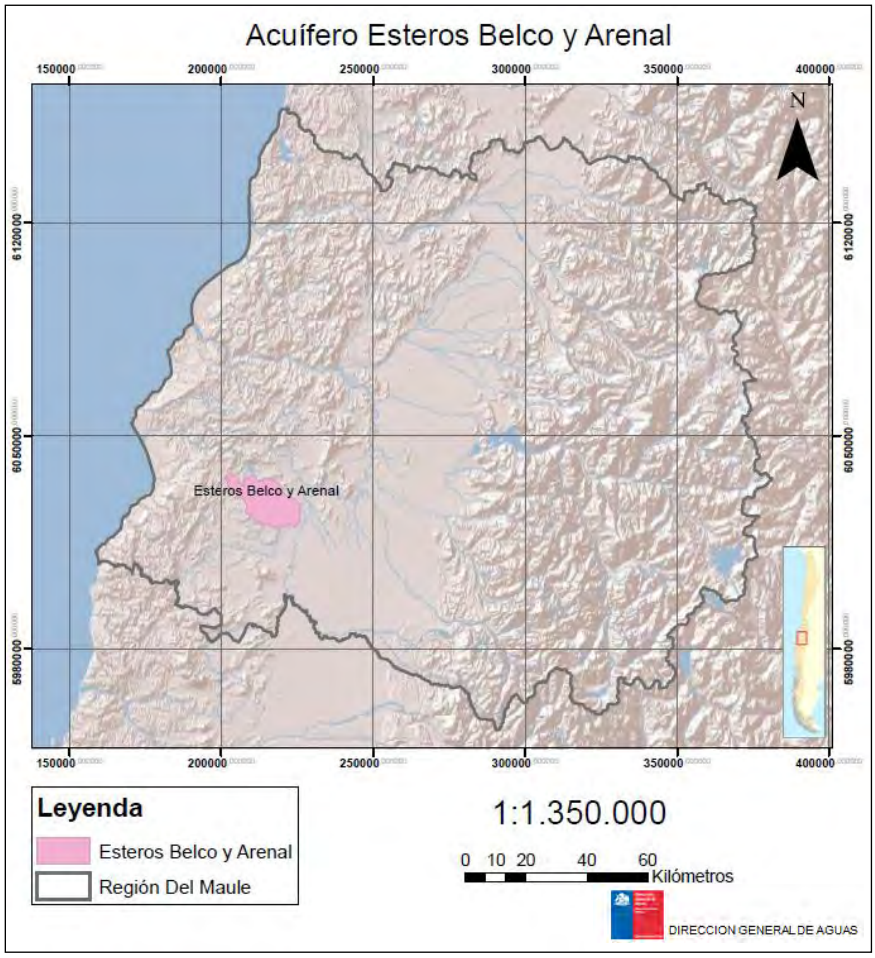



**Ilustración 13: Mapa "Acuífero Belco y Arenal", creación propia.**

- Unidades Hidrogeológicas

Los Esteros Belco y Arenal se encuentran principalmente en un área de Rocas plutónicas que conforman el basamento granítico local, estas rocas presentan escaso atractivo hidrogeológico, su permeabilidad es considerada como nula. Sin embargo, en algunos sectores se desarrolla cierta permeabilidad secundaria, debido a un fracturamiento (SERNAGEOMIN, 1995).

- Descripción del acuífero

Los diferentes afluentes del río Cauquenes conforman los valles de la Cordillera de la Costa, correspondientes a los del estero Liucura, río Cauquenes aguas arriba de Cauquenes, río del Rosal, estero Culenco, estero El Arenal y estero Belco. Estos valles tienen un relleno aluvial de granulometría relativamente fina,

especialmente a profundidades pequeñas, disminuyendo lentamente hacia abajo. El espesor del relleno, que alberga napas semiconfinadas, es de unos 45 m en la zona. (DGA, 1986a).

- Recarga y descarga

Las cuencas del Estero El Arenal y Estero Belco se han considerados como un solo sector acuífero, esto de acuerdo a los resultados de la gravimetría. La precipitación promedio en la cuenca de Los Esteros El Arenal y Belco es de 646 (mm) anual, la recarga asociada a las cuencas de los esteros El Arenal y Belco corresponderá a 438 l/s. Para determinar el flujo subterráneo se consideran datos de permeabilidad, gradiente de napa y geometría del acuífero, lo que da como resultado una recarga de 165 l/s.

Los ríos Purapel, Belco, El Arenal y San Juan, no cuentan con una red de canales organizada; en esas áreas existen captaciones superficiales que extraen recursos para su uso a nivel local. Además, el estero Belco y Arenal recargan superficialmente el río cauquenes.

- Parámetros elásticos

| Sector | k (m/s) |
|---|---|
| Estero Belco | 1,3*10-4 |
| Estero El Arenal | 1,2*10-4 |

**Tabla 8: Permeabilidad (K) del acuífero Esteros Belco y Arenal (DGA, 2013).**

### III. 5.2. 4. HIDROGEOLOGÍA ACUÍFERO CAUQUENES

Los antecedentes hidrogeológicos de la cuenca del río Cauquenes fueron obtenidos a partir del informe “Levantamiento de información hidrogeológica para modelación cuenca del río Maule” realizado por GCF Ingenieros Limitada (DGA, 2010). Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una interfaz SIG en ambiente MapObject, que permite el ingreso de información, preparación de los datos, construcción de topología y observación de los resultados del modelo de

simulación hidrológico operacional Modelo Genérico (M.A.G.I.C.) desarrollado por la Dirección General de Aguas.

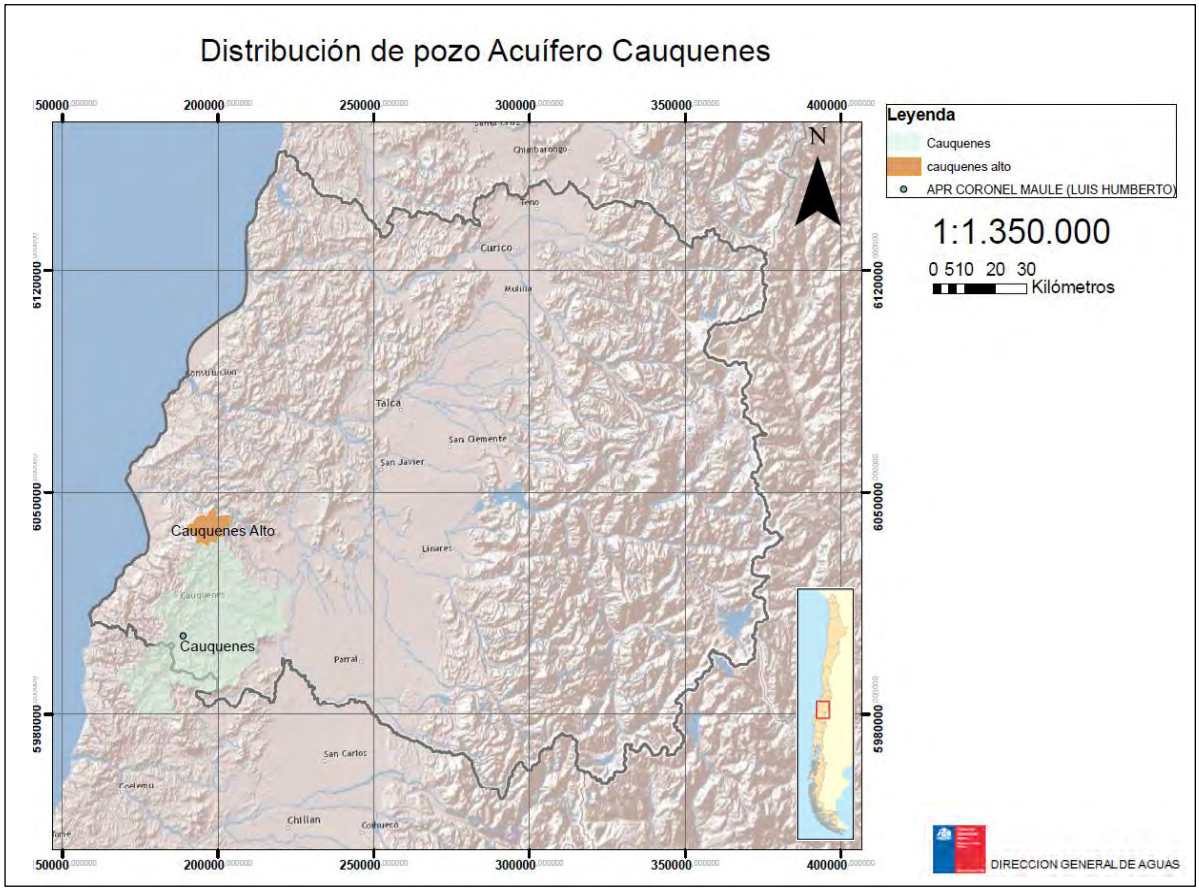



**Ilustración 14: Mapa "Distribución de pozo Acuífero Cauquenes". En esta imagen se incluye tanto Cauquenes Norte como Sur. Solamente Cauquenes Norte es preliminar. Creación propia.**

- Unidades Hidrogeológicas

Las rocas metamórficas y sedimentarias de la zona no son de importancia hidrogeológica, ya que poseen una permeabilidad muy baja o ausente. En cuanto a las rocas graníticas, también tienen una nula importancia. Los depósitos piroclásticos tienen una importancia hidrogeológica muy baja, debido a que la permeabilidad es baja o ausente. Los únicos depósitos que tienen una importancia hidrogeológica relativa mayor son los depósitos no consolidados de relleno, ya que tienen una permeabilidad primaria en formación porosa.

La cuenca del río Cauquenes, se divide en las siguientes subcuencas de aporte superficial: Estero El Arenal, Esteros Culenco y Las Garzas, Río Tutuvén, Esteros Los Coipos y Liucura, Estero Taqueral, Estero Camarico, Ríos San Juan y Huedque (DGA, 2013).

- Descripción del acuífero

En el valle del río Cauquenes, existen dos niveles acuíferos, de los cuales uno se encuentra a partir de la superficie del terreno con características freáticas y se extiende hasta unos 23 m de profundidad, mientras el otro se encuentra entre los 24 y 39 m. La parte oriental del valle presenta depósitos de conglomerados con un espesor de unos 50 m. En el lecho del río se han reconocido espesores de sedimentas del orden de 50 m compuestos por fracciones gruesas y medias del tipo ripio, grava y arena. En las terrazas del río existe un estrato arcilloso, que se repite a una profundidad intermedia y en la base de la perforación.

Según el estudio realizado en 2013, el flujo de las aguas subterráneas se desarrolla de la siguiente forma en el sistema Cauquénes- Purapel.

- Recarga y descarga

Según los antecedentes del catastro de captaciones realizado en julio 2013, se determinó que la tasa actual de extracción declarada por los usuarios es de 16.37 $Mm^3$/año (invierno + verano), considerando las extracciones desde pozos, norias, drenes y punteras. En términos de volumen, la explotación más relevante del acuífero se produce en verano, siendo el riego el principal destino de las aguas, seguido de muy lejos por el abastecimiento de agua potable. En el período invernal, la extracción de aguas subterráneas baja considerablemente, en particular el riego que se reduce a menos de un 5% de la extracción del período verano. El consumo en agua potable se reduce casi en un 50% (DGA, 2013).

La recarga corresponde a las provenientes del riego y las precipitaciones. El área de interés presenta condiciones favorables, en cuanto a la escorrentía superficial, puesto que en los períodos invernales, las precipitaciones originan flujos en las

quebradas, esteros y ríos existentes en el área. En los meses veraniegos, sólo se obtienen recargas menores, provenientes del riego, posibilitado por la regulación del embalse Tutuvén. La recarga promedio en 2013 resultó en 786 L/s (DGA, 2013).

En cuanto a la descarga, según los derechos otorgados y derechos [otorgados + pendientes], respectivamente, se puede concluir que el sistema sustenta la extracción de del 41.3 % de los derechos otorgados (como caudal continuo, 408 l/s de un total de 989 l/s). Por otro lado, según el escenario 5, es posible bombear un 32 % del total otorgado + pendiente (513 l/s de un total de 1598 l/s) (DGA, 2013).

- Parámetros elásticos:

El área de interés presenta condiciones favorables, en cuanto a la escorrentía superficial. Sin embargo, una porción menor de dicha disponibilidad superficial, llega al sistema acuífero como recarga efectiva. Esto ocurre debido a que la mayor parte del área estudiada, tiene una capacidad de almacenamiento y conducción reducida (volumen acuífero, coeficiente de almacenamiento (S) y conductividad hidráulica (k)).

| Sector | S |
|---|---|
| Cauquenes Norte | 0,05-0,10 |
| Cauquenes Sur | 0,09-0,15 |

**Tabla 9: Coeficiente de almacenamiento, para los sectores Cauquenes Norte y Cauquenes Sur (DGA, 2010)**

| Sector | T ($m^2/d$) | K (m/s) |
|---|---|---|
| Río Cauquenes | 390 | $1,4*10^{-4}$ |

**Tabla 10: Transmisividad y permeabilidad (DGA, 2010).**

| Sector | K (m/s) |
|---|---|
| Río Tutuvén | $2,5*10^{-4}$ |
| Río Huedque | $1,8*10^{-4}$ |
| Río Cauquenes | $2,1*10^{-4}$ |
| Estero Taqueral | $2,2*10^{-5}$ |
| Estero Los coipos | $4,0*10^{-5}$ |
| Estero Camarico | $1,8*10^{-4}$ |

**Tabla 11: Valores por Sector acuífero de transmisividad. (DGA, 2013)**

## III. 5.2. 4. HIDROGEOLOGÍA ACUÍFEROS PRELIMINARES

### III. 5.2.4.1ACUÍFERO PRELIMINAR: PURAPEL

Dentro de la Cuenca del Río Maule, se desarrolla el acuífero Purapel, hacia el Nororiente de la depresión. A continuación se describirá de forma separada el Acuífero del Maule, debido a que según el estudio de la DGA 2015 se considera como un sistema preliminar independiente.

Los datos fueron obtenidos de “Levantamiento de información hidrogeológica para modelación de la cuenca del río Maule”, 2010.

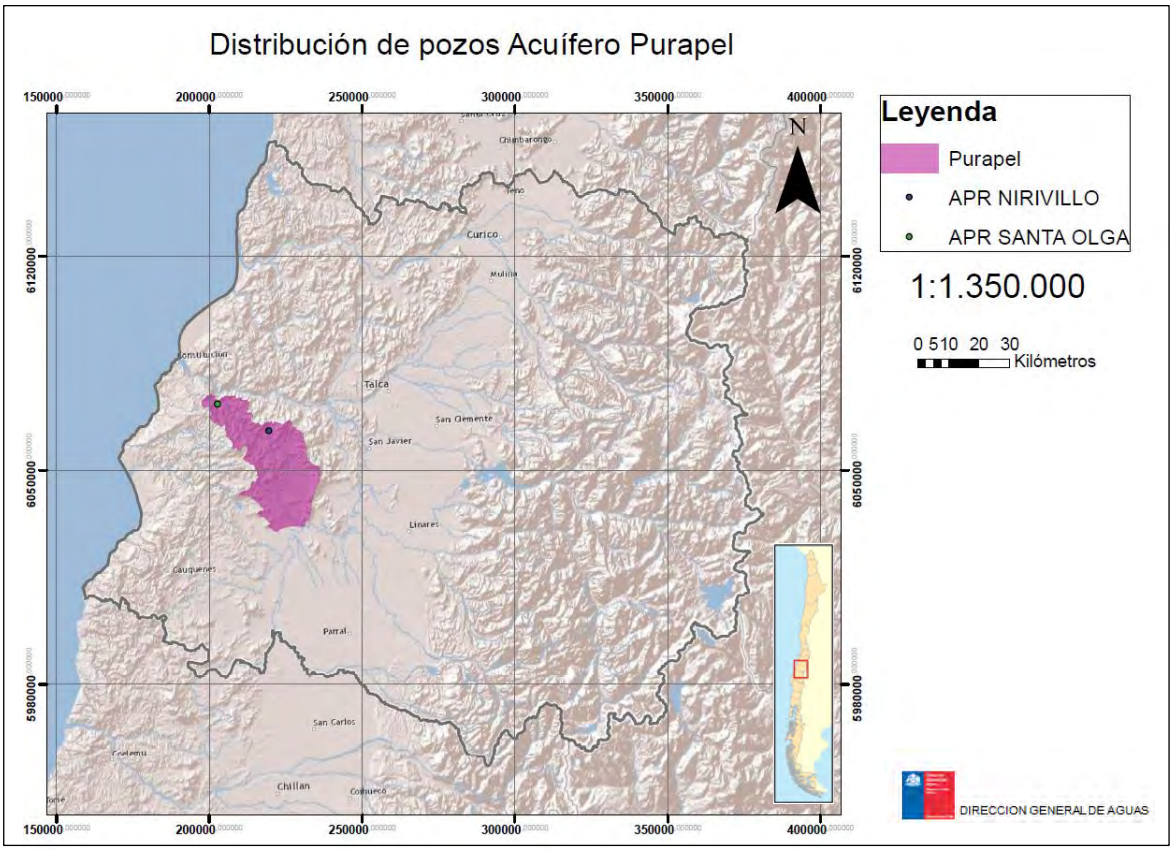



Ilustración 15: Mapa "Distribución de pozos Acuífero Purapel". Creación propia.

- Unidades hidrogeológicas

La primera unidad está compuesta por rocas metamórficas, sedimentarias y plutónicas e hipabisales: intrusivos graníticos, metareniscas, pizarras, filitas, esquistos, gneises, anfibolitas, lutitas cuarcita, las cuales son basamiento impermeable. Permeabilidad nula en roca (DGA,1986a).

La segunda son depósitos no consolidados de relleno. Sedimentos fluviales, glaciares, aluviales, lacustres, aluvionales, eólicos con una permeabilidad primaria, en formación rocosa. Se presentan zonas de acuíferos de productividad elevada a muy elevada. (DGA,1986a).

- Descripción acuífero

Dentro de la cuenca Purapel, se identifican las sub-cuencas de los Estero Sauzal, Mirador, Lo Miranda, Requehua y Los Nilches (DGA, 2010).

En la hoya del río Purapel se estima que debe existir desde la superficie una zona acuífera relativamente potente y libre, con granulometría en general media y fina. (DGA,1986a).

Dada la presencia de roca impermeable muy cerca de la superficie en los sectores inferiores del valle y aflorando en las lomas que existen, es posible que se tenga acuíferos compuestos de arena y grava entre los flancos del valle y los umbrales rocosos. (DGA,1986a).

- Parámetros elásticos

| Sector | T($m^2$/d) | K(m/s) | S |
|---|---|---|---|
| Purapel | 10 | $6,1*10^{-6}$ | 0,03-0,08 |

**Tabla 12: Transmisividad (T), Permeabilidad (K) y Coeficiente de almacenamiento (S) sub- cuenca Purapel de la cuenca del Río Maule. Modificada (DGA, 2010).**

### III.5.2.4.2 ACUÍFERO COSTERO LOS PUERCOS

Los antecedentes hidrogeológicos del acuífero costero Los Puercos, fueron obtenidos a partir del siguiente trabajo. “Modelación Hidrogeológica Cuenca Estero Los Puercos, Región del Maule”. Realizado por GCF Ingenieros en coordinación con la División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas. Con el objetivo principal de este estudio fue analizar para 3 cuencas pluviales de la hoya hidrográfica del río Maule (Catillo, Los Puercos y Purapel), el comportamiento del modelo SIMED (Modelo de simulación de escorrentía diaria) y contrastarlo con el modelo Sacramento, usado en la cuenca del río Catillo.

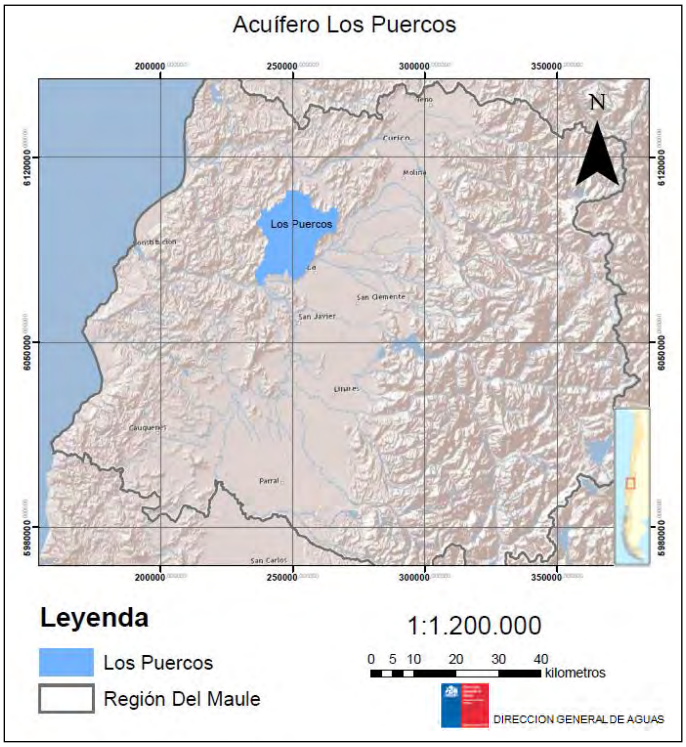



**Ilustración 16: Mapa "Acuífero Los Puercos". Creación propia.**

- Descripción del acuífero:

El canal Pencahue es la principal fuente de recursos de agua para riego en la cuenca del estero los Puercos. Los recursos hídricos provienen de un trasvase desde el río Lircay. De norte a sur, se cuentan 7 subcuencas principales, afluentes al estero los Puercos: Estero Las Palmas, Estero Tapihue, Estero Litú, Estero Pichingüileo, Estero Botalcura, Estero Tulucura y Estero Cunculén.

- Propiedades elásticas

| Sector | S | T($m^2$/d) | K(m/s) |
|---|---|---|---|
| Los Puercos | 0,03-0,08 | 110 | $7,3*10^{-5}$ |

**Tabla 13: Coeficiente de almacenamiento (S), transmisividad y permeabilidad acuífero Los Puercos (DGA, 2013)**

| Sector | K(m/s) |
|---|---|
| Estero Cuculén | $1,2*10^{-4}$ |
| Esteo Botalcura | $8,1*10^{-5}$ |
| Estero Tulucura | $8,1*10^{-5}$ |
| Estero Los Puercos | $8,1*10^{-5}$ |
| Estero Litú | $8,1*10^{-5}$ |
| Estero Pichigulleo | $8,1*10^{-5}$ |
| Estero Tapihue | $8,1*10^{-5}$ |
| Estero Las Palmas | $8,1*10^{-5}$ |

**Tabla 14: Permeabilidad para cada sub-cuenca del acuífero Los Puercos. Modificada (DGA, 2013)**

- Recarga y descarga

Las recargas se relacionan sólo con las recargas superficiales distribuidas, que corresponden a las provenientes del riego y de las precipitaciones. Además de recargas por cauces naturales, canales y flujos subterráneos (DGA, 2013).

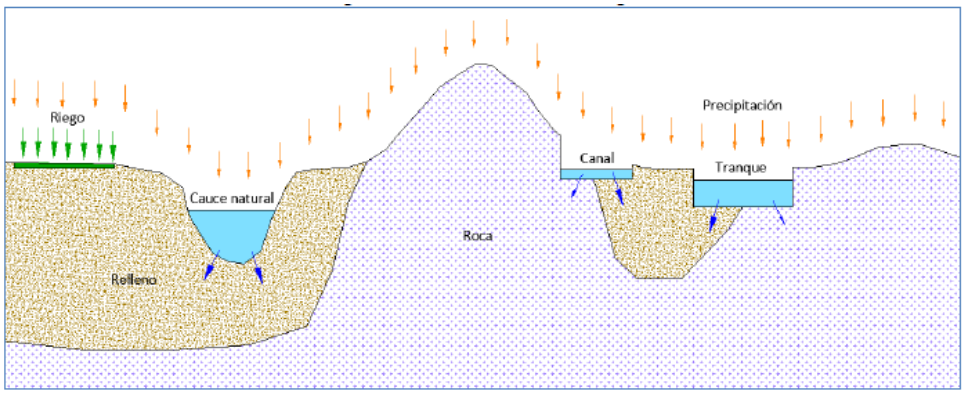



**Ilustración 17: Esquema idealizado de las fuentes de recarga en el acuífero Los Puercos. Extraído (DGA, 2013)**

Según lo extraído del estudio del año 2013, se concluyó que para el período con riego (desde 1999), la recarga promedio es 280 l/s. Mientras que la descarga, está relacionada con los derechos otorgados y derechos [otorgados + pendientes], respectivamente, de los cuales se debió reducir progresivamente los caudales

impuestos para evitar descensos excesivos de los niveles. Los valores reducidos de las propiedades físicas de los medios existentes en el área (k y S), imposibilitan extracciones prolongadas y continuas de caudales sobre 10 a 20 l/s (dependiendo del sector). No obstante, es posible extraer desde los pozos con capacidades suficientes, caudales de esas magnitudes de forma intermitente, como ocurre en los pozos que se usan para riego, que bombean de forma intensa sólo en verano (DGA, 2013).

La extracción máxima admisible de forma continua y sustentable varía entre 110 y 115 l/s. Probablemente se podría llegar a un caudal total de 150 l/s si se incorporan captaciones bien distribuidas en la cuenca pero captando caudales pequeños (<2 l/s) y estacionalmente variables (uso riego, variable entre invierno y verano) (DGA, 2013).

#### III.5.2.4.3 ACUÍFERO COSTERO PLAYA JUNQUILLAR

Los antecedentes hidrogeológicos del acuífero costero Playa Junquillar, fueron obtenidos a partir del siguiente trabajo “Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins, Del Maule y del Bío-Bío”, realizado por Aqualogy Medioambiental Chile S.A en coordinación con Dirección General de Aguas. Con el objetivo principal el levantamiento de la información hidrogeológica precisa para desarrollar modelos conceptuales de las cuencas y acuíferos de estudio, que permitan la creación de una herramienta de gestión basada en el funcionamiento hidrológico e hidráulico, así como en la disponibilidad de recursos hídricos de los mismos.

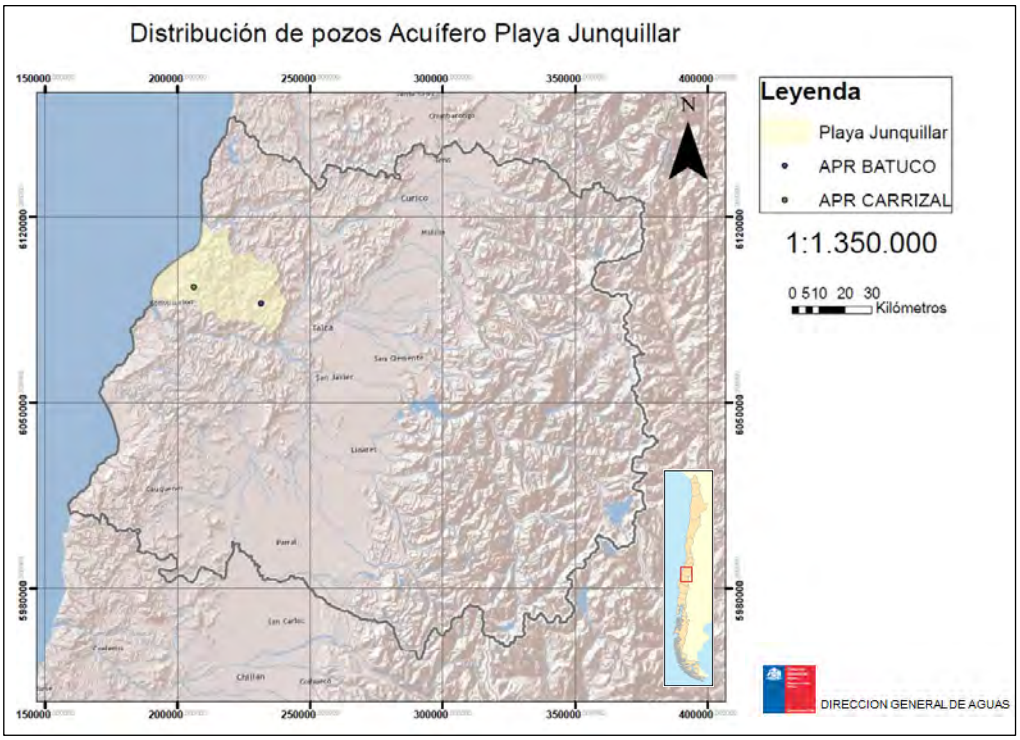



**Ilustración 18: Mapa "Distribución de pozos Acuífero Playa Junquillar". Creación propia.**

- Descripción del acuífero

En el área preliminar del acuífero Playa Junquillar se definieron anteriormente dos sectores acuíferos relevantes: Dunas de Putú y Aluvial Huenchullamí (DGA, 2014).

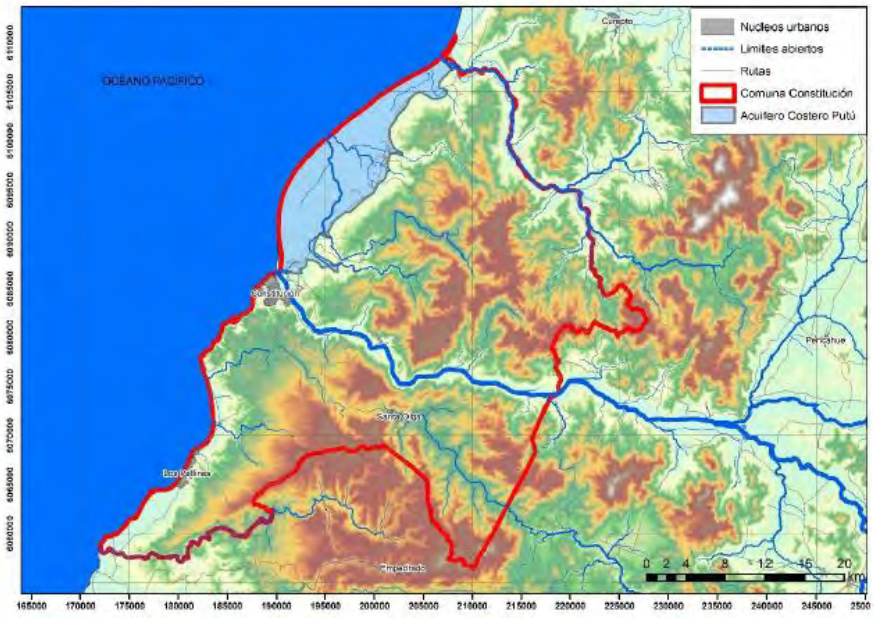



**Ilustración 19: Situación geográfica del sector acuífero Dunar de Putú. Extraído (DGA, 2014)**

En el área de Dunas de Putú se tienen formaciones con diferentes permeabilidades, por un lado se tienen tramos con permeabilidad media- alta, en donde se incluyen en este grupo las dos formaciones cuaternarias (Q1 y Qe). Son de naturaleza detrítica y permeabilidad primaria. Por otro lado, tramos de permeabilidad baja a muy baja, incluyendo los materiales paleozoicos presentes en el área y las formaciones Pz4a y Pz4, su permeabilidad es secundaria por fracturación principalmente (DGA, 2014).

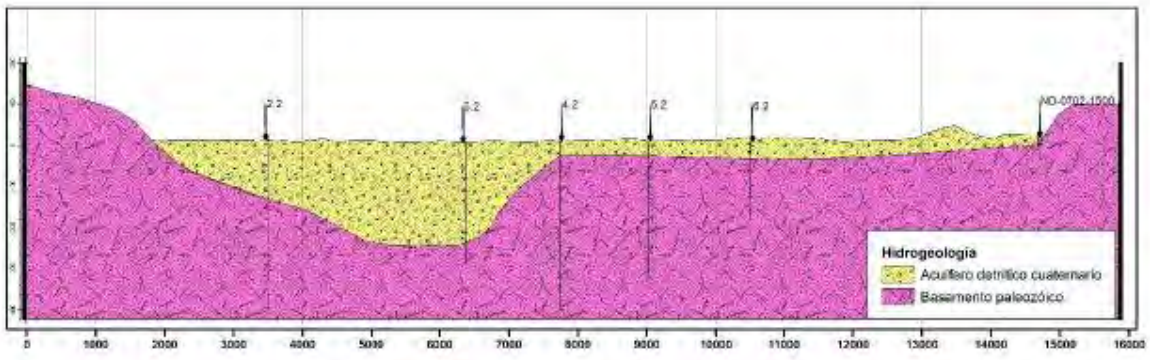



**Ilustración 20: Perfil N-S de geofísica en el acuífero Costero Dunar de Putú. Extraído (DGA,2014).**

En Aluvial Huenchullamí se tienen tramos permeables únicamente en las formaciones cuaternarias del aluvial del río Huenchullamí, las cuales presentan un porosidad primaria con valores medios y altos de permeabilidad. Son las constituyentes del acuífero. Los tramos de baja y muy baja permeabilidad incluyen las formaciones Pz4a, Pz4b y CPg. Son materiales con permeabilidades muy bajas de naturaleza secundaria por fisuración y diaclasado. Constituyen el impermeable de base del acuífero (DGA, 2014).

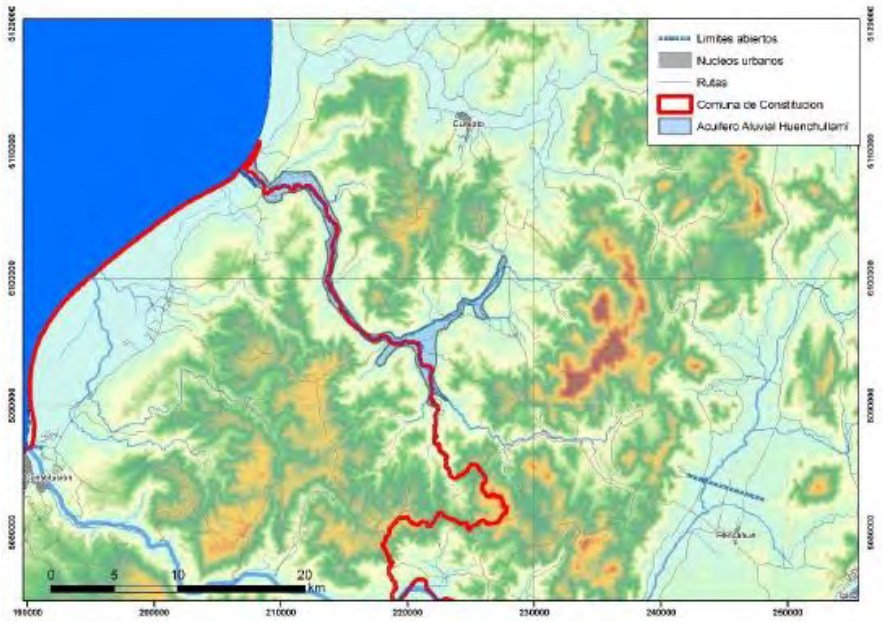



Ilustración 21: Situación del acuífero Aluvial de Huenchullamí. Extraído (DGA, 2014)

- Parámetros elásticos

En el sector de Acuífero Dunas de Putú, se tienen los siguientes valores:

| Sector | T($m^2$/día) | S |
|---|---|---|
| Dunas de Putú | 23,79 | 0,4 |

Tabla 15: Transmisividad y coeficiente de almacenamiento (S) Dunas de Putú. Modificado (DGA, 2014).

En Aluvial Huenchullamí no se dispone de datos de aforos realizados en expedientes en este acuífero. Atendiendo a lo recogido en la bibliografía, en sectores específicos aparecen amplios rellenos de arenas de algún interés hidrogeológico, corroborado por algunos ensayos específicos realizados en el

lecho, es indicativo de que esta cuenca resulta interesante desde el punto de vista hidrogeológico (DGA, 2014).

- Recarga y descarga

Para el acuífero Dunas de Putú la recarga del acuífero es considerada infiltración directa muy alta debido a la permeabilidad de la cobertera superficial, infiltración subsuperficial procedente del borde este del acuífero en contacto con el basamento, e infiltración de retorno de riego. En cuanto a la descarga computan los bombeos escasos (90,88 l/s), afloramientos en forma de masas de agua en arroyos y láminas de agua en la zona de dunas, y las salidas al mar (DGA, 2014).

Para Aluvial Huenchullamí la recarga viene desde la infiltración directa, infiltración procedente del cauce en el tramo alto del cauce, infiltración subsuperficial procedente del basamento en los bordes del aluvial y retornos de riego. Las salidas computadas comprenden los bombeos al 100% y afloramientos a la zona de Putu y cauce bajo (DGA, 2014).

#### III.5.2.4.4 ACUÍFERO COSTERO DUNAS DE CHANCO

Los antecedentes hidrogeológicos del acuífero costero Dunas de Chanco, fueron obtenidos a partir del siguiente informe. “Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins, Del Maule y del Bío-Bío”, realizado por Aqualogy Medioambiental Chile S.A en coordinación con Dirección General de Aguas. Con el objetivo principal el levantamiento de la información hidrogeológica precisa para desarrollar modelos conceptuales de las cuencas y acuíferos de estudio, que permitan la creación de una herramienta de gestión basada en el funcionamiento hidrológico e hidráulico, así como en la disponibilidad de recursos hídricos de los mismos.

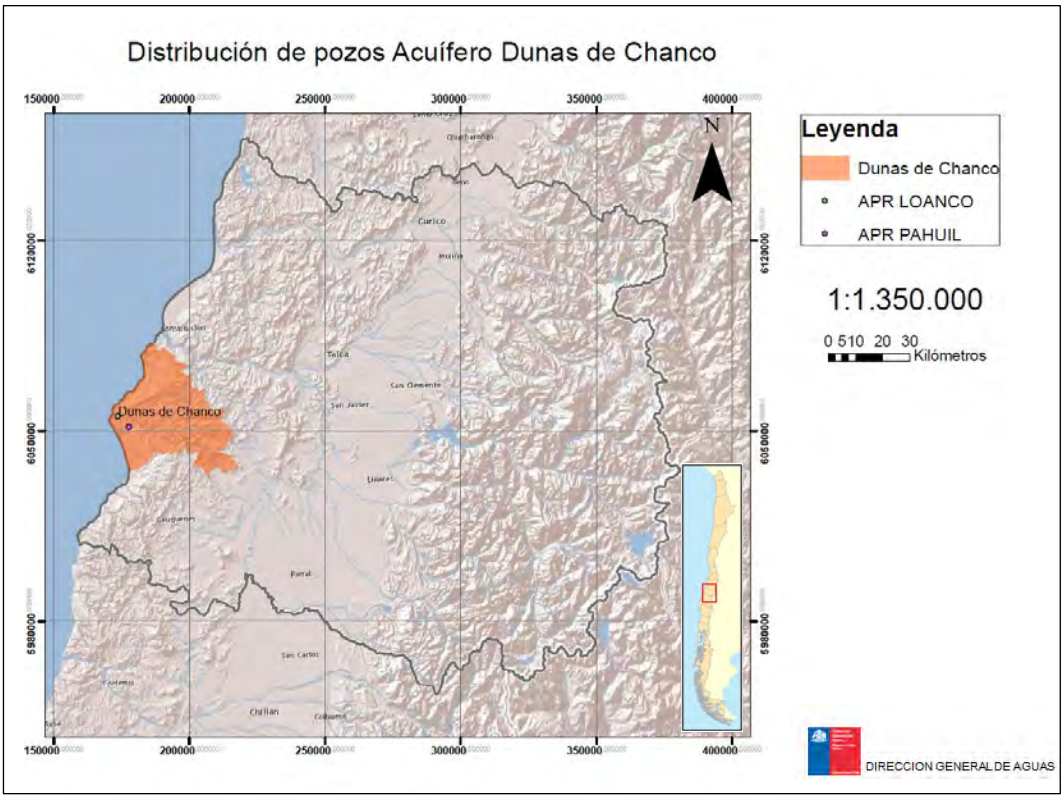



**Ilustración 22: Mapa "Distribución de pozos Acuífero Dunas de Chanco". Creación propia.**

En esta área existe un sector acuífero relevante perteneciente a la cuenca del Río Reloca. Este se encuentra al sur de la zona de estudio, especialmente en aquellos sectores de mayor desarrollo de los aluviales, como el área próxima a la desembocadura y la zona de Empedrado (DGA, 2014).

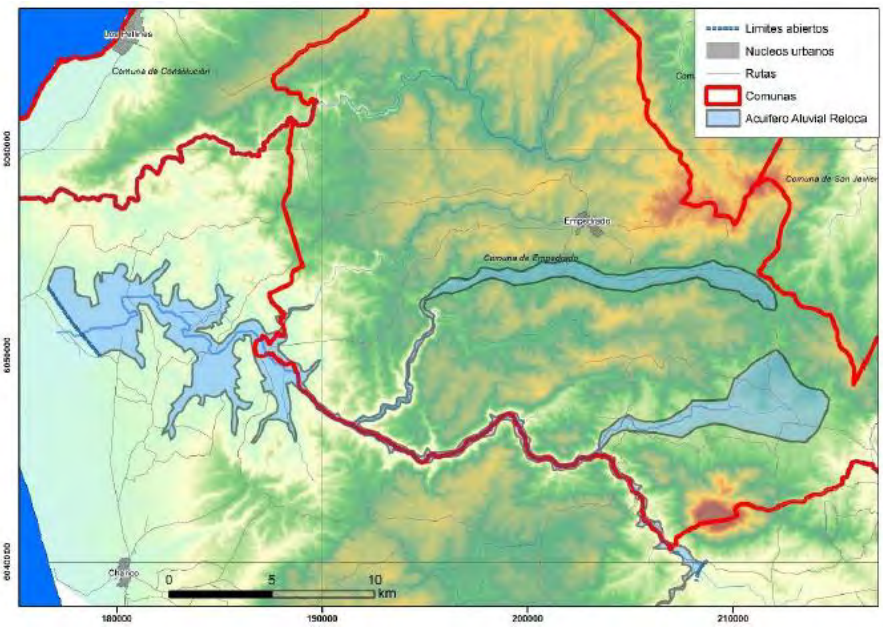



**Ilustración 23: Situación del sector acuífero Aluvial Reloca. Extraído (DGA, 2014).**

Se consideran tramos permeables a las formaciones aluviales del río y cuaternarias marinas de la desembocadura. Igualmente la formación Ks1m, presenta un conjunto de litologías que le confieren una permeabilidad aceptable. Mientras que tramos de baja y muy baja permeabilidad afloran en el entorno del acuífero únicamente las pizarras de la formación Pz4b, las cuales deben de disponerse inferiormente a la formación cretácica, y por tanto representa la base impermeable del conjunto acuífero (DGA, 2014).

- Parámetros elásticos

No se dispone de datos aportados por expedientes que permitan valorar los parámetros hidráulicos de estos acuíferos con detalle. Sin embargo, de acuerdo a los antecedentes (Diagnóstico de recursos hídricos en secano interior y costero en VI a VIII Región), los valores de transmisividades, dada la formación acuífera, cabe esperar valores muy variables entre 5 y 1000 $m^2$/día. El caudal máximo de explotación alcanzado por los sondajes es 23 L/s (DGA, 2014).

- Recarga y descarga

La recarga del acuífero corresponden a la infiltración directa, infiltración subsuperficial procedente del basamento de baja permeabilidad a través de los bordes del aluvial y el retorno de riego. Mientras que las descargas se producen por bombeos, muy escasos de acuerdo a los datos censados y probablemente mayores en la realidad, y el total de salidas naturales del acuífero computadas como salidas laterales a través del límite abierto al oeste en el que el acuífero continúa hasta el mar (DGA, 2014).

La información de los acuíferos Vichuquén, Nilahue Alto y Pelluhue es deficiente en cuanto a las características hidrogeológicas.

## III.6 RESTRICCIÓ N Y VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

### III. 6.1 RESTRICCIÓN ACUÍFEROS

Los antecedentes sobre restricciones en los acuíferos expuestos a continuación fueron extraídos de los siguientes informes:

- “Informe técnico DARH N°45 – Evaluación de la disponibilidad de Recursos Hídricos Subterráneos en el Sector Acuífero Estero Belco y Arenal” (DGA, 2015).
- “Informe técnico DARH N°44 – Evaluación de la disponibilidad de Recursos Hídricos Subterráneos en el Sector Acuífero Teno- Lontué” (DGA, 2015).

Entre las funciones de la Dirección General de Aguas se encuentra asegurar la explotación sustentable del recurso, que no genere menoscabo de derechos de terceros y que no limite innecesariamente su aprovechamiento. De acuerdo con esto, se debe hacer una evaluación de la disponibilidad de los recursos hídricos.

Para constituir derechos de aprovechamiento de aguas en un sector acuífero, lo primero que se hace es estudiar el volumen sustentable, es decir, el volumen que permite un equilibrio de largo plazo del sistema. Cuando se ha otorgado una cantidad de derechos de agua tal que se alcanza la totalidad del volumen sustentable se declara un área con restricción.

Para Los Esteros Belco y Arenal, según el resultado de oferta hídrica, realizada en septiembre del 2013, corresponde a 301,5 l/s.

| Sector acuífero | $m^3$/año |
|---|---|
| Esteros Belco y Arenal | 9.508.104 |

**Tabla 16: Oferta de Recursos Hidricos en el Sector acuífero Esteros Belco y Arenal. Modificada (DGA, 2015).**

En cuanto a la demanda comprometida, solo se consideran los derechos ya otorgados y los pendientes en la zona, al 3 de marzo del 2015 se tienen los siguientes datos.

| Sector acuífero | $m^3$/año |
|---|---|
| Esteros Belco y Arenal | 9.857.341 |

**Tabla 17: Demanda comprometida en el Sector acuífero Esteros Belco y Arenal. Modificada (DGA, 2015).**

En el acuífero Mataquito en el Sector Teno- Lontué la situación es similar. La oferta hídrica a septiembre del 2014 es la siguiente:

| Sector acuífero | $m^3$/año |
|---|---|
| Teno- Lontué | 362.664.000 |

**Tabla 18: Oferta de Recursos Hidricos en el Sector acuífer Mataquito- Teno Lontué Modificada (DGA, 2015).**

En cuanto a la demanda comprometida en derechos definitivos, al 28 de febrero de 2015 se tiene la siguiente tabla:

| Sector acuífero | $m^3$/año |
|---|---|
| Teno- Lontué | 466.051.697 |

**Tabla 19: Demanda comprometida en el Sector acuífer Mataquito- Teno Lontué. Modificada (DGA, 2015).**

En el sector acuífero de aprovechamiento común Mataquito (Sector Teno- Lontué) y en Esteros Belco y El Arenal, la demanda de aguas subterráneas comprometida supera el volumen sustentable de recursos hídricos, estimándose que existe el riesgo de grave disminución del acuífero con el consiguiente perjuicio de derechos

ya establecidos en él, por lo cual según el artículo 65 del Código de Aguas, letra b) del Decreto Supremo N° 203, que aprueba el Reglamento sobre Normas de Explotación de Aguas Subterráneas, ha de ser “declarado área de restricción” para nuevas extracciones de aguas subterráneas.

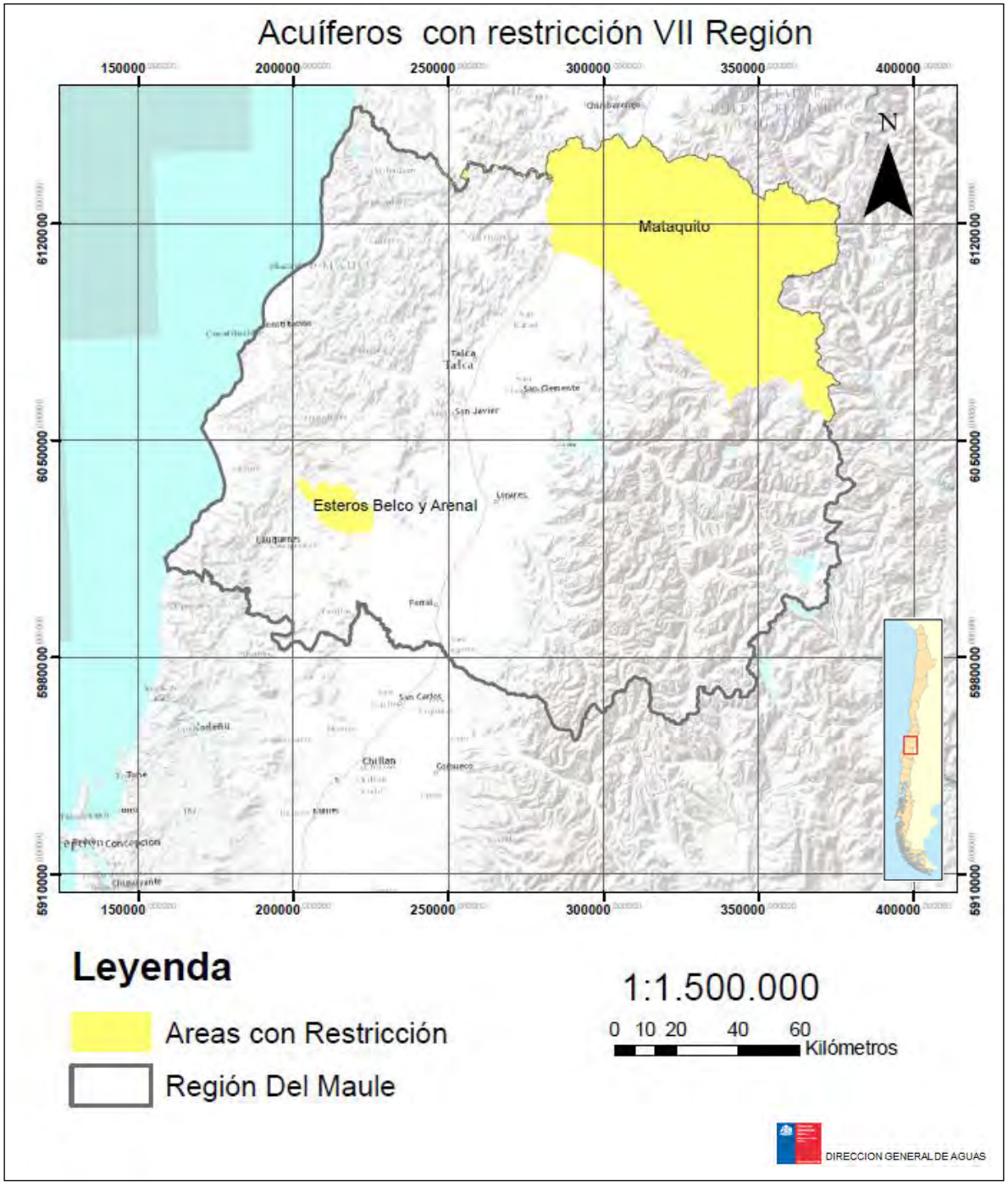



Ilustración 24: Mapa “Acuíferos con restricción VII Región”, elaboración propia.

### III. 6.2 VULNERABILIDAD ACUÍFEROS

Los datos de vulnerabilidad de la Región Del Maule, fueron obtenidos a partir de los siguientes trabajos:

“Vulnerabilidad de los acuíferos en los Ríos Limarí y Maule mediante las metodologías GOD y BGR”, realizado por María Carolina Paz Espinoza Contreras, 2005. Con el objetivo de determinar entre los métodos GOD y BGR cuál es el más apropiado para evaluar la vulnerabilidad de dos acuíferos, ubicados en las cuencas de los ríos Limarí y Maule.

“Diagnóstico para desarrollar plan de riego cuenca del Maule”, realizada por Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental en coordinación con la Dirección General de Aguas, 2015. Con el objetivo de contribuir al uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos para riego en la cuenca, mediante la implementación de un plan de gestión de aguas de riego y drenaje, diseñado y validado con la participación de los/as usuarios/as y agentes regionales y locales.

Por su parte, El Servicio Nacional de Geología y Minería define vulnerabilidad como “una medida cualitativa o cuantitativa, en general expresada mediante un índice sin dimensiones, de la mayor o menor facilidad con que se puede infligir ese perjuicio”. Se han realizado mapas de vulnerabilidad en varias regiones de Chile, aplicando tanto el método GOD como el BGR, que corresponden a los métodos más usados en el país (Espinoza, 2005).

Por lo general se consideran para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, la profundidad del nivel estático y la litología de la zona no saturada (Espinoza, 2005).

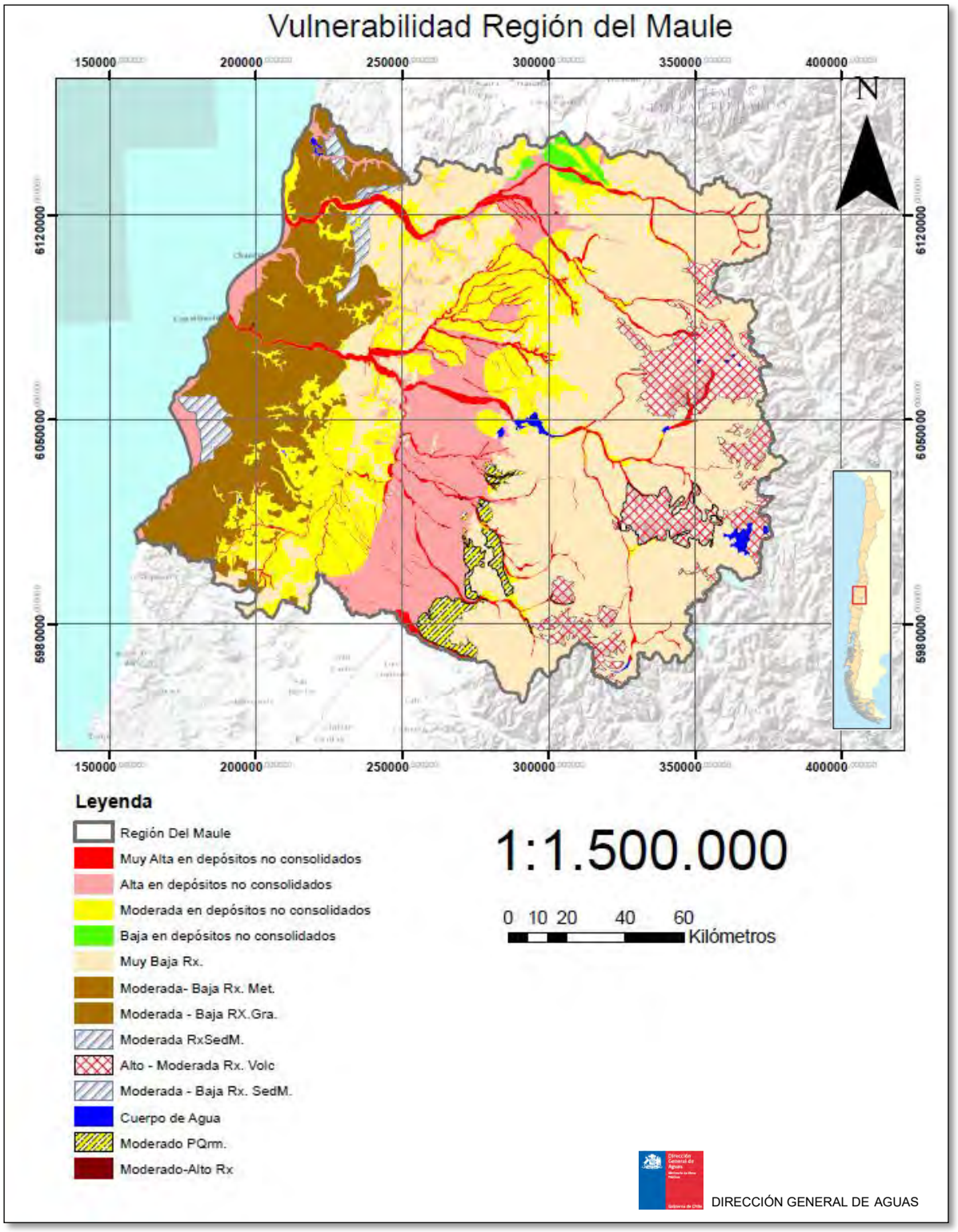



**Ilustración 25: Mapa "Vulnerabilidad Región del Maule", editado de Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y Sitios prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad en la Región del Maule, (SERNAGEOMIN, 2005)**

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

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

**Tabla 20: Descripción de cada categoría de vulnerabilidad. Modificado de SERNAGEOMIN (Espinoza, 2005)**

Para efectos de este trabajo, se consideraran los resultados obtenidos mediante el método BGR, debido a que según la información recabada, este método es más útil tanto para altas como bajas precipitaciones. En esta zona, las principales variaciones en los resultados entregados por los métodos se deben a la influencia del factor de recarga. Para montos de recarga mayores a 300 mm/año, los rangos de vulnerabilidad obtenidos son más conservadores. Para recargas mayores a la mencionada, la vulnerabilidad varía de baja a moderada, de moderada a alta y de alta a muy alta, dependiendo del método de que se trate (Espinoza, 2006).

En la zona de estudio también existen diferencias puntuales en los valores de vulnerabilidad, los valores de vulnerabilidad altos y muy altos se presentan principalmente en los depósitos fluviales, abarcando la mayor parte del relleno sedimentario. En el sector norte del área de estudio predominan valores de vulnerabilidad bajos, asociados a acuíferos cubiertos, mientras que hacia el este

se encuentran valores de vulnerabilidad moderados, asociados a granulometrías heterogéneas con niveles estáticos superiores a los 20 m. También en el sector norte se encuentran sectores de vulnerabilidad muy baja, debido a que se presentan niveles estáticos más profundos (Espinoza, C., 2005).

En el sector occidental del área de estudio, en las unidades de roca se han estimado valores de vulnerabilidad muy bajos a bajos, mientras que en los depósitos cineríticos, ubicados junto a las unidades de roca, y en depósitos fluvioaluviales de valles interserranos y coluviales se han estimado valores de vulnerabilidad medios a bajos (Espinoza, C., 2005).

| Vulnerabilidad | Porcentaje % |
|---|---|
| muy alta | 35,3 |
| alta | 28,79 |
| moderada | 13,59 |
| baja | 16,8 |
| muy baja | 0 |
| no coinciden | 5,41 |

**Tabla 21: Porcentaje de categoría de vulnerabilidad. Editada de (Espinoza, 2005).**

A continuación se detalla la vulnerabilidad de cada acuífero de la VII Región:

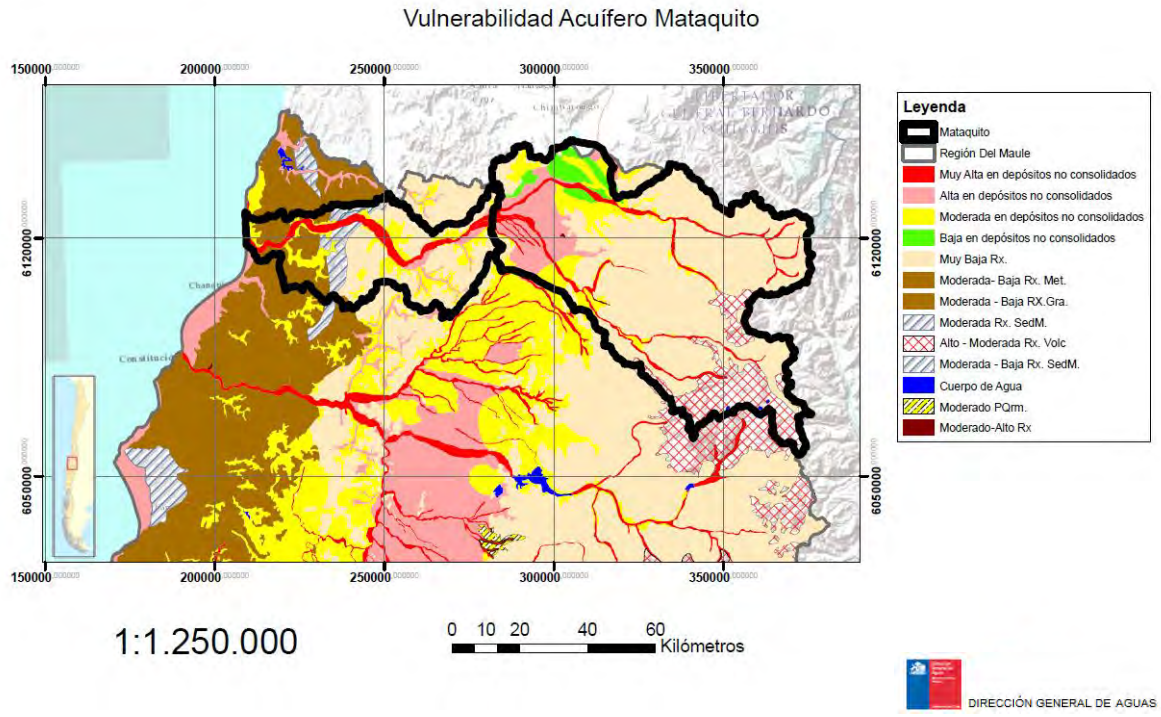



**Ilustración 26: Vulnerabilidad del acuífero SHAC Mataquito. Modificado. (SERNAGEOMIN, 2005)**

Esta área presenta una vulnerabilidad muy baja en la mayor parte del área del Sector Teno- Lontué, exceptuando las rocas volcánicas y los depósitos no consolidados del río Mataquito que presentan alta vulnerabilidad. En el área noroeste, cercano a la línea de costa las rocas son más susceptibles a contaminación, aumentando gradualmente la vulnerabilidad.

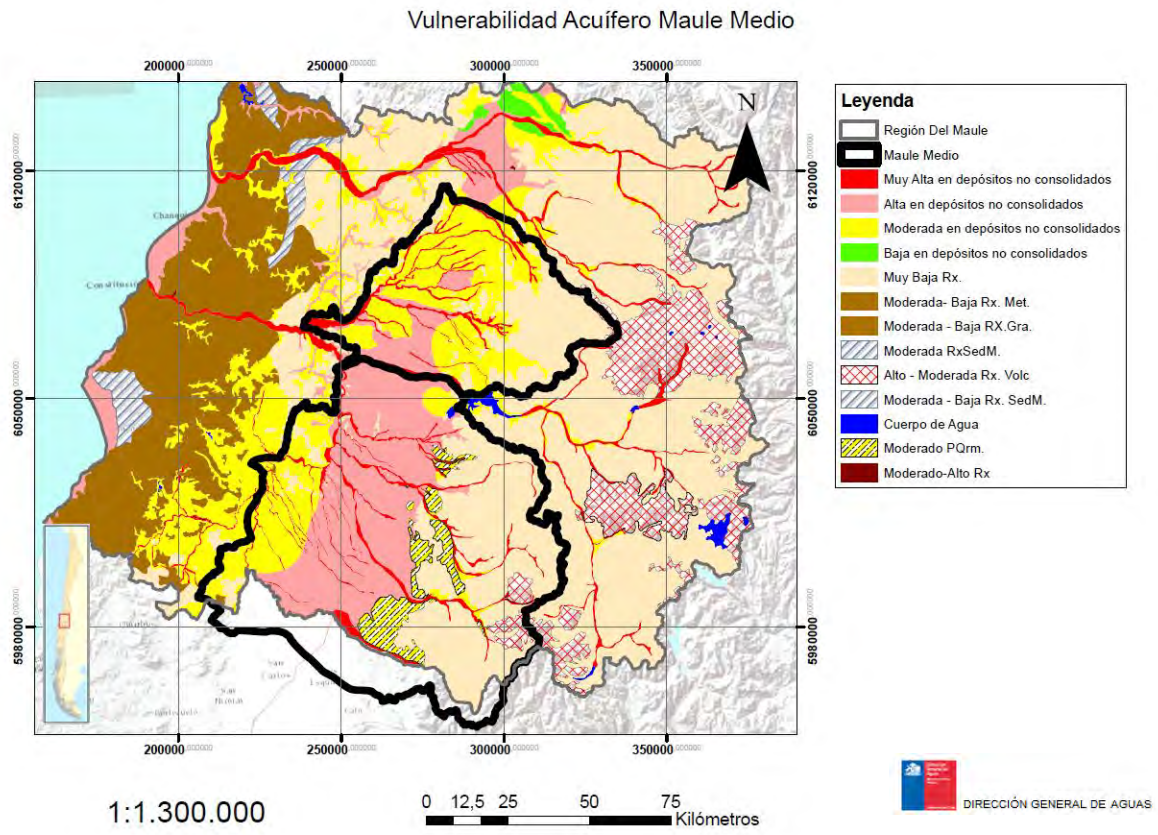



**Ilustración 27: Vulnerabilidad del acuífero SHAC Maule Medio. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005).**

El Acuífero Maule Medio se sub divide en el sector norte y sur. En el norte, la mayoría de los depósitos no consolidados tienen una vulnerabilidad moderada-baja y una porción menor alta. En cambio en el sector Maule Medio Sur, se tiene una franja extensa de alta a muy alta vulnerabilidad a la contaminación, lo cual es predominante al momento de definirlo.

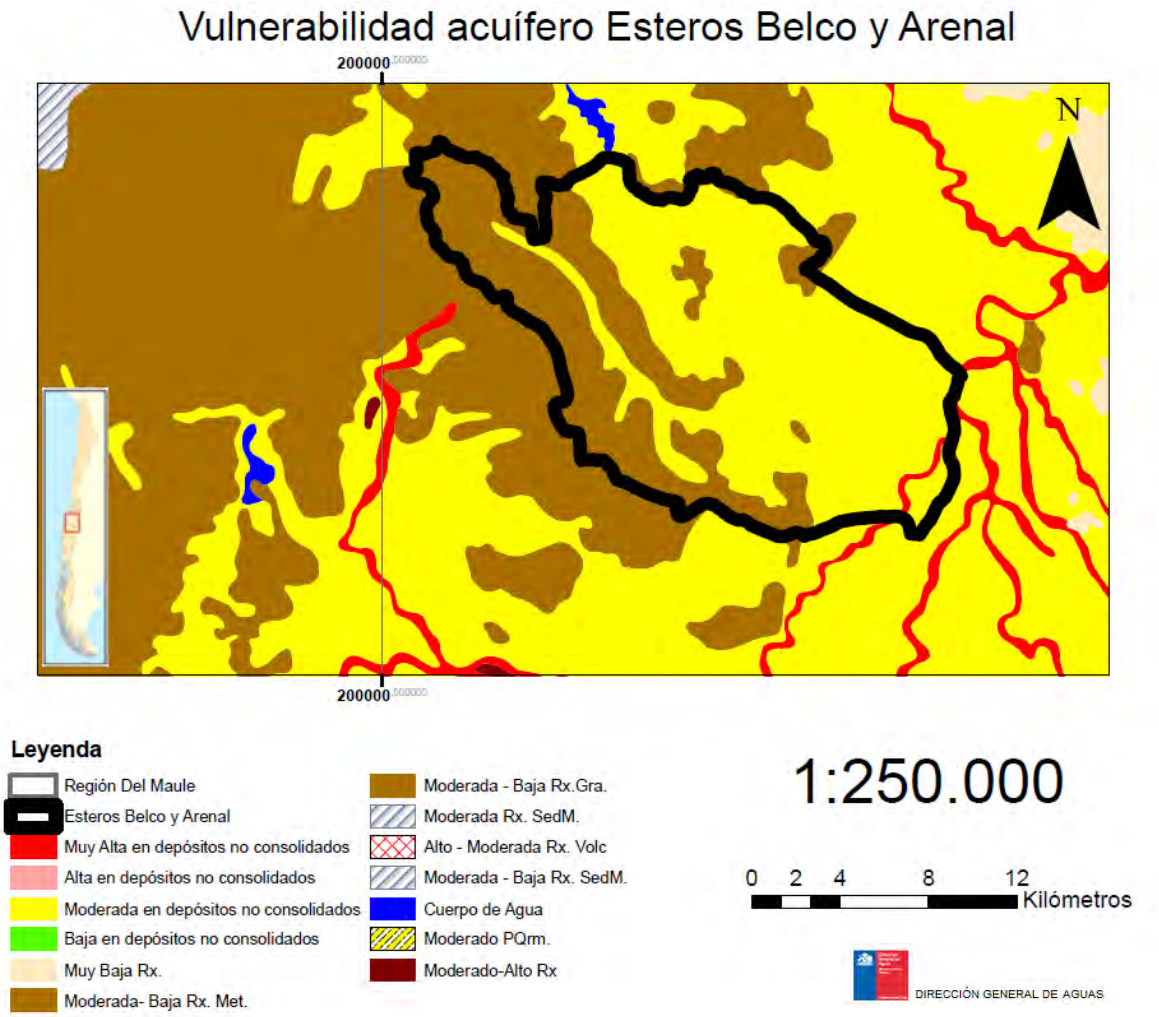



**Ilustración 28: Vulnerabilidad del acuífero SHAC Maule Medio. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005)**

En el acuífero Esteros Belco y Arenal, la vulnerabilidad es moderada en todas las rocas presentes en el área.

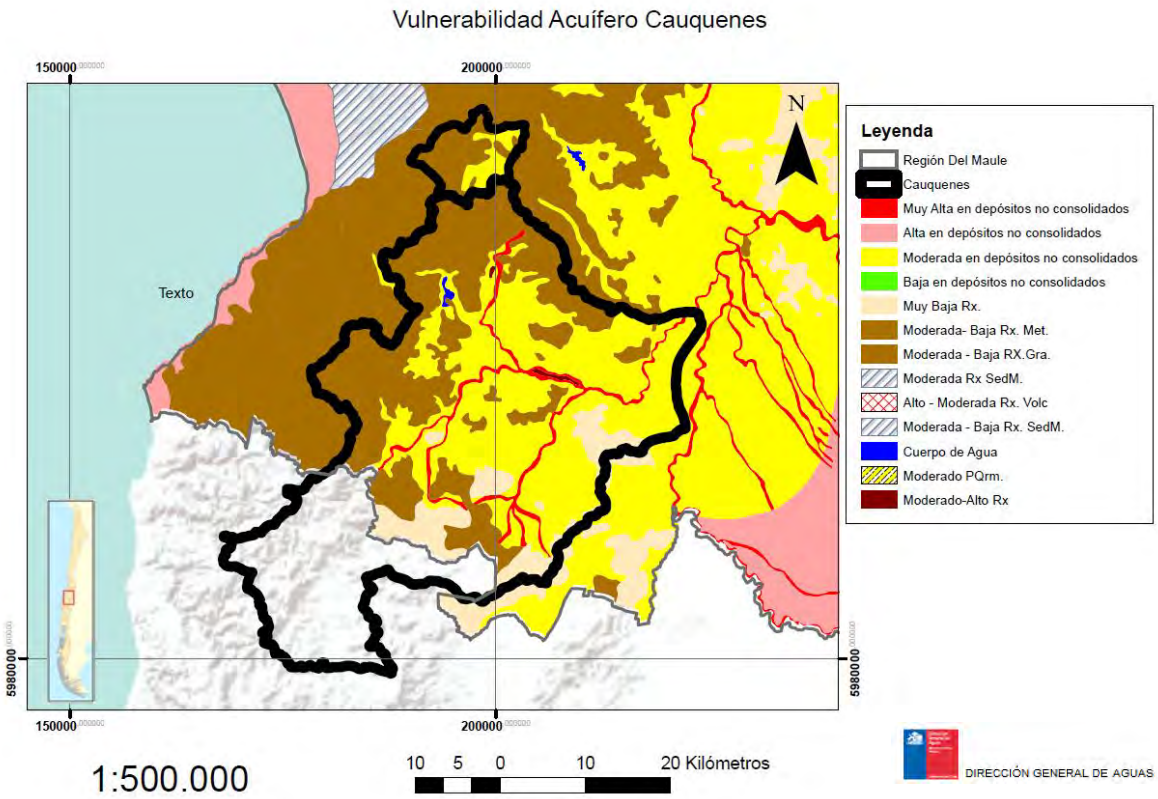



**Ilustración 29: Vulnerabilidad del acuífero SHAC Cauquenes y del acuífero preliminar Cauquenes Alto. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005).**

En el acuífero Cauquenes la vulnerabilidad es moderada, tanto en los depósitos no consolidados como en las rocas metamórficas y graníticas. En algunos cursos de agua, de depósitos sedimentarios no consolidados la vulnerabilidad es muy alta.

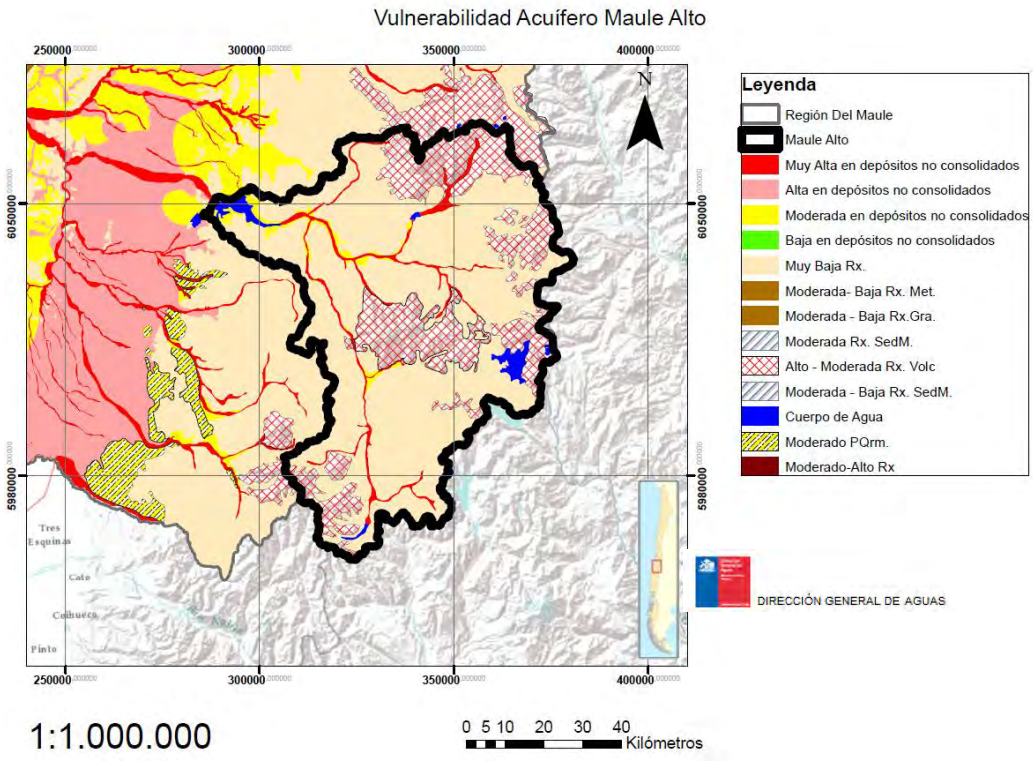



**Ilustración 30: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Maule Alto. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005)**

Esta área cordillera, tiene una vulnerabilidad de muy baja a alta en roca, mientras que en los depósitos no consolidados (de área mucho menor) la vulnerabilidad es alta a muy alta.

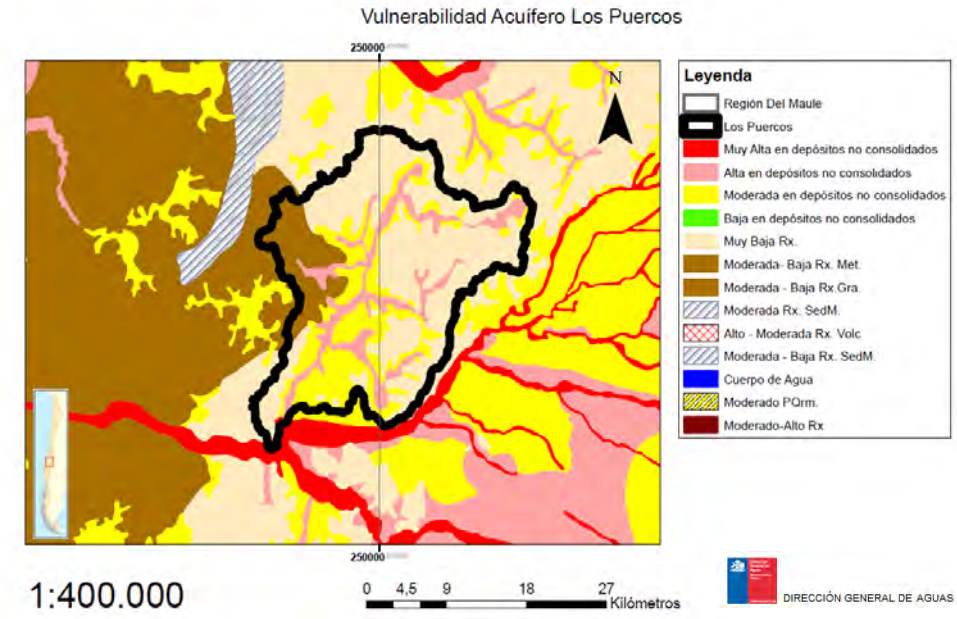


Ilustración 31: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Los Puercos. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005)

Los Puercos se caracteriza por poseer rocas con muy baja vulnerabilidad. Mientras que los depósitos no consolidados varían de moderada a alta.

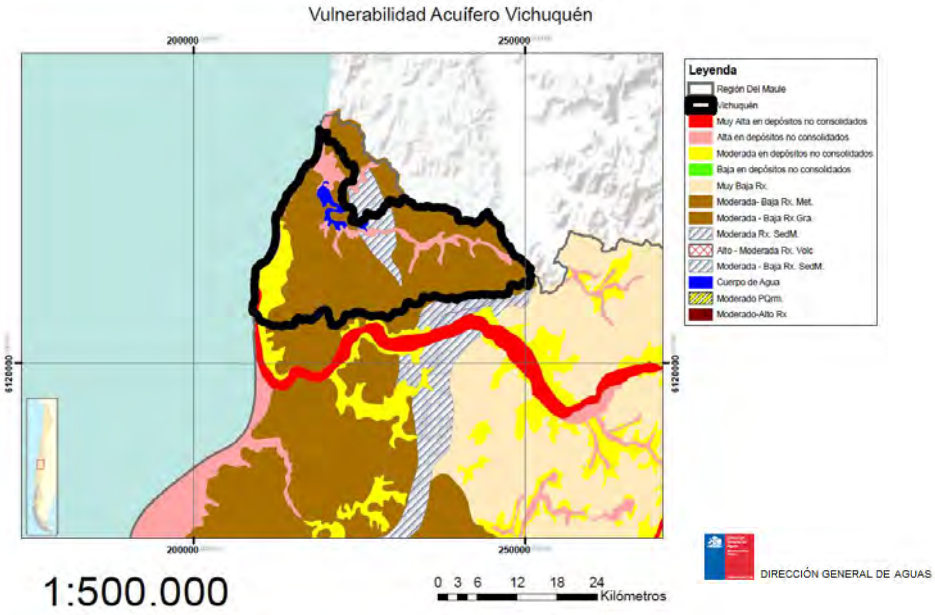



Ilustración 32: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Vichuquén. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005)

El acuífero costero Vichuquén se caracteriza por tener una vulnerabilidad moderada tanto en las rocas metamórficas, graníticas y sedimentarias y en los depósitos no consolidados. En algunas áreas menores se presenta vulnerabilidad alta.

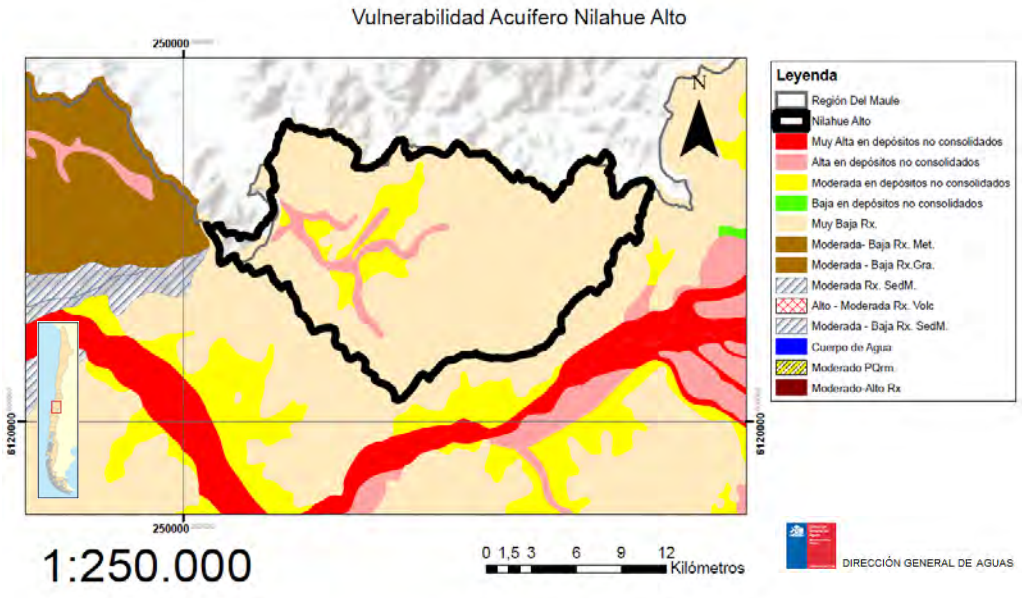



**Ilustración 33: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Nilahue Alto. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005)**

Este acuífero se caracteriza por poseer una vulnerabilidad muy baja en roca.

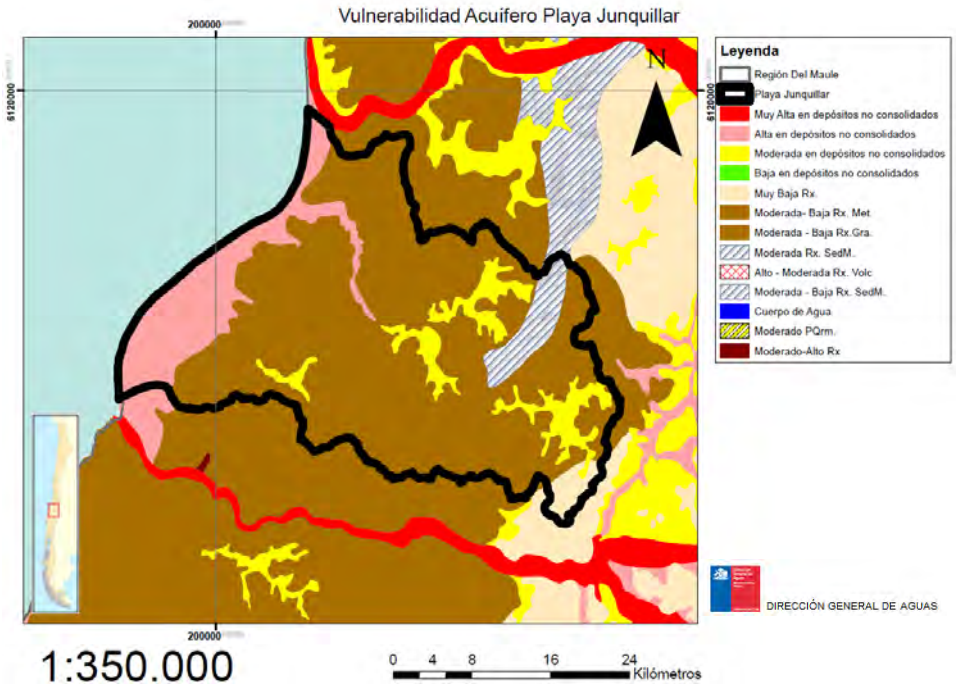



**Ilustración 34: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Playa Junquillar. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005)**

El acuífero costero playa Junquillar, posee una vulnerabilidad moderada en roca volcánica, sedimentaria, metamórfica. En el área cercana al mar, posee una importante área con vulnerabilidad alta.

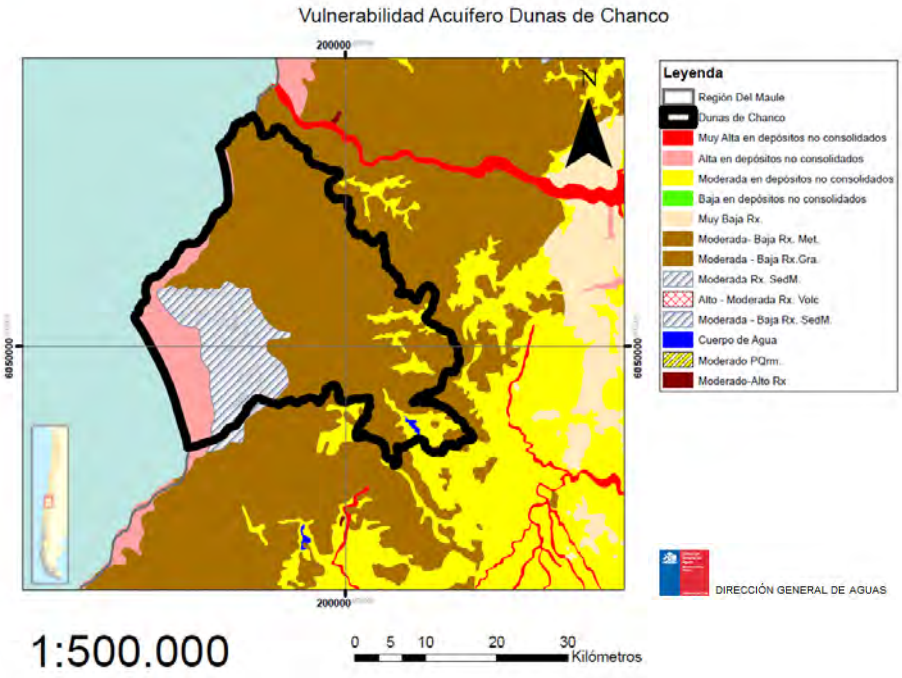



**Ilustración 35: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Dunas de Chanco. Modificado (SERNAGEOMIN, 2005).**

La vulnerabilidad es moderada en la zona de estudio, a excepción de la franja cercana al mar, ya que aumenta a alta en depósitos no consolidados.

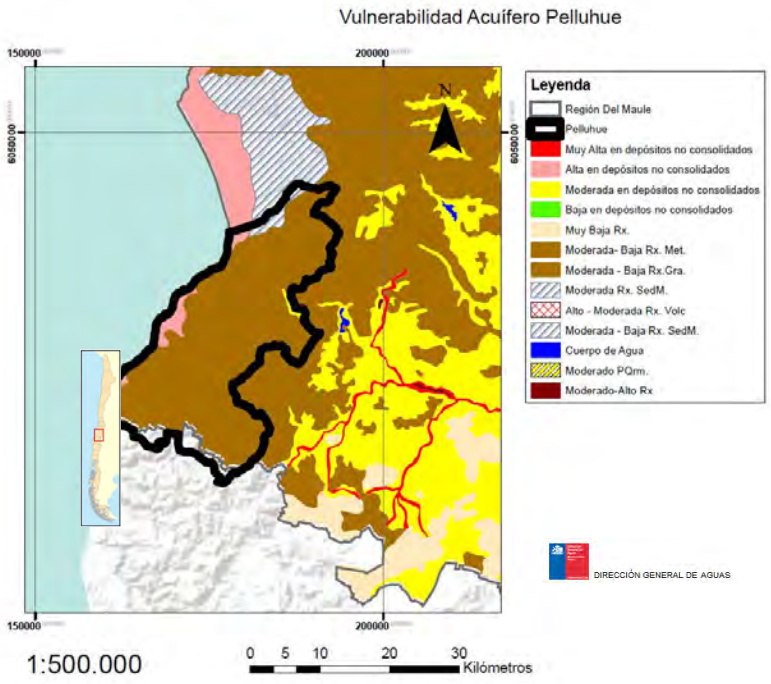



**Ilustración 36: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Pelluhue. Modificado. (SERNAGEOMIN, 2005)**

Al igual que la mayoría de los acuíferos costeros, Pelluhue posee una vulnerabilidad moderada en roca y en los depósitos no consolidados de la zona cercana a la costa aumenta a alta.

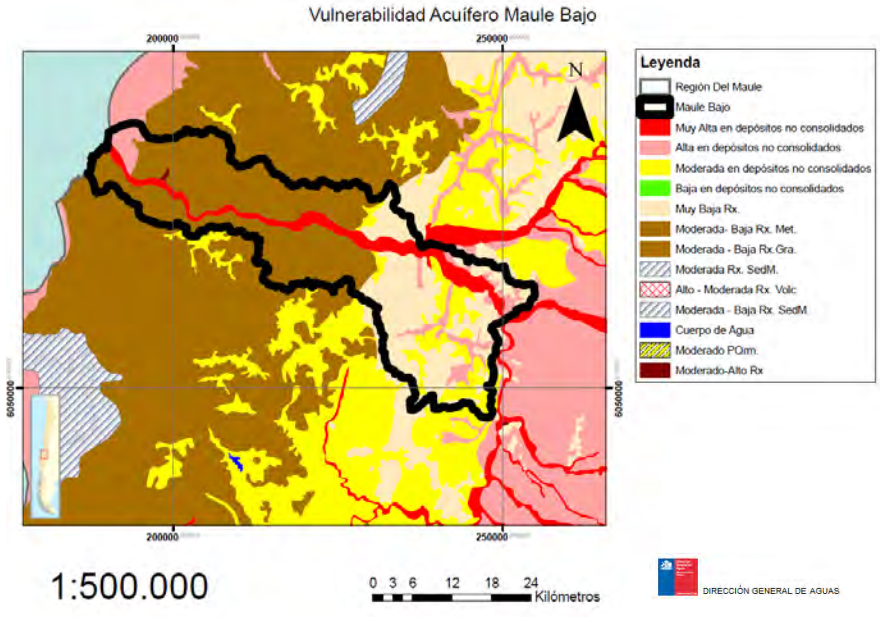



**Ilustración 37: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Maule Bajo. Modificado. (SERNAGEOMIN, 2005)**

El acuífero Maule Bajo, se caracteriza por aumentar su vulnerabilidad de este a oeste, mientras que el flujo del río Maule y los depósitos no consolidados que se depositan en él, poseen una vulnerabilidad muy alta.

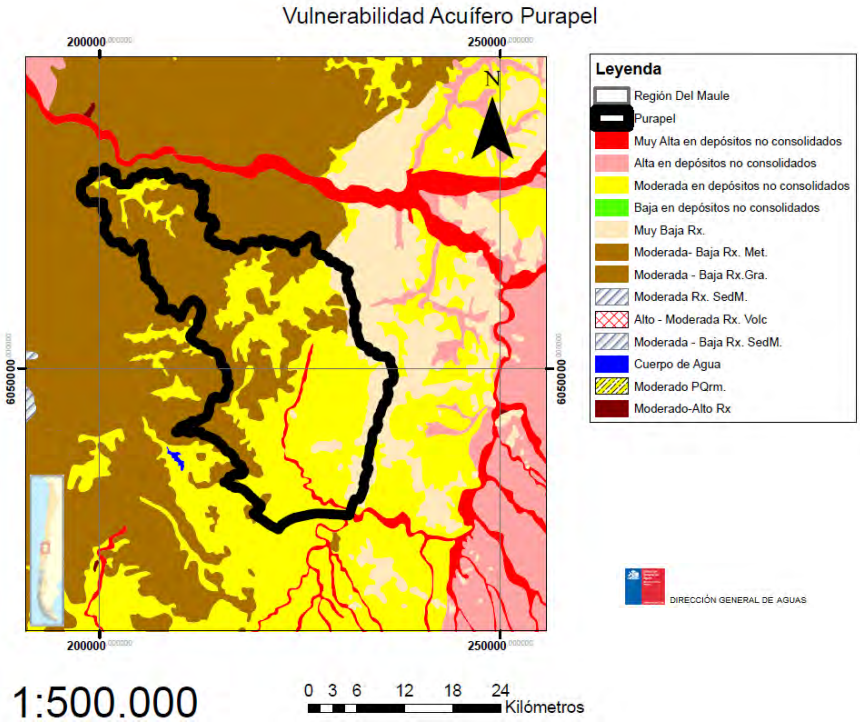



**Ilustración 38: Vulnerabilidad del acuífero preliminar Purapel. Modificado. (SERNAGEOMIN, 2005)**

El acuífero Purapel posee una vulnerabilidad moderada, tanto en depósitos no consolidados como en las rocas.

## III.7 USOS Y PRESIONES SOBRE EL AGUA- POSIBLES FUENTES CONTAMINANTES

La información presentada a continuación se extrajo del estudio “Análisis Crítico de la Red de Calidad de Aguas Superficiales y Subterráneas”, realizado por Infraestructura y Ecología S.A. en coordinación con la Dirección General de Aguas en el año 2014.

En el informe mencionado se hace un estudio de los usos y presiones sobre el agua, tanto superficial como subterráneo, con el fin de reformular la red nacional de calidad de aguas.

En una cuenca hidrográfica se tienen 2 interacciones importantes con el recurso hídrico, por un lado los usos y por otro las presiones, a continuación se esquematizan estas relaciones:

**Ilustración 39: Diagrama de las interacciones en una cuenca hidrográfica. Extraído (DGA, 2014).**

El recurso hídrico, cumple con la función de satisfacer diferentes necesidades, tanto para el medio ambiente como para los humanos. Según lo definido en el estudio, “Es la capacidad de la cuenca de proporcionar la calidad y cantidad de agua para cumplir con las variadas funciones”. Los usos en Chile son principalmente para consumo humano, riego, recreación y vida acuática.

La presión que se ejerce sobre el agua es definida como “cualquier actividad humana que incida sobre el estado de las aguas superficiales y subterráneas”. Dependiendo del tipo de actividad, la presión puede ser:

1. Directas: Los efectos son localizados en un punto en relación a un cuerpo receptor
2. Indirectas: No se cuenta con descargas a cuerpos de agua
3. Por regulación: Alteración de la cantidad de agua o bien de alguna propiedad física como la temperatura del agua
4. Difusas: Cuando los efectos se extienden en una superficie, actividad agrícola

A nivel nacional, la presión directa se debe a las descargas autorizadas de cursos y cuerpos de agua, la indirecta son proyectos y/o pasivos identificados, sin descargas directas, las presiones por regulación son todos los proyectos y obras de regulación de cauces y las presiones territoriales.

### III.7.1 USOS Y PRESIONES VII REGIÓN

A nivel del área en estudio, al igual que en todo Chile, se requiere agua para las diferentes actividades que se están desarrollando en el territorio y que se van a desarrollar en el futuro cercano, para consumo humano, riego, generación de energía eléctrica, industria, turismo y medio ambiente, entre otros usos (DGA, 2014).

Dada esta situación, a continuación, se detallará los principales usos y presiones del agua, vale mencionar que la distribución espacial en el informe del cual fue extraída la información es dada de forma diferente a las impuestas en este trabajo, por lo que pueden existir discrepancias en la información:

| Acuífero SHAC | Sector | Presiones significativas | Usos significativos |
|---|---|---|---|
| Mataquito | Rio Teno | Aguas Servidas, Agroalimentaria, Uso Agrícola, | Consumo Humano, Riego, |
| | Rio Lontue | Aguas Servidas, Agroalimentaria, Uso Agrícola, | Consumo Humano, Riego, |
| | Rio Mataquito | Uso Forestal, Uso Agrícola, | Consumo Humano, Riego, |
| Maule Medio | Rio Maule Alto (Hasta antes junta Rio Melado) | Regulación de cauce, | |
| | Maule Medio | Regulación de cauce, Uso Agrícola, | Riego, Vida acuática |
| | Rio Loncomilla | Regulación de cauce, Aguas Servidas, Agroalimentaria, Uso Agrícola, | Consumo Humano, Riego, |
| | Rio Maule entre Rio Loncomilla y Rio Claro | Uso Forestal, Uso Agrícola, | Riego, |
| | Rio Claro | Regulación de cauce, Cultivos Hidrobiológicos, Residuos, Aguas Servidas, Agroalimentaria, Uso Agrícola, | Consumo Humano, Riego, |
| Esteros Belco y Arenal | Perquilauquen Alto | Uso Forestal, Uso Agrícola, | Consumo Humano, Riego, |
| Cauquenes | Perquilauquen Bajo | Uso Forestal, Agroalimentaria, Uso Agrícola, | Riego, |

| Sector de Acuífero | Nombre del acuífero/ sub cuenca | Presiones significativas | Usos significativos |
|---|---|---|---|
| Acuífero Cordillerano | Maule Alto / Rio Melado | Regulación de cauce, | |
| Acuífero Depresión | Purapel | Uso Forestal, Uso Agrícola, | Consumo Humano, Riego, |
| | Cauquenes Alto: Costeras entre Rio Reloca y Rio Curanilahue | Uso Forestal , Uso Agrícola, | Riego, |
| Acuíferos Costeros | Dunas de Chanco/ Costeras entre Quebrada Honda y Rio Reloca | Uso Forestal, | |
| | Maule Bajo | Uso Forestal, uso Agrícola | Consumo humano, Riego |
| | Dunas de Chanco / Rio Reloca | Uso Forestal, Uso Agrícola, | Riego, |
| | Los Puercos- Playa Junquillar /Costeras entre Rio Huenchullami y Rio maule | Uso Forestal, | |
| | Playa Junquillar /Rio Huenchullami | Uso Forestal, | |
| | Pelluhue/ Costeras entre R. Curanilahue y limite Region (E. Pullay) | Uso Forestal, Uso Agrícola, | Riego, |

**Tabla 22: Usos y presiones significativas en la Región del Maule. Extraída (DGA, 2014)**

## III 7.2 CONTAMINACIÓN

La siguiente información fue extraída de “Diagnóstico para desarrollar plan de riego cuenca del Maule”, realizada por Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental en coordinación con la Dirección General de Aguas, 2015. Con el objetivo de contribuir al uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos para riego en la cuenca, mediante la implementación de un plan de gestión de aguas de riego y drenaje, diseñado y validado con la participación de los/as usuarios/as y agentes regionales y locales.

La contaminación de los cursos y cuerpos de agua de Chile tiene orígenes naturales y antropogénicos. Existe un nivel de contaminación natural importante de las aguas debido a fenómenos volcánicos, suelos salinos y estratos metalogénicos, entre otros (Banco Mundial, 2011).

Los principales contaminantes del agua de riego son aguas residuales con alto contenido de elementos orgánicos y microorganismos, basura doméstica e industrial, nutrientes estimulantes del crecimiento de plantas acuáticas (nitratos y fosfatos), productos químicos (metales pesados, pesticidas, detergentes y productos resultantes de la descomposición de compuestos orgánicos); aceites, grasas y otros derivados del petróleo; minerales orgánicos y partículas de suelo arrastradas por escurrimiento superficial (CNR, 2006). Fuera del área agrícola, existen algunos canales expuestos a contaminación del tipo urbana por estar cerca de localidades o casas.

Se han definido dos tipos de fuentes contaminantes: Puntual y difusa.

1. Las fuentes puntuales de descargas a los cursos de agua tienen su origen en los efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas y residuos industriales líquidos.

2. Las fuentes difusas están compuestas por una multiplicidad de pequeñas fuentes de descargas, cuyos aportes no son localizados ni continuos, y cuyo acceso a los cursos o cuerpos de agua es por derrame o filtración a través de los suelos.

La siguiente información fue extraída de “Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad- Cuenca Río Mataquito y Cuenca Río Maule”, realizada por Centro CADE-IDEPE consultores en ingeniería en coordinación con la Dirección General de Aguas, 2004.

En el valle del río Mataquito, se desarrollan principalmente cultivos de maíz, trigo, manzanas, vides y otras hortalizas; dentro de los cultivos industriales se destaca la remolacha, que dio origen a la construcción de la planta azucarera de Curicó. En este estudio se señala que existen suelos contaminados con residuos de organoclorados (Dieldrin y pp-DDE) (DGA, 2014).

En el valle del río Maule, la actividad agrícola propiamente tal, desde la década de 1990 ha experimentado una reducción continuada de las siembras anuales, excepto en el caso del trigo. La maravilla registra un descenso muy marcado; en cambio, se ha producido un fuerte aumento de los frutales (DGA, 2014).

Desde comienzos de la década de 1990 la región concentra gran parte de la producción de manzanas, de cerezos, de perales y de kiwis del país. También se hizo notoria la producción vitivinícola, concentrando más de la tercera parte de las vides del país (DGA, 2014).

De los resultados obtenidos en el estudio mencionado, se puede concluir que existe una leve influencia de plaguicidas en las aguas superficiales, por lo que debe monitorearse Aldicarb, Carbofurano, Trifluralina, Clorotalonil, dicoflop-Metil y Atrazina+S-Metalocloro (DGA, 2014).

En conclusión, en la Cuenca del Maule la calidad del recurso hídrico se explica por factores naturales, contaminación difusa, principalmente de las áreas agrícolas, y contaminación puntual por sistemas de tratamiento industriales y de aguas servidas. Una de las fuentes difusas más importantes es la basura en ríos y canales.

# IV. METODOLOGÍA

## IV.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 40. 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 (DGA, 2017).

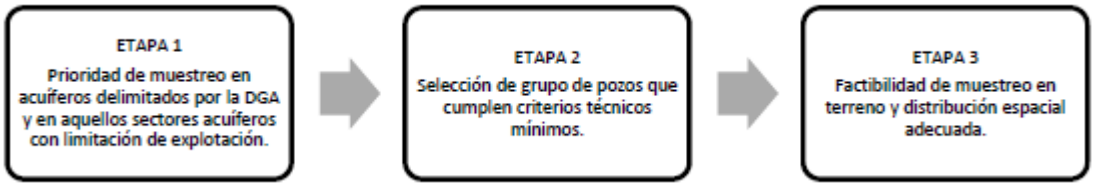



**Ilustración 40: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas. Extraído (DGA, 2017)**

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

En la Etapa 2 se seleccionan pozos que cumplen con los siguientes criterios técnicos mínimos:

1. 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.

2. 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 lleva a cabo una selección práctica de 148 pozos, basada en la factibilidad de ejecutar el muestreo en terreno de forma expedita, cumpliendo con los estándares técnicos requeridos para disponer de muestras representativas del acuífero:

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

## IV.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS

Con el objetivo de determinar la actual condición físico-química de las aguas subterráneas en los acuíferos de la Región del Maule se procedió a definir los parámetros necesarios de medición:

| Categoría | Total de parámetros | Parámetro |
|---|---|---|
| Físico- químico (análisis de terreno) | 4 | Temperatura, pH, conductividad eléctrica, potencial de óxido de reducción. |
| Iones (análisis de Laboratorio Ambiental SGS Chile Ltda.) | 10 | Cloruro ($Cl^-$), Sodio ($Na^+$), Calcio ($Ca^{+2}$), Magnesio($Mg^{+2}$), Nitrato ($NO_3^-$), Amonio ($NH_4^+$), Sulfato ($SO_4^{-2}$), Bicarbonato ($HCO_3^-$), Fosfato ($PO_4^{-3}$), Alcalinidad total, solidos disueltos totales (SDT). |
| Micro elementos (Laboratorio Ambiental SGS Chile Ltda) y | 11 | Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Mercurio (Hg), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), |

| | | |
|---|---|---|
| Laboratorio DGA | | Plomo (Pb), Selenio (Se) y Zinc (Zn) |

**Tabla 23: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la Región del Maule. Laboratorio Ambiental SGS Chile Ltda: Laboratorio externo a DGA**

En cuanto a los análisis, éstos fueron analizados por un laboratorio externo Laboratorio Ambiental SGS Chile Ltda., contratado mediante licitación pública. El trabajo contratado para este estudio incluyó la visita a terreno de 148 pozos en la Región del Maule, 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.

## IV.3 TERRENO

### IV.3.1 ACTIVIDADES A REALIZAR PREVIO AL TERRENO

- Coordinación entre la Dirección General de Aguas y SGS, las fechas de visita y muestreo a los pozos seleccionados.
- Planificar las labores de terreno para ser ejecutadas durante el año 2017 en los meses de octubre y principalmente en noviembre.
- Preparar todo material o instrumento necesario para abastecer un terreno.

### IV.3.2 ACTIVIDAD A REALIZAR EN TERRENO

- Verificar que se cumplan las condiciones requeridas para la toma de muestras de aguas subterráneas.[11]
- Tomar muestras de pozos en el número y cantidad comprometida que aseguren su representatividad de los resultados, sean parámetros de terreno y/o laboratorio.
- Registrar los siguientes parámetros de terreno:
    1. Temperatura, °C
    2. Conductividad, uS/cm

[11] LADGA-IM-02 Instructivo muestreo aguas subterráneas, basado en NCh411/11

3. pH, upH
4. Potencial Oxido Reducción (ORP), mV

- Completar en terreno los datos de una ficha técnica
- Muestras deberán ser recolectadas en pozos que cuenten con bomba y una llave de despiche donde sea factible recoger agua cruda característica del acuífero.
- Se deberá tomar muestra adicional de agua (botella 250 ml), la cual deberá ser preservada con $HNO_3$ para la DGA que realizará ciertos metales[12]
- Enviar las muestras recolectadas al laboratorio SGS[13]
- Tomar al menos 4 fotografías de cada punto de muestreo.

### IV.3.3 ACTIVIDADES A REALIZAR POST-TERRENO

- Análisis de muestras de agua en laboratorio mediante metodologías adecuadas.

## IV.4 MUESTREO

Los procedimientos aplicados por SGS para los distintos monitoreos, técnicas de muestreo y preservación de muestras se basan en las Normas Chilenas y Normas Internacionales.

| Identificación | Título de la Norma |
|---|---|
| NCh 411/11 2005 | Calidad del agua- Muestreo- Parte 11:<br><br>Guía para el muestreo de Aguas Subterráneas |
| NCh 411/3 Of96 | Calidad del agua- Muestreo- Parte 3:<br><br>Guía sobre preservación y manejo de las muestras |

[12] LADGA-IM-03 Instructivo de preservación de muestras y etiquetado de envases
[13] LADGA-IM-06 Instructivo de envío y traslado de muestras

| | |
|---|---|
| Standard Methods Ed. 2012 | Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater |

**Tabla 24: Metodologías de Muestreo- Serie Norma Chilena NCh 411. Extraído y modificado de Licitación: "Servicio de muestreo y análisis aguas subterráneas Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Maule"- MOP (SGS, 2017)**

Se considera 1 muestreo (frecuencia anual) para así evitar las variaciones producidas naturalmente por la estacionalidad y medir los cambios relativamente a largo plazo. El periodo de muestreo se concentró en el mes de noviembre.

## IV.5 USO DE EQUIPOS Y MATERIALES

Durante el trabajo en terreno se utilizaron los siguientes equipos:

1. Pozometro:
    - Marca: Geotech
    - Modelo: 100 metros

**Ilustración 41: Equipo utilizado en terreno. Extraído (geotech)**

2. Medidor Multiparamétrico[14] :
    - Marca: Hanna
    - Modelo: HI-98194

[14] LADGA-IM-09 Instructivo uso de sondas multiparámetro.

Ilustración 42 : Equipo utilizado en terreno. Extraído (HANNA CHILE)

3. Phmetro[15]
    - Marca: YSI
    - Modelo: PH 100[a]

Ilustración 43: Equipo utilizado en terreno. Extraido (YSI)

## IV.6 METODOLOGÍAS ANALÍTICAS

Los métodos que utiliza el Laboratorio para los ensayos se encuentran definidos por:

[15] LADGA-IM-09 Instructivo uso de sondas multiparámetro

- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Ed 22nd año 2012, para los parámetros y matrices expresamente señalados en las respectivas normativas de calidad de aguas.

Los criterios de calidad analítica referidos a límites de detección y/o límites de cuantificación, precisión y exactitud de resultados, cumplen las exigencias definidas por la SISS, para todos aquellos métodos de ensayo y matrices en que el organismo fiscalizador, así, lo ha establecido.

Las metodologías utilizadas por el laboratorio SGS para la determinación de Iones y de los microelementos son los señalados en la siguiente tabla:

| Parámetro | Metodología de Análisis |
|---|---|
| Cloruro (Cl) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 4110B |
| Sodio(Na) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 3111 B |
| Potasio(K) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 3111B |
| Calcio(Ca) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 3111B |
| Magnesio (Mg) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 3111B |
| Nitrato ($NO_3$) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 4500 NO3B |
| Amonio ($NH_4$) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 4500-NH3 B D |
| Sulfato ($SO_4$) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 4110B |
| Bicarbonato ($HCO_3$) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 2320B |
| Fosfato ($PO_4$) | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 4500 P E |
| Alcalinidad Total | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 2320 B |
| Solidos Disueltos Totales | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 2540 C |
| Arsénico | Standard Methods Ed 22, 2012 Método 3114B |
| Cadmio (Cd) | Standard Method 3111B |
| Cobalto (Co) | Standard Method 3111B |
| Cobre (Cu) | Standard Method 3111B |

| Parámetro | Metodología de Análisis |
|---|---|
| Hierro (Fe) | Standard Method 3111B |
| Mercurio (Hg) | LADGA- IT-17 basado en Standard Method 3112B y 3114C |
| Manganeso (Mn) | Standard Method 3111B |
| Níquel (Ni) | Standard Method 3111B |
| Plomo (Pb) | Standard Method 3111B |
| Selenio (Se) | Standard Method 3114C |
| Zinc (Zn) | Standard Method 3111B |

**Tabla 25: Metodología de Análisis utilizadas en el laboratorio SGS. Modificada (SGS)**

## IV.7 ANÁLISIS Y RESULTADOS QUÍMICOS

La calidad de los resultados de los análisis químicos de iones son verificados mediante el cálculo del balance iónico. Este cálculo considera la sumatoria de cationes y aniones expresados en unidades de miliequevalentes/litro (meq/L). El error de balance iónico no debe ser mayor a 30% (en términos absolutos) según la expresión que se presenta a continuación:

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

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

- Parámetros físico-químicos medidos en terreno: gráficas de bolas sobre cartografía.
- Iones mayoritarios: diagrama de Stiff y diagrama de Piper. Para su construcción se utilizó el software AquaChem 3.70
- Microelemento: gráfico de barra comparando con estándares de calidad de agua para consumo humano (NCh 409/2005) y aguas para riego (NCh 1333)

La interpretación de los diagramas de Piper se realiza acorde con la siguiente clasificación de las aguas que considera la distribución porcentual de cationes y aniones.

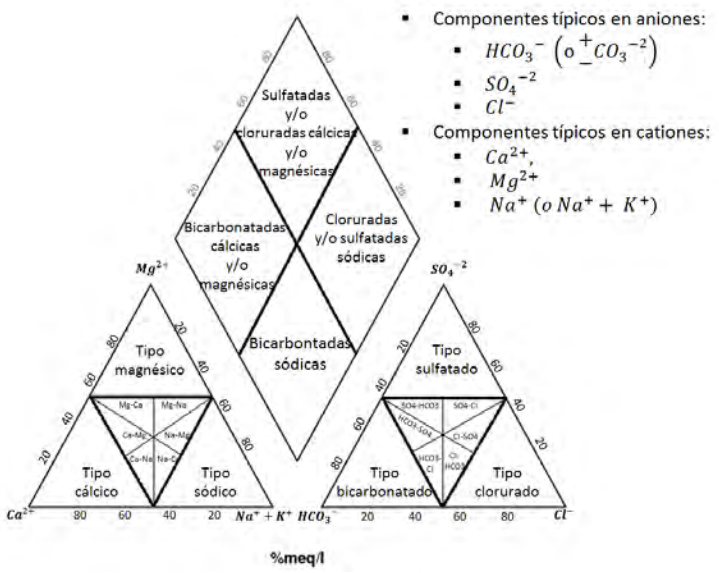



Ilustración 44: Clasificación de los diversos tipos de agua según Diagrama de Piper.

## IV.8 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFERO SEGÚN ÍNDICE DE CALIDAD

La legislación ambiental chilena no contempla normativas de calidad para las aguas subterráneas sino solamente para determinados usos, como son el Agua Potable o el Agua de Riego. En efecto, las Normas Chilenas 409 y 1333, respectivamente, dictan las concentraciones máximas permitidas para cada elemento y compuesto en las aguas que se destinan a estos usos. Luego, la práctica ambiental considera como aguas contaminadas aquellas que, contrastadas con análisis previos del mismo lugar, han aumentado sus concentraciones químicas producto de una actividad antrópica (directa o indirectamente) como fuente de ese aumento (DGA, 2017).

Es importante conocer la calidad de las aguas subterráneas, para la planificación territorial y para desarrollar una gestión sustentable del recurso hídrico. A nivel internacional existen diferentes índices para determinar la calidad de las aguas, pero en general vinculados a proyectos de investigación o a la gestión de una cuenca en particular.

En Chile, en el año 2009, la DGA licitó un estudio para definir un Índice de Calidad que pudiera ser aplicado para la clasificación de sectores acuíferos en cuanto a la calidad de sus aguas, y que pudiera ser utilizado indistintamente en acuíferos de todo el país con sus particularidades como pueden ser geométricas (acuíferos extensos o encajonados en quebradas), geológicas (con altas concentraciones de parámetros nocivos para la salud, pero de origen natural), antrópicas (con actividades potencialmente contaminantes diferentes), con o sin intrusión salina, etc. Su resultado fue el estudio S.I.T. 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) que se ha utilizado para el presente trabajo, el cual fue extraído del estudio recientemente mencionado, se basa en 4 pilares fundamentales, los cuales son (DGA, 2009):

- El análisis 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).
- El análisis estadístico multivariado para visualizar las agrupaciones y correlaciones de parámetros que posiblemente provienen de una misma fuente.

## IV. 8.1 ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA DEL ÍNDICE DE CALIDAD

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 45) 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.

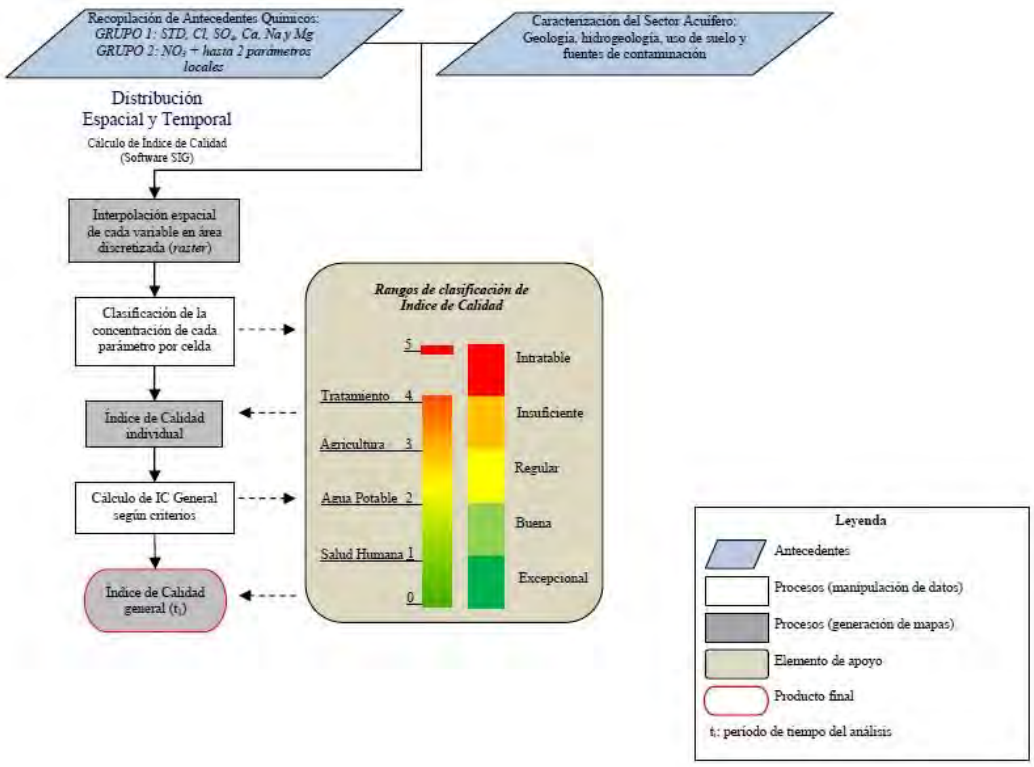



**Ilustración 45: Esquema y diagrama de flujo de la metodología. Editado de (DGA, 2009)**

## IV. 8.2 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD

Para realizar la metodología, es importante medir los siguientes dos grupos de parámetros (DGA, 2009):

- El primer grupo está formado por 7 parámetros químicos fijos los cuales son los Sólidos Disueltos Totales (SDT), el Magnesio ($Mg^{2+}$), los Cloruros ($Cl^{-}$), el Sulfato ($SO_4^{2-}$), el Calcio ($Ca^{2+}$), el Sodio ($Na^{+}$) y los Nitratos ($NO_3^{-}$). Las concentraciones de estos parámetros se encuentran en cualquier muestra de agua y permiten calcular un Índice de Calidad (IC) intermedio comparable con la calidad química de los diferentes acuíferos en idénticas condiciones.
- El segundo grupo corresponde a un parámetro local, como es el caso del contenido de Arsénico variable que permite dar cuenta de las características propias de cada sector acuífero del país (DGA, 2009).

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.

Para obtener el cálculo de índice de calidad, se debe calcular el índice de calidad individual y posteriormente el general.

### 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.

| 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 la 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 y complejos. |

**Tabla 26: Relación entre Clases de Calidad y Valores de Corte.**

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.

- 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.

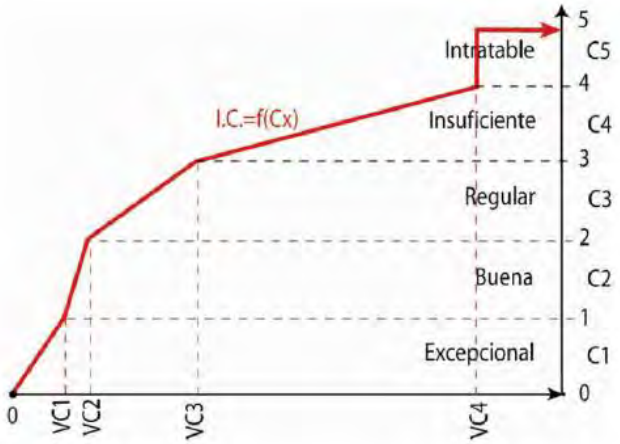



**Ilustración 46: Gráfico "Cálculo de Índice de Calidad mediante interpolación lineal entre clases". (DGA, 2009).**

### IV.8.2.2 CÁLCULO IC GENERAL

Posterior a obtener el IC individual se debe proceder a calcular el Índice de Calidad general (IC general) del pozo y sector acuífero mediante la siguiente tabla:

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

**Tabla 27: Criterios para establecer el IC general (DGA, 2009)**

Las categorías resumidas en la tabla 27 serán descritas a continuación:

- Índice de Calidad Excepcional: Esta calidad permite asegurar que, ninguno de los parámetros considerados afecta a la salud humana o su percepción de las características organolépticas. Por lo tanto, el agua es apta para el consumo humano. Estas aguas cumplen, 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 (DGA, 2009).

- Índice de Calidad Buena: Implica que entre los parámetros seleccionados, ninguno afecta a la salud humana, sin embargo podrían presentar concentración elevada de algunos parámetros que reflejen afectación antrópica o limiten su uso. Considerando los parámetros seleccionados, el agua es apta para el consumo humano (DGA, 2009).
- Índice de Calidad Regular: Esta situación puede reflejar que algún parámetro tiene IC Regular, pero el resto posee Regular, Bueno y/o excepcional. Por lo tanto, el agua no es apta para el consumo humano, pero puede ser utilizada para el agua de riego (DGA, 2009).
- Índice de Calidad Insuficiente: Existe algún parámetro de los considerados en la metodología que no cumple con la legislación nacional (según normativa NCh409) e internacional de calidad de aguas para uso agrícola. No obstante, las aguas pueden ser tratadas 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 (DGA, 2009).
- Índice de Calidad Intratable: Este caso se da cuando existe un parámetro de los estudiados que presenta una calidad intratable. El agua no es apta ni para el consumo humano ni para el riego agrícola. El tratamiento requerido para cumplir con la normativa de Agua Potable, de ser posible, sería un proceso de alta eficiencia, por lo que probablemente tendrían limitaciones de complejidad y de costos (DGA, 2009).

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

# V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

## V.1 DATOS REGISTRADOS EN TERRENO

### V.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES EN TERRENO Y LABORATORIO

La totalidad de los pozos muestreados (148) corresponden a pozos utilizados para abastecimiento de la población rural (Programa Agua Potable Rural – APR, de la Dirección de Obras Hidráulicas). Previamente al muestreo se verificó el cumplimiento de las condiciones mínimas que aseguren la calidad de las muestras.

Ilustración 47: Fotografías Muestreo APR Aguas del Valle

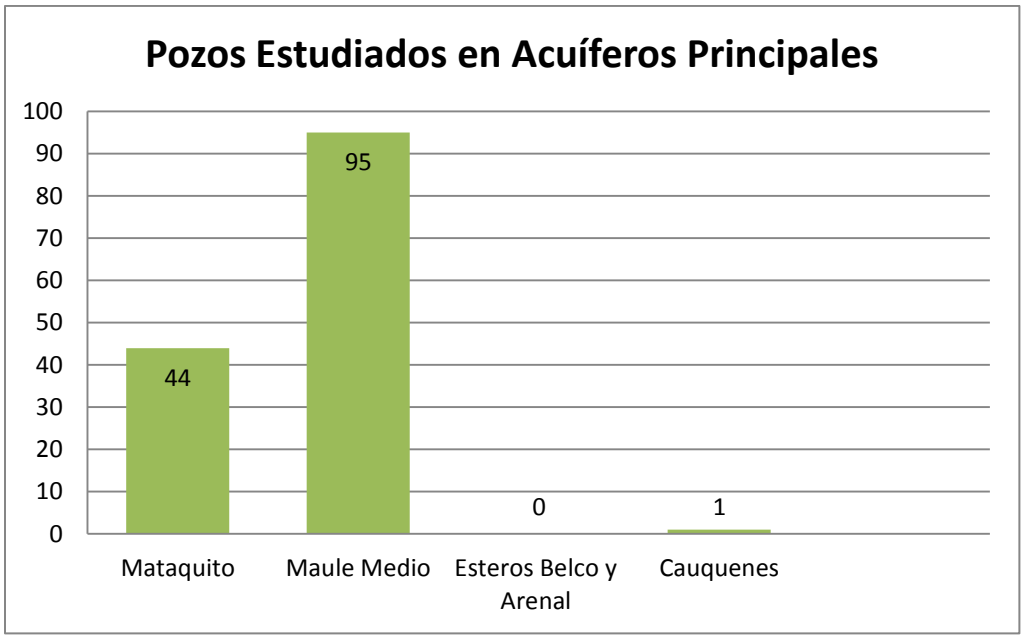



Ilustración 48: Pozos APR estudiados en acuíferos SHAC- VII Región. Creación propia.

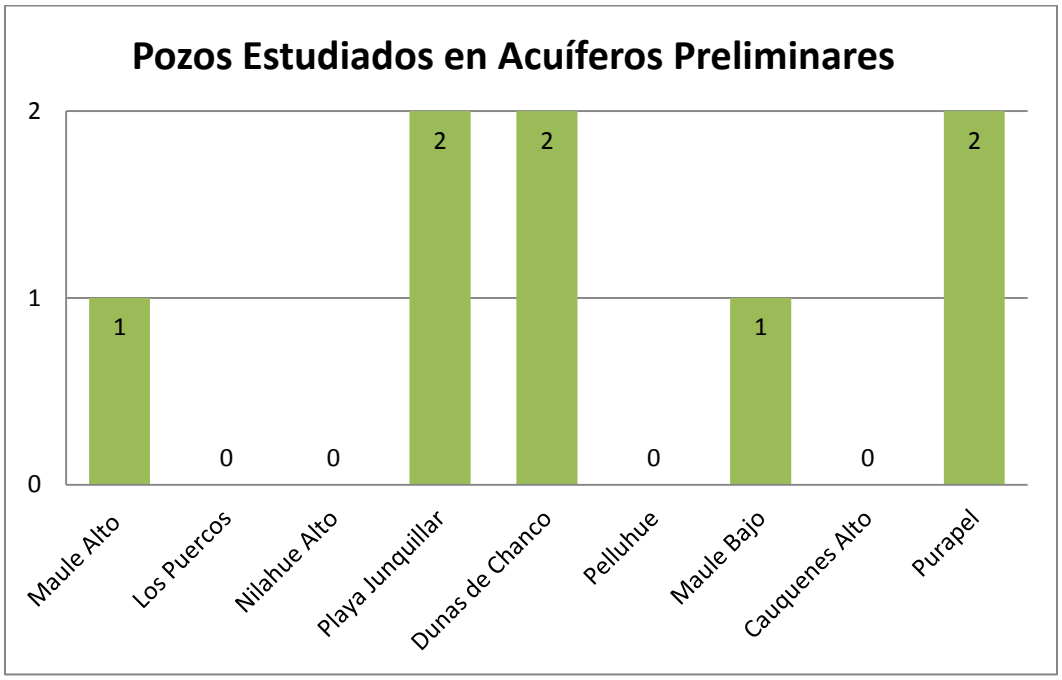



Ilustración 49 : Pozos APR estudiados en acuíferos preliminares- VII Región. Creación propia.

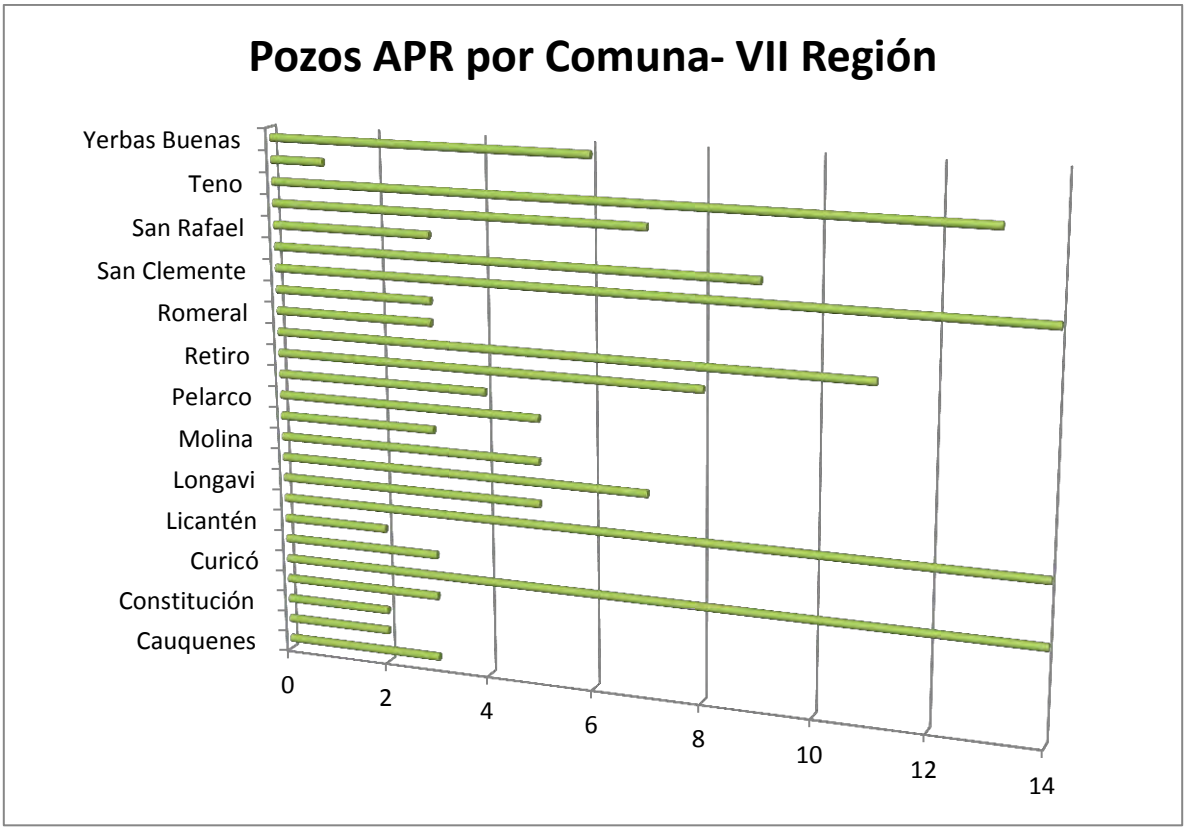



**Ilustración 50: Pozos APR por comuna- VII Región. Creación propia.**

## V.1.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y PROFUNDIDADES

### *V.1.2.1 GENERALIDADES SOBRE DATOS DE TERRENO*

En las siguientes ilustraciones se darán a conocer los datos fisicoquímicos obtenidos en terreno, los cuales son: Temperatura, pH, conductividad eléctrica y Potencial Oxido-Reducción.

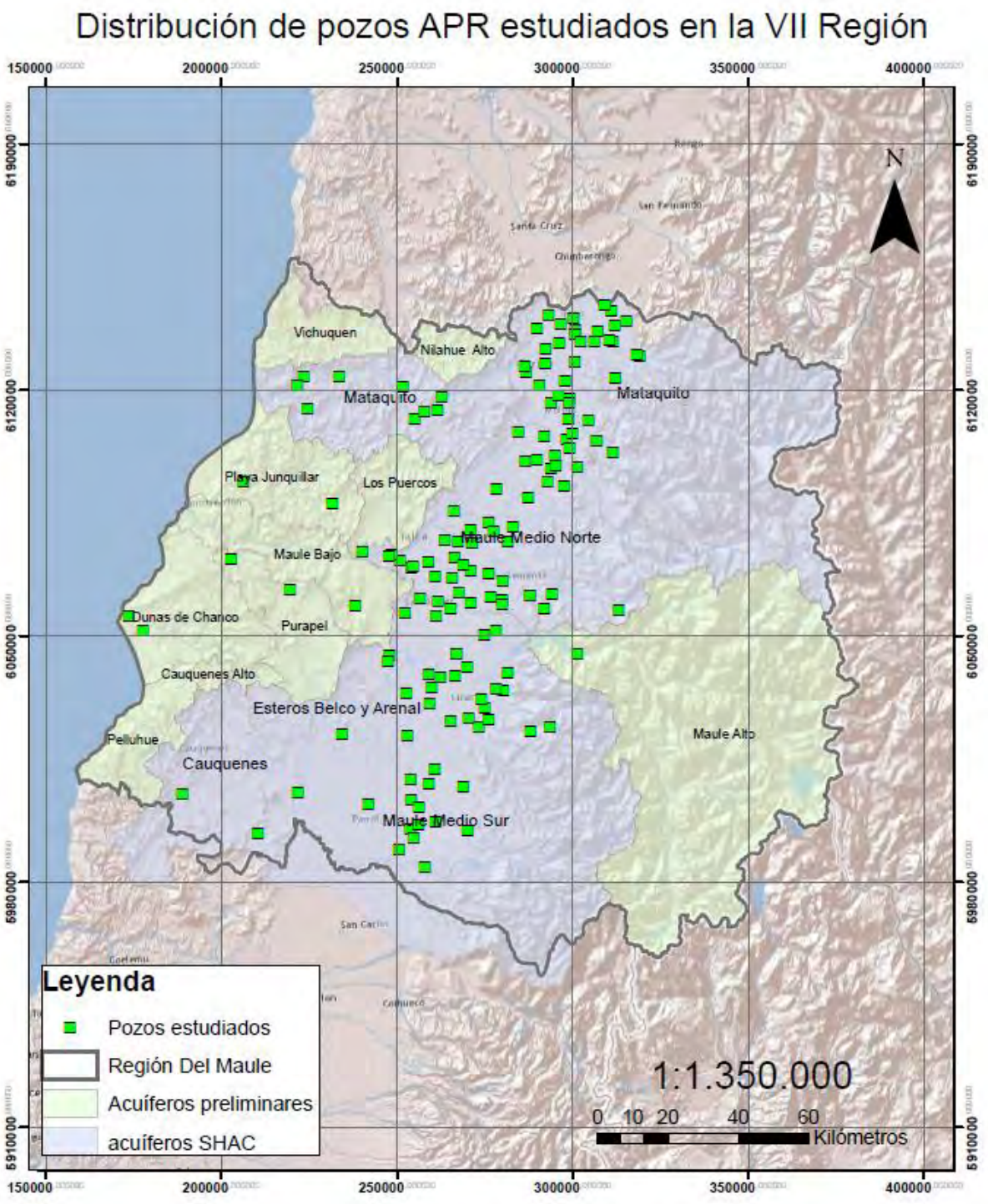



**Ilustración 51: Mapa "Distribución de pozos APR estudiados en Acuíferos VII Región". Creación propia.**

## V.1.3 DATOS DE TERRENO ACUÍFEROS SHAC

### V.1.3.1 DATOS DE TERRENO ACUÍFERO MATAQUITO

| APR | N° de pozo |
|---|---|
| APR POTRERO GRANDE | 65 |
| APR LA CUESTA | 32 |
| APR SAN JORGE DE ROMERAL | 80 |
| APR CORDILLERILLA | 12 |
| APR PICHINGAL | 63 |
| APR HUAQUEN | 28 |
| APR LA HUERTA MATAQUITO | 33 |
| APR VILLA PRATS | 97 |
| APR EL RODEO | 101 |
| APR CASABLANCA | 9 |
| APR LOS CASTAÑOS | 44 |
| APR EL MAITEN - SAN SALVADOR | 18 |
| APR ORILLA NAVARRO | 56 |
| APR PIRIHUIN - LOS CANALES | 64 |
| APR PERALILLO | 105 |
| APR EL CRUCERO | 17 |
| APR LORA | 104 |
| APR LA OBRA | 35 |
| APR EL PEUMAL - SAN RAMON | 20 |
| APR PLACILLA | 107 |
| APR LIEN PLACILLA | 40 |
| APR HUALEMU | 27 |

| APR | N° de pozo |
|---|---|
| APR TUTUQUEN BAJO | 92 |
| APR TUTUQUEN | 91 |
| APR LOS CRISTALES | 46 |
| APR LA LAGUNA | 34 |
| APR LOS GUAICOS | 47 |
| APR LOS NICHES - SANTA ELENA | 50 |
| APR SANTA OLGA - LOS GUINDOS | 108 |
| APR EL MOLINO - VENTANA DEL ALTO | 19 |
| APR QUILVO ALTO | 72 |
| APR VISTA HERMOSA | 99 |
| APR VENTANA DEL BAJO | 95 |
| APR RINCON DE SARMIENTO | 74 |
| APR DOMINGO MANCILLA | 14 |
| APR PIEDRA BLANCA | 106 |
| APR LA PALMILLA | 103 |
| APR SANTA REBECA - PURISIMA | 86 |
| APR HACIENDA TENO | 102 |
| APR LAS LIRAS | 38 |
| APR LAS ARBOLEDAS | 37 |
| APR COMALLE | 11 |
| APR EL CISNE | 16 |
| APR EL QUELMEN - SAN RAFAEL | 22 |

**Tabla 28: Pozos APR estudiados en el Acuífero Mataquito. Creación propia**

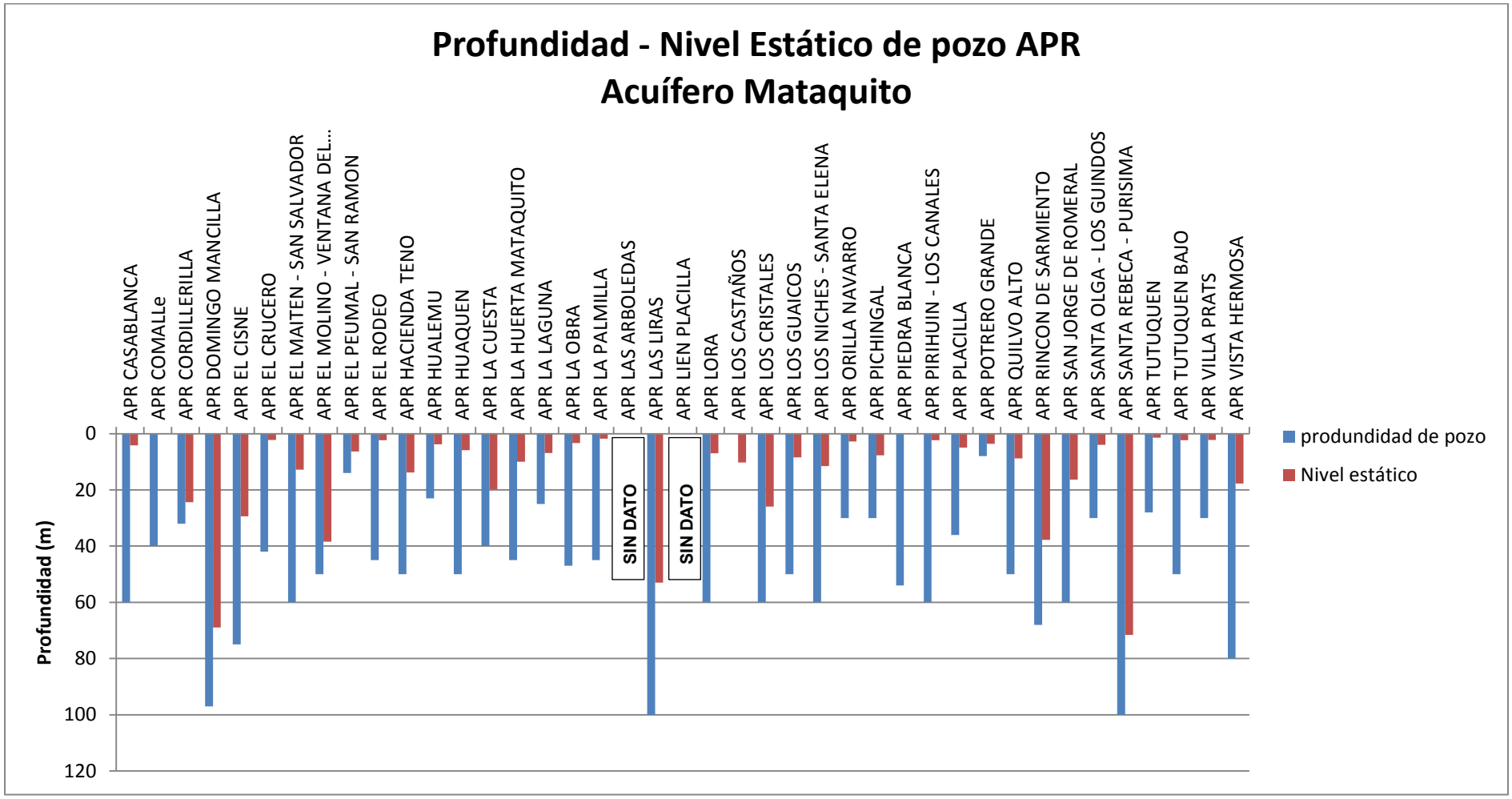



Ilustración 52: Gráfico "Profundidad- Nivel Estático de pozo APR- Acuífero Mataquito". Creación propia.

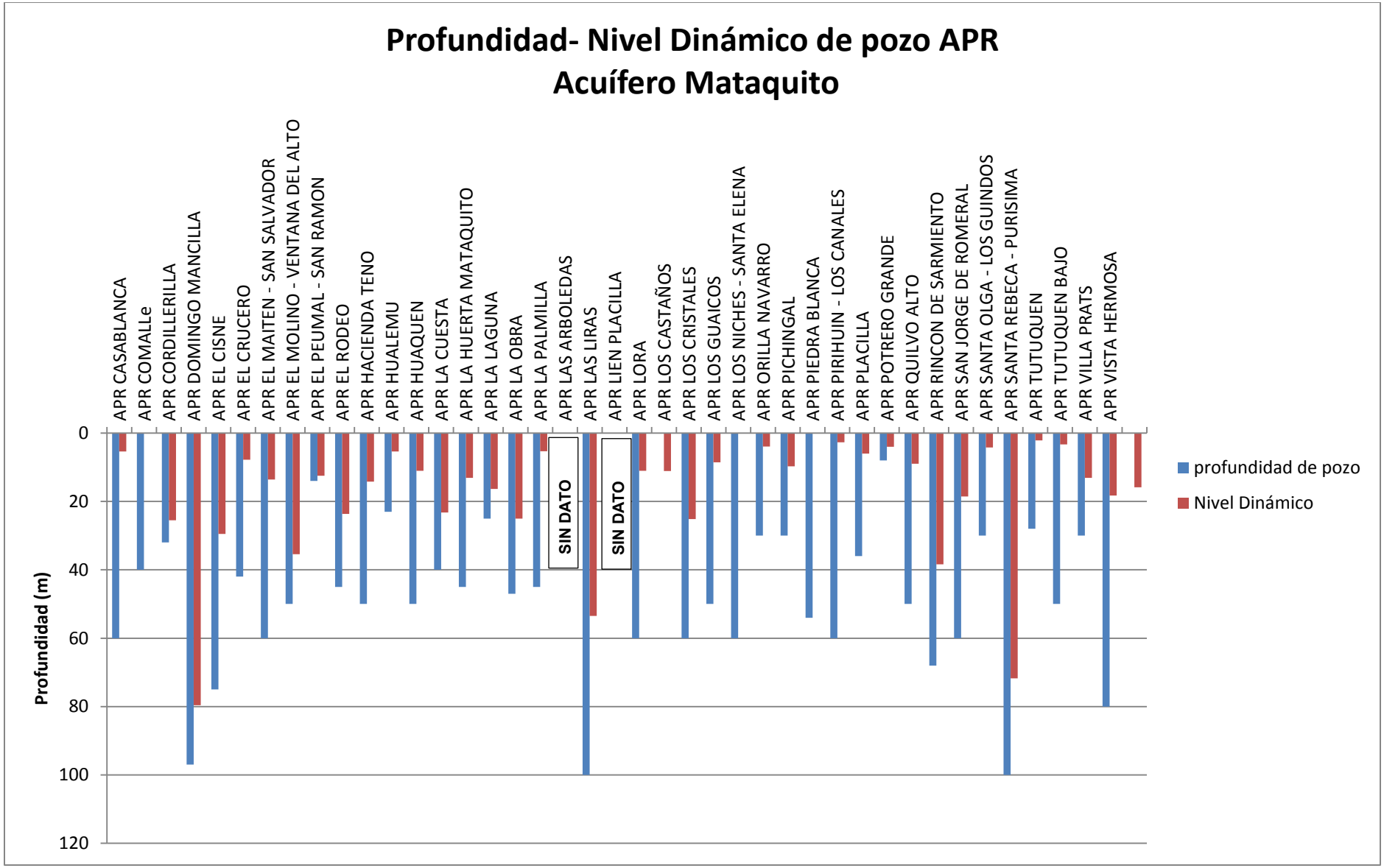



Ilustración 53: Gráfico "Profundidad- Nivel Dinámico de pozo APR- Acuífero Mataquito". Creación propia.

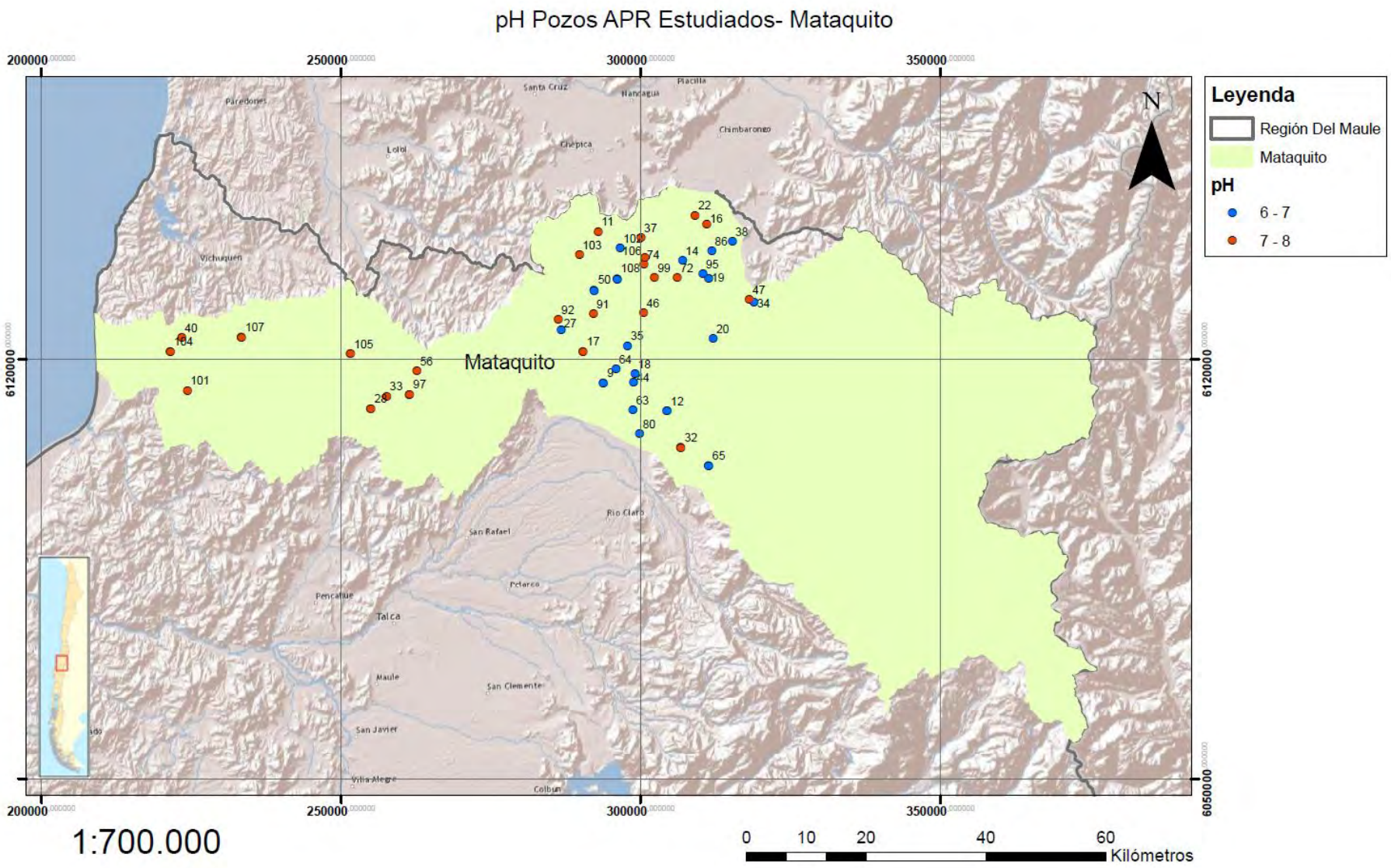



Ilustración 54: Mapa "pH pozos APR Estudiados- Acuífero Mataquito". Creación propia.

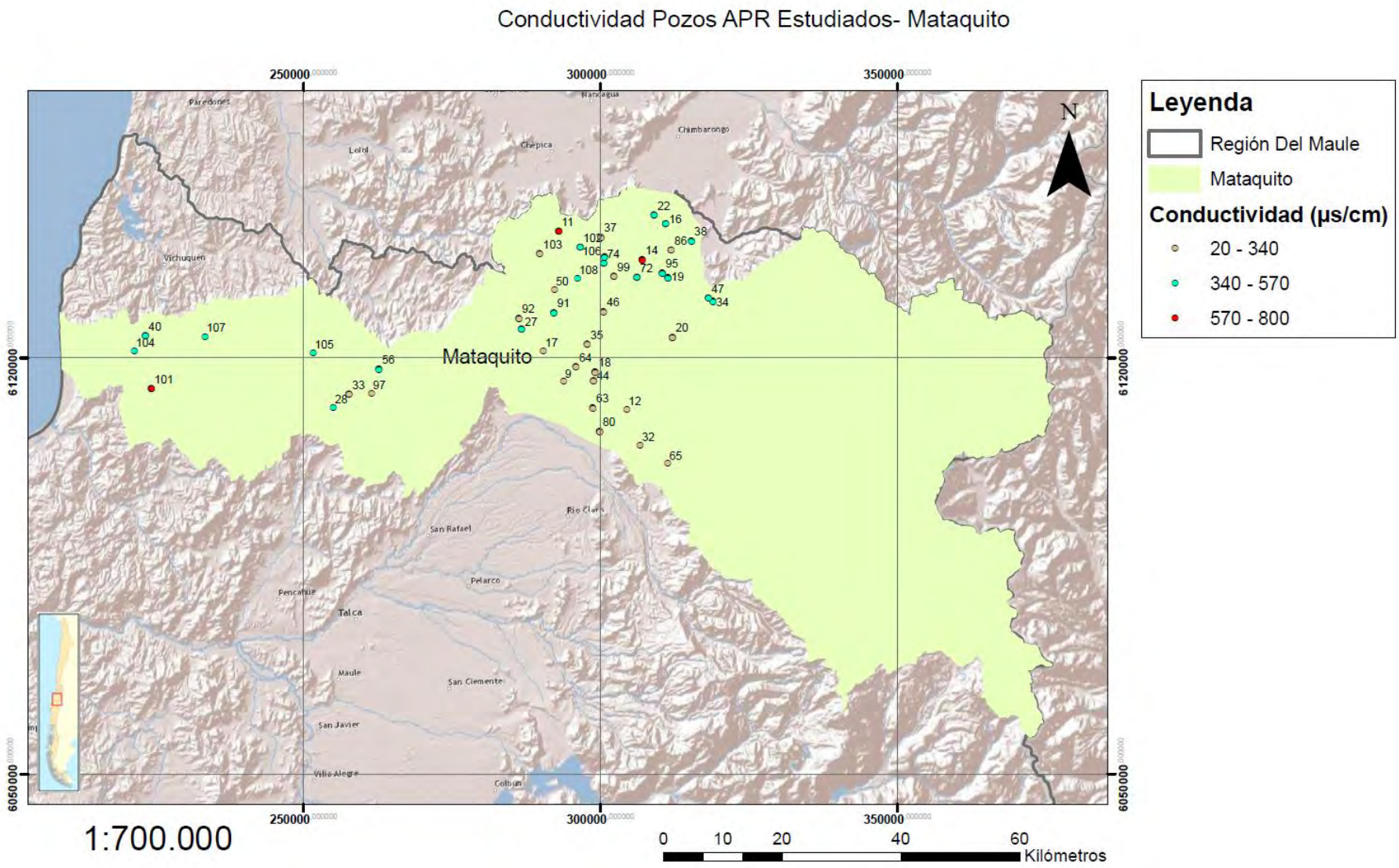



Ilustración 55: Mapa "Conductivad eléctrica pozos APR Estudiados- Acuífero Mataquito". Creación propia.

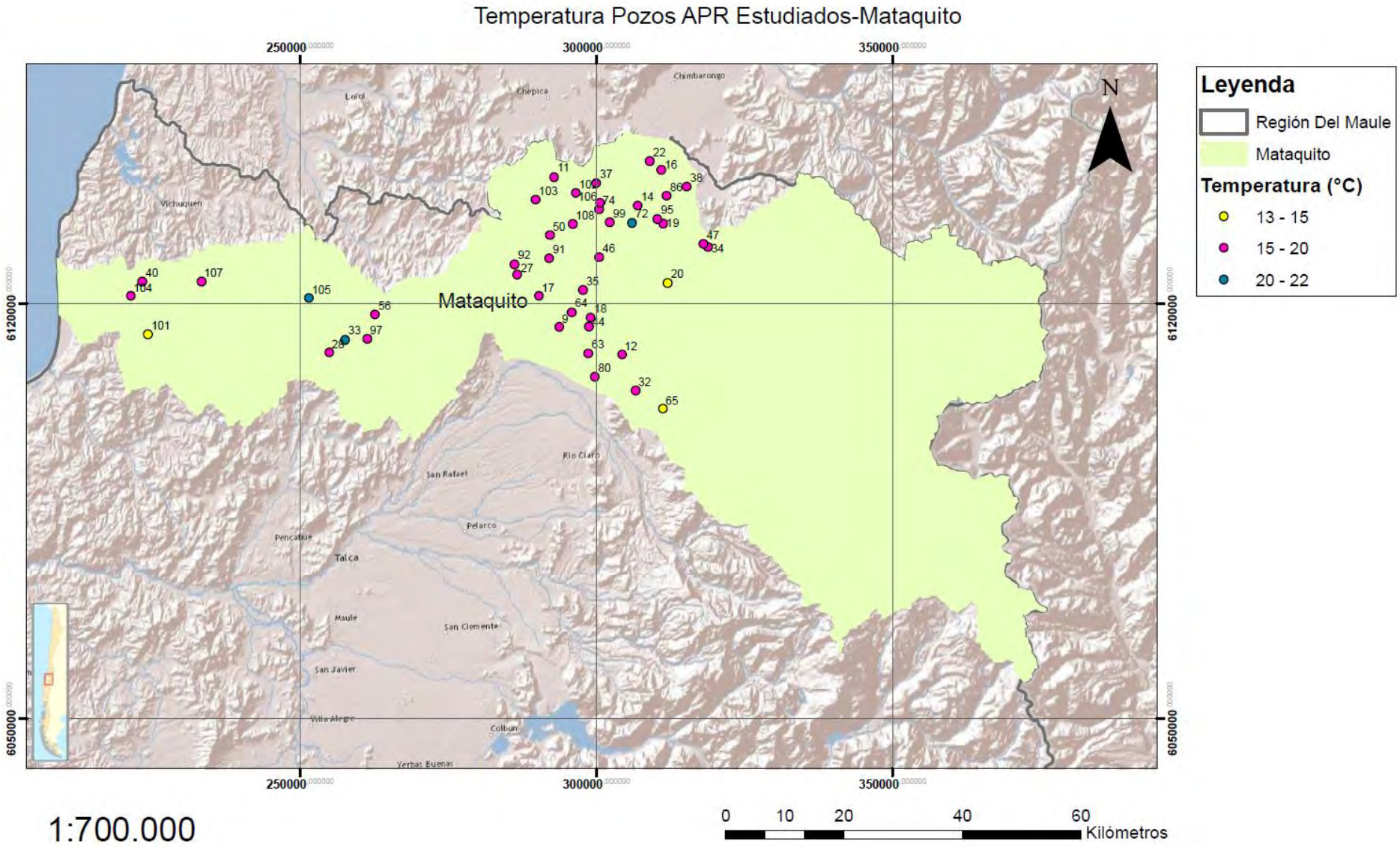



Ilustración 56: Mapa "Temperatura Pozos APR Estudiados- Acuífero Mataquito". Creación propia.

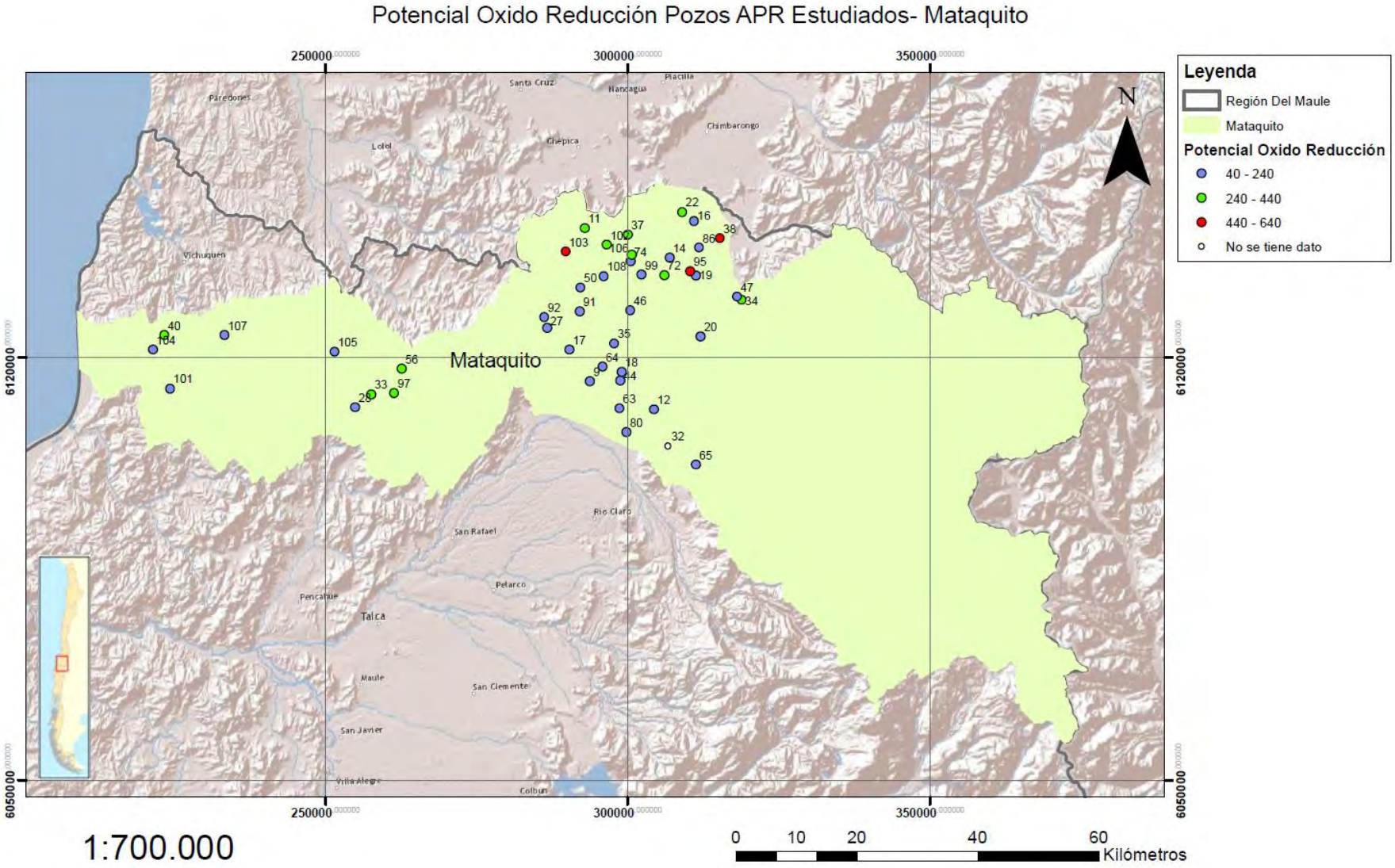



**Ilustración 57: Mapa "Potencial Oxido- Reducción Pozos APR Estudiados- Acuífero Mataquito". Creación propia.**

El acuífero Mataquito se caracteriza por tener un pH entre 6 y 8, por lo que según lo estipulado por Atlas 2016-Nuestra Agua (DGA, 2016), se trata de un acuífero neutro. Aunque existen aguas con mayor tendencia a la alcalinidad, con pH entre 7-8 y otras a la acidez con pH entre 6-7. Se puede inferir que este estado del agua se debe a la existencia de una concentración de bicarbonato en la mayoría de las aguas de la cuenca, lo que neutraliza la acidez.

En general, la conductividad del acuífero es baja. Aunque se tienen variaciones, los pozos del sector Teno poseen una conductividad eléctrica mayor que los pozos del sector Lontué, mientras que la conductividad de los pozos del valle del río Mataquito posee una conductividad variable. Según esto, se puede deducir, que las aguas varían sus propiedades, ya que la conductividad depende los iones disueltos, la carga y la movilidad. Cabe mencionar que en el valle del río Teno, se tienen puntos con una mayor concentración de solidos disueltos, lo que podría ser una causa de la variación de conductividad eléctrica.

En general la temperatura del agua se encuentra en un rango de 15-20 °C, los valores más bajos se encuentran hacia la cordillera a excepción de APR EL RODEO que se encuentra cercano a la costa.

En cuanto a la distribución de los valores de potencial oxido reducción, se tienen valores de magnitud menor en el valle del río Mataquito y en el río Lontué, por lo que favorece las reacciones de reducción, mientras que valores de Eh positivo y de alta magnitud se encuentran en el río Teno, lo que es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación.

## V.1.3. 2 DATOS DE TERRENO ACUÍFERO MAULE MEDIO

| APR | N° de pozo |
|---|---|
| APR REMULCAO | 73 |
| APR VILLA REINA | 98 |
| APR CARMEN ORIENTE | 144 |
| APR POCILLAS | 130 |
| APR ESPERANZA | 25 |
| APR AJIAL | 2 |
| APR SANTA CECILIA-RETIRO | 145 |
| APR SANTA DELFINA | 84 |
| APR SANTA INES | 143 |
| APR PALMA ROSA | 57 |
| APR SAN ISIDRO | 79 |
| APR QUELLA | 70 |
| APR LA QUINTA | 36 |
| APR LAS MERCEDES | 39 |
| APR LOS MAITENES | 48 |
| APR LOS CRISTALES | 45 |
| APR ENTRADA DE CERRILLOS | 24 |
| APR HIGUERILLAS | 26 |
| APR VEGA DE ANCOA | 94 |
| APR EMBALSE ANCOA | 23 |
| APR LLANCANAO | 41 |
| APR HUAQUI | 29 |

| APR | N° de pozo |
|---|---|
| APR SAN VICTOR LAMAS | 146 |
| APR SAN ANTONIO | 75 |
| APR SAN ANTONIO LAS ENCINAS | 76 |
| APR SANTA ROSA DE MAITENES | 89 |
| APR VARA GRUESA | 93 |
| APR PALMILLA | 58 |
| APR QUINAMAVIDA | 132 |
| APR SAN FRANCISCO DE RARI | 77 |
| APR LAS HORNILLAS | 123 |
| APR COIRONAL | 10 |
| APR PEÑUELAS | 129 |
| APR PUTAGAN | 68 |
| APR CHIRIPA PANIMAVIDA | 147 |
| APR ABRANQUIL | 109 |
| APR MELOZAL | 127 |
| APR LA GOTERA | 122 |
| APR LOS PUQUIOS | 42 |
| APR LLANO BLANCO | 51 |
| APR MAITENCILLO | 53 |
| APR SEMILLERO | 90 |
| APR SANTA CECILIA - GABRIELA MISTRAL | 83 |
| APR VISTA HERMOSA -ALQUIHUE | 100 |

| APR | N° de pozo |
|---|---|
| APR VILCHES ALTO | 96 |
| APR BRAMADERO | 7 |
| APR PUENTE PANDO - MARIÑICO | 66 |
| APR QUERI | 71 |
| APR SAN MANUEL | 82 |
| APR SAN PABLO | 134 |
| APR EL ALAMO | 118 |
| APR BOBADILLA | 110 |
| APR AGUAS DEL VALLE | 1 |
| APR BAJOS DE PERQUIN - CORRALONES | 4 |
| APR LOS MONTES | 49 |
| APR CHEQUEN | 114 |
| APR MARIPOSAS | 54 |
| APR SANTA MARTA - MATA VERDE | 137 |
| APR CALLEJONES | 111 |
| APR QUEBRADA DE AGUA | 69 |
| APR FLOR DEL LLANO | 115 |
| APR NUMPAY | 55 |
| APR SAN LUIS DE UNIHUE | 81 |
| APR PORVENIR | 138 |
| APR CHACARILLAS - CAIVAN | 112 |
| APR COLIN | 116 |
| APR HUINQUILEMO/HUILQUILEMU | 30 |
| APR PENCAHUE | 62 |

| APR | N° de pozo |
|---|---|
| APR LO FIGUEROA | 124 |
| APR CORINTO | 13 |
| APR PURISIMA - PANQUIMILI | 60 |
| APR PANGUILEMO UNIDO | 67 |
| APR RAMADILLA DE LIRCAY | 133 |
| APR EL MANZANO | 120 |
| APR SAN VALENTIN - LIRCAY ALTO | 135 |
| APR SANTA MARGARITA - LOS GOMEROS - LA BATALLA | 136 |
| APR SANTA RITA | 87 |
| APR QUESERIA | 131 |
| APR LO PATRICIO | 125 |
| APR PANGUE ARRIBA - PANGUE ABAJO | 128 |
| APR LA CHISPA | 113 |
| APR EL MILAGRO- SANTA VICTORIA | 121 |
| APR EL CERRILLO - CASAS VIEJAS | 119 |
| APR CUMPEO | 117 |
| APR LOS MONTES | 126 |
| APR BOLSICO | 6 |
| APR SANTA ROSA | 88 |
| APR LOS ROBLES - ESCUDO DE CHILE | 52 |
| APR EL AROMO | 15 |
| APR SAN GERARDO - ODESSA - PEÑAFLOR | 78 |
| APR PALMIRA | 59 |

| APR | N° de pozo |
|---|---|
| APR BAJO LOS ROMEROS | 3 |
| APR EL PORVENIR | 21 |

| APR | N° de pozo |
|---|---|
| APR ITAHUE - PUENTE ALTO | 31 |

**Tabla 29: Pozos APR estudiados en el Acuífero Maule Medio. Creación propia**

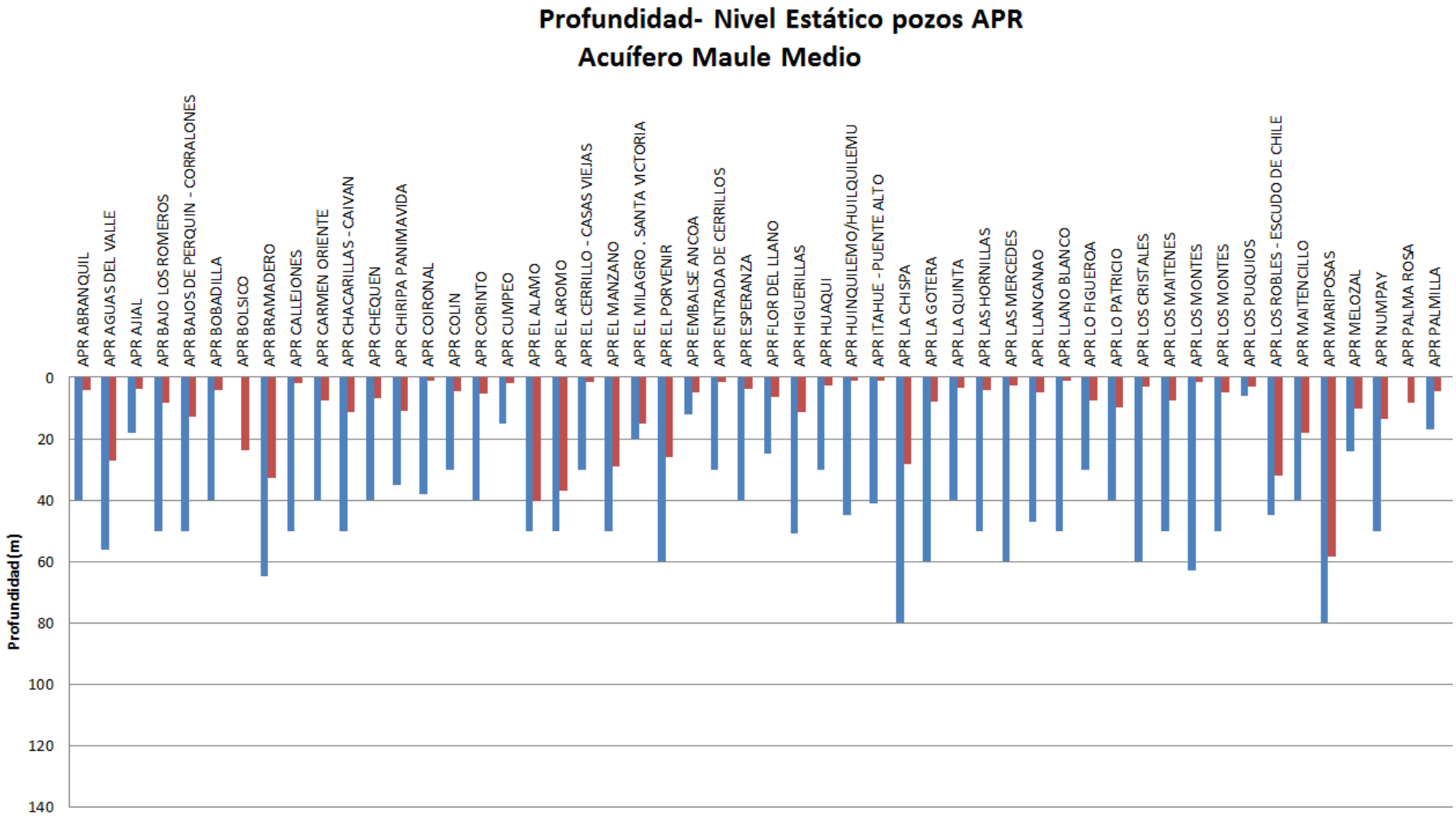



Ilustración 58: Gráfico "Profundidad- Nivel Estático pozos APR- Acuífero Maule Medio- parte 1". Creación propia.

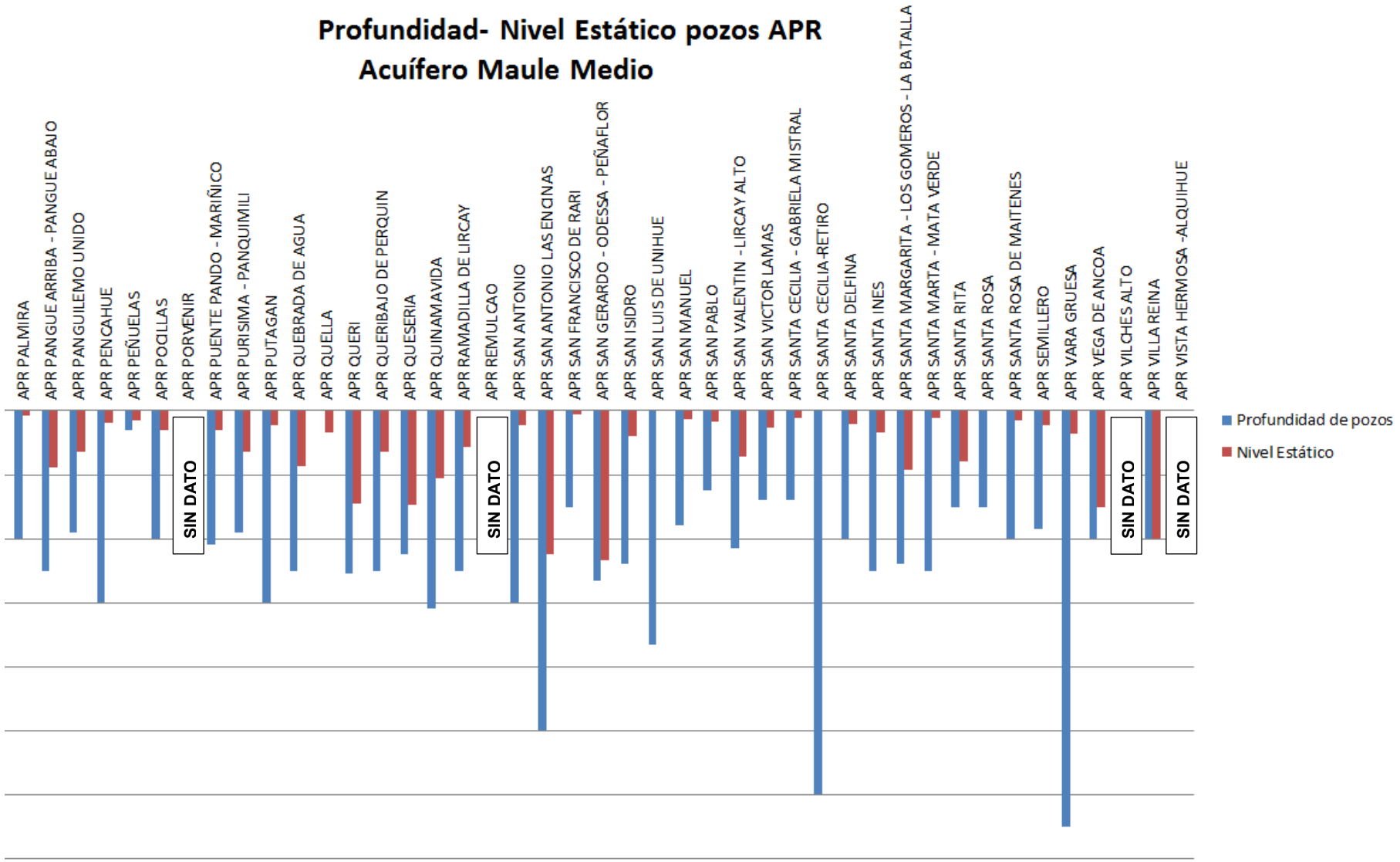



Ilustración 59: Gráfico "Profundidad- Nivel Estático pozos APR- Acuífero Maule Medio- parte 2". Creación propia.

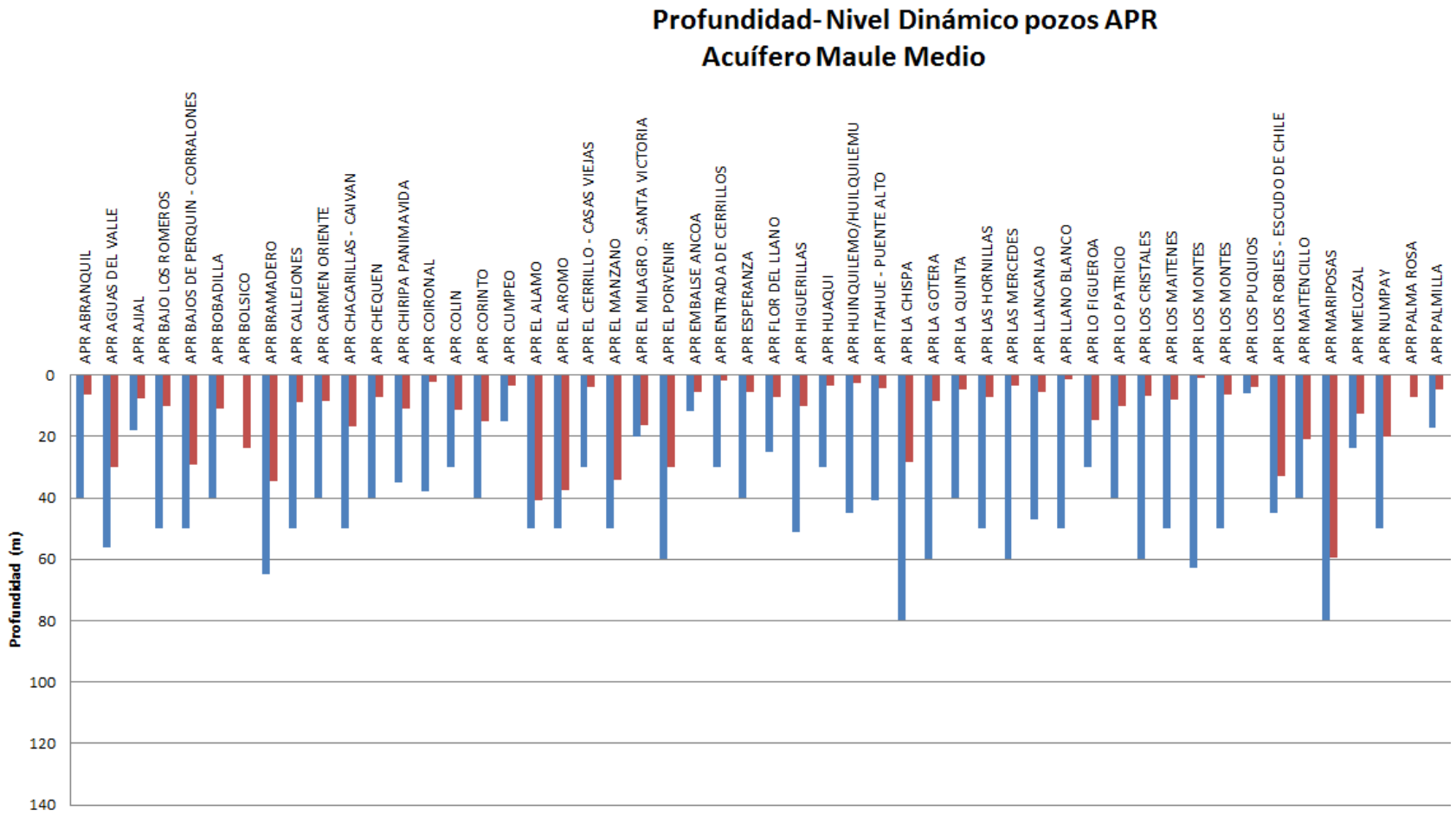



**Ilustración 60: Gráfico "Profundidad- Nivel Dinámico pozos APR- Acuífero Maule Medio- parte 1". Creación propia.**

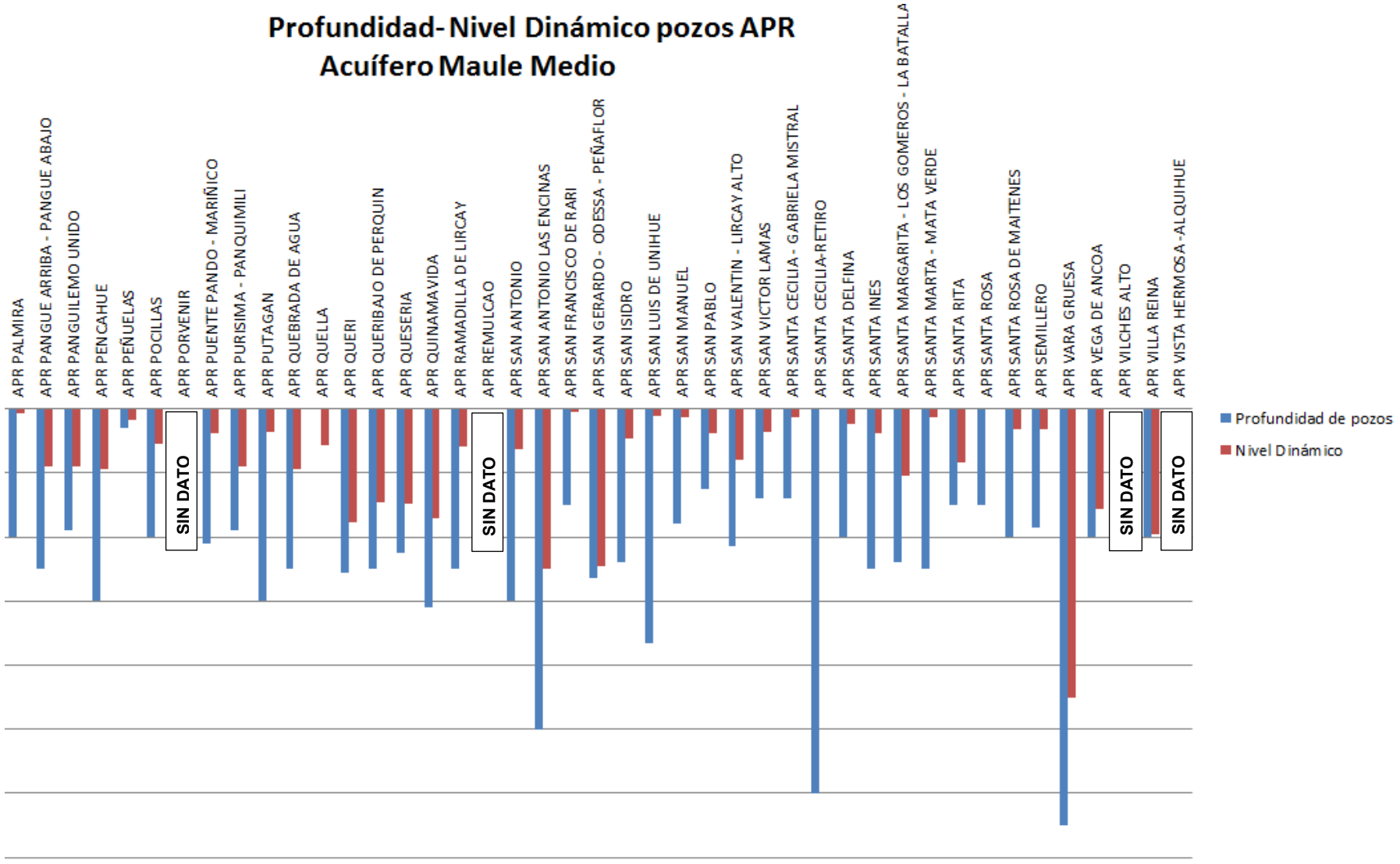



Ilustración 61: Gráfico "Profundidad- Nivel Dinámico pozos APR- Acuífero Maule Medio- parte 2". Creación propia.

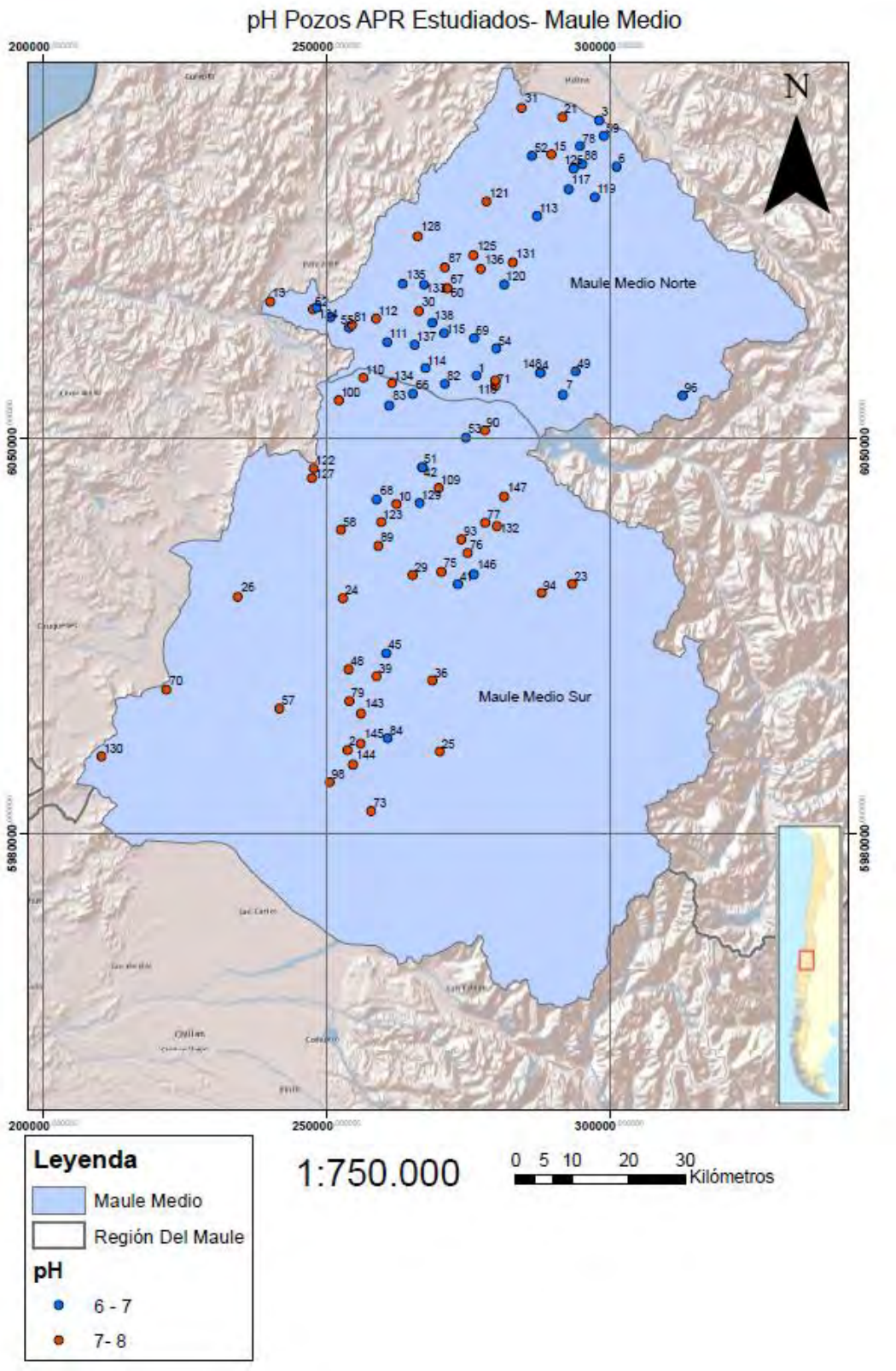



Ilustración 62: Mapa "pH pozos APR Estudiados-Maule Medio". Creación propia

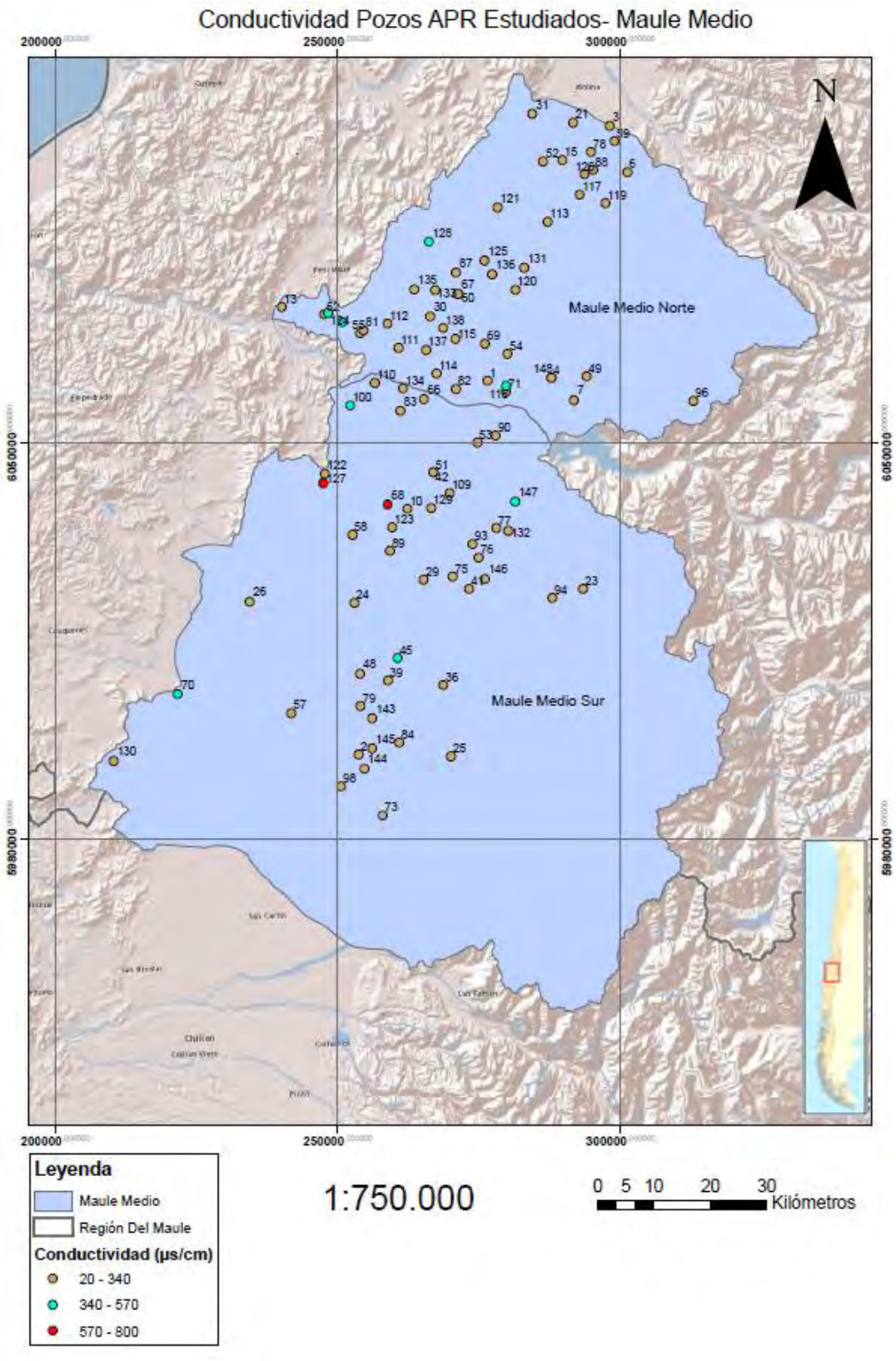



Ilustración 63: Mapa "Conductividad Pozos APR Estudiados- Maule Medio". Creación propia.

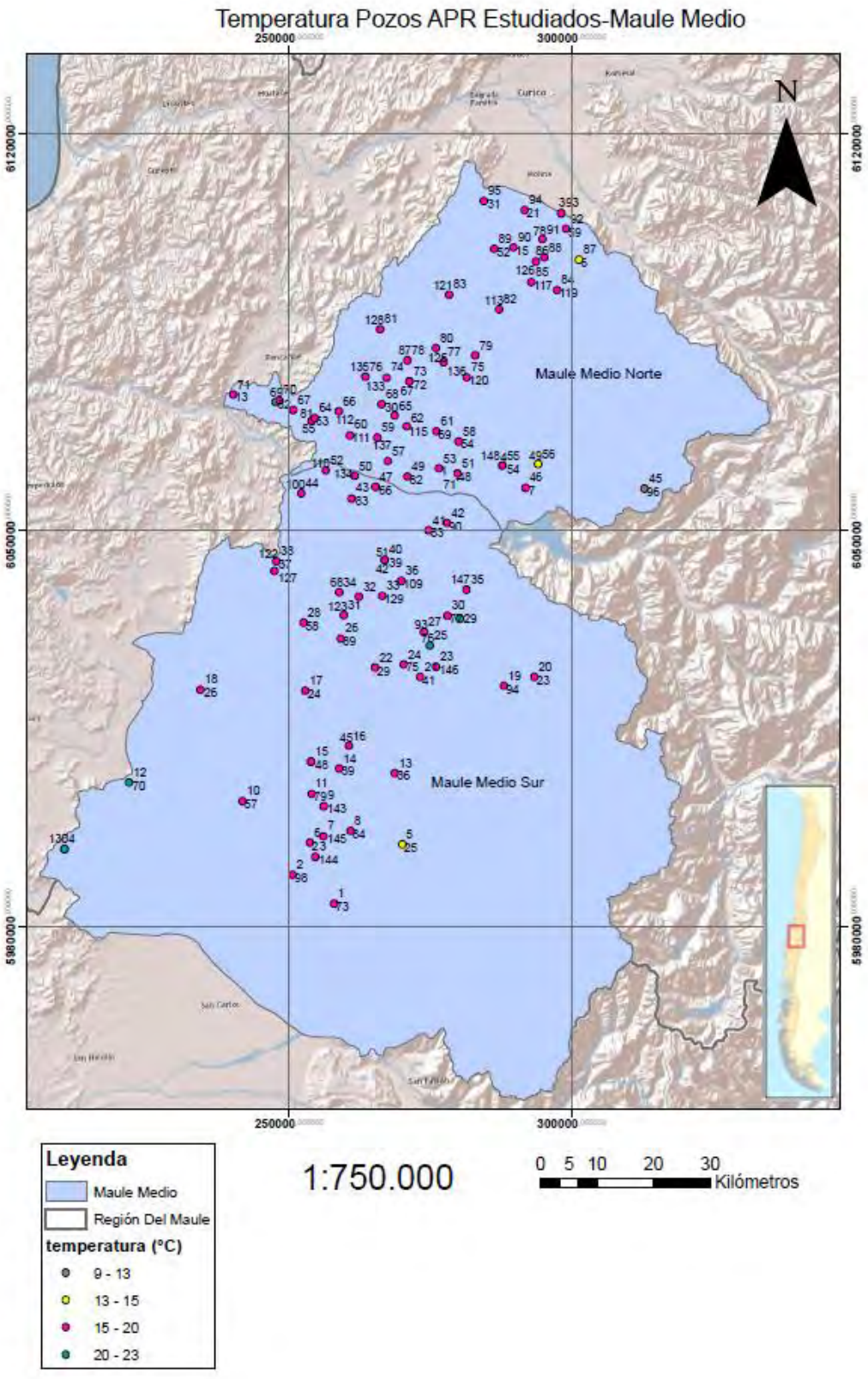



Ilustración 64: Mapa "Temperatura Pozos APR Estudiados- Maule Medio". Creación propia.

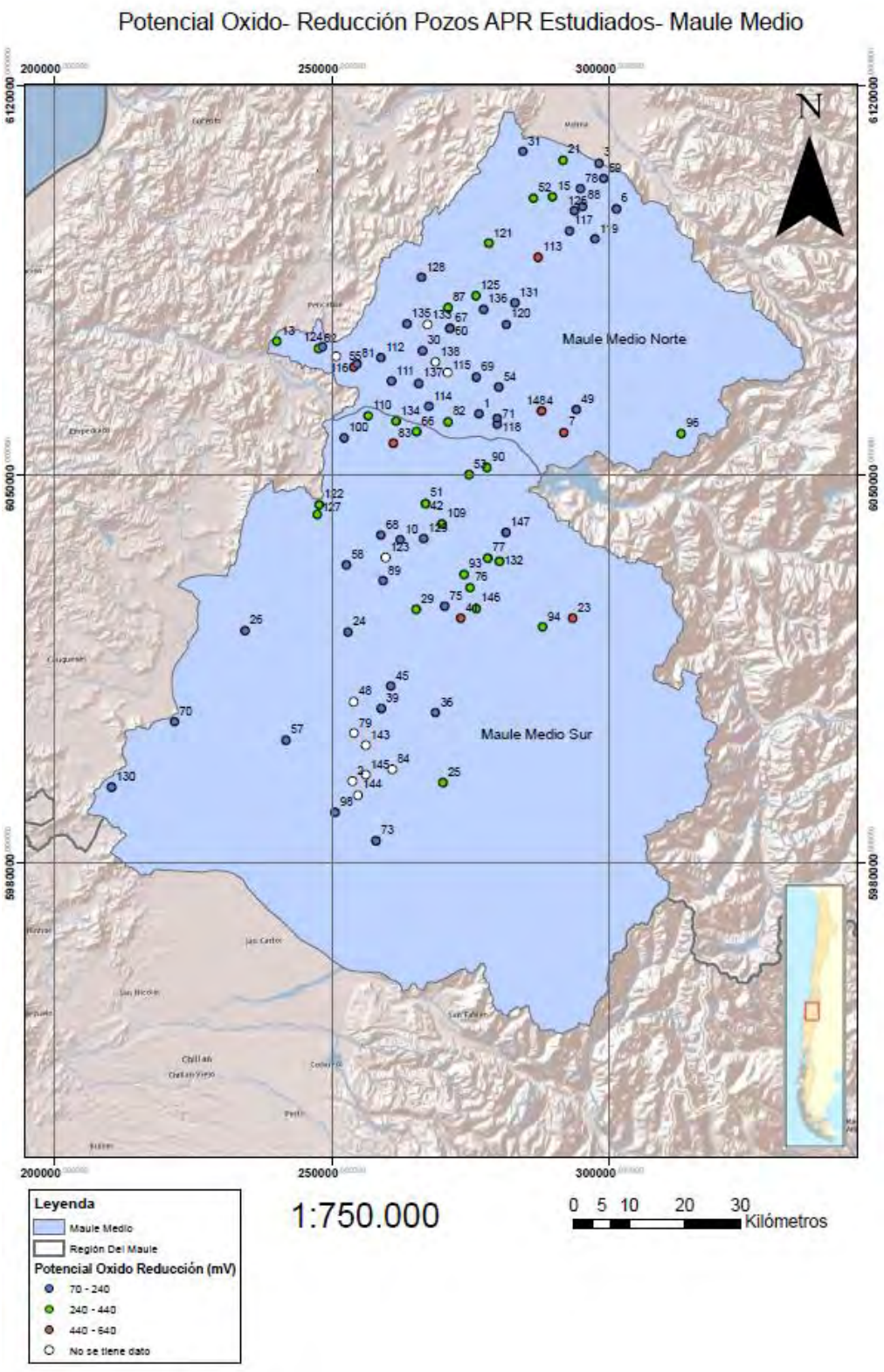



**Ilustración 65: Mapa "Potencial Oxido- Reducción pozos APR estudiados- Maule Medio". Creación propia.**

Los parámetros físico-químicos medidos en terreno (temperatura, pH, potencial oxido reducción y conductividad eléctrica) se encuentran, en general, dentro de rangos típicos esperables para aguas duces.

En el acuífero Maule Medio al igual que el Mataquito se caracteriza por poseer un pH entre 6 y 8, por lo que es un acuífero Neutro. Maule Medio Norte posee mayor tendencia a la acidez mientras que el Maule Medio Sur a la alcalinidad, por lo que se infiere que las aguas subterráneas de la cuenca poseen una cantidad de bicarbonato considerable.

La conductividad eléctrica, en general es baja. Esto se debe a que se trata de aguas dulces con baja cantidad de sales disueltas, los puntos con valores inusualmente más altos son APR PUTAGAN y APR LA GOTERA, aunque no superan la norma. En cuanto a la temperatura, las aguas cercanas a la línea de costa son más cálidas mientras que hacia la cordillera son más frías, aunque se tienen excepciones: APR QUINAMAVIDA y SAN ANTONIO LAS ENCINAS. En ambos parámetros, los valores tienden a incrementarse en el sentido del flujo del agua, es decir, de este a oeste.

En cuanto a la distribución de los valores de potencial oxido reducción se tienen valores positivos de baja magnitud.

### V.1.3.1 DATOS DE TERRENO ACUÍFERO CAUQUENES

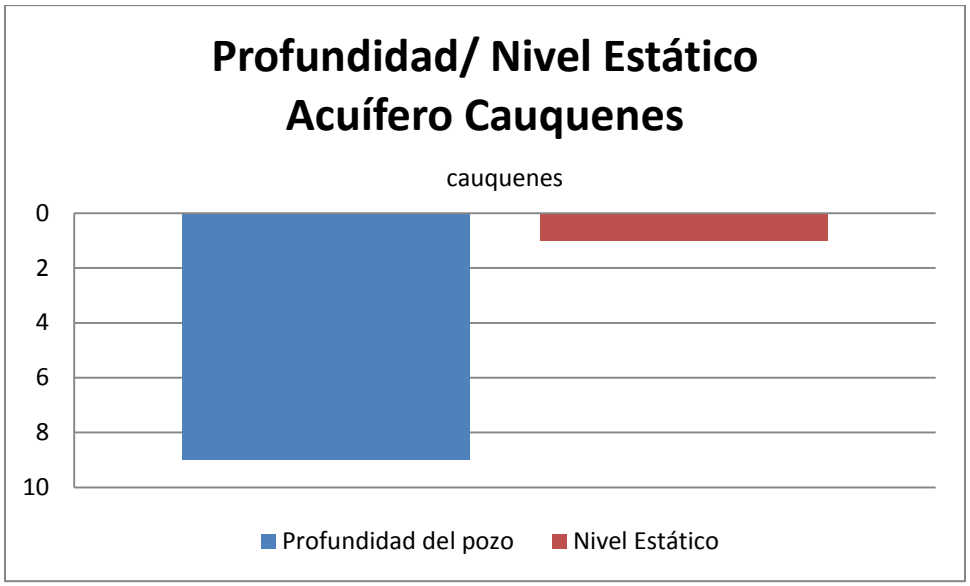



**Ilustración 66: Gráfico "Profundidad/ Nivel Estático Acuífero Cauquenes". Creación propia.**

Cabe señalar que de los datos obtenidos de terreno para el acuífero Cauquenes, no fue posible recopilar información respecto del nivel dinámico del APR CORONEL MAULE.

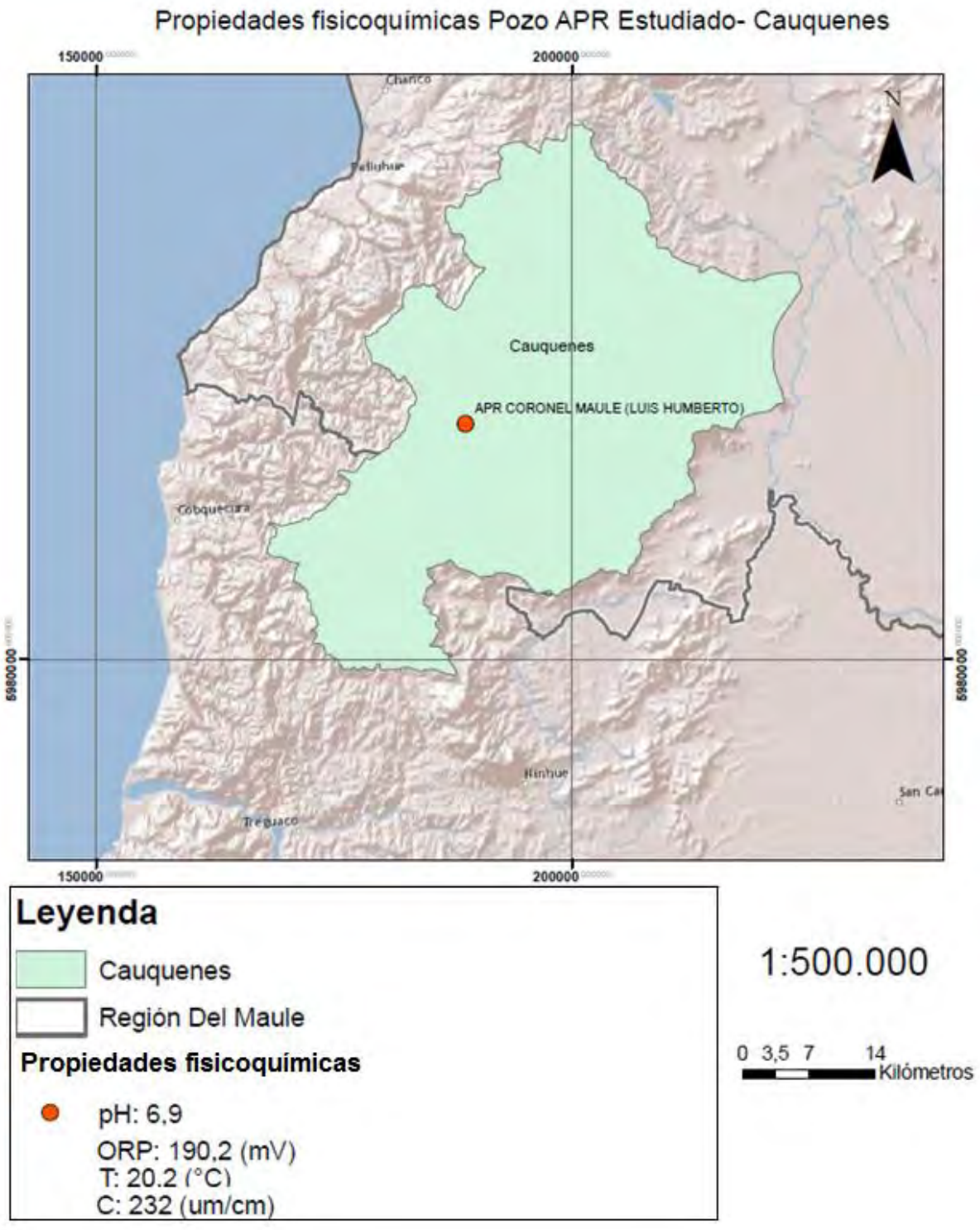



**Ilustración 67: Mapa "Propiedades fisicoquímicas pozo APR estudiado- Cauquenes". Creación propia.**

## V.1.4 DATOS DE TERRENO ACUÍFEROS PRELIMINARES

### V.1.4.1 DATOS DE TERRENO ACUÍFERO MAULE ALTO

| Nombre del pozo | Profundidad del pozo(m) | Nivel estático(m) | Nivel dinámico(m) | Temperatura (°C) | pH | Conductividad (µs/cm) | Potencial oxido-reducción (mV) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| APR PASO NEVADO | 40 | 13,74 | 15,86 | 15,60 | 6,41 | 254 | 255,5 |

Tabla 30: Datos de terreno del Acuífero Maule Alto. Creación propia.

### V.1.4.2 DATOS DE TERRENO ACUÍFERO MAULE BAJO

| Nombre del pozo | Profundidad del pozo(m) | Nivel estático(m) | Nivel dinámico(m) | Temperatura (°C) | pH | Conductividad (µs/cm) | Potencial oxido-reducción (mV) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| APR LUIS CRUZ MARTINEZ | 40 | 2 | 19 | 20,3 | 7,3 | 230 | 250 |

Tabla 31: Datos de terreno Acuífero Maule Bajo. Creación propia.

### V.1.4.3 DATOS DE TERRENO ACUÍFERO DUNAS DE CHANCO

| Nombre del pozo | Profundidad del pozo(m) | Nivel estático(m) | Nivel dinámico(m) | Temperatura (°C) | pH | Conductividad (µs/cm) | Potencial oxido-reducción (mV) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| APR LOANCO | 33 | 11,1 | 15 | 17,86 | 7,11 | 302 | 234 |
| APR PAHUIL | 40 | 21,3 | 30,2 | 18,79 | 7,19 | 558 | 88,5 |

Tabla 32: Datos de terreno Acuífero Dunas de Chanco. Creación propia.

### V.1.4.4 DATOS DE TERRENO ACUÍFERO PLAYA JUNQUILLAR

| Nombre del pozo | Temperatura (°C) | pH | Conductividad (µs/cm) | Potencial oxido-reducción (mV) |
|---|---|---|---|---|
| APR BATUCO | 18,20 | 6,93 | 246 | 210,2 |
| APR CARRIZAL | 22,40 | 8,43 | 68 | 178,8 |

**Tabla 33: Datos de terreno Acuífero Playa Junquillar. Creación propia.**

### V.1.4.5 DATOS DE TERRENO ACUÍFERO PURAPEL

| Nombre del pozo | Profundidad del pozo(m) | Nivel estático(m) | Nivel dinámico(m) | Temperatura (°C) | pH | Conductividad (µs/cm) | Potencial oxido-reducción (mV) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| APR NIRIVILLO | 58 | 3,4 | 8 | 20,00 | 7,8 | 300 | 260 |
| APR SANTA OLGA | SIN DATO | SIN DATO | SIN DATO | 23,10 | 8 | 390 | 200 |

**Tabla 34: Datos de terreno Acuífero Purapel. Creación propia**

## V.2 CALIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

A continuación se exponen todos los datos del Balance Iónico de cada acuífero de la VII Región.

| Nombre Pozo | Acuífero | Balance iónico |
|---|---|---|
| APR ABRANQUIL | Maule Medio | 16,76 |
| APR AGUAS DEL VALLE | Maule Medio | 9,43 |
| APR AJIAL | Maule Medio | 25,87 |
| APR BAJO LOS ROMEROS | Maule Medio | 3,55 |
| APR BAJOS DE PERQUIN - CORRALONES | Maule Medio | 14,40 |
| APR BATUCO | playa junquillar | 14,09 |
| APR BOBADILLA | Maule Medio | 17,75 |
| APR BOLSICO | Maule Medio | 27,56 |
| APR BRAMADERO | Maule Medio | 10,27 |
| APR CALLEJONES | Maule Medio | 18,68 |
| APR CARMEN ORIENTE | Maule Medio | NO SE TIENE DATO |
| APR CARRIZAL | playa junquillar | 26,53 |
| APR CASABLANCA | Mataquito | 1,36 |
| APR CHACARILLAS - CAIVAN | Maule Medio | 20,42 |
| APR CHEQUEN | Maule Medio | 17,30 |
| APR CHIRIPA PANIMAVIDA | Maule Medio | NO SE TIENE DATO |
| APR COIRONAL | Maule Medio | 12,63 |
| APR COLIN | Maule Medio | 18,11 |
| APR COMALLE | Mataquito | 7,51 |
| APR CORDILLERILLA | Mataquito | 7,72 |
| APR CORINTO | Maule Medio | 7,90 |
| APR CORONEL MAULE (LUIS HUMBERTO) | cauquenes | 44,22 |

| Nombre Pozo | Acuífero | Balance iónico |
|---|---|---|
| APR CUMPEO | Maule Medio | 21,27 |
| APR DOMINGO MANCILLA | Mataquito | 3,10 |
| APR DUAO – TRES ESQUINAS | No delimitado por DGA | 15,92 |
| APR EL ALAMO | Maule Medio | 23,73 |
| APR EL AROMO | Maule Medio | 26,89 |
| APR EL CERRILLO – CASAS VIEJAS | Maule Medio | 23,18 |
| APR EL CISNE | Mataquito | 2,46 |
| APR EL CRUCERO | Mataquito | 12,09 |
| APR EL MAITEN – SAN SALVADOR | Mataquito | 5,36 |
| APR EL MANZANO | Maule Medio | 21,60 |
| APR EL MILAGRO. SANTA VICTORIA | Maule Medio | 16,25 |
| APR EL MOLINO – VENTANA DEL ALTO | Mataquito | 7,14 |
| APR EL PEUMAL – SAN RAMON | Mataquito | 4,80 |
| APR EL PORVENIR | Maule Medio | 14,42 |
| APR EL QUELMEN – SAN RAFAEL | Mataquito | 0,40 |
| APR EL RODEO | Mataquito | 17,92 |
| APR EMBALSE ANCOA | Maule Medio | 13,90 |
| APR ENTRADA DE CERRILLOS | Maule Medio | 20,09 |
| APR ESPERANZA | Maule Medio | 20,56 |
| APR FLOR DEL LLANO | Maule Medio | 19,11 |
| APR HACIENDA TENO | Mataquito | 11,11 |
| APR HIGUERILLAS | Maule Medio | 22,89 |
| APR HUALEMU | Mataquito | 2,55 |
| APR HUAQUEN | Mataquito | 10,10 |
| APR HUAQUI | Maule Medio | 23,72 |

| Nombre Pozo | Acuífero | Balance iónico |
|---|---|---|
| APR HUINQUILEMO/HUILQUILEMU | Maule Medio | 0,95 |
| APR ITAHUE – PUENTE ALTO | Maule Medio | 11,59 |
| APR LA CHISPA | Maule Medio | 24,50 |
| APR LA CUESTA | Mataquito | 8,77 |
| APR LA GOTERA | Maule Medio | 21,12 |
| APR LA HUERTA MATAQUITO | Mataquito | 5,39 |
| APR LA LAGUNA | Mataquito | 0,26 |
| APR LA OBRA | Mataquito | 4,92 |
| APR LA PALMILLA | Mataquito | 24,63 |
| APR LA QUINTA | Maule Medio | 20,91 |
| APR LA TERCERA – CHALET QUEMADO | No delimitado por DGA | 18,51 |
| APR LAS ARBOLEDAS | Mataquito | 10,85 |
| APR LAS HORNILLAS | Maule Medio | 30,72 |
| APR LAS LIRAS | Mataquito | 2,79 |
| APR LAS MERCEDES | Maule Medio | 18,47 |
| APR LIEN PLACILLA | Mataquito | 8,37 |
| APR LLANCANAO | Maule Medio | 18,63 |
| APR LLANO BLANCO | Maule Medio | 17,30 |
| APR LO FIGUEROA | Maule Medio | 21,23 |
| APR LO PATRICIO | Maule Medio | 17,02 |
| APR LOANCO | Dunas de Chanco | 13,24 |
| APR LORA | Mataquito | 22,50 |
| APR LOS CASTAÑOS | Mataquito | 2,95 |
| APR LOS CRISTALES | Maule Medio | 19,76 |
| APR LOS CRISTALES | Mataquito | 2,34 |

| Nombre Pozo | Acuífero | Balance iónico |
|---|---|---|
| APR LOS GUAICOS | Mataquito | 2,86 |
| APR LOS MAITENES | Maule Medio | 5,14 |
| APR LOS MAQUIS | No delimitado por DGA | 27,63 |
| APR LOS MONTES | Maule Medio | 23,44 |
| APR LOS MONTES | Maule Medio | 24,24 |
| APR LOS NICHES - SANTA ELENA | Mataquito | 3,70 |
| APR LOS PUQUIOS | Maule Medio | 13,07 |
| APR LOS ROBLES - ESCUDO DE CHILE | Maule Medio | 12,47 |
| APR LUIS CRUZ MARTINEZ | maule bajo | 17,17 |
| APR MAITENCILLO | Maule Medio | 13,21 |
| APR MARIPOSAS | Maule Medio | 6,31 |
| APR MELOZAL | Maule Medio | 12,64 |
| APR NIRIVILLO | Purapel | 14,27 |
| APR NUMPAY | Maule Medio | 23,31 |
| APR ORILLA NAVARRO | Mataquito | 13,69 |
| APR PAHUIL | dunas de Chanco | 10,33 |
| APR PALMA ROSA | Maule Medio | 25,91 |
| APR PALMILLA | Maule Medio | 5,48 |
| APR PALMIRA | Maule Medio | 0,06 |
| APR PANGUE ARRIBA - PANGUE ABAJO | Maule Medio | 22,49 |
| APR PANGUILEMO UNIDO | Maule Medio | 4,18 |
| APR PASO NEVADO | Maule alto | 4,40 |
| APR PENCAHUE | Maule Medio | 2,60 |
| APR PEÑUELAS | Maule Medio | 16,03 |
| APR PERALILLO | Mataquito | 39,28 |

| Nombre Pozo | Acuífero | Balance iónico |
|---|---|---|
| APR PICHINGAL | Mataquito | 3,71 |
| APR PIEDRA BLANCA | Mataquito | 11,01 |
| APR PIRIHUIN - LOS CANALES | Mataquito | 2,96 |
| APR PLACILLA | Mataquito | 17,35 |
| APR POCILLAS | Maule Medio | 70,92 |
| APR PORVENIR | Maule Medio | 24,01 |
| APR POTRERO GRANDE | Mataquito | 21,09 |
| APR PUENTE PANDO - MARIÑICO | Maule Medio | 6,54 |
| APR PURISIMA - PANQUIMILI | Maule Medio | 5,86 |
| APR PUTAGAN | Maule Medio | 8,81 |
| APR QUEBRADA DE AGUA | Maule Medio | 12,56 |
| APR QUELLA | Maule Medio | 0,97 |
| APR QUERI | Maule Medio | 6,62 |
| APR QUESERIA | Maule Medio | 14,92 |
| APR QUILVO ALTO | Mataquito | 2,20 |
| APR QUINAMAVIDA | Maule Medio | 14,47 |
| APR RAMADILLA DE LIRCAY | Maule Medio | 19,43 |
| APR REMULCAO | Maule Medio | 23,17 |
| APR RINCON DE SARMIENTO | Mataquito | 4,88 |
| APR SAN ANTONIO | Maule Medio | 14,80 |
| APR SAN ANTONIO LAS ENCINAS | Maule Medio | 21,53 |
| APR SAN FRANCISCO DE RARI | Maule Medio | 18,21 |
| APR SAN GERARDO - ODESSA - PEÑAFLOR | Maule Medio | 24,35 |
| APR SAN ISIDRO | Maule Medio | 29,78 |
| APR SAN JORGE DE ROMERAL | Mataquito | 3,34 |

| Nombre Pozo | Acuífero | Balance iónico |
|---|---|---|
| APR SAN LUIS DE UNIHUE | Maule Medio | 16,41 |
| APR SAN MANUEL | Maule Medio | 5,37 |
| APR SAN PABLO | Maule Medio | 16,09 |
| APR SAN VALENTIN - LIRCAY ALTO | Maule Medio | 20,17 |
| APR SAN VICTOR LAMAS | Maule Medio | NO SE TIENE DATO |
| APR SANTA CECILIA - GABRIELA MISTRAL | Maule Medio | 6,03 |
| APR SANTA CECILIA-RETIRO | Maule Medio | NO SE TIENE DATO |
| APR SANTA DELFINA | Maule Medio | 24,42 |
| APR SANTA INES | Maule Medio | 34,09 |
| APR SANTA MARGARITA - LOS GOMEROS - LA BATALLA | Maule Medio | 14,80 |
| APR SANTA MARTA - MATA VERDE | Maule Medio | 15,09 |
| APR SANTA OLGA | Purapel | 3,63 |
| APR SANTA OLGA - LOS GUINDOS | Mataquito | 27,22 |
| APR SANTA REBECA - PURISIMA | Mataquito | 5,66 |
| APR SANTA RITA | Maule Medio | 9,51 |
| APR SANTA ROSA | Maule Medio | 21,50 |
| APR SANTA ROSA DE MAITENES | Maule Medio | 12,39 |
| APR SEMILLERO | Maule Medio | 18,25 |
| APR TUTUQUEN | Mataquito | 3,22 |
| APR TUTUQUEN BAJO | Mataquito | 13,06 |
| APR VARA GRUESA | Maule Medio | 23,72 |
| APR VEGA DE ANCOA | Maule Medio | 16,26 |
| APR VENTANA DEL BAJO | Mataquito | 2,21 |
| APR VILCHES ALTO | Maule Medio | 28,37 |
| APR VILLA PRATS | Mataquito | 10,06 |

| Nombre Pozo | Acuífero | Balance iónico |
|---|---|---|
| APR VILLA REINA | Maule Medio | 23,57 |
| APR VISTA HERMOSA | Mataquito | 12,47 |
| APR VISTA HERMOSA -ALQUIHUE | Maule Medio | 13,78 |

**Tabla 35: Datos de Balance Iónico de los pozos APR estudiados en la Región del Maule. De los pozos Carmen Oriente, Chiripa panimavida, Queribajo, San Victor Lamas y Santa Cecilia Retiro no se tienen datos.**

Según el valor de conductividad eléctrica se considera un rango de error admisible, para considerar la validez del cálculo de balance iónico. Ver la siguiente tabla:

| Conductividad eléctrica ( µS/cm) | Error admisible (%) |
|---|---|
| 50 | 30 |
| 200 | 10 |
| 500 | 8 |
| >2000 | 5 |

**Tabla 36: Error admisible según la Conductividad eléctrica de la muestra de agua subterránea de pozo APR. Extraído (Custodio. E, 1983)**

Según el estudio realizado en la Región del Maule, de un total de 151 muestras con datos se obtiene:

- El 7% de las muestras, se encuentran en un rango de conductividad eléctrica entre 500 y 2000 (µS/cm), por lo cual se considera un error admisible de 8%.

- El 62 % de las muestras, se encuentran en un rango de conductividad eléctrica entre 200 y 500 (µS/cm), por lo cual se considera un error admisible de 10%.
- El 30% de las muestras, se encuentran en un rango de conductividad eléctrica entre 50 y 200 (µS/cm), por lo cual se considera un error admisible de 30%.
- El 17% de las muestras, posee un error fuera del rango admisible.

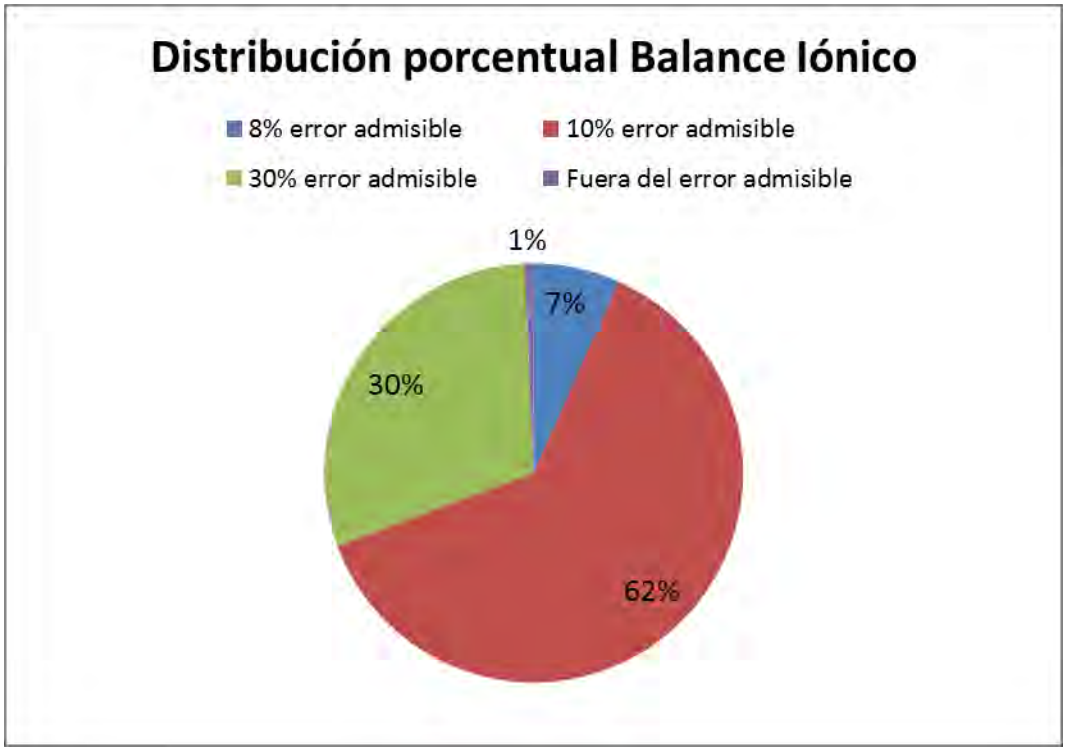



**Ilustración 68 : Gráfico "Distribución porcentual de Error de Balance Iónico". Región del Maule. Creación Propia**

## V.3 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS

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

El origen esencial de las aguas subterráneas es el agua de lluvia, la cual tiene gran importancia en el aporte de sales solubles y agresividad de las aguas de infiltración. A medida que el agua se infiltra y escurre hacia la costa, cumple un ciclo de metamorfismo de las aguas naturales en la corteza. Las aguas más cercanas a la zona de recarga tendrán una composición mayor de $HCO_3^-$, luego aumentara la concentración de $SO_4^{-2}$ y en la zona de descarga dominaran las aguas ricas el $Cl^-$. Se debe a dos causas principalmente, la solubilidad y la abundancia.

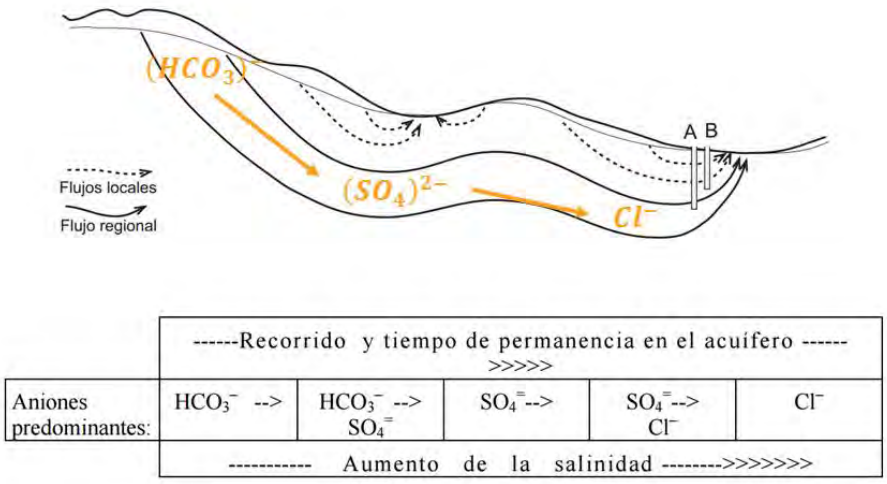



**Ilustración 69 : Secuencia de Chebotarev. Extraído (Taucare, 2017)**

El agua marina tiene una mayor concentración de sales disueltas, son aguas ricas en Cloro, Sodio y Potasio. En zonas cercanas a la costa, se da un fenómeno

llamado Intrusión Marina, proceso de movimiento temporal o permanente de agua salada tierra adentro desplazando al agua dulce.

Cuando las aguas comienzan a infiltrarse, la composición dependerá netamente por la influencia de la mineralogía con la cual entra en contacto estas aguas además del tiempo de interacción entre ambos.

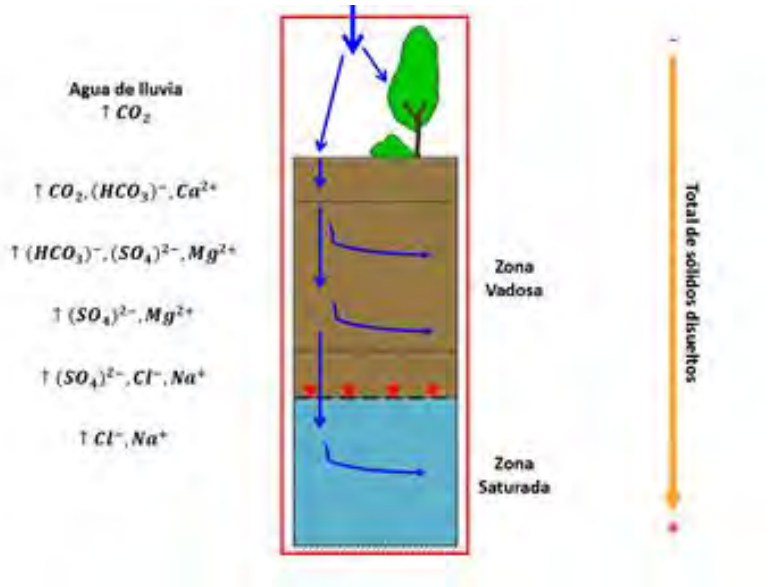



**Ilustración 70: Composición de las aguas subterráneas, a medida de la interacción agua-roca. Extraído (Taucare, 2017)**

La composición de las aguas subterráneas está condicionada por diversos factores, tanto naturales como antropogénicos. En la Tabla 37 se describen los orígenes más comunes de los diferentes parámetros mayoritarios analizados tradicionalmente para caracterizar la composición de aguas subterráneas.

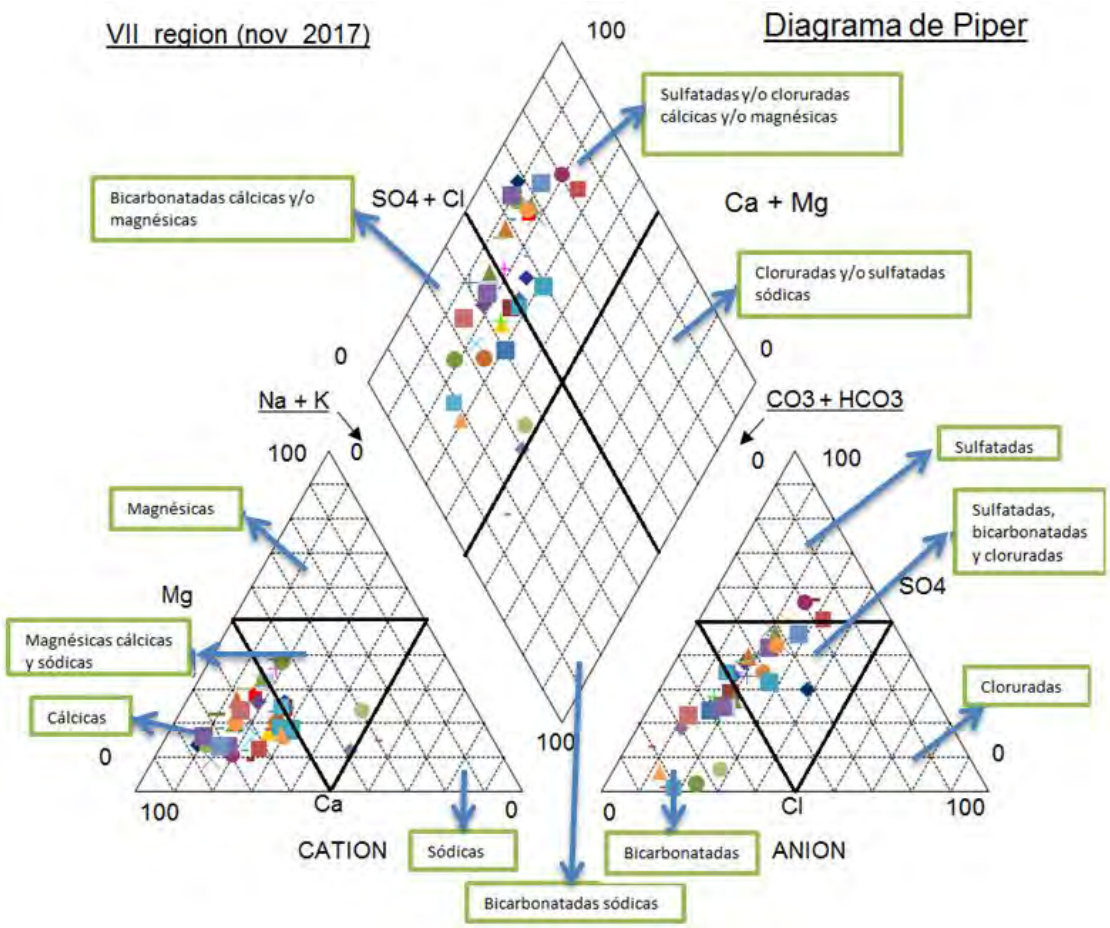
| Ion | Origen |
|---|---|
| $Na^+$ | Plagioclasas, halita, zeolita, polvo atmosférico, agua de mar, aerosol marino. |
| $K^+$ | Feldespato potásico, micas (muscovita), agua de mar. |
| $Mg^{2+}$ | Dolomita, serpentina, piroxeno, anfíbol. |
| $Ca^{2+}$ | Carbonatos, yeso, plagioclasas, piroxeno, anfíbol. |

| Ion | Origen |
|---|---|
| $Cl^-$ | Halita, polvo atmosférico, agua de mar, aerosol marino |
| $HCO_3^-$ | Carbonatos, materia orgánica, $CO_2$ de suelos. |
| $SO_4^{2-}$ | Atmósfera, yeso, sulfuros, fertilizantes. |
| $NO_3^-$ | Atmósfera, materia orgánica, fertilizantes. |
| $SiO_2$ | Silicatos |

**Tabla 37: Origen principal de algunos iones. Hidrogeología: Conceptos básicos de hidrogeología subterránea. Extraído (FCIHS, 2009)**

## V.3.1 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS ACUÍFEROS SHAC

### V.3.1.1 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS ACUÍFERO MATAQUITO



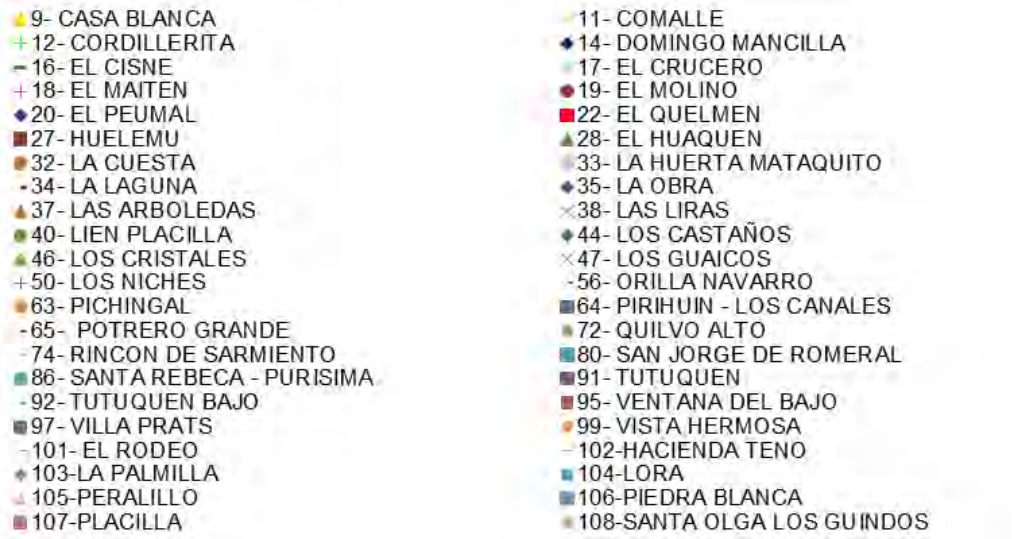



**Ilustración 71: Diagrama de Piper "Pozos APR estudiados en el acuífero Mataquito". Creación propia.**

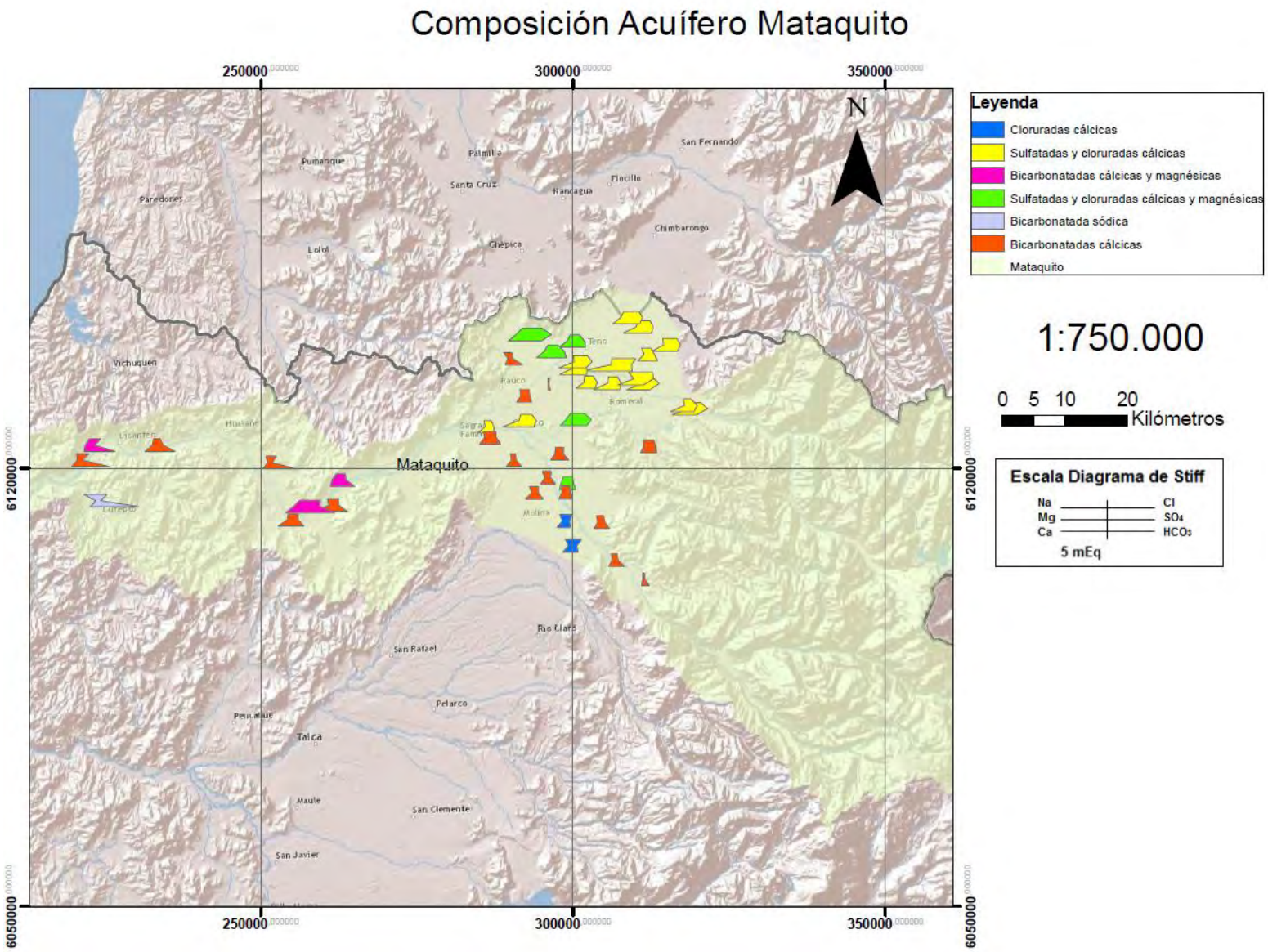



**Ilustración 72: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Mataquito ilustrado mediante diagramas de Stiff. Creación propia.**

Al observar los Diagramas de Piper y Stiff, se puede observar que la composición de las aguas del acuífero Mataquito se presentan bastante variadas, esto es deducible, debido a la gran extensión y heterogeneidad de la cuenca, es el segundo acuífero más grande de la Región, abarcando un total del 30% de los pozos del estudio. En las zonas altas del Río Lontué, las aguas se caracterizan por tener una composición bicarbonatada cálcica, esto se debe a que se sitúan en zonas de recarga de agua de lluvia y que la infiltración ha sido muy baja. Aguas abajo, existe una zona enriquecida en cloro, bicarbonato, calcio y sodio clasificados como aguas cloruradas cálcicas en los APR PICHINGAL – APR SAN JORGE DE ROMERAL, lo que podría ser producto de que el agua se ha infiltrado hasta un punto en que se está produciendo el cambio de aguas superficiales a subterráneas.

En la zona alta del Río Teno, las aguas se caracterizan por tener una importante concentración de sulfuros y de calcio, clasificadas como sulfatadas y cloruradas cálcicas. Esto se debería, según la secuencia de Chebotarev, a que el agua ha recorrido una mayor distancia y por ende ha permanecido más tiempo en el acuífero. Además, es importante mencionar que en general los pozos APR estudiados presentan una profundidad importante en comparación a los otros pozos del área, por lo que se infiere que se ha llevado a cabo un proceso de infiltración y que ha existido interacción agua- roca que ha cambiado la composición de las aguas subterráneas.

En el valle del río Mataquito existe una variación entre aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas y magnésicas hasta desembocar en la costa, se infiere que esta variación se debe al tiempo de residencia en el acuífero y la interacción agua –roca, además de que el magnesio como el calcio son cationes bastante parecidos en sus propiedades químicas por lo que tienden a sustituirse, lo cual es muy efectivo en terrenos arcillosos de baja permeabilidad. En la comuna de Curepto, existe una variación importante en el tipo de agua en el APR EL RODEO (Total de Sólidos Disueltos: 406 mg/L), ya que se observan aguas bicarbonatadas sódicas, al comparar las características de los pozos cercanos

APR LORA (Total de Sólidos Disueltos: 278 mg/L) y APR LIEN PLACILLA (Total de Sólidos Disueltos: 235 mg/L), es posible notar que existe un aumento de sólidos disueltos en las aguas al producirse el cambio de tipo de agua, producto de esta relación se puede inferir que en el lugar podría estar produciéndose un fenómeno de mezcla de aguas.

### V.3.1.2 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS ACUÍFERO MAULE MEDIO

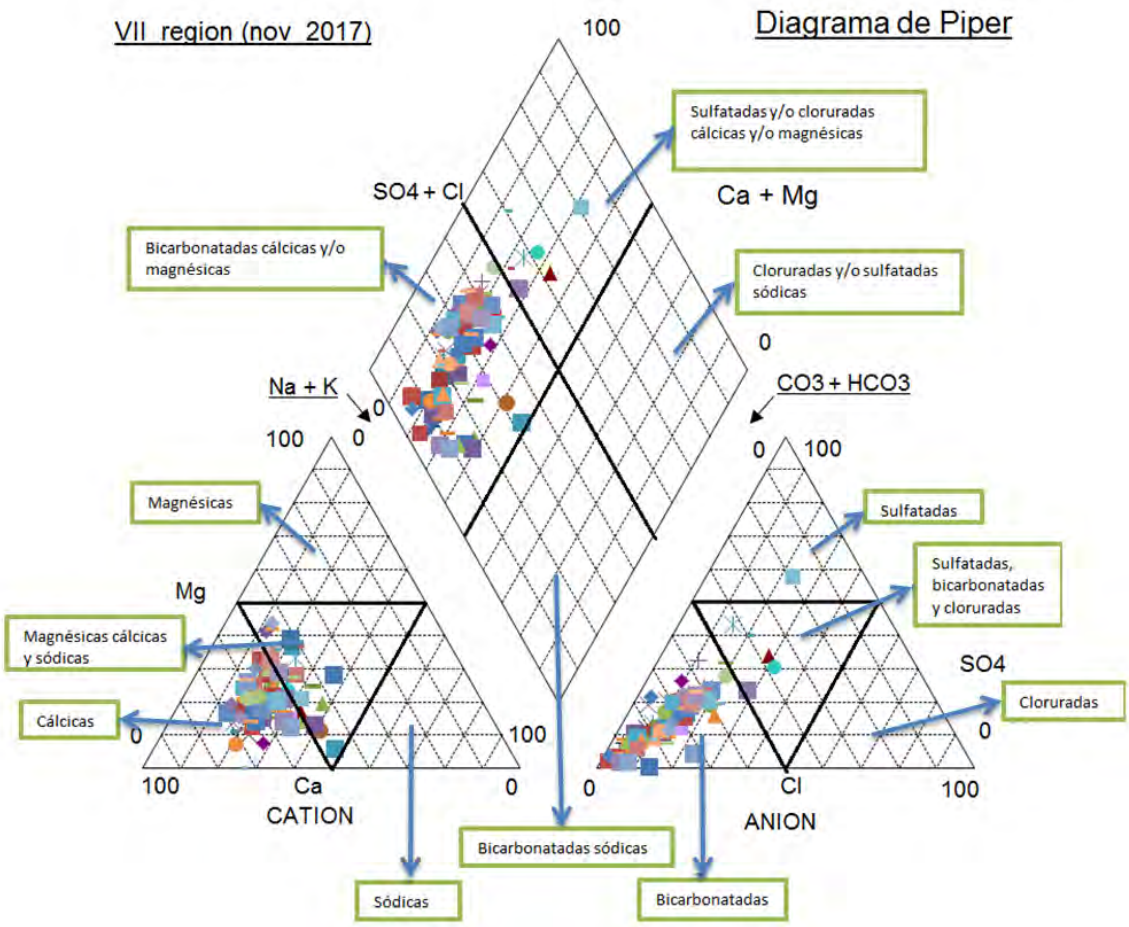


**Ilustración 73: Diagrama de Piper "Pozos APR estudiados Acuífero Maule Medio". No se tienen datos de los pozos Carmen Oriente, Chiripa panimavida, Queribajo, San Victor Lamas y Santa Cecilia Retiro.**

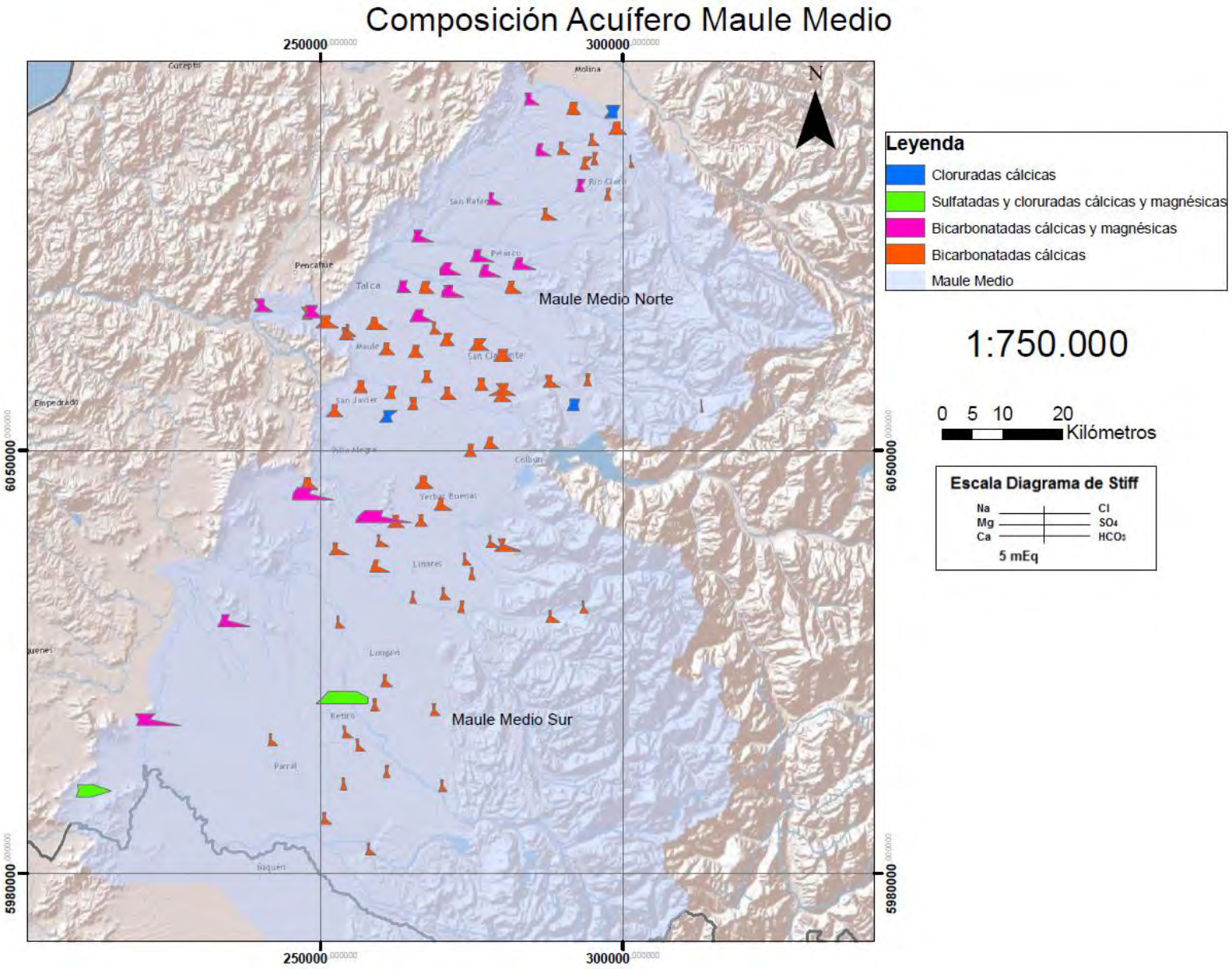



Ilustración 74: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuífero Maule Medio ilustrado mediante diagramas de Stiff. Creación propia

A pesar de la gran extensión del acuífero Maule Medio, se tiene en general una distribución de tipo de aguas bien bastante agrupadas:

En el Maule Medio Norte, todos los ríos que nacen en la cordillera como lo son el Río Claro, Río Colorado, Río Palos de San Pablo y Río Licay vienen cargados de aguas bicarbonatadas cálcicas, esto debido a que se encuentran en la zona de recarga proveniente de las aguas de lluvia. Al avanzar hacia el valle tiende a aumentar la concentración de magnesio, por lo que las aguas sufren un metamorfismo a bicarbonatadas cálcicas y magnésicas. Aguas subterráneas diferentes a las mencionas, se muestrearon en el APR BRAMADERO ubicado en el este del límite de Talca-Linares y en APR BAJO LOS ROMEROS ubicado en el límite norte del acuífero Maule Medio, las cuales son cloruradas cálcicas.

En el Maule Medio Sur, Los ríos que alimentan la cuenca (Río Blanco, Río Longavi, Río Melado, Río Achibueno, Río Ancoa y Río Los cipreses), poseen aguas clasificadas como bicarbonatadas cálcicas, al igual que en el Maule Medio Norte, las aguas mutan a aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas. En el APR POCILLAS y APR LOS MAITENES mutan a sulfatadas y cloruradas cálcicas y magnésicas, mientras que el APR SANTA CECILIA- GABRIELA se caracteriza por aguas cloruradas cálcicas.

En Retiro se encuentra el APR LOS MAITENES, la importante concentración de sulfuros se podría deber a que en la zona se caracteriza por poseer actividad agrícola y la actividad industrial del arroz, cabe señalar que se encuentran cultivos de arroz y por ende las empresas arroceras Tucapel.

A medida que las aguas avanzan de este a oeste, se enriquecen en sales aumentando la cantidad de magnesio, sodio y calcio.

### V.3.1.3 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS ACUÍFERO CAUQUENES

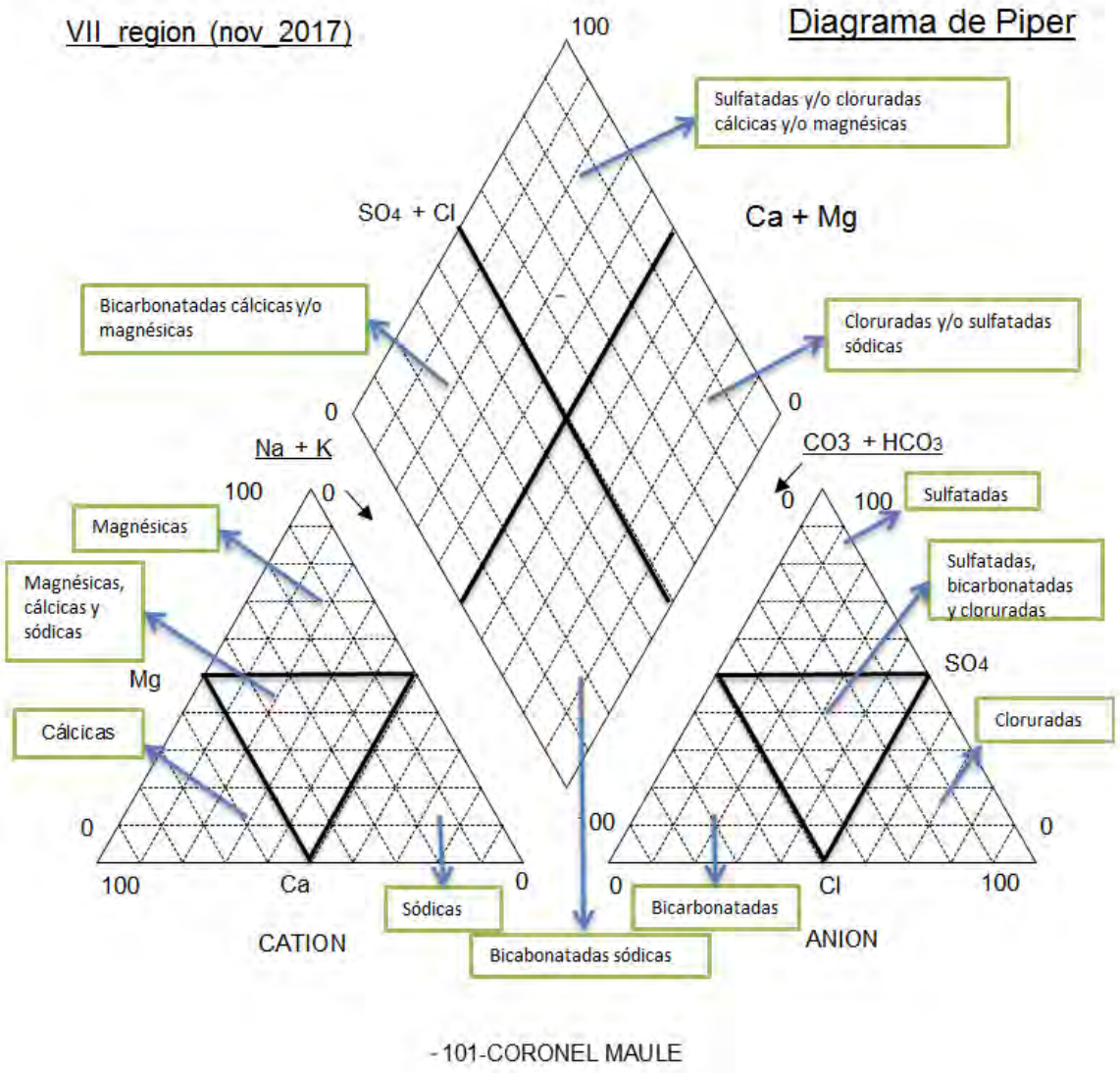



**Ilustración 75: Diagrama de Piper "Pozos APR estudiados Acuífero Cauquenes". Creación propia.**

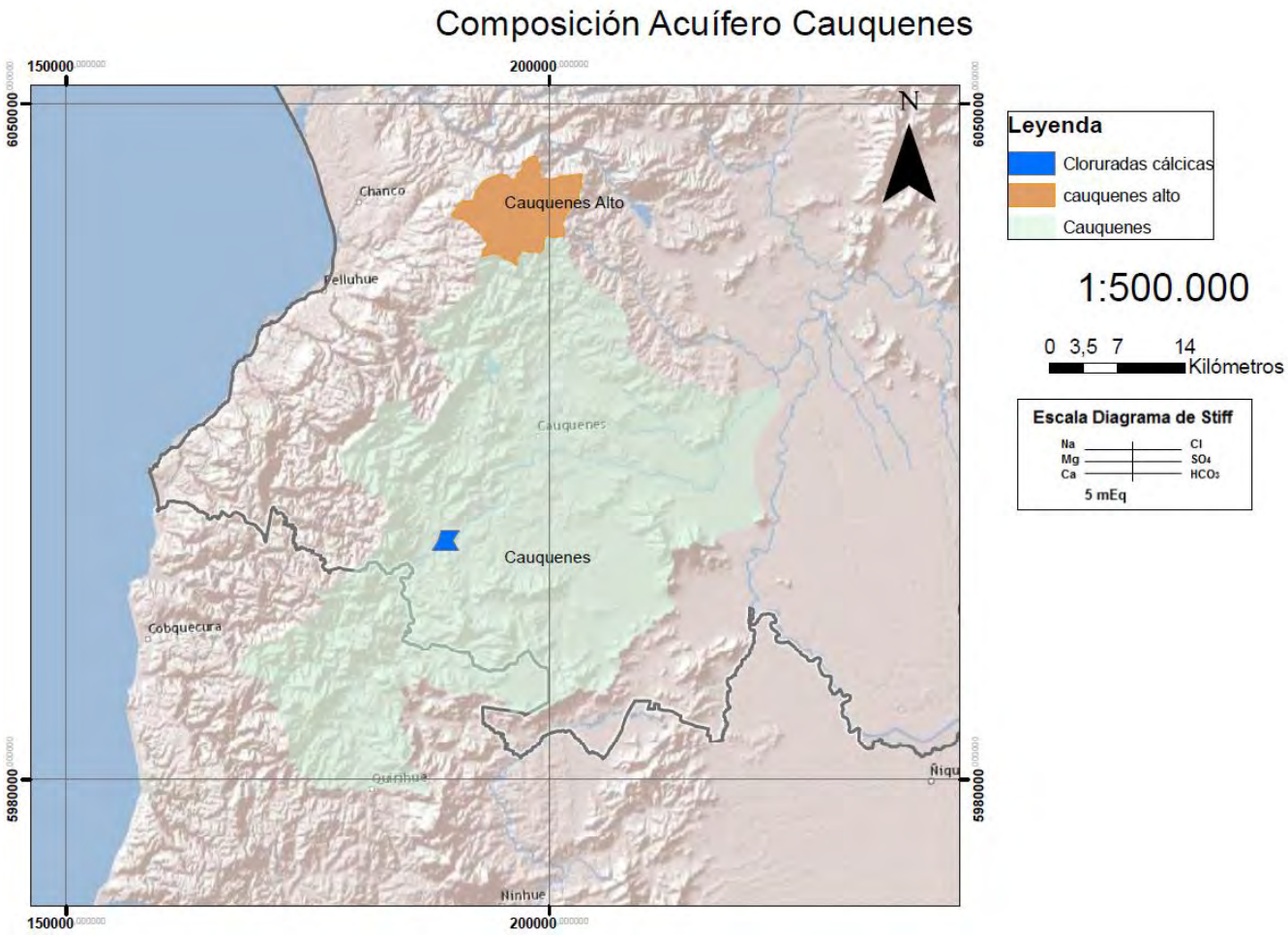
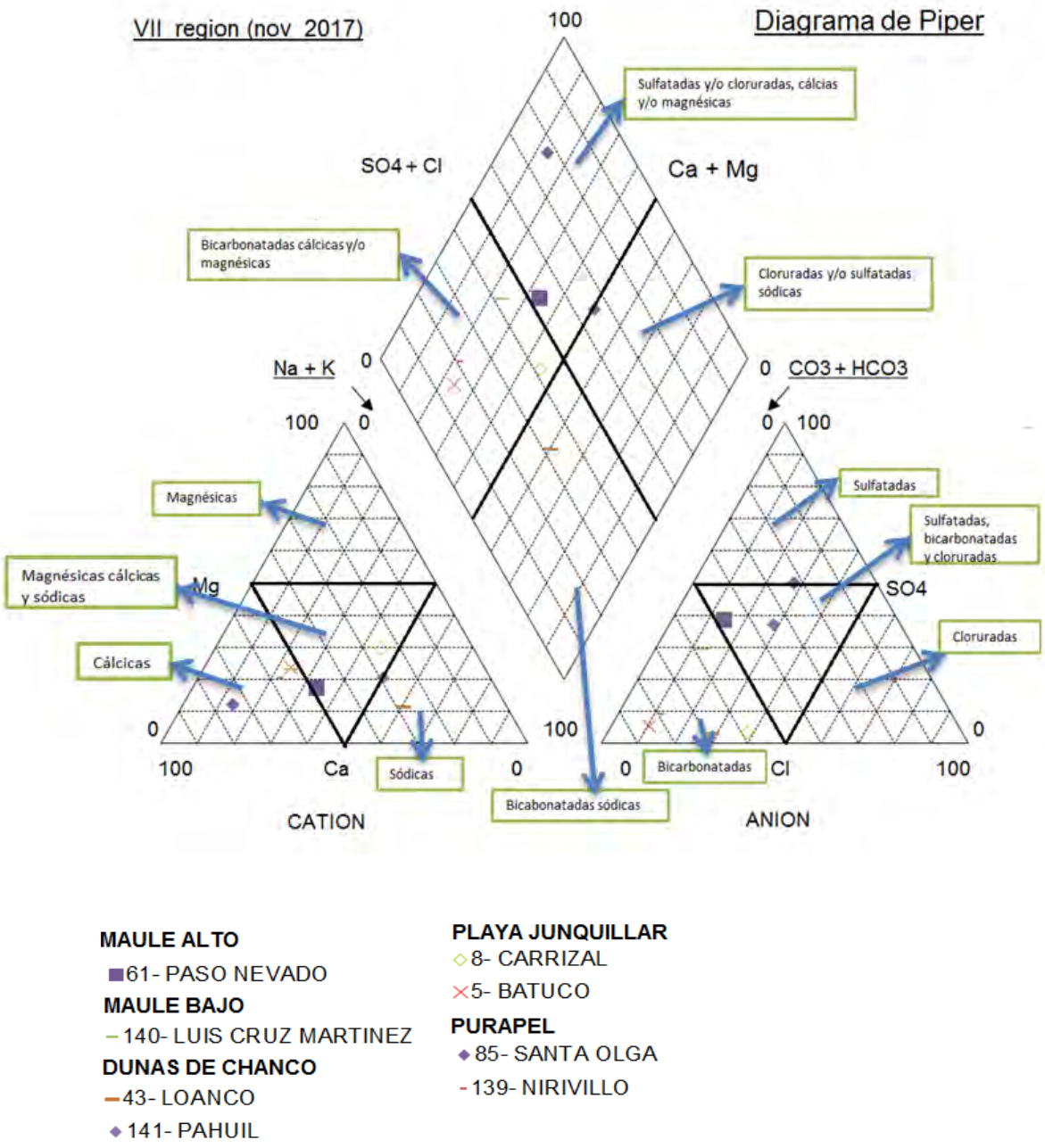



**Ilustración 76: Composición aguas de pozo APR estudiado de acuífero Cauquenes ilustrado mediante diagramas de Stiff. Creación propia.**

Al analizar los diagrama de Stiff y el diagrama de Piper, las aguas del acuífero cauquenes son clasificadas como cloruradas cálcicas. El APR CORONEL DEL MAULE posee una profundidad de 8 metros y un nivel freático de 1 metro, lo que da información de aguas de relativo poco tiempo de residencia asi como también con mayor oportunidad de ser afectada por actividad antrópica en superficie (agricultura e industria).

## V.3.1 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS ACUÍFEROS PRELIMINARES




**MAULE ALTO**
- 61- PASO NEVADO

**MAULE BAJO**
- 140- LUIS CRUZ MARTINEZ

**DUNAS DE CHANCO**
- 43- LOANCO
- 141- PAHUIL

**PLAYA JUNQUILLAR**
- 8- CARRIZAL
- 5- BATUCO

**PURAPEL**
- 85- SANTA OLGA
- 139- NIRIVILLO

**Ilustración 77: Diagrama de Piper "Pozos APR preliminares estudiados en la VII Región". Creación propia.**

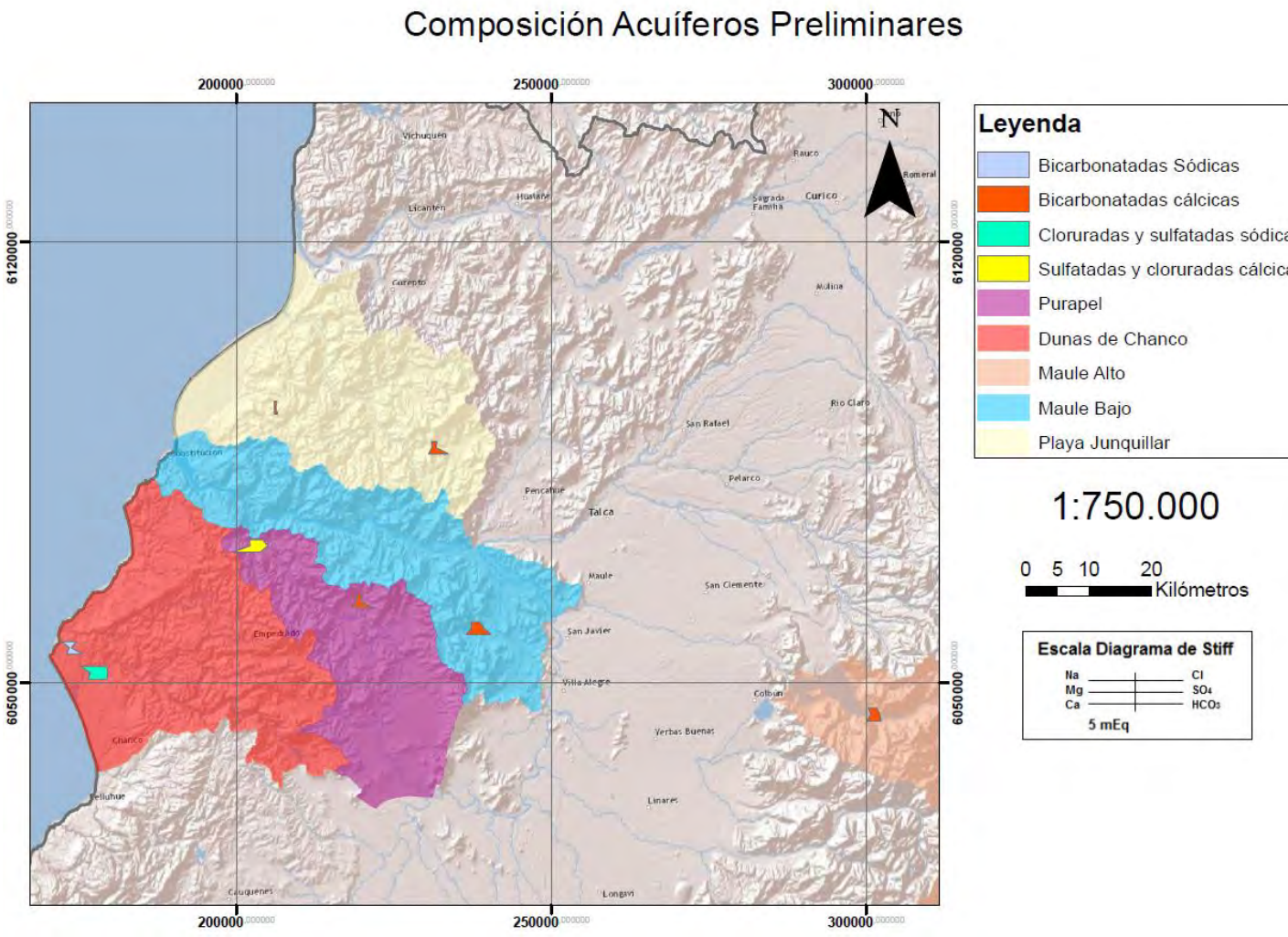



**Ilustración 78: Composición aguas de pozos APR estudiados de acuíferos preliminares ilustrado mediante diagramas de Stiff. Creación propia.**

Según los diagramas anteriores, las aguas no varían en demasiada su composición (bicarbonatadas cálcicas) a excepción de las aguas muy cercanas a la línea de costa, las cuales son: APR PAHUIL -cloruradas y sulfatadas sódicas y en el APR LOANCO-bicarbonatada sódica del acuífero Dunas de Chanco.

El APR SANTA OLGA en el acuífero Purapel posee aguas sulfatadas, se infiere que el aumento del sulfato se deber a procesos industriales de tratamiento de aguas, cabe destacar que en esta zona se encuentra una de las empresas más grandes de la región, Celulosa Arauco y Constitución S.A.

En el APR LOANCO y APR PAHUIL del acuífero Dunas de Chanco existe un aumento de sodio, cloro y magnesio, por lo que es posible que exista una interacción del agua subterránea con el agua marina, este fenómeno es conocido como intrusión marina, lo cual es muy común en la costa chilena.

## V.4 CONCENTRACIONES QUÍMICAS ESPECÍFICAS Y COMPARACIÓN CON NORMAS

### V.4.1 LÍMITES DE DETECCIÓN

| Parámetro | Límite de detección (mg/L) |
|---|---|
| Sulfato | 0,2 |
| Cloruro | 0,02 |
| Bicarbonato | 2 |
| Sodio | 0,01 |
| Potasio | 0,01 |
| Calcio | 0,01 |
| Magnesio | 0,01 |
| Fosfato (como P) | 0,02 |
| Nitrato | 0,01 |
| Solidos Disueltos totales | 5 |
| Amonio | 0,02 |
| Arsénico | 0,001 |
| Cadmio | 0,01 |
| Cobalto | 0,02 |
| Cobre | 0,01 |
| Hierro | 0,02 |
| Mercurio | 0,001 |

| | |
|---|---|
| Manganeso | 0,01 |
| Níquel | 0,03 |
| Plomo | 0,02 |
| Selenio | 0,001 |
| Zinc | 0,01 |

**Tabla 38: Listado de parámetros químicos usados para caracterizar las aguas y su respectivo límite de detección. Extraído (DGA, 2017)**

El análisis de las aguas se hizo considerando constituyentes mayoritarios, minoritarios y trazas. A continuación se describen en la siguiente tabla.

## V.4.2 RESULTADOS POR ACUÍFERO SHAC

| Acuífero Mataquito | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Datos de terreno | | | | | Análisis SGS | | | | | | | | | | | |
| Parámetro | Temperatura (°C) | pH | Conductividad (µs/cm) | ORP (mV) | Cloruro (mg/L) | Sodio (mg/L) | Potasio (mg/L) | Calcio (mg/L) | Magnesio (mg/L) | Nitrato (mg/L) | Amonio (mg/L) | Sulfato (mg/L) | Bicarbonato (mg/L) | Fosfato (mg/L) | Alcalinidad total (mg/L) | SDT (mg/L) |
| Promedio | 17,35 | 6,99 | 380,96 | 213,29 | 29,08 | 16,04 | 2,64 | 39,83 | 8,82 | 12,21 | 0,43 | 59,83 | 111,33 | 0,05 | 91,26 | 380,96 |
| Desviación estándar | 1,75 | 0,41 | 142,99 | 121,01 | 17,90 | 9,06 | 1,64 | 20,58 | 5,76 | 11,21 | 0,77 | 39,95 | 68,57 | 0,08 | 56,27 | 142,99 |
| Máximo | 21,50 | 7,72 | 798,00 | 630,50 | 103,19 | 60,93 | 5,97 | 111,30 | 27,62 | 54,34 | 2,22 | 169,84 | 376,00 | 0,54 | 308,50 | 798,00 |
| Mínimo | 13,10 | 6,11 | 111,00 | 40,40 | 2,11 | 2,60 | 0,17 | 1,40 | 0,68 | 0,08 | 0,04 | 1,23 | 17,00 | 0,00 | 13,57 | 37,00 |

**Tabla 39 : Resumen de datos medidos y analizados en las muestras de los pozos APR del acuífero Mataquito. Creación propia.**

| Acuífero Maule Medio | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Datos de terreno | | | | | Análisis de SGS | | | | | | | | | | | |
| Parámetro | Temperatura (°C) | pH | Conductividad (µs/cm) | POR (mV) | Cloruro (mg/L) | Sodio (mg/L) | Potasio (mg/L) | Calcio (mg/L) | Magnesio (mg/L) | Nitrato (mg/L) | Amonio (mg/L) | Sulfato (mg/L) | Bicarbonato (mg/L) | Fosfato (mg/L) | Alcalinidad total (mg/L) | SDT (mg/L) |
| Promedio | 17,32 | 7,02 | 227,21 | 249,82 | 10,86 | 9,75 | 1,44 | 19,49 | 5,42 | 16,01 | 0,08 | 19,03 | 97,48 | 0,04 | 79,99 | 185,38 |
| Desviación Estándar | 1,78 | 0,40 | 109,66 | 127,93 | 10,80 | 8,67 | 1,23 | 11,89 | 6,40 | 12,68 | 0,08 | 31,65 | 59,88 | 0,06 | 49,13 | 96,24 |
| Máximo | 23,10 | 7,90 | 692,00 | 631,20 | 73,04 | 58,89 | 5,91 | 92,30 | 43,48 | 72,72 | 0,24 | 241,37 | 381,00 | 0,54 | 312,81 | 740,00 |
| Mínimo | 9,15 | 6,07 | 21,00 | 76,30 | 0,47 | 1,51 | 0,00 | 1,90 | 0,00 | 0,81 | 0,03 | 1,14 | 16,00 | 0,00 | 12,78 | 35,00 |

**Tabla 40: Resumen de datos medidos y analizados en las muestras de los pozos APR del Acuífero Maule Medio. Creación propia.**

| Acuífero Cauquenes | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Datos de terreno | | | | Análisis de SGS | | | | | | | | | | |
| Temperatura (°C) | pH | Conductividad (µs/cm) | POR (mV) | Cloruro (mg/L) | Sodio (mg/L) | Potasio (mg/L) | Calcio (mg/L) | Magnesio (mg/L) | Nitrato (mg/L) | Amonio (mg/L) | Sulfato (mg/L) | Bicarbonato (mg/L) | Fosfato (mg/L) | Alcalinidad total (mg/L) | SDT (mg/L) |
| 20,2 | 6,9 | 232 | 190,2 | 65,55 | 13,54 | 0,41 | 19 | 3,84 | 1,98 | <0.02 | 57 | 107 | 0 | 87,65 | 132 |

**Tabla 41: Resumen de datos medidos y analizados en las muestras del pozo APR del Acuífero Cauquenes. Creación propia.**

### V.4.3 RESULTADOS POR ACUÍFERO PRELIMINAR

| Maule Alto | | | |
|---|---|---|---|
| | Parámetro | Unidad | APR PASO NEVADO |
| Parámetro de terreno | Temperatura | (°C) | 15,60 |
| | pH | | 6,41 |
| | Conductividad | (µs/cm) | 254 |
| | ORP | (mV) | 255,5 |
| Análisis por SGS | Cloruro | (mg/L) | 12,52 |
| | Sodio | | 17,74 |
| | Potasio | | 1,96 |
| | Calcio | | 22,1 |
| | Magnesio | | 4,69 |
| | Nitrato | | 3,694 |
| | Amonio | | <0,02 |
| | Sulfato | | 45,46 |
| | Bicarbonato | | 71 |
| | Fosfato | | 0,02 |
| | Alcalinidad Total | | 58,58 |
| | SDT | | 163 |

**Tabla 42: Datos medidos y analizados en las muestras del pozo APR del Acuífero Maule Alto. Creación propia**

| Maule Bajo | | | |
|---|---|---|---|
| | Parámetro | Unidad | APR LUIS CRUZ MARTINEZ |
| Parámetro de terreno | Temperatura | (°C) | 20,30 |
| | pH | | 7,3 |
| | Conductividad | (µs/cm) | 230 |
| | ORP | (mV) | 250 |
| Análisis por SGS | Cloruro | (mg/L) | 19,59 |
| | Sodio | | 16,39 |
| | Potasio | | 0,47 |
| | Calcio | | 30,7 |
| | Magnesio | | 8,26 |
| | Nitrato | | 0,208 |
| | Amonio | | <0,02 |
| | Sulfato | | 58,43 |
| | Bicarbonato | | 145 |
| | Fosfato | | 0,03 |
| | Alcalinidad Total | | 119,20 |
| | SDT | | 270 |

**Tabla 43: Datos medidos y analizados en las muestras del pozo APR del acuífero Maule Bajo. Creación propia.**

| Acuífero Dunas de Chanco | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Parámetro | Unidad | APR LOANCO | APR PAHUIL |
| Parámetro de terreno | Temperatura | (°C) | 17,86 | 18,79 |
| | pH | | 7,11 | 7,19 |
| | Conductividad | (µs/cm) | 302 | 558 |
| | ORP | (mV) | 234 | 88,5 |
| Análisis por SGS | Cloruro | (mg/L) | 28,34 | 51,56 |
| | Sodio | | 29,74 | 49,19 |
| | Potasio | | 2,81 | 5,61 |
| | Calcio | | 11,9 | 24,1 |
| | Magnesio | | 2,96 | 10,27 |
| | Nitrato | | 8,065 | 13,677 |
| | Amonio | | <0,02 | <0,02 |
| | Sulfato | | 3,93 | 91,18 |
| | Bicarbonato | | 114 | 107 |
| | Fosfato | | 0,01 | 0 |
| | Alcalinidad Total | | 93,30 | 87,87 |
| | SDT | | 213 | 350 |

**Tabla 44: Datos medidos y analizados en las muestras del pozo APR del acuífero Dunas de Chanco. Creación propia.**

| Acuífero Playa Junquillar | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Parámetro | Unidad | APR BATUCO | APR CARRIZAL |
| Parámetro de terreno | Temperatura | (°C) | 18,20 | 22,40 |
| | pH | | 6,93 | 8,43 |
| | Conductividad | (µs/cm) | 246 | 68 |
| | ORP | (mV) | 210,2 | 178,8 |
| Análisis por SGS | Cloruro | (mg/L) | 9,17 | 7,68 |
| | Sodio | | 10,31 | 3,59 |
| | Potasio | | 0,59 | 0,29 |
| | Calcio | | 19,7 | 1,7 |
| | Magnesio | | 5,3 | 1,23 |
| | Nitrato | | 1,865 | 2,432 |
| | Amonio | | <0,02 | <0,02 |
| | Sulfato | | 6,25 | 0,89 |
| | Bicarbonato | | 127 | 20 |
| | Fosfato | | 0 | 0 |
| | Alcalinidad Total | | 104,5 | 16,06 |
| | SDT | | 153 | 49 |

**Tabla 45: Datos medidos y analizados en las muestras del pozo APR del acuífero Playa Junquillar. Creación propia.**

| Acuífero Purapel | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Parámetro | Unidad | APR SANTA OLGA | APR NIRIVILLO |
| Parámetro de terreno | Temperatura | (°C) | 23,20 | 20,00 |
| | pH | | 8 | 7,8 |
| | Conductividad | (µs/cm) | 390 | 300 |
| | ORP | (mV) | 200 | 260 |
| Análisis por SGS | Cloruro | (mg/L) | 44,85 | 9,27 |
| | Sodio | | 13,94 | 8,64 |
| | Potasio | | 1,04 | 0,17 |
| | Calcio | | 65,3 | 20,5 |
| | Magnesio | | 6,30 | 4,38 |
| | Nitrato | | 13,433 | 4,035 |
| | Amonio | | <0,02 | <0,02 |
| | Sulfato | | 9,96 | 107,97 |
| | Bicarbonato | | 111 | 62 |
| | Fosfato | | 0,01 | 0,01 |
| | Alcalinidad Total | | 50,66 | 309 |
| | SDT | | 90,92 | 160 |

**Tabla 46: Datos medidos y analizados en las muestras del pozo APR del acuífero Purapel. Creación propia.**

### V.4.4 RESUMEN DE RESULTADOS COMPARADOS CON NORMAS NCh409 Y NCh1333

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

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

| Parámetro | Unidad | Límite de detección (mg/L) | Límite Máximo para agua potable (NCh 409) | Límite máximo para agua de riego (NCh 1333) | N° de pozos fuera de la norma NCh 409 | N° de pozos fuera de la norma NCh 1333 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | - | - | Rango admisible 6,5-8,5 | Rango admisible 5,5-9,0 | 19 | 0 |
| Sulfato | (mg/L) | 0,2 | 500 | 250 | 0 | 0 |
| Cloruro | (mg/L) | 0,02 | 400 | 200 | 0 | 0 |
| Magnesio | (mg/L) | 0,01 | 125 | No se incluye | 0 | - |
| Nitrato | (mg/L) | 0,01 | 50 | No se incluye | 3 | - |
| Amonio | (mg/L) | 0,02 | 1,5 | - | 1 | - |
| Solidos Disueltos totales | (mg/L) | 5 | 1500 | 500 < SDT ≤ 1000 * | 0 | 0 |
| Arsénico | (mg/L) | 0,001 | 0,01 | 0,1 | 3 | 0 |

| Parámetro | Unidad | Límite de detección (mg/L) | Límite Máximo para agua potable (NCh 409) | Límite máximo para agua de riego (NCh 1333) | N° de pozos fuera de la norma NCh 409 | N° de pozos fuera de la norma NCh 1333 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cadmio | (mg/L) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0 |
| Cobalto | (mg/L) | 0,02 | No se incluye | 0,05 | - | 0 |
| Cobre | (mg/L) | 0,01 | 2 | 0,2 | 0 | 2 |
| Hierro | (mg/L) | 0,02 | 0,3 | 5 | 13 | 3 |
| Mercurio | (mg/L) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0 | 0 |
| Manganeso | (mg/L) | 0,01 | 0,1 | 0,2 | 7 | 6 |
| Níquel | (mg/L) | 0,03 | No se incluye | 0,2 | - | 0 |
| Plomo | (mg/L) | 0,02 | 0,05 | 5 | 2 | 1 |
| Selenio | (mg/L) | 0,001 | 0,01 | 0,02 | 0 | 0 |
| Zinc | (mg/L) | 0,01 | 3 | 2 | 0 | 0 |

* Los pozos contabilizados se encuentran como valor máximo dentro del rango señalado

**Tabla 47: Comparación de los resultados de los análisis de los pozos APR de la VII Región con la Norma NCh 409 – NCh 133.** [16]

| Clasificación | Conductividad eléctrica (CE) | | Solidos Disueltos Totales (SDT) | |
|---|---|---|---|---|
| Agua con la cual generalmente no se observaran efectos perjudiciales | Rango [µS/cm] | N° de Pozos | Rango [mg/l] | N° de Pozos |
| | CE ≤750 | 149 | SDT ≤ 500 | 146 |
| Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles | 750 < CE ≤ 1.500 | 1 | 500 < SDT ≤ 1.000 | 4 |

[16] (*)Límite máximo de Sodio para aguas de riego se calcula según el porcentaje de Sodio siendo e 100% la suma de todos los cationes (Na + Ca + Mg + K). (**) Clasificación de aguas según salinidad (SDT y Conductividad eléctrica) según norma NCh1333 se presenta en Tabla 47.

Tabla 48: Clasificación de pozos APR estudiados según la conductividad eléctrica y los Sólidos Disueltos Totales en base a la Norma NCh1333 para aguas de riego.

## V. 4.5 ESPECIES NITROGENADAS

El nitrógeno puede llegar al suelo por la aplicación de aguas servidas, residuos animales, efluentes de plantas de tratamiento, fertilizantes comerciales, materia animal y vegetal, precipitación y deposición. Además, la fijación del nitrógeno a través de bacterias en el suelo transforma el nitrógeno gas en nitrógeno disponible para la vida de los vegetales. El hombre ha incrementado la cantidad de nitrógeno fijado biológicamente mediante el cultivo de legumbres, las que realizan fijación biológica (Collao, 2008)

Usualmente, más del 90% del nitrógeno presente en el suelo es orgánico. El contenido de nitrógeno en general es bajo debido a que es usado en la asimilación, lixiviado por el agua a través del suelo y sujeto a la desnitrificación bajo la capa aeróbica del suelo. A pesar de esto, la asimilación y la desnitrificación raramente remueven todo el nitrato agregado al suelo a través de los fertilizantes y los efluentes de aguas servidas. Debido a esto la lixiviación de nitratos es un problema importante para la calidad de las aguas subterráneas en muchas partes del mundo (Collao, 2008)

En este contexto, la concentración de Nitrato (NO3) en aguas subterráneas, raramente excede los 10 mg/l. En la zona de estudio 81 de los pozos APR muestreados, poseen un valor igual o mayor a 10 mg/L, por lo que se infiere que las aguas cuentan con una concentración más alta de lo normal.

En el presente informe se considera aquellos valores mayores a 30 mg/L atribuibles a contaminación difusa, que como regla general, se relacionada con la elevada actividad agrícola de la región. Mientras que por otra parte, la Normativa vigente (NCh 409) fija en 50 mg/L el contenido de nitratos en aguas potable, superando de esta forma 3 pozos en los acuíferos de mataquito y Maule medio según se indica en la tabla 49.

| POZO | Nitrato (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR SAN JORGE DE ROMERAL | 54,344 | Mataquito |
| APR LOS MONTES | 59,902 | Maule Medio |
| APR SANTA CECILIA - GABRIELA MISTRAL | 72,724 | Maule Medio |

Tabla 49: Pozos APR estudiados sobre la Norma de agua potable NCh409. Creación propia.

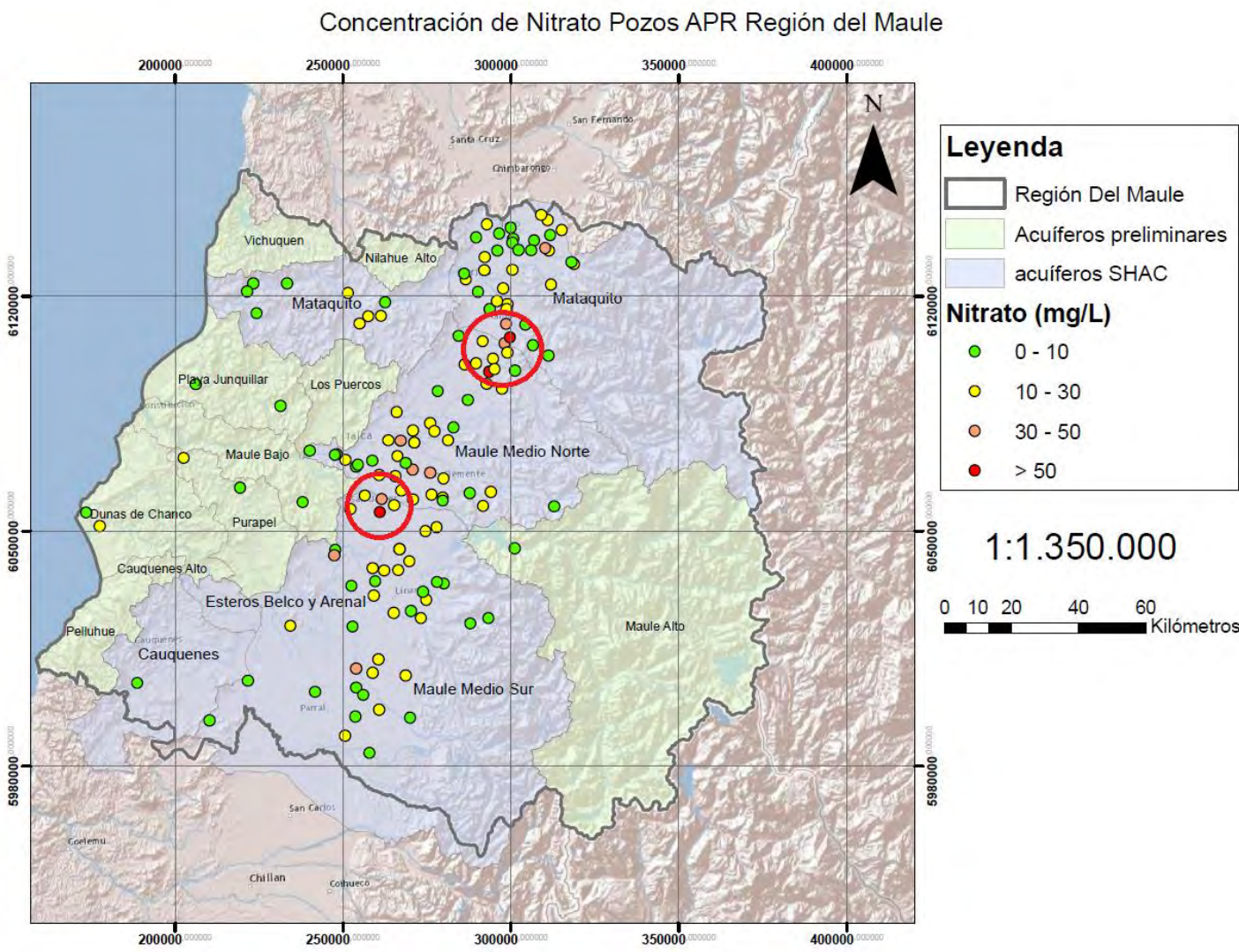



Ilustración 79: Mapa "Concentración de Nitrato Pozos APR Región del Maule". Se destacan áreas con potencial contaminación difusa.

En el acuífero Mataquito, según la Norma 409, un pozo la excede en un muy bajo porcentaje (APR SAN JORGE DE ROMERAL), no obstante contiene una mayor

cantidad de pozos con concentraciones cercanas a la norma de referencia. Según el mapa de vulnerabilidad, en el punto de intersección de los ríos Teno- Lontué formando el río Mataquito existe una vulnerabilidad alta a muy alta a la contaminación, por lo que es una zona propensa a seguir contaminándose por nitratos.

En el acuífero Maule Medio, existen dos focos de contaminación difusa de nitratos, lo que coincide con el área de vulnerabilidad localizada en el mapa de Vulnerabilidad de Acuífero Maule Medio. Esto se debe principalmente a que el Maule es una zona que se caracteriza por el uso de agua en la agricultura y por ende un alto uso de fertilizantes.

Justamente el APR SANTA CECILIA- GABRIELA MISTRAL, se encuentra en San Javier, en donde según la información obtenida en terreno, la profundidad del nivel estático del pozo es de 2,26 metros, es decir, son aguas bastantes cercanas a la superficie por lo que resulta más fácil la interacción entre el agua subterránea y los diversos compuestos provenientes desde la superficie.,

Por otro lado, en esta comuna se encuentra una importante industria asociada a los purines de cerdo según el estudio de Collao et all, 2008, considerando un alto riesgo de contaminación de los acuíferos por la aplicación de purines al suelo, lo anterior supeditado a la caracterización de los planteles porcinos realizados por el INIA. Si el plantel se encuentra en una zona de medianas o altas características favorables para la lixiviación y que además el riesgo de contaminación aumenta si el suelo está asociado a los residuos líquidos de los purines, por lo que, se infiere que estos valores pudiesen tener una asociación.

La norma NCh409 establece que el límite de concentración para el agua potable es 1,5 (mg/L), según el análisis realizado 1 de los pozos APR poseen un límite sobre lo establecido:

| POZO | Amonio (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR EL RODEO | 2,22 | Mataquito |

Tabla 50: Pozos APR estudiados sobre la Norma de agua potable NCh409. Creación propia.

Se puede notar que la profundidad del pozo APR EL RODEO es de 45 m, mientras que los niveles estáticos de agua son bastante superficiales (2,30 m), por lo que es posible que hayan existido condiciones reductoras en los pozos que permitiesen que las altas concentraciones de nitrato presentes en los acuíferos estudiados, se hayan transformado a amonio producto del ciclo normal del nitrato y se hayan alterado los pozos como se ha notado anteriormente.

Por otro lado, la presencia en el agua de nitrito ($NO_2^-$), debe considerarse como un indicio fundado de una posible contaminación reciente (dada su inestabilidad) y, tal vez, de la impotabilidad del agua debida a la toxicidad de este ion.

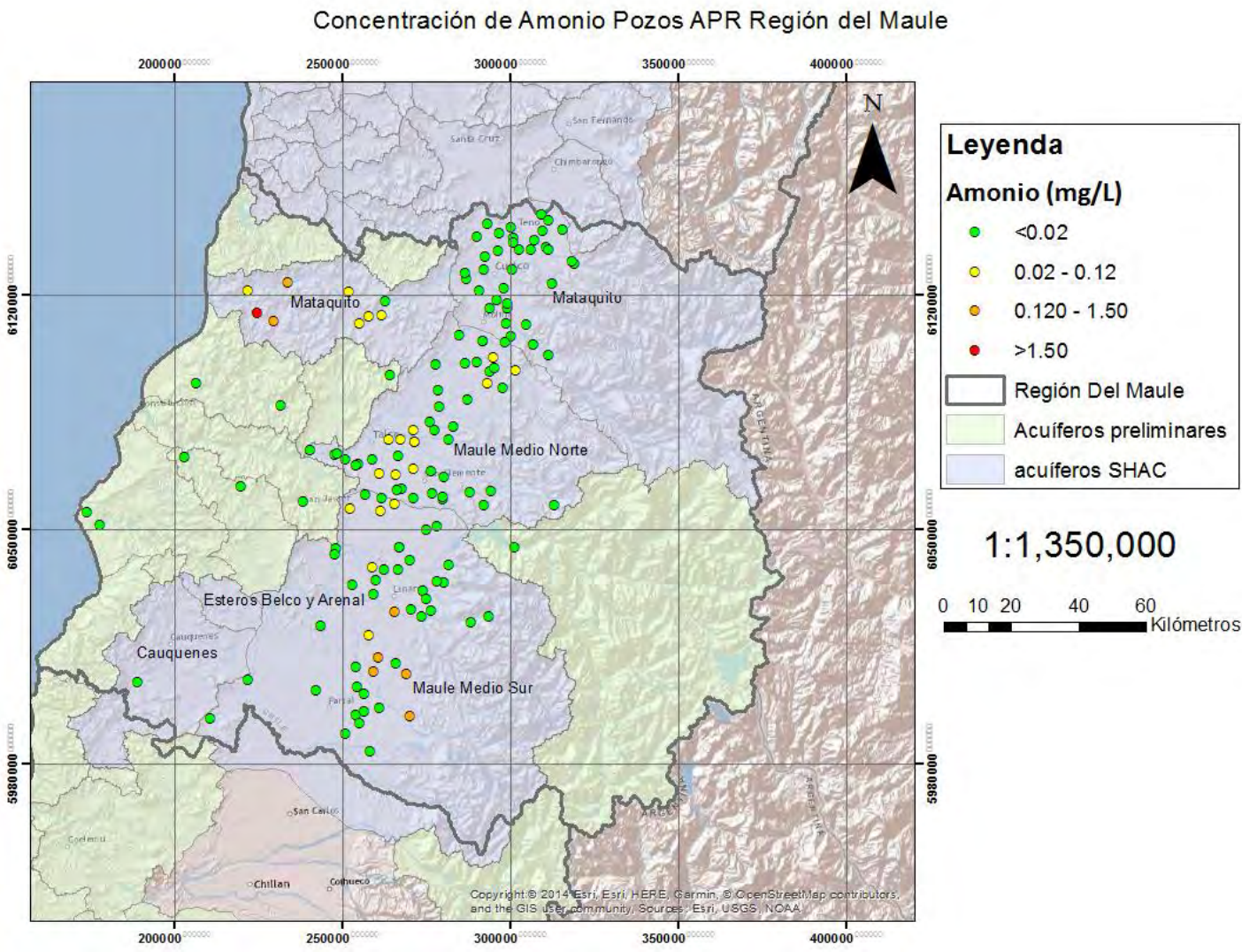



**Ilustración 80: Mapa "Concentración de Amonio Pozos APR Región del Maule". Se destacan áreas con potencial contaminación difusa.**

## V. 4.6 SULFATO

El $SO_4^{-2}$ son sales con solubilidad moderada a muy alta. Su comportamiento puede desviarse significativamente del teórico predecible en base a los principios de su disolución, por su tendencia a formar iones complejos con Na y Ca y a incorporarse a procesos biológicos. Está sujeto a procesos de reducción, especialmente en presencia de bacterias y 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 $HS^-$.

El origen de las aguas sulfatadas podría ser agua de lluvia, lavado suelos zonas áridas- semiárida y actividades industriales, urbanas y agrícolas.

En aguas dulces, la concentración normal de sulfatos puede variar entre 2 y 150 mg/l. En las aguas analizadas 2 pozos están sobre este rango, por lo que la mayoría de los pozos se encuentran en un estado aceptable en cuanto a este parámetro.

El APR POCILLAS ubicado en el límite entre la séptima y octava región posee concentraciones cercanas a los umbrales de referencia. Esta condición puede guardar correlación con la evolución misma del acuífero más aguas de mayor tiempo de residencia. Además, según la información recolectada, en el sector existen forestales y agricultura importante, por lo que la mayor concentración de sulfatos se podría deber principalmente a estas actividades.

En la siguiente tabla se muestra un pozo de la zona de estudio, cuya concentración se encuentra cercana a la normativa de referencia:

| Pozo | Sulfato (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR POCILLAS | 241,37 | Maule Medio |

**Tabla 51 : Pozo APR estudiado cercano al valor máximo estipulado por la Norma 409. Creación propia.**

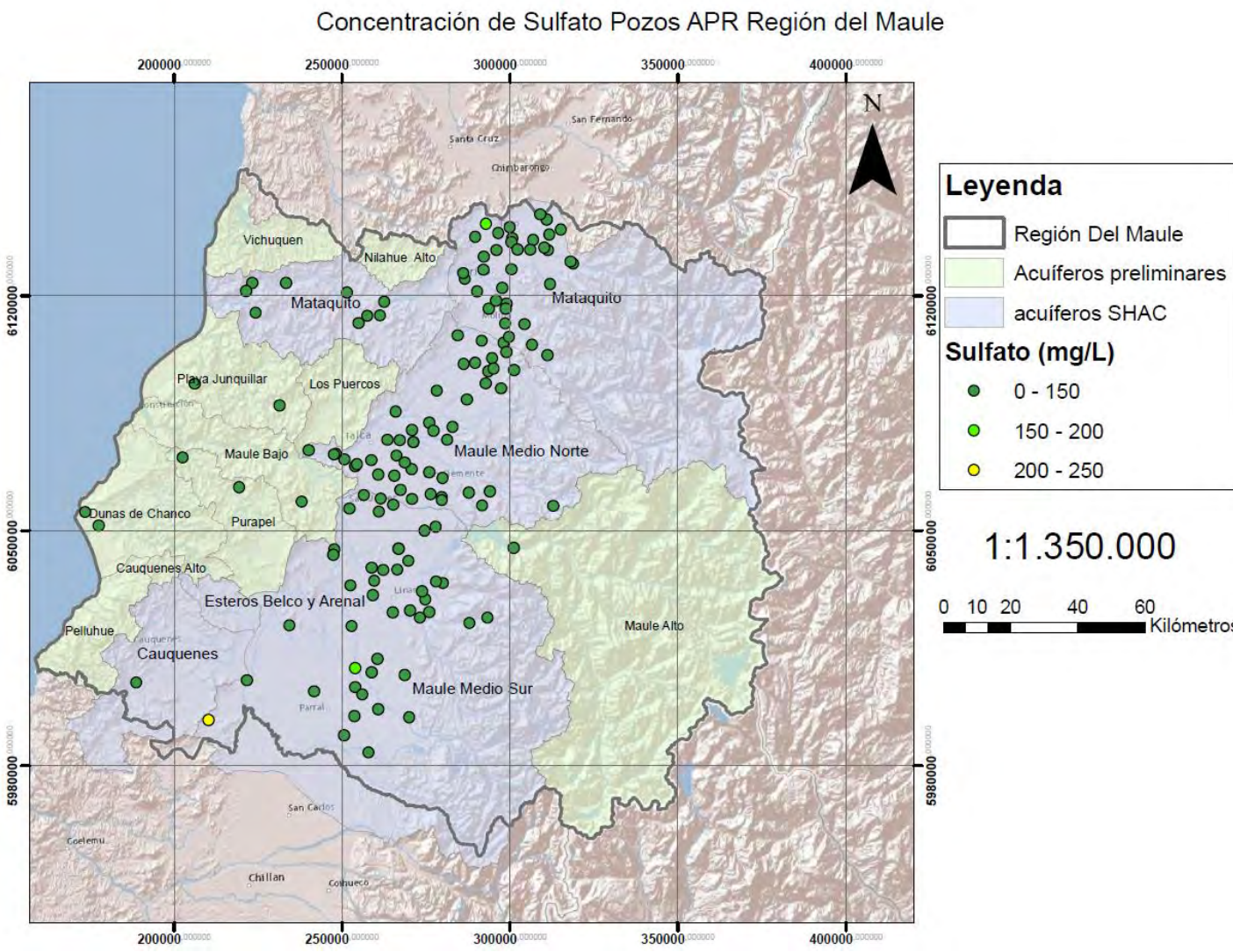



Ilustración 81: Mapa "Concentración de Sulfato Pozos APR Región del Maule".

## V. 4.7 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.

Las aguas de la región del Maule, son menores a los 250 mg/l por lo que se consideran aguas dulces, sin intrusión marina significativa en el caso de los acuíferos costeros.

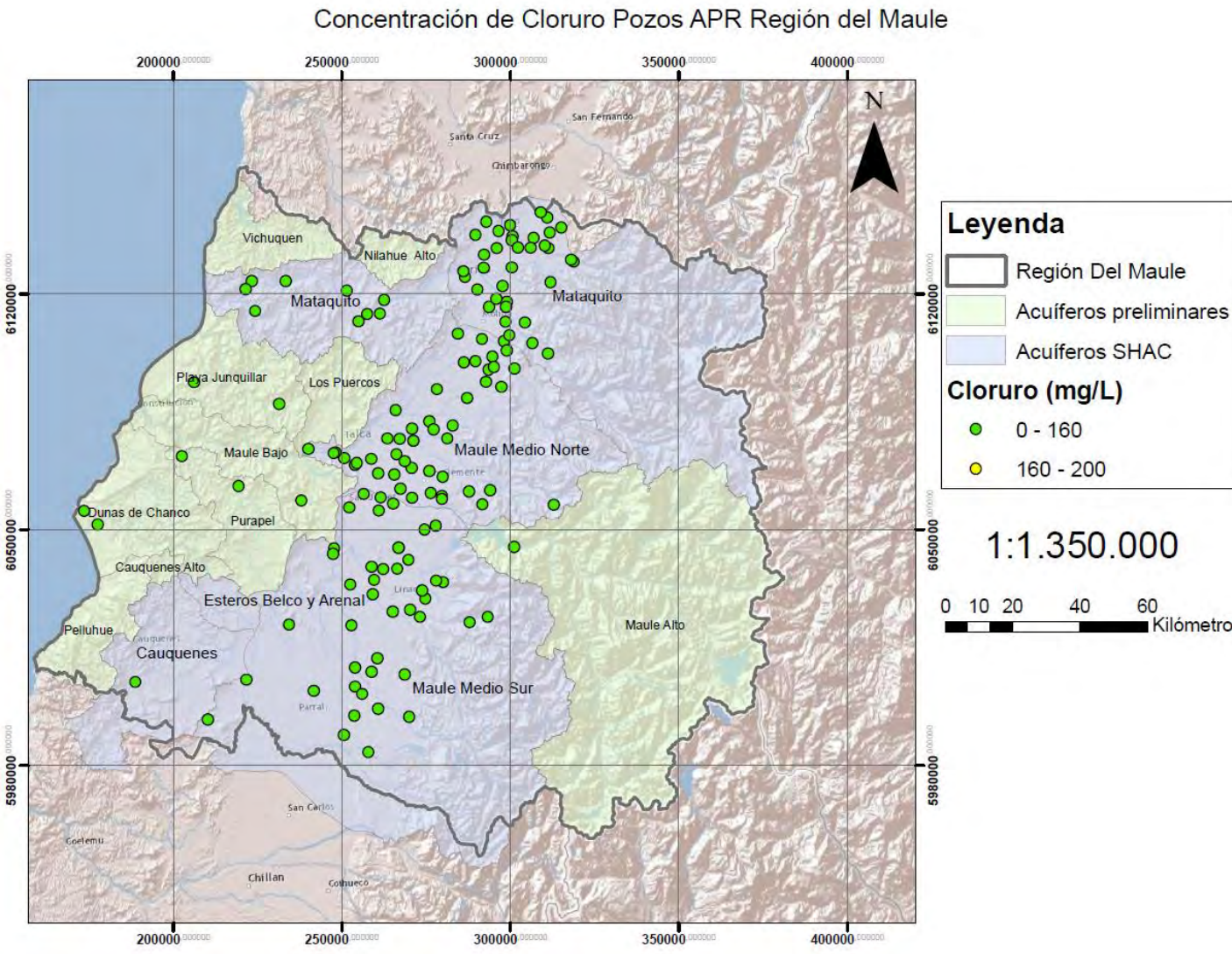



**Ilustración 82: Mapa "Concentración de Cloruro Pozos APR Región del Maule". Creación propia.**

### V. 4.9 MAGNESIO

$Mg^{2+}$ es menos abundante que el calcio en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina. Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de Mg en aguas subterráneas. En ellas, el Mg es retenido con preferencia al Ca en suelos y rocas.

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.

Todos los valores de la concentración de magnesio en la región del Maule, están bajo el límite de la Norma NCh409.

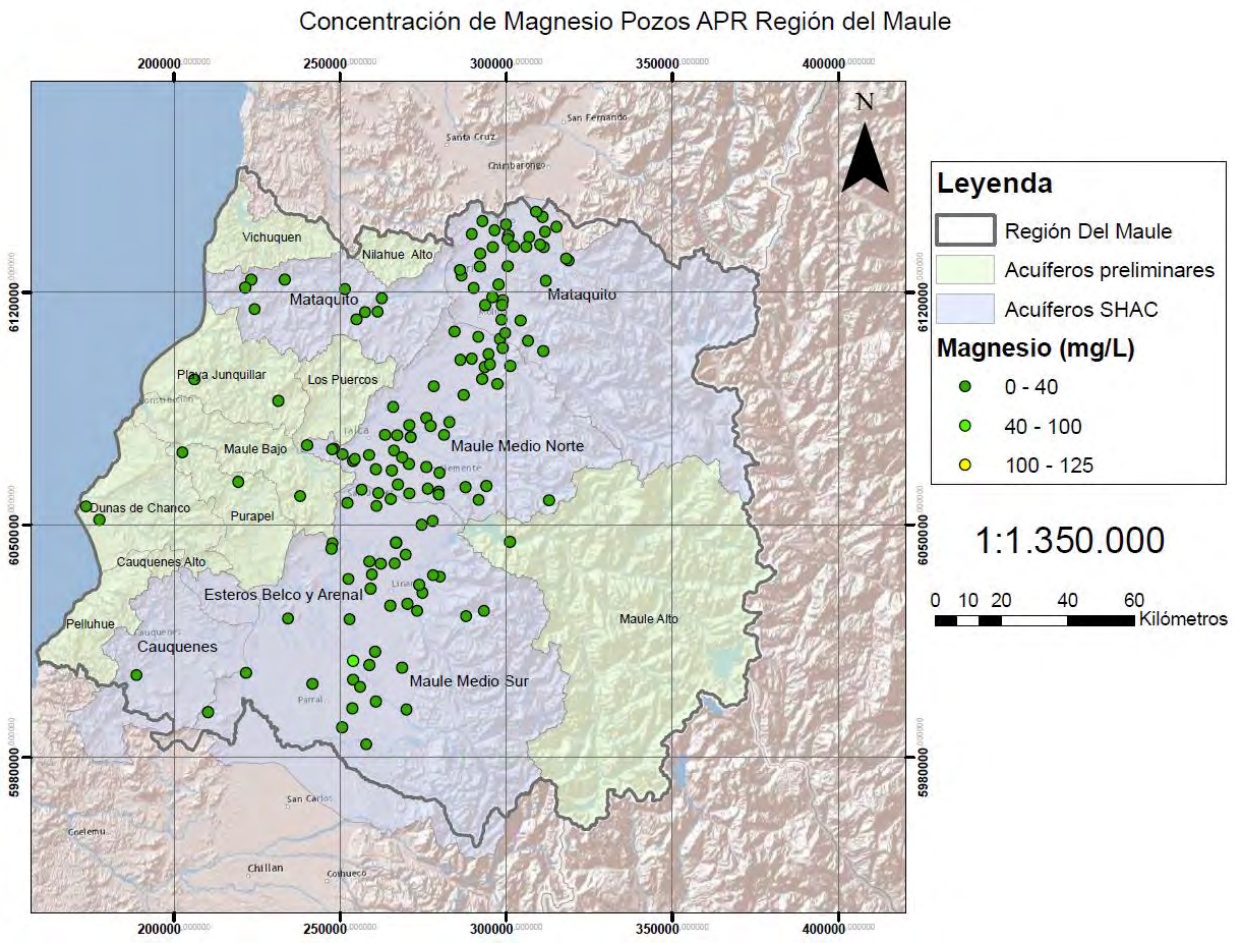



**Ilustración 83: Mapa "Concentración de Magnesio Pozos APR Región del Maule. Creación propiaa**

## V. 4.10 SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

Es el peso de todas las sustancias disueltas, sean volátiles o no, en un determinado volumen de agua. Se suele medir en ppm o mg/L. la cantidad de sólidos disuelto es muy sensible, ya que puede cambiar con variaciones en la temperatura y pH.

A partir de la observación de los valores obtenidos, se concluye que los acuíferos en estudio no han sufrido contaminación ya que poseen todos están en bajo el límite de la norma NCh409. Aunque, los sólidos disueltos totales son bajos, se tienen dos pozos: APR PUTAGAN y APR LOS MAITENES cuyas concentraciones son elevadas en comparación con el total.

| Pozo | SDT (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR La Huerta Mataquito | 500 | Mataquito |
| APR Putagan | 514 | Maule Medio |
| APR Comalle | 527 | Mataquito |
| APR Domingo Manculla | 565 | Mataquito |
| APR Los Maitenes | 740 | Maule Medio |
| APR Vista hermosa | 976 | Mataquito |

**Tabla 52: Pozos APR estudiados cercano al valor máximo estipulado por la Norma NCh409. Creación propia**

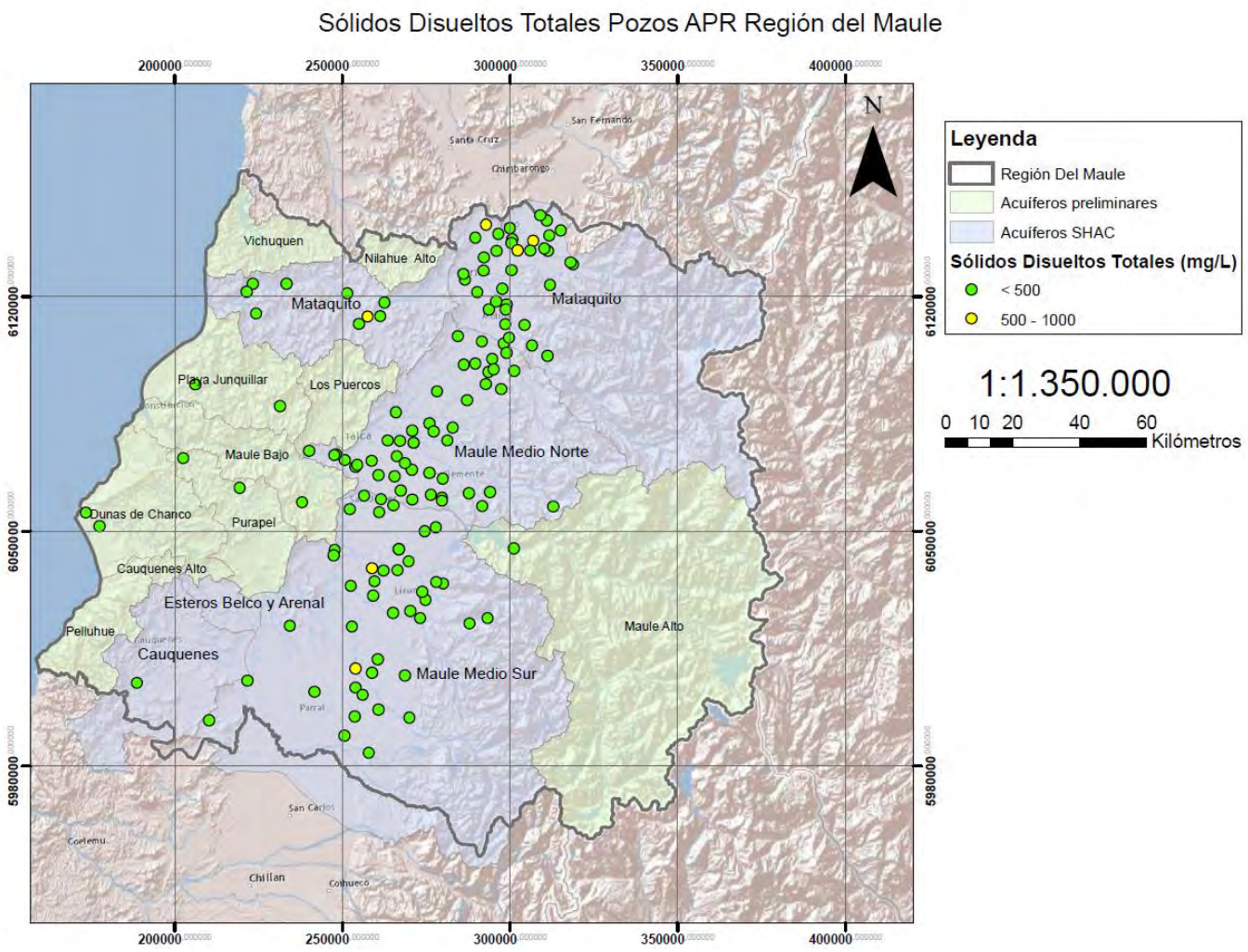



**Ilustración 84: Mapa "Concentración de Magnesio Pozos APR Región del Maule. Creación propia**

## V. 4.11 ARSÉNICO

En el análisis de un número de 150 pozos analizados, se detectó arsénico fue en 105 pozos de los cuales 3 sobrepasaron la norma de agua potable, existe una zona donde se concentró la excedencia la cual corresponde a la zona costera del Acuífero Mataquito.

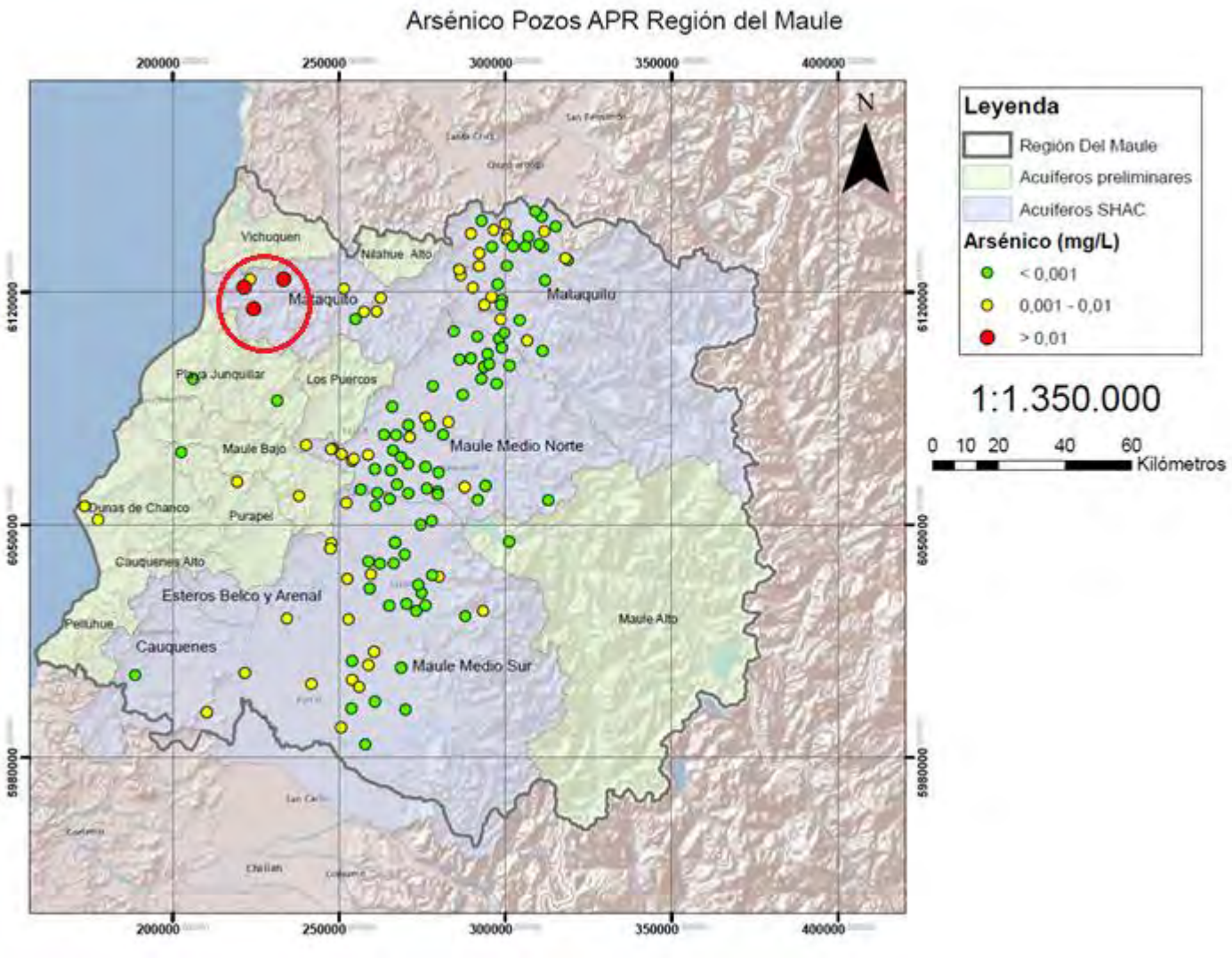



**Ilustración 85: Mapa "Concentración de Arsénico Pozos APR Región del Maule. Creación propia.**

| Pozo | Arsénico (mg/L) | % sobre la Norma NCh409 |
|---|---|---|
| APR PLACILLA | 0,018 | 80 |

| Pozo | Arsénico (mg/L) | % sobre la Norma NCh409 |
|---|---|---|
| APR LORA | 0,032 | 220 |
| APR RODEO | 0,062 | 420 |

**Tabla 53: Pozos APR estudiados sobre lo estipulado por la Norma NCh 409(0,01 mg/L). Creación propia**

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).

Sin embargo, la mayor parte de los acuíferos con contenidos altos de arsénico tienen un origen ligado a procesos geoquímicos naturales. A diferencia de la contaminación antropogénica, la cual genera una afección de carácter más local, la ocurrencia de concentraciones altas de arsénico de origen natural afecta a grandes áreas. Los numerosos casos de “contaminación” natural de aguas subterráneas por arsénico que existen en el mundo están relacionados con ambientes geológicos muy diferentes (por ejemplo, BGS y DPHE, 2001; Boyle et al, 1998; Smedley y Kinniburgh, 2002).

El contenido de arsénico está 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 y la fase líquida, y el transporte de arsénico como especie acuosa en el seno del agua.

Los dos procesos geoquímicos que controlan la movilización de arsénico al agua son: reacciones de adsorción-desorción, y reacciones de coprecipitación-codisolución. Tanto arsenito como arsenato son adsorbidos en la superficie de una

gran variedad de materiales presentes en el medio como son óxidos de hierro, manganeso y aluminio. También puede ser adsorbido por arcillas y materia orgánica. La desorción del arsénico adsorbido en la fase sólida está condicionada por los cambios en pH, la ocurrencia de reacciones redox (reducción/oxidación), la presencia de iones competitivos, y los cambios en la estructura cristalina de la fase sólida. Las reacciones de coprecipitación-codisolución están controladas por el pH, temperatura, estado redox y concentración de especies acuosas de la solución. Existen varios mecanismos de incorporación de arsénico de origen natural a las aguas: a) oxidación de sulfuros; b) Disolución de óxidos e oxihidróxidos de Fe y Mn en condiciones ácidas; c) desorción en condiciones oxidantes a pH alto; d) desorción y disolución de óxidos y oxihidróxidos relacionados con cambios a condiciones reductoras; e) desorción por reducción de superficie específica en la fase sólida; f) desorción por reducción en la carga de superficie de la fase sólida.

El arsénico aparece como un constituyente principal en más de 200 minerales (As nativo, arseniuros, sulfuros, óxidos, arsenatos y arsenitos), aunque apenas una docena son relativamente frecuentes

| Mineral | Composición | Ocurrencia |
|---|---|---|
| Arsénico nativo | As | Venas hidrotermales |
| Niccolita | NiAs | Filones y noritas |
| Realgar | AsS | Filones, muchas veces asociado con oropimente, arcillas y carbonatos en "hot springs" |
| Oropimente | $As_2S_3$ | Venas hidrotermales, "hot springs". También como producto de sublimation de emanaciones volcánicas |
| Cobaltita | CoAsS | Depósitos de alta temperatura, rocas metamórficas |
| Arsenopirita | FeAsS | Es el mineral de As más abundante. Muy frecuente en filones |
| Tennantita | $(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$ | Venas hidrotermales |
| Enargita | $Cu_3AsS_4$ | Venas hidrotermales |
| Arsenolita | $As_2O_3$ | Mineral secundario formado por oxidación de arsenopirita, arsénico nativo y otros minerales de arsénico |
| Claudetita | $As_2O_3$ | Mineral secundario formado por oxidación de realgar, arsenopirita, y otros minerales de arsénico |
| Escorodita | $FeAsO_4.2H_2O$ | Mineral secundario |
| Annabergita | $(Ni,Co)_3(AsO_4)_2{\cdot}8H_2O$ | Mineral secundario |
| Hoernesita | $Mg_3(AsO_4)_2.8H_2O$ | Mineral secundario, en escorias |
| Hematolita | $(Mn,Mg)_4Al(AsO_4)(OH)_8$ | Mineral en fisuras de rocas metamórficas |
| Conicalcita | $CaCu(AsO_4)(OH)$ | Mineral secundario |
| Farmacosiderita | $Fe_3(AsO_4)_2(OH)_3.5H_2O$ | Producto de oxidación de arsenopirita y otros minerales de arsénico |

**Tabla 54: Minerales de arsénico más frecuentes. Extraído de Lillo J, Peligros geoquímicos**

Aunque no como componente mayoritario, el arsénico también se encuentra en concentraciones variables formando parte de un gran número de minerales, tanto primarios como secundarios.

| Mineral | Concentración de As (ppm) | Referencia |
|---|---|---|
| **Sulfuros:** | | |
| Pirita | 100–77.000 | (a) |
| Pirrotina | 5–100 | (b) |
| Galena | 5–10.000 | (a) |
| Esfalerita | 5–17.000 | (a) |
| Calcopirita | 10–5000 | (a) |
| **Óxidos:** | | |
| Hematites | Hasta 160 | (a) |
| Óxidos de Fe | Hasta 2000 | (b) |
| Oxihidróxido de Fe(III) | Hasta 76.000 | (c) |
| Magnetita | 2,7–41 | (a) |
| **Silicatos:** | | |
| Cuarzo | 0,4–1,3 | (a) |
| Feldespato | <0,1–2,1 | (a) |
| Biotita | 1,4 | (a) |
| Anfíbol | 1,1–2,3 | (a) |
| Olivino | 0,08–0,17 | (a) |
| Piroxeno | 0,05–0,8 | (a) |
| **Carbonatos:** | | |
| Calcita | 1–8 | (b) |
| Dolomita | <3 | (b) |
| Siderita | <3 | (b) |
| **Sulfatos:** | | |
| Yeso/Anhidrita | <1–6 | (b) |
| Barita | <1–12 | (b) |
| Jarosita | 34–1000 | (b) |
| **Fosfatos:** | | |
| Apatito | <1–1000 | (a), (b) |

**Tabla 55: Concentración de arsénico en algunos de los minerales más comunes. Extraído de Lillo J, Peligros geoquímicos. Referencias de la tabla a) Baur y Onishi, 1969, b)Boyle y Jonasson,1973, c) Pichler et al., 1999).**

Debido a que los acuíferos que poseen un alto contenido de arsénico en el acuífero del Mataquito poseen una profundidad muy baja y el nivel freático cercano a la superficie se descartaría la opción de que la contaminación fuese producto de que a mayor profundidad mayor cantidad de arsénico en las aguas.

Además debido a que la cuenca del Maule no se caracteriza por ser un área con importante actividad minera, la acción como agente contaminador también seria eliminada.

Por último, se infiere que el fenómeno de la existencia de contenidos altos de arsénico son de origen natural en las aguas.

### V. 4.11Hierro

Del análisis de los 150 pozos en estudio, el Hierro fue detectado en 108 pozos de los cuales 13 de estos sobrepasaron la norma de agua potable (0,3 mg/L) y 3 pozos la norma requisitos de calidad del agua para diferentes usos (5 mg/L), concentrándose las superaciones en los acuíferos de Mataquito y Maule Medio.

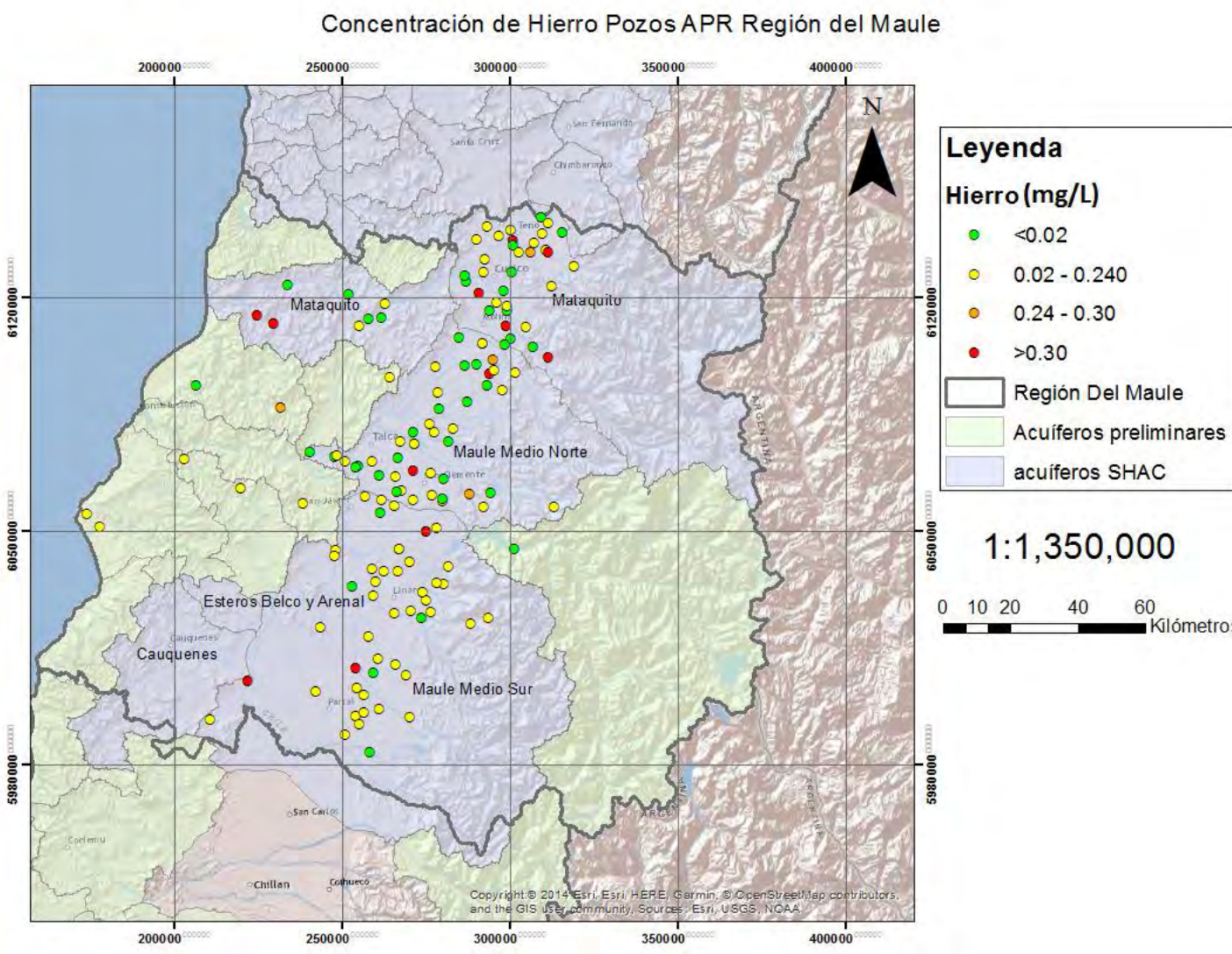



**Ilustración 86: Mapa "Concentración de Hierro en Pozos APR Región del Maule. Creación propia.**

| POZO | Hierro (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR EL MOLINO - VENTANA DEL ALTO | 0,49 | Mataquito |
| APR POTRERO GRANDE | 0,37 | Mataquito |
| APR EL CRUCERO | 0,52 | Mataquito |
| APR PICHINGAL | 0,31 | Mataquito |
| APR FLOR DEL LLANO | 1,30 | Maule Medio |
| APR QUELLA | 1,13 | Maule Medio |
| APR PIEDRA BLANCA | 6,58 | Mataquito |

| POZO | Hierro (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR LOS MONTES | 0,50 | Maule Medio |
| APR EL PORVENIR | 0,33 | Maule Medio |
| APR LOS MAITENES | 2,98 | Maule Medio |
| APR EL RODEO | 6,94 | Mataquito |
| APR LIEN PLACILLA | 8,23 | Mataquito |
| APR MAITENCILLO | 0,48 | Maule Medio |

**Tabla 56: Pozos APR estudiados sobre la Norma de agua potable NCh409. Creación propia.**

El Hierro se encuentra de manera natural en los acuíferos, pero los niveles en aguas subterráneas pueden aumentar por disolución de rocas ferrosas. En muestras filtradas (especies disueltas) de aguas superficiales oxigenadas, el Fe raramente alcanza concentraciones de 1 mg/L, mientras que en aguas subterráneas y drenajes superficiales ácidos pueden contener una cantidad de Fe bastante mayor. 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.

Los acuíferos que poseen un alto contenido de Hierro (>1 mg/L), corresponden a pozos ubicados en los acuíferos de Mataquito y Maule Medio, con características similares de profundidades de pozos bajas y de niveles freáticos cercano a la superficie, por lo que se podría descartar la opción de que la contaminación fuese producto de que a mayor profundidad, mayor concentración en las aguas.

Finalmente se infiere que el fenómeno de la existencia de contenidos altos de Hierro sería de origen natural en las aguas.

### V. 4.12Manganeso

El análisis de los 150 pozos en estudio, obtuvo para Manganeso un total de detección de 12 pozos, de los cuales 7 de estos sobrepasaron la norma de agua potable (0,1 mg/L) y 6 pozos la norma requisitos de calidad del agua para

diferentes usos (0,2 mg/L), concentrándose las superaciones en los acuíferos de Mataquito y Maule (medio-bajo).

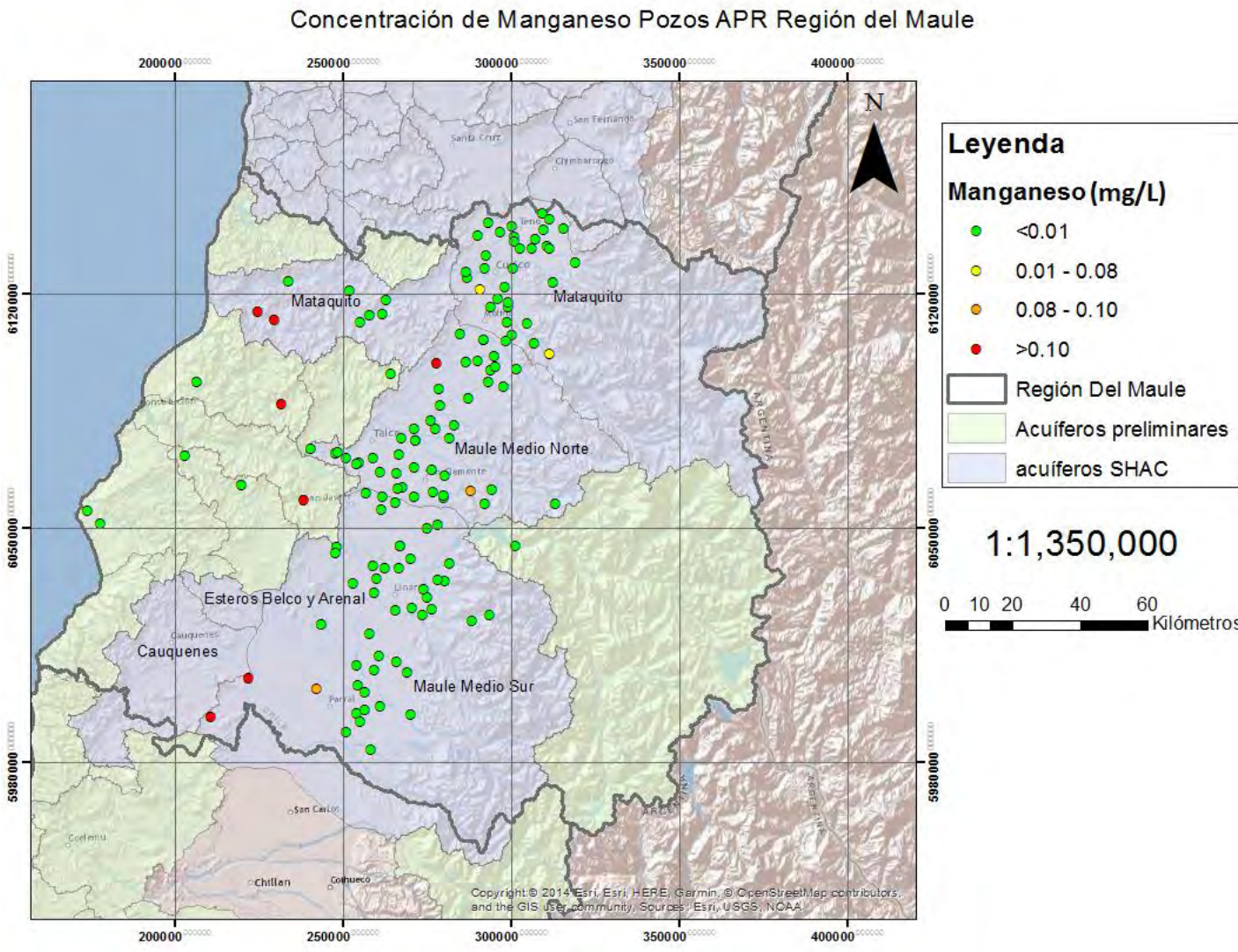



**Ilustración 87: Mapa "Concentración de Manganeso en Pozos APR Región del Maule. Creación propia.**

| POZO | Manganeso (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR POCILLAS | 1,41 | Maule Medio |
| APR QUELLA | 1,49 | Maule Medio |
| APR BATUCO | 0,88 | playa junquillar |
| APR LOS MAQUIS | 0,11 | No delimitado por DGA |

| POZO | Manganeso (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR LUIS CRUZ MARTINEZ | 0,60 | Maule bajo |
| APR EL RODEO | 1,48 | Mataquito |
| APR LIEN PLACILLA | 1,92 | Mataquito |

**Tabla 57: Pozos APR estudiados sobre la Norma de agua potable NCh409. Creación propia.**

El Manganeso, al igual que el hierro, se encuentra de manera natural en los acuíferos, en aguas naturales bien oxigenadas (Superficiales) no es importante, ya que los compuestos derivados se oxidan precipitando hidróxidos poco solubles. Aunque raramente supera 1mg/L, en forma disuelta, coloidal o asociado a materias orgánicas lo estabilizan, lo que podría aumentar su concentración, implicando dificultades para la eliminación sobre todo en agua potable.

Los acuíferos que poseen un alto contenido de Manganeso (>1 mg/L), corresponden a pozos ubicados en los acuíferos de Mataquito y Maule (medio y bajo), con características similares de profundidades de pozos bajas y de niveles freáticos cercano a la superficie, por lo que se podría descartar la opción de que la contaminación fuese producto de que a mayor profundidad, mayor concentración en las aguas.

Por último se infiere que el fenómeno de la existencia de contenidos altos de Manganeso sería de origen natural en las aguas.

### V. 4.13Plomo

El análisis de los 150 pozos en estudio, obtuvo para Plomo un total de detección en 14 pozos, de los cuales 2 de estos sobrepasaron la norma de agua potable (0,05 mg/L) y 1 pozo la norma requisitos de calidad del agua para diferentes usos (5 mg/L), correspondiente a los acuíferos de Mataquito y Maule Medio.

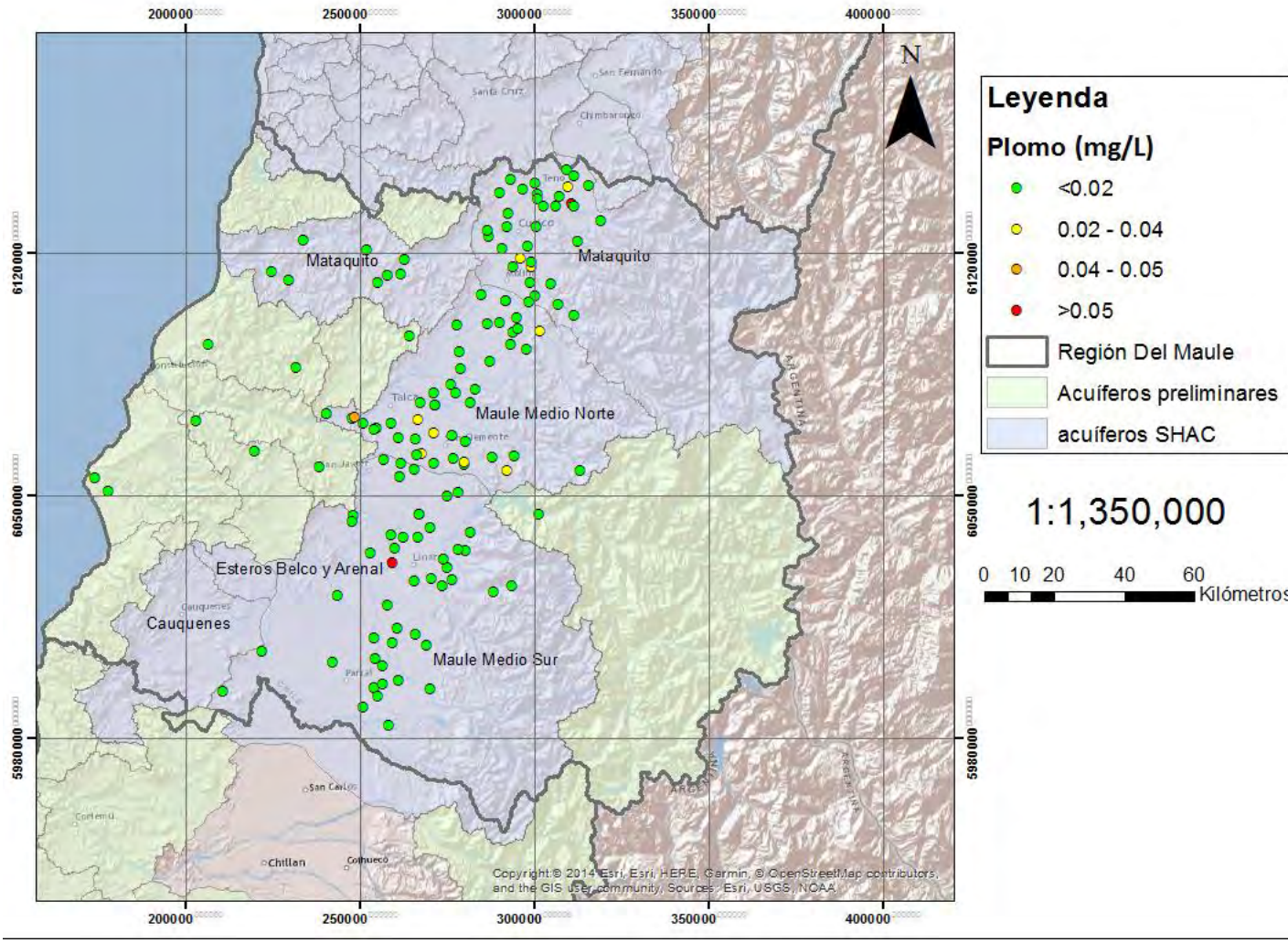



Ilustración 88: Mapa "Concentración de Plomo en Pozos APR Región del Maule. Creación propia.

| POZO | Plomo (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR VENTANA DEL BAJO | 0,08 | Mataquito |
| APR SANTA ROSA DE MAITENES | 5,58 | Maule Medio |

Tabla 58: Pozos APR estudiados sobre la Norma de agua potable NCh409. Creación propia.

La toxicidad del Plomo se vincula directamente con sus propiedades químicas, es por esto que es el metal más estudiado desde el punto de vista de sus efectos adversos.

Las aguas naturales rara vez contienen por encima de 5 μg/L (ppb). En el suministro de agua potable puede tener un origen industrial, minero y de descargas de hornos de fundición o de cañerías viejas de plomo. El nivel establecido por la Organización Mundial de la Salud considera como máximo un valor de 0,01 mg/L, mientras que la EPA determina el nivel de contaminantes en el agua potable que no causa efectos, en este contexto se denomina “objetivos de nivel máximo de contaminante” (MCLG por sus siglas en ingles), en donde se determinó que para el plomo en agua potable es cero, ya que es un metal tóxico que puede dañar la salud humana, incluso en niveles de baja exposición. Así también el Plomo es persistente y puede bioacumularse en el cuerpo con el tiempo.

Los acuíferos que poseen un alto contenido de Plomo (>0,05 mg/L), corresponden a pozos ubicados en los acuíferos de Mataquito y Maule Medio, destacando negativamente el pozo del acuífero Maule Medio “APR Santa Rosa de Maitenes, en donde alcanza una concentración de 5,58 mg/L. Se la razón de la altas concentraciones detectadas.

### V. 4.13Cobre

Del análisis de los 150 pozos en estudio, obtuvo para Cobre un total de detección en 22 pozos, de los cuales no existe superación de la norma de agua potable (2 mg/L), mientras que 2 pozos superan la norma requisitos de calidad del agua para diferentes usos (0,2 mg/L), correspondiente a los acuíferos de Mataquito y Maule Medio.

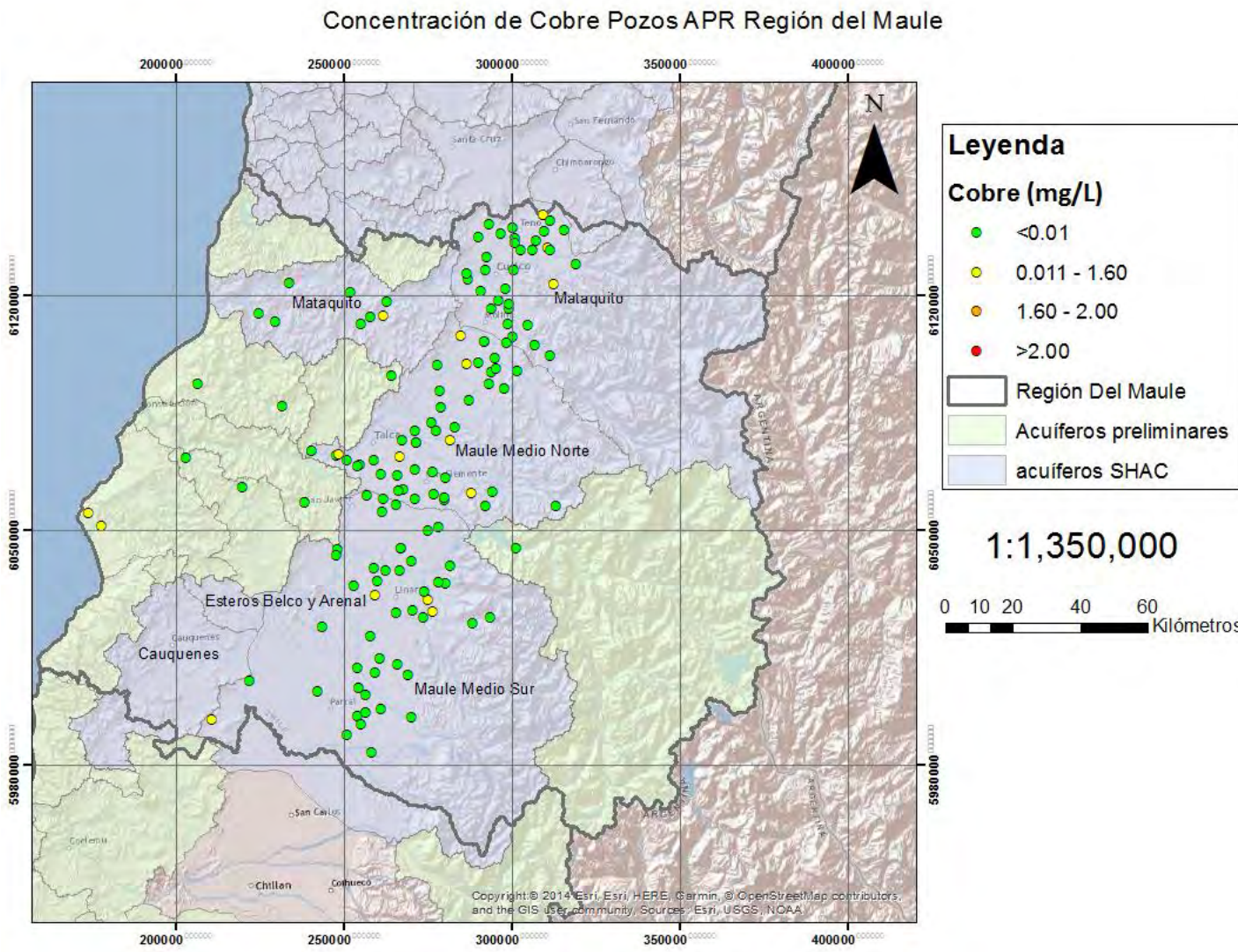



**Ilustración 89: Mapa "Concentración de Cobre en Pozos APR Región del Maule. Creación propia.**

| POZO | Cobre (mg/L) | Acuífero |
|---|---|---|
| APR VENTANA DEL BAJO | 0,40 | Mataquito |
| APR LO FIGUEROA | 0,56 | Maule Medio |

**Tabla 59: Pozos APR estudiados sobre la Norma de calidad de agua para diferentes usos NCh1333. Creación propia.**

El cobre normalmente se encuentra en el agua, sin embargo no presenta efectos adversos para la salud. El valor estándar establecido por la Organización Mundial de la Salud es de 2 mg/L, así también 2 mg la necesidad diaria de cobre para una persona adulta.

En aguas naturales está relacionado al desgaste y oxidación de rocas que lo contienen, sin embargo a pesar de que la mayoría de los minerales de cobre son insolubles bajo condiciones normales, existe una pequeña porción que se incorpora al agua. Por otra parte, la elevada concentración de cobre en el agua usualmente está relacionada con las fuentes antropogénicas más que con las fuentes naturales, fuentes como actividades industriales, fundición, minería y refinamiento de petróleo entre otros.

Los acuíferos que superan la NCh calidad de agua para diferentes usos (>0,2 mg/L), corresponden a Mataquito y Maule Medio.

Finalmente se infiere que el fenómeno de la existencia de contenidos de cobre sería de origen natural en las aguas.

# VI. CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS

## VI.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS LOCALES

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

1) Recopilación de antecedentes de posibles efectos que eleven el valor de la concentración de parámetros químicos en un sector acuífero. Para ello, en cada acuífero de la Región del Maule, se interpretaron los posibles efectos, tales como:

- Efectos de origen natural: geología, salares, volcanes, termas, mar.
- Efectos de origen antrópico: derrames industriales, depósitos de residuos industriales líquidos (Riles), tranques de relave, vertederos, actividades agrícolas, ganaderas, etc.

2) Estudio de posibles fuentes que modifiquen la química natural del agua subterránea. Se consideró los parámetros químicos asociados y su relación con valores propuestos por normas nacionales e internacionales de Agua Potable y de Riego, y su porcentaje de remoción mediante un tratamiento tradicional para agua potable, ya definido en el estudio de la DGA (2009).

3) Selección de dos parámetros siguiendo uno o más criterios establecidos. Entre estos:

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

- Parámetros minoritarios de mayor concentración
- Parámetros no correlacionados y representativos de actividades antrópicas distintas

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

### VI.1.1. OCURRENCIA NATURAL CARACTERIZACIÓN DE POSIBLES CONTAMINANTES DE ORIGEN NATURAL

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

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

Los parámetros contaminantes de origen natural potencialmente estarían relacionados con las concentraciones naturalmente anómalas de parámetros en la corteza terrestre, que corresponde a las zonas donde se ubican por ejemplo los yacimientos minerales. El mayor riesgo de contaminación por causas de origen

natural se presenta en las regiones del norte de Chile debido a las bajas tasas de precipitación. (DGA, 2009).

En la Tabla 60 se presentan los principales posibles parámetros contaminantes de origen natural (según DGA, 2009). Se observa, que la Región del Maule, lugar de estudio, los contaminantes naturales típicos para uso de Agua Potable corresponden a las concentraciones de Hierro, tanto en aguas superficiales como subterráneas.

| Región | Considerados en NCh409/1 | No considerados en NCh409/1 |
|---|---|---|
| XV y I | Cl, $SO_4$,SDT, As, Mn | Al, B, Li, Mo, Ag, Ba, Asbesto, Sb, Na, U |
| II | As, Cl | Al, B, Li, Mo, Ag, Be, Ba, Sb, Na, U |
| III | $SO_4$, SDT | Al, B, Li, Mo, Va, Ag, Ba, Sb, Na, U |
| IV | - | Mo, V, Ag, Ba, Asbesto, Sb, U |
| V | Fe, Mn | Al, Mo, Ba |
| RM | Fe | Al, Mo, Ba |
| VI | - | Al, Mo, Sb, U |
| VII | Fe | Al, Li, V, Asbesto |
| VIII | Fe, Mn | Al, Ni, Asbesto |
| IX | Fe, Mn | Al, Mo, Ni, Asbesto |
| XIV y X | - | Al, Ni, Asbesto, Sb |
| XI | Fe | Mo, Ag, U |
| XII | - | Sb |

**Tabla 60: Contaminantes naturales típicos de aguas superficiales y subterráneas de Chile (DGA, 2009).**

### VI.1.2. CARACTERIZACIÓN DE POSIBLES CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTRÓPICO

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

De los antecedentes recopilados en la Región del Maule, respecto al uso del suelo, desarrollo de industrias y obras mineras entre otros, se concluye que las principales actividades que potencialmente podrían afectar la calidad de las aguas

subterráneas en sectores acuíferos, corresponden a los siguientes tipos de actividades:

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

**Tabla 61: Resumen con los metales pesados asociados a distintas actividades antrópicas realizadas en la Cuenca del Maule, y parámetros químicos que pudieran estar relacionados a estas actividades.**

### VI.1.2. PARÁMETROS LOCALES POR ACUÍFERO

Considerando los resultados obtenido para cada uno de los acuíferos respecto de los parámetros “no fijos” utilizados para el cálculo del índice de calidad, aquellos que más veces superan la normativa vigente son Hierro (13 pozos), manganeso (7 pozos), Arsénico[17] (2 pozos)[18]. No obstante lo anterior, las concentraciones obtenidas para Hierro, Manganeso y Arsénico corresponderían a un fenómeno de origen natural, mientras que Plomo se desconoce el aporte pero llama la atención la alta concentración detectada > 5 mg/lt. Complementariamente, el Plomo y el Arsénico corresponden a dos elementos que disponibles en el medio ambiente, pueden ser tóxicos para la salud de las personas. Es por esto que, para el cálculo de índice de calidad los parámetros locales, se establecieron como parámetros al Arsénico y Plomo.

[17] Para el caso de As se tomaron como referencia las Normas Nacionales de Agua potable (0.01 mg/lt) y Riego (0.1 mg/lt).
[18] Si bien se considera como parámetro local al Analito Plomo para efectos del cálculo de Índice de calidad general, no se tomó en cuenta debido a que el límite de detección Ld 0.02 mg/lt es superior a las normas de referencia recomendado por la OMS, Organización Mundial de la Salud (0.01 mg/lt)

## VI.2 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD POR APR

De los resultados analizados, en la determinación de los índices de calidad individual y generales, la Región del Maule no cuenta con clasificación de “insuficientes” ni “intratables”. Por otra parte, existen 3 pozos, a saber, APR San Jorge de Romeral, APR Santa Cecilia y APR Los Montes, los cuales cuentan con calidad “Regular” debido al parámetros Nitrato, concentrados en los acuíferos de Maule medio (2 pozos) y Mataquito (1 pozo).

| Nombre Pozo | ICA general por Pozo |
|---|---|
| APR LA LAGUNA | Buena |
| APR LAS LIRAS | Buena |
| APR VENTANA DEL BAJO | Buena |
| APR SANTA REBECA - PURISIMA | Excepcional |
| APR EL MOLINO - VENTANA DEL ALTO | Buena |
| APR EL QUELMEN - SAN RAFAEL | Buena |
| APR LA PALMILLA | Excepcional |
| APR POTRERO GRANDE | Excepcional |
| APR EL PEUMAL - SAN RAMON | Buena |
| APR CORDILLERILLA | Excepcional |
| APR LOS NICHES - SANTA ELENA | Buena |
| APR LOS CRISTALES | Buena |
| APR LA CUESTA | Excepcional |
| APR LOS CASTAÑOS | Buena |
| APR EL MAITEN - SAN SALVADOR | Buena |
| APR LA OBRA | Buena |
| APR HUALEMU | Buena |
| APR EL CRUCERO | Excepcional |
| APR SAN JORGE DE ROMERAL | Regular |
| APR PICHINGAL | Buena |
| APR CASABLANCA | Excepcional |
| APR PIRIHUIN - LOS CANALES | Buena |
| APR BAJO LOS ROMEROS | Buena |
| APR ITAHUE - PUENTE ALTO | Excepcional |
| APR PANGUILEMO UNIDO | Excepcional |
| APR HUINQUILEMO/HUILQUILEMU | Buena |
| APR PALMIRA | Buena |
| APR QUEBRADA DE AGUA | Buena |
| APR MARIPOSAS | Buena |

| Nombre Pozo | ICA general por Pozo |
|---|---|
| APR AGUAS DEL VALLE | Buena |
| APR QUERI | Excepcional |
| APR BAJOS DE PERQUIN - CORRALONES | Excepcional |
| APR BRAMADERO | Buena |
| APR EL ALAMO | Buena |
| APR SAN MANUEL | Buena |
| APR LOS MONTES | Buena |
| APR VILCHES ALTO | Excepcional |
| APR PASO NEVADO | Excepcional |
| APR FLOR DEL LLANO | Buena |
| APR SANTA CECILIA - GABRIELA MISTRAL | Regular |
| APR LAS HORNILLAS | Excepcional |
| APR SANTA ROSA DE MAITENES | Buena |
| APR PALMILLA | Excepcional |
| APR PUTAGAN | Buena |
| APR PUENTE PANDO - MARIÑICO | Buena |
| APR CORONEL MAULE (LUIS HUMBERTO) | Excepcional |
| APR POCILLAS | Excepcional |
| APR QUELLA | Excepcional |
| APR BATUCO | Excepcional |
| APR PENCAHUE | Excepcional |
| APR CORINTO | Excepcional |
| APR LO FIGUEROA | Buena |
| APR PAHUIL | Buena |
| APR LOANCO | Excepcional |
| APR CARRIZAL | Excepcional |
| APR CUMPEO | Buena |
| APR SAN GERARDO - ODESSA - PEÑAFLOR | Buena |
| APR BOLSICO | Excepcional |
| APR LORA | Excepcional |
| APR VILLA PRATS | Buena |
| APR PLACILLA | Excepcional |
| APR PERALILLO | Buena |
| APR LA HUERTA MATAQUITO | Buena |
| APR HUAQUEN | Buena |
| APR SANTA RITA | Buena |
| APR PURISIMA - PANQUIMILI | Buena |
| APR RAMADILLA DE LIRCAY | Buena |
| APR SAN VALENTIN - LIRCAY ALTO | Buena |

| Nombre Pozo | ICA general por Pozo |
|---|---|
| APR SANTA MARTA - MATA VERDE | Buena |
| APR PORVENIR (Ficha 61613) | Buena |
| APR HUAQUI (HUAPI BAJO) | Buena |
| APR LA TERCERA - CHALET QUEMADO | Buena |
| APR ENTRADA DE CERRILLOS | Excepcional |
| APR LAS MERCEDES | Buena |
| APR LOS CRISTALES | Buena |
| APR CHACARILLAS - CAIVAN | Excepcional |
| APR SAN LUIS DE UNIHUE | Excepcional |
| APR CHEQUEN | Buena |
| APR CALLEJONES | Buena |
| APR DUAO - TRES ESQUINAS | Buena |
| APR COLIN | Buena |
| APR ESPERANZA | Excepcional |
| APR LA QUINTA | Buena |
| APR HIGUERILLAS | Buena |
| APR LA GOTERA | Excepcional |
| APR SAN PABLO | Buena |
| APR ORILLA NAVARRO | Excepcional |
| APR PALMA ROSA | Excepcional |
| APR VILLA REINA | Buena |
| APR MELOZAL | Buena |
| APR BOBADILLA | Buena |
| APR QUESERIA | Excepcional |
| APR PANGUE ARRIBA - PANGUE ABAJO | Buena |
| APR LOS MAQUIS | Excepcional |
| APR NUMPAY | Excepcional |
| APR EL MANZANO | Buena |
| APR SANTA MARGARITA - LOS GOMEROS - LA BATALLA | Buena |
| APR REMULCAO | Excepcional |
| APR PIEDRA BLANCA | Excepcional |
| APR HACIENDA TENO | Excepcional |
| APR COMALLe | Buena |
| APR LAS ARBOLEDAS | Excepcional |
| APR LO PATRICIO | Buena |
| APR EL MILAGRO . SANTA VICTORIA | Excepcional |
| APR LOS GUAICOS | Excepcional |
| APR QUILVO ALTO | Excepcional |
| APR EL CISNE | Buena |

| Nombre Pozo | ICA general por Pozo |
|---|---|
| APR DOMINGO MANCILLA | Buena |
| APR TUTUQUEN | Buena |
| APR TUTUQUEN BAJO | Excepcional |
| APR SANTA OLGA | Buena |
| APR VISTA HERMOSA | Excepcional |
| APR RINCON DE SARMIENTO | Excepcional |
| APR SANTA OLGA - LOS GUINDOS | Excepcional |
| APR NIRIVILLO | Excepcional |
| APR LUIS CRUZ MARTINEZ | Excepcional |
| APR VISTA HERMOSA -ALQUIHUE | Buena |
| APR QUINAMAVIDA | Excepcional |
| APR SAN FRANCISCO DE RARI | Excepcional |
| APR CHIRIPA PANIMAVIDA | Excepcional |
| APR LOS ROBLES - ESCUDO DE CHILE | Buena |
| APR LOS MONTES | Regular |
| APR SANTA ROSA | Buena |
| APR EL CERRILLO - CASAS VIEJAS | Buena |
| APR EL AROMO | Buena |
| APR LA CHISPA | Excepcional |
| APR EL PORVENIR (Ficha 61613) | Excepcional |
| APR VARA GRUESA | Excepcional |
| APR EMBALSE ANCOA | Excepcional |
| APR VEGA DE ANCOA | Excepcional |
| APR LLANCANAO | Buena |
| APR SAN ANTONIO LAS ENCINAS | Buena |
| APR SAN ANTONIO | Excepcional |
| APR SAN VICTOR LAMAS | Excepcional |
| APR SANTA CECILIA-RETIRO | Excepcional |
| APR AJIAL | Excepcional |
| APR CARMEN ORIENTE | Buena |
| APR SANTA DELFINA | Buena |
| APR SANTA INES | Excepcional |
| APR SAN ISIDRO | Excepcional |
| APR LOS MAITENES | Excepcional |
| APR EL RODEO | Excepcional |
| APR LIEN PLACILLA | Excepcional |
| APR COIRONAL | Buena |
| APR LOS PUQUIOS | Buena |
| APR LLANO BLANCO | Buena |

| Nombre Pozo | ICA general por Pozo |
|---|---|
| APR MAITENCILLO | Buena |
| APR PEÑUELAS | Buena |
| APR SEMILLERO | Buena |
| APR ABRANQUIL | Buena |

Tabla 62: Resumen índices de calidad general de los pozos APR año 2017 Región del Maule

# VII. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió conocer la condición actual de la calidad de las aguas subterráneas tanto de los acuíferos SHAC (Mataquito, Maule Medio, Estero Belco y Arena, Cauquenes), como de los acuíferos preliminares (Maule Alto, Los Puercos, Vichuquén, Nilahue Alto, Playa Junquillar, Dunas de Chancho, Pelluhue, Maule Bajo, Cauquenes Alto y Purapel), ubicados en la región del Maule. A partir de los resultados químicos obtenidos se identificaron diferencias entre las aguas de los distintos sectores acuíferos estudiados, permitiendo identificar cambios paulatinos en las características de las aguas.

Con respecto a los análisis de iones mayoritarios, los acuíferos SHAC, en particular el acuífero de Mataquito, presenta profundidades más importantes que los otros pozos del área, por lo que se infiere que llevan un proceso de infiltración de mayor interacción agua-roca, presentando una composición bicarbonatada cálcica en las zonas altas del río Lontué, mientras que aguas abajo como aguas cloruradas cálcicas (APR Pichingal, APR San Jorge de Romeral). En el valle del rio Mataquito existe una variación entre aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas y magnésicas, hasta desembocar en la costa. Por otra parte en el acuífero Maule Medio, presenta aguas bicarbonatadas cálcicas en la zona norte, mientras que a medida que se avanza en el valle tiende a aumentar la concentración de magnesio a bicarbonatadas cálcicas y magnésicas. A medida que las aguas avanzan de Este a Oeste se enriquecen en sales aumentando la cantidad de magnesio, sodio y calcio. Finalmente el acuífero de Cauquenes se clasifican como cloruradas cálcicas, en donde el APR Coronel del Maule, posee una baja profundidad y nivel freático, lo que entrega información de aguas de poco tiempo de residencia, así también como un pozo propenso a ser afectado por la actividad antrópica en la superficie.

Las aguas de los acuíferos Preliminares, no varían demasiado en su composición, correspondiente en su gran mayoría a bicarbonatadas cálcicas, a excepción de las aguas cercanas a la costa, en donde corresponden a cloruradas y sulfatadas sódicas y bicarbonatadas sódicas.

La superación de la normativa vigente se dio principalmente con el Nitrato (3 pozos) y Amonio (1 pozo), mientras que los microelementos dados por Arsénico (3 pozos), Hierro (13 pozos), Manganeso (7 pozos) y Plomo (2 pozos). En la siguiente tabla se presenta en detalle de la superación de umbrales, considerando la Norma NCh 409/2005. La superación de Nitrato se debería a causas antrópicas, por el usos del suelo en agricultura.

| Parámetro | Unidad | Límite Máximo para agua potable (NCh 409) | N° de pozos fuera de la norma NCh 409/2005 |
|---|---|---|---|
| Sulfato | (mg/L) | 500 | 0 |
| Cloruro | (mg/L) | 400 | 0 |
| Magnesio | (mg/L) | 125 | 0 |
| Nitrato | (mg/L) | 50 | 3 |
| Amonio | (mg/L) | 1,5 | 1 |
| Solidos Disueltos totales | (mg/L) | 1500 | 0 |
| Arsénico | (mg/L) | 0,01 | 3 |
| Cadmio | (mg/L) | 0,01 | 0 |
| Cobalto | (mg/L) | No se incluye | - |
| Cobre | (mg/L) | 2 | 0 |
| Hierro | (mg/L) | 0,3 | 13 |
| Mercurio | (mg/L) | 0,001 | 0 |
| Manganeso | (mg/L) | 0,1 | 7 |
| Níquel | (mg/L) | No se incluye | - |
| Plomo | (mg/L) | 0,05 | 2 |
| Selenio | (mg/L) | 0,01 | 0 |
| Zinc | (mg/L) | 3 | 0 |

**Tabla 63: Resumen con los analitos que superaron al norma de referencia NCh 409/2005**

Por otra parte, de aquellos metales que superaron la Normativa Vigente, a saber, Arsénico, Hierro, Manganeso y Plomo, existe un factor común relacionado con los pozos APR Quella (superación hierro – Manganeso), APR El Rodeo (superación Arsénico – Hierro – Manganeso) y APR Lien Placilla (superación Hierro – Manganeso), los cuales cuentan con más de una superación, y corresponden a los acuíferos de Maule Medio (1

pozo) y Mataquito (2 pozos). De esta misma forma el mayor número de superaciones se genera en el acuífero de Mataquito, involucrando 14 superaciones de norma.

## VIII. RECOMENDACIONES

En base al presente estudio, se sugieren las siguientes recomendaciones o medidas a llevar a cabo en la Región del Maule:

1. Evaluar la factibilidad técnica y económica de realizar un muestreo, análisis y posterior estudio de las aguas subterráneas de los pozos APR de las zonas costeras de la séptima Región, con el fin de complementar y comparar resultados con el presente estudio de calidad de aguas, manteniendo las características del presente informe. Los pozos de mayor importancia de ser considerados son los siguientes:

| APR | Acuífero | Comuna |
|---|---|---|
| APR LLICO | Vichuquén | Vichuquén |
| APR DUAO-LIPIMÁVIDA | Vichuquén | Licanten |
| APR VICHUQUÉN | Vichuquén | Vichuquén |
| APR COICABAR | Nilahue Alto | Hualañe |
| APR BOTACULCURA | Los Puercos | Pencahue |
| APR JUNQUILLAR | Playa Junquillar | Constitución |
| APR MAGDALENA DE CURTIDURÍA | Maule Bajo | Pencahue |
| APR UNIÓN MAULE CLARO | Maule Bajo | Maule |
| APR SAN RAMÓN | Dunas de Chanco | Constitución |
| APR PELLINES | Dunas de Chanco | Constitución |
| APR LA VEGA | Pelluhue | Chanco |
| APR CHOVELLÉN | Pelluhue | pelluhue |

**Tabla 64: Pozos APR que no han sido considerados en el presente estudio, pero que son relevantes de estudiar.**

2. En el acuífero Mataquito se obtuvieron resultados de concentraciones altas de Arsénico, Fierro y Manganeso en 3 de los 44 pozos APR, debido a esto, se recomienda realizar un monitoreo sitio especifico de las aguas de pozos no estudiados cercanos a (APR PLACILLA, LORA, RODEO), así como también incorporar a estaciones de aguas superficiales, incorporando metales complementarios al arsénico, con el fin de delimitar la zona con influencia y sus posibles fuentes de contaminación. Además, sería de utilidad realizar un estudio de detalle geológico en el área delimitada con el fin de complementar la información anterior.

| APR | Acuífero | Comuna |
|---|---|---|
| APR ORILLA | Mataquito | Curepto |
| APR CONSTANTUÉ | Mataquito | Curepto |

**Tabla 65: Pozos APR que no han sido considerados en el presente estudio, cercanos a pozos con altas concentraciones de Arsénico.**

3. Implementar un seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en el Acuífero Mataquito y Maule Medio, ya que se detectaron pozos cuyas concentraciones sobrepasaron la Norma de agua potable (NCh409/2005), dando preferencia a los pozos que superaron el máximo permitido para el parámetro Arsénico (3 pozos), Nitrato (3 pozos), Amonio (7), Hierro (13), Manganeso (7) y Plomo (2). Con el objeto de mantener las condiciones de entorno y constructivos de los pozos, se debe priorizar la inclusión de los mismos puntos de muestreo, lo cual permitirá disponer de datos que den cuenta de los cambios temporales de las aguas subterráneas, a saber los siguientes pozos:

| Pozo | Acuífero |
|---|---|
| APR SAN JORGE DE ROMERAL | Mataquito |
| APR LOS MONTES | Maule Medio |
| APR SANTA CECILIA - GABRIELA MISTRAL | Maule Medio |
| APR EL RODEO | Mataquito |
| APR LORA | Mataquito |
| APR EL MOLINO - VENTANA DEL ALTO | Mataquito |
| APR POTRERO GRANDE | Mataquito |
| APR EL CRUCERO | Mataquito |
| APR PICHINGAL | Mataquito |
| APR FLOR DEL LLANO | Maule Medio |

| Pozo | Acuífero |
|---|---|
| APR QUELLA | Maule Medio |
| APR PIEDRA BLANCA | Mataquito |
| APR EL PORVENIR | Maule Medio |
| APR LOS MAITENES | Maule Medio |
| APR LIEN PLACILLA | Mataquito |
| APR MAITENCILLO | Maule Medio |
| APR POCILLAS | Maule Medio |
| APR BATUCO | playa junquillar |
| APR LOS MAQUIS | No delimitado por DGA |
| APR LUIS CRUZ MARTINEZ | Maule bajo |
| APR VENTANA DEL BAJO | Mataquito |
| APR SANTA ROSA DE MAITENES | Maule Medio |

**Tabla 66: Pozos APR que superaron los máximos permitidos para la Norma de agua potable (NCh409/2005).**

4. Se sugiere implementar un monitoreo de observación de las aguas subterráneas en los otros 12 acuíferos, tanto preliminares como SHAC, incluidos en el presente informe donde se detectaron concentraciones de nitrato en un rango próximo al máximo permitido, dando preferencia a los pozos que se encuentran en áreas de los sectores acuíferos en donde la vulnerabilidad a la contaminación es mayor.

| Pozo | Acuífero |
|---|---|
| APR VENTANA DEL BAJO | Mataquito |
| APR SAN JORGE DE ROMERAL | Mataquito |
| APR PICHINGAL | Mataquito |
| APR BAJO LOS ROMEROS | Maule Medio |
| APR QUEBRADA DE AGUA | Maule Medio |
| APR FLOR DEL LLANO | Maule Medio |
| APR SANTA CECILIA - GABRIELA MISTRAL | Maule Medio |
| APR LO FIGUEROA | Maule Medio |
| APR RAMADILLA DE LIRCAY | Maule Medio |
| APR SAN PABLO | Maule Medio |
| APR MELOZAL | Maule Medio |
| APR LOS MONTES | Maule Medio |

**Tabla 67: Pozos APR concentraciones de nitrógeno próximos al permitido para la Norma de agua potable (NCh409/2005).**

5. Es deseable Incorporar un mayor número de pozos en el acuífero Los Puercos, actualmente solo cuenta con un APR, el cual no tiene información. Esto debido a que durante el terremoto del 27 de febrero de 2010 el tranque relave Las Palmas colapsó, y podría, eventualmente, ser una fuente de contaminación de las aguas del pequeño valle de Las Palmas, en Pencahue.
6. Evaluar la factibilidad técnica y económica de implementar nuevas tecnologías en la detección de Nitrito ($NO_2^-$), ya que se trata de un parámetro importante a la hora de identificar contaminación reciente en el recurso hídrico.

Otras recomendaciones a considerar:

- Incorporar indicadores de calidad durante el proceso de toma de muestra, de esta manera se reducirán los errores producidos en esta etapa del estudio, por ejemplo en los balances iónicos realizados por el laboratorio contratado.
- Incluir en formulario de terreno un ítem de desarrollo que incorpore información respecto del entorno del pozo APR en estudio, esto debido a que resulta relevante considerar antecedentes in situ de los usos de suelo, tipología de cultivos agrícolas, existencia de redes de canales de riego, antecedentes de prácticas de riego, tipología, geología y ubicación de industrias, las cuales pueden ser contrastadas con la bibliografía del sector.
- Evaluar la factibilidad técnica y económica de incluir parámetros complementarios a los análisis de aguas subterráneas, entre otros se puede considerar: DQO, turbidez, alcalinidad y dureza.
- Se recomienda enfocar los muestreos en pozos con la menor profundidad posible, por ser éstos más sensibles a modificaciones por fuentes de contaminación puntual o difusa existentes en la zona.
- Para asegurar la calidad de los datos generados, se recomienda continuar realizando los muestreos de acuerdo con los estándares de la Norma chilena NCh 411/11 (Guía para el muestreo de aguas subterráneas) y realizar los análisis en un laboratorio acreditado bajo la norma chilena NCh-ISO 17.025. Esto permite reducir la incertidumbre de los resultados y contar con datos representativos de la condición del acuífero.
- Trabajar con los diversos actores participantes en la región, de manera de incorporar la educación ambiental y las buenas prácticas en el uso sustentable del Recurso Hídrico

- Entregar y difundir los resultados obtenidos en este informe a las autoridades regionales para tomar medidas adecuadas en el caso de los pozos contaminados y precauciones en los APR en riesgo de estarlo.
- Mantener el modelo colaborativo utilizado en el presente informe, a saber, apoyo entre el nivel central y regional de la DGA para la selección de pozos y toma de muestras, y a su vez con la DOH (Dirección de Obras Hidráulicas) regional para acceder a los pozos administrados por las comunidades locales.
- Incorporar otros servicios con competencias en conservación y protección de los recursos hídricos, considerando el apoyo de otros especialistas del para la participación activa en la elaboración y revisión del informe.
- Incluir la fiscalización ambiental de competencias DGA en aquellos acuíferos que lo requieran, ya sea por la calidad del recurso hídrico como de la cantidad.
- Contar con un inventario actualizado de descargas industriales a aguas subterráneas, especialmente de aquellas actividades realizadas en los diversos sectores acuíferos en estudio.
- Crear planes de manera de los recursos hídricos que lo requieran, en relación a los resultados obtenidos del presente informe, el cual pueda incorporar amortiguar las concentraciones que sean particularmente altas, así como incorporar probable actualizaciones de la tecnología en el tratamiento de las aguas.
- Describir e informar de aquellas zonas donde por el tipo de suelo no es conveniente la aplicación de descarga de residuos o donde el nivel freático es muy somero y en el futuro definir zonas vulnerables donde las tasas de aplicación son restringidas.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

Ingenieros consultores IPLA, 1986a, Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional, Escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000, Santiago.

Dirección General de Aguas (DGA), 1986b, Mapa hidrogeológico de Chile, texto explicativo, escala 1: 2.500.000, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago.

Dirección General de Aguas (DGA), 1986, Mapa hidrogeológico Escalas 1:1000.000, Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago.

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 2003, Mapa Geológico Centro Chile, PUBLICACION GEOLOGICA DIGITAL, No. 4, versión 1.0, 2003, Base Geológica escala 1:1.000.000.

Dirección General de Aguas (DGA). 1986b; Mapa hidrogeológico de Chile: texto explicativo, escala 1:2.500.000; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Series: SEB; No. 3

Espinoza, C.PRACTICA 2005. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la Región del Maule. (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, mapa en dos hojas, escala 1:250.000.

Infraestructura y Ecología S. A. (INFRAECO), 2014. Análisis crítico de la red de calidad de aguas superficiales y subterráneas de la DGA, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos SIT: No. 337.

Taucare. M., Clase_Auxiliar_N_6_primavera_2017.ppt, Hidrogeología GL5213-1, primavera 2017, Universidad de Chile, Santiago.

Taucare. M., Clase_Auxiliar_N_7_primavera_2017.ppt, Hidrogeología GL5213-1, primavera 2017, Universidad de Chile, Santiago.

Taucare. M., Clase_Auxiliar_N_8_primavera_2017.ppt, Hidrogeología GL5213-1, primavera 2017, Universidad de Chile, Santiago.

Daniele. D., 14_15_HQ_INTRO.pdf, Hidrogeoquímica y contaminación, Hidrogeología GL5213-1, primavera 2017, Universidad de Chile, Santiago.

Dirección General de Aguas (DGA), 2017, Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la Región de Coquimbo, Ministerio de Obras Públicas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH), S.D.T N°397

CADE-IDEPE Consultores en Ingeniería, 2004, Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de agua según Bbjetivos de Calidad, CUENCA DEL RÍO MAULE, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

CADE- IDEPE Consultores en Ingeniería, 2004, Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad, CUENCA DEL RÍO MATAQUITO, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

GCF Ingenieros Consultores LTDA, 2006, Estudio de calidad de aguas subterráneas en las cuencas de Huasco y Mataquito, Ministerio de Agricultura, Comisión Nacional de Riego (CNR), Secretaria ejecutiva.

CADE- IDEPE Consultores en Ingeniería, 2004, Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Volumen N°1, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA), Santiago.

Comisión Nacional de Riego (CNR), 2017, Diagnóstico para desarrollar plan de riego Cuenca del Maule, Ministerio de Agricultura, Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, Universidad de Talca, Talca.

Dirección General de Aguas (DGA), 2009, Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Geohidrología Consultores LTDA, Santiago.

Espinoza. C., 2006, Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos comparación entre los Métodos GOD y BGR, Universidad Católica del Norte, XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta.

KRAL Consultores LTDA, 2013, Análisis crítico de las redes hidrométricas, regiones V a VII y Región Metropolitana, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Hidrología, Santiago.

Aquaterra Ingenieros LTDA, 2012, Estudio hidrogeológico Cuenca del Río Mataquito, tomo 1, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago.

Dirección General de Aguas, 2005, Modelación hidrológica de Cuencas Pluviales, Hoya hidrográfica del Río Maule, Ministerio de Obras Públicas, Universidad de Chile,

Departamento de Ingeniería Civil, Departamento de Estudios y Planificación, S.I.T N°110, Santiago.

Dirección General de Aguas, 2013, Estimación de la Oferta Hídrica en las Cuencas de los Esteros Belco y El Arenal, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, SDT N°345, Santiago.

Aqualogy Medioambiente Chile S.A, 2014, Levantamiento Hidrogeológico en Cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Del Maule y Del Bío Bío, Etapa 2, Ministerio de Obras Públicasm Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, S.I.T N°346, Santiago.

GCF Ingenieros, 2013, Modelación Hidrogeológica de la Cuenca del Río Cauquenes, Región del Maule, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, S.I.T N°321, Santiago.

GCF Ingenieros, 2013, Modelación Hidrogeológica Cuenca Estero Los Puercos Región del Maule, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, S.I.T N°319, Santiago.

Dirección General de Aguas, 2011, Balance Hídrico Preliminar Acuífero Río Maule, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, S.D.T N° 319, Santiago.

Dirección General de Aguas, 2016, Atlas del agua, Nuestra Agua- Capítulo 2, Ministerio de Obras Públicas, Chile.

Dirección General de Aguas, 2011, Modelación Hidrogeológica Cuenca Río Maule, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, SDT N°320, Santiago.

GCF Ingenieros LTDA, Levantamiento de Información Hidrogeológica para Modelación Cuenca del Río Maule, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, S.I.T N°222, Santiago.

GCF Ingenieros Consultores LTDA, 2006, Estudio e Implementación de Modelos Hidrológicos Acoplados a SIG para el Manejo y Planificación, Cuencas de Maule, Mataquito e Itata, Comisión Nacional de Riego, División Estudios y Desarrollo, Santiago.

Luis Arrau Del Canto- Consultores en Ingeniería Hidráulica y de Riego, 2008, Fase II Actualización del Modelo de Operación del Sistema y Formulación Del Plan, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, S.I.T N°134, Santiago.

Servicio Nacional de Geología y Minería, 2016, Anuario de la Minería de Chile, Ministerio de Minería, Santiago.

Dirección General de Aguas, 2015, Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos Subterráneos en el Sector Acuífero Estero Belco y Arenal, Informe Técnico DARH N°45, Santiago.

Dirección General de Aguas, 2015, Evaluación a la Disponibilidad de Recursos Hídricos Subterráneos en el Sector Acuífero Teno- Lontué, Informe Técnico DARH N° 44, Santiago.

Hevia, A,. 2014, Evolución tectono- Estratigráfica de Depósitos Cenozoicos en la Cuenca del Río Teno, Vertiente Occidental de la Cordillera principal, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Santiago.

Astaburuaga, D,. 2014, Evolución Estructural del Límite Mesozoico- Cenozoico de la Cordillera Principal entre 35°30 y 36°S, Región del Maule, Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Santiago.

Lillo, J.,Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas, Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente, visitada el 01 de febrero de 2018, en línea [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag15564/Peligros%20geoqu%C3%ADmicos%20del%20ars%C3%A9nico%20-%20Javier%20Lillo.pdf]

Collao, G., 2008, Contaminación de las Aguas Subterráneas por Nitratos provenientes de la utilización de purines de cerdo en la Agricultura, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago.

Cortes, I., Motalvo, S., Cenma. Aguas: Calidad y Contaminación. Un enfoque Químico Ambiental, Santiago.