



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESCUELA DE GEOGRAFÍA

Evaluación de la disponibilidad de agua del
Sector Acuífero Chacabuco-Polpaico:
Factibilidad de entrega de nuevos derechos de
aprovechamiento de agua provisionales.

Memoria para optar al Título de Geógrafo.

Jonathan Nuñez Codoseo

Profesor Guía: Dr. Francisco Ferrando Acuña

Santiago de Chile: Abril de 2017.

Resumen

La sobreexplotación de los recursos de aguas subterráneas es un grave problema que afecta a los acuíferos de diversos países, generando problemas de abastecimiento hídrico para diversos fines y para millones de personas en el mundo. En el caso de Chile, la extracción de aguas subterráneas es regulada legalmente por el Código de Aguas de 1981, el cual entrega Derechos de Aprovechamiento de Aguas a perpetuidad.

Este estudio trata específicamente de una evaluación de disponibilidad hídrica del Sector Acuífero Chacabuco-Polpaico, ante las solicitudes de otorgamiento de nuevos Derechos Provisionales de aprovechamiento de agua, considerando que este sector acuífero ya fue decretado como Área de Restricción, donde ya no se pueden entregar nuevos derechos definitivos, no obstante se pueden seguir otorgando nuevos derechos en carácter de Provisionales.

La evidencia de actual escasez hídrica en el área de estudio queda reflejada en el agotamiento de los cauces, esto motivó la elaboración de una estimación de recarga efectiva del acuífero a través de un estudio, cuyos resultados muestran un Balance Hídrico negativo reflejado en el descenso sostenido de los niveles freáticos del acuífero. Este se explica principalmente por la gran evapotranspiración y la extracción de agua para riego, motivando como recomendación el decretar este Sector Acuífero como una nueva Área de Prohibición en el país.

Palabras claves: *Sector acuífero Chacabuco-Polpaico, Derechos de agua provisionales, Extracción de aguas subterráneas, Recarga de acuífero.*

Abstract

The overexploitation of the groundwater resources is a serious problem that affects the aquifers of different countries, generating problems of water supply for different purposes and for millions people in the world. In the case of Chile, the extraction of groundwater is legally regulated by the Water Code of 1981, which delivers Water Exploitation Rights in perpetuity.

This study addresses specifically about an evaluation of water availability of the Chacabuco-Polpaico aquiferous sector, before new granting requests of new Provisional Rights of water exploitation, considering that this aquiferous sector was already declared as a Restriction Area, where already is not possible deliver new Definitive Rights, notwithstanding it is possible to continue granting new rights in character of provisional.

The evidence of current water shortage in the study area is reflected in the depletion of streams, it motivated the elaboration of an effective recharge estimation of the aquifer through a study that shows a negative water balance, situation reflected in a sustained decline of the aquifer phreatic levels. This decline is explained mainly by the great evapotranspiration and the extraction of water for irrigation, motivating how recommendation to decree this Aquiferous Sector as a new Banning Area in the country.

Key words: *Chacabuco-Polpaico aquiferous sector, Provisional water rights, Groundwater exploitation, Aquifer recharge.*

Dedicatoria

A quienes perdieron sus vidas
en los trágicos incendios forestales
de enero de 2017.

Agradecimientos

Debo agradecer a muchas personas el poder haber terminado mis estudios, comenzando por mi novia María Paz Rodríguez, por haber creído en mí, apoyado y tenido paciencia todos estos años, a ella dedico este trabajo y los que vendrán.

Agradezco a mi familia el apoyo para poder estudiar por tantos años, aun cuando la meta se veía tan lejana en el tiempo.

En cuanto a las personas de la Universidad, agradezco especialmente a mi profesor guía Francisco Ferrando, por tanto conocimiento entregado durante todos los ramos en los que me hizo clases, además de su apoyo en mi Práctica Profesional y Memoria de Título. Siempre le estaré agradecido por tanto apoyo. Gracias profe!!!

Agradezco a mis profesores informantes; al profesor Álvaro Mauro por sus ramos y consejos climatológicos y al profesor James McPhee, a quien conocí al realizar este trabajo y me ayudó amablemente con atinados consejos y observaciones, muchas gracias a ambos.

Como no mencionar al profesor José Araya Vergara, a quien le agradezco por sus enseñanzas de Geomorfología y por recomendarme para mi primera experiencia laboral.

Le agradezco a Yohann Videla por su apoyo y consejos cuando comenzaba a andar por el camino de la Hidrología, a Cristián Escobedo por sus conocimientos entregados en Estadísticas y por ofrecerme mi segunda experiencia laboral, donde conocí a mi supervisor Julio Covarrubia a quien también agradezco por su apoyo y consejos.

También le agradezco mucho a Carlos Guzmán, por haber confiado en mí y haberme llevado a hacer la práctica a su trabajo en la DGA. Lugar donde aprendí tanto, por eso quiero agradecer a mi supervisor Pablo Liendo por su tiempo dedicado. Junto con él, le agradezco por sus consejos a mis compañeros de la DGA, Alexis Segovia, Cristian Maturana y a todos los chiquillos que amablemente me recibieron en su trabajo.

Le envío agradecimientos al señor Leonel Fernández Ávila del Fondo de Desarrollo Frutícola de la Red Agroclima por facilitarme valiosos datos meteorológicos y al tío Toño por haberme acompañado con su auto a la salida a terreno.

Le envío mis saludos a los compañeros de la carrera, con los que trabajé y estudié tantos semestres, a ellos les deseo mucha suerte en sus Memorias de Título y futuro profesional.

Finalmente deseo agradecer a mis profesores de la enseñanza básica de la escuela Ramón Vinay Sepúlveda de Chillán, porque ellos me entregaron la formación necesaria para surgir en la vida y llegar hasta la Universidad.

Muchas gracias a todos.

Contenido

Resumen.....	2
Abstract	2
Lista de Abreviaciones usadas.....	8
Lista de Figuras	9
Lista de Tablas.....	10
Lista de Gráficos	11
I. Introducción	12
II. Problemática.....	13
2.1 Desafíos presentes y futuros en el manejo de aguas subterráneas.	13
2.2 Disminución del agua subterránea.	13
2.3 Cambio climático, aguas subterráneas y cultivos.....	14
2.4 Uso de aguas subterráneas en el mundo.....	15
2.5 Uso de aguas subterráneas en países desarrollados.....	16
2.5.1 El caso de Dinamarca.	17
2.6 Uso de aguas subterráneas en países en desarrollo.	17
2.6.1 Dimensiones del desarrollo sostenible en países en desarrollo.	18
2.6.2 Agua, agricultura y alimentación en países en desarrollo.....	18
2.7 Problemáticas de agua en Chile.	19
III. Fundamentos de Hidrología e Hidrogeología.	20
3.1 Ecuaciones de balance hídrico.	20
3.2 Estimación de recarga de acuífero.....	22
3.3 Elementos del ciclo hidrológico.	23
3.3.1 Evaporación.....	24
3.3.2 Transpiración	24
3.3.3 Evapotranspiración.....	24
3.3.4 Precipitación.....	25
3.3.5 Infiltración.....	26
3.3.6 Escorrentía	26
3.4 Explotación de pozos	28
3.5 Procesos de recarga de acuíferos.....	29
IV. Antecedentes sobre la situación de las aguas subterráneas en Chile	31
4.1 Aguas subterráneas en Chile.	31
4.1.1 Situación de acuíferos en Chile.....	31
4.1.2 Disponibilidad y rendimientos sustentables de acuíferos.	31

4.1.3 Restricciones y prohibiciones de aguas subterráneas.....	32
4.1.4 Derechos de aguas otorgados a nivel nacional.	32
4.1.5 Cuenca y acuífero del Río Maipo.	34
4.1.6 Estimaciones de demanda de agua en Chile.	35
4.1.7 Agua potable en Chile.....	36
V. Marco teórico legal de aguas de Chile.	38
VI. Área de estudio.....	42
VII. Pregunta de investigación.....	44
VIII. Objetivos.....	45
8.1 Objetivo General.....	45
8.2 Objetivos específicos.....	45
IX. Metodología.....	46
9.1 Estimación de la recarga potencial de agua del acuífero.....	46
9.2 Estimación de Evapotranspiración.....	46
9.2.1 Evapotranspiración Potencial de Thornthwaite (1948).....	46
9.2.2 Evapotranspiración Real de Turc (1961).	47
9.2.3 Evapotranspiración Real de FAO Penman-Monteith (1998).	47
9.3 Estimación de escorrentía superficial y subterránea.	54
9.3.1 Escorrentía superficial de Grunsky.....	54
9.3.2 Escorrentía superficial de Peñuelas.	54
9.3.3 Escorrentía superficial de Coutagne.....	55
9.3.4 Escorrentía superficial de Turc.	55
9.3.5 Estimación de Escorrentía Subterránea.....	55
9.4 Estimación de retornos por infiltración de agua de riego.....	56
9.5.1 Determinación de cultivos, superficies y métodos de riego.	57
9.5 Análisis de variaciones del nivel estático del acuífero.....	57
9.6 Estimación de extracción artificial de agua del acuífero.....	58
9.7 Estimación del rendimiento sustentable del acuífero.	59
X. Resultados.....	60
10.1 Aspectos físicos del Área de Estudio.....	60
10.1.1 Topografía.....	60
10.1.2 Geología.....	62
10.1.3 Suelos.....	63
10.1.4 Hidrología.....	65
10.1.5 Hidrogeología.....	67

10.1.6 Climatología.....	70
10.1.7 Actividad agrícola y usos de suelo.....	71
10.2 Estimación de la recarga potencial de agua del acuífero.....	73
10.2.1 Método de las Isoyetas	74
10.2.2 Método de los Polígonos de Thiessen.....	76
10.2.3 Método de la media aritmética.	77
10.2.4 Resumen de resultados de recarga potencial anual.....	78
10.2.5 Líneas de tendencia de precipitaciones medias mensuales.....	78
10.3 Estimación de Evapotranspiración.....	82
10.3.1 Evapotranspiración Potencial de Thornthwaite (1948).....	82
10.3.2 Evapotranspiración Real de Turc (1961).	83
10.3.3 Evapotranspiración Real de FAO Penman-Monteith (1998). Cultivo de referencia.....	86
10.3.4. Evapotranspiración Real de FAO Penman-Monteith (1998). Cultivo en condiciones estándar.	90
10.3.5 Líneas de tendencia de temperaturas medias mensuales.....	101
10.4 Estimación de escorrentía superficial y subterránea.	102
10.4.1 Escorrentía superficial de Grunsky.....	102
10.4.2 Escorrentía superficial de Peñuelas.	102
10.4.3 Escorrentía superficial de Coutagne.....	103
10.4.4 Escorrentía superficial de Turc.	103
10.4.5 Estimación de Escorrentía Subterránea.....	104
10.5 Estimación de retornos por infiltración de agua de riego.....	106
10.5.1 Cálculo de Demanda de agua neta de los cultivos (Dn).	106
10.5.2 Cálculo de Demanda de agua bruta de los cultivos (Db).....	107
10.6 Análisis de variaciones del nivel estático del acuífero.....	110
10.6.1 Gráficos de niveles de pozos de observación.....	110
10.6.2 Modelo de regresión entre niveles de pozos y precipitaciones.	118
10.7 Estimación de extracción artificial de agua del acuífero.	121
10.7.1 Derechos de aguas otorgados y pendientes	121
10.7.2 Estimación de extracción real de agua.	124
10.8. Estimación del rendimiento sustentable del acuífero.	125
1.8.1 Estimación de recarga hipotética en condiciones naturales.....	127
10.9 Análisis de las incertidumbres de las variables.	128
XI. Conclusiones	131
XII. Discusiones	133

XIII. Bibliografía.....	134
XIV. Anexos	136

Lista de Abreviaciones usadas

- APR:** Agua Potable Rural
- CBR:** Conservador de Bienes Raíces
- COCHILCO:** Corporación Chilena del Cobre
- CODELCO:** Corporación del Cobre
- CORFO:** Corporación de Fomento
- CPA:** Catastro Público de Aguas
- DARH:** Departamento de Administración de Recursos Hídricos (de la DGA).
- DEM:** Digital Elevation Model (Modelo de Elevación Digital)
- DGA:** Dirección General de Aguas
- DMC:** Dirección Meteorológica de Chile
- ETP:** Evapotranspiración Potencial
- ETR:** Evapotranspiración Real
- FDF:** Fundación para el Desarrollo Frutícola
- IGRAC:** International Groundwater Resources Assessment Center (Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas)
- IGM:** Instituto Geográfico Militar
- INIA:** Instituto de Investigaciones Agropecuarias
- SHAC:** Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común
- SIG:** Sistema de Información Geográfica
- SINIA:** Sistema Nacional de Información Ambiental
- SISS:** Superintendencia de Servicios Sanitarios
- PSAD 56:** Provisional South American Datum 1956 (Datum Provisional Sudamericano 1956)
- UTM:** Universal Transverse Mercator (Sistema de Coordenadas Transversal de Mercator.)
- WGS 84:** World Geodetic System 1984 (Sistema Geodésico Mundial 1984)

Lista de Figuras

Figura 1. Recarga de agua subterránea (1961-1990) per cápita al año 2000.	15
Figura 2. Estrés de desarrollo de las aguas subterráneas, 2010.	16
Figura 3. Representación de los elementos del ciclo hidrológico.....	23
Figura 4. Sección transversal de un río efluente (izquierda) e influente (derecha).....	27
Figura 5. Diagrama de un cono de depresión en un acuífero no confinado.....	28
Figura 6. Cartografía del área de estudio.....	42
Figura 7. Comunas del área de estudio.....	43
Figura 8. Diagrama de evapotranspiración del cultivo de referencia.	48
Figura 9. Menú de características geográficas y climáticas en ETo Calculator.	50
Figura 10. Diagrama de evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar.	51
Figura 11. Valores típicos de Kc para diferentes cultivos completamente desarrollados.	52
Figura 12. Rangos típicos esperados del valor de Kc para las cuatro etapas del crecimiento....	52
Figura 13. Diagrama de evapotranspiración del cultivo bajo condiciones NO estándar.	54
Figura 14. Cartografía de topografía.	60
Figura 15. Curvas de nivel.	61
Figura 16. Cartografía de pendientes.....	62
Figura 17. Composición geológica.....	62
Figura 18. Clases de suelo.	63
Figura 19. Textura de suelo.	64
Figura 20. Capacidad de drenaje de suelo.	65
Figura 21. Red hidrográfica.	66
Figura 22. Embalse Huechún (04-10-2005).....	66
Figura 23. Embalse Huechún (23-02-2016).....	67
Figura 24. Acuíferos modelados.....	67
Figura 25. Isohipsas de profundidad del relleno sedimentario.....	68
Figura 26. Importancia hidrogeológica.	69
Figura 27. Productividad de pozos.	70
Figura 28. Cartografía de balance hídrico.	71
Figura 29. Usos de suelo.....	72
Figura 30. Estaciones meteorológicas pluviométricas usadas.	74
Figura 31. Precipitaciones medias de estaciones usadas en los tres métodos.....	74
Figura 32. Raster de precipitación interpolada.....	75
Figura 33. Cartografía de Isoyetas.....	75
Figura 34. Áreas de precipitación media.....	76
Figura 35. Polígonos de Thiessen de estaciones meteorológicas pluviométricas.	76
Figura 36. Polígonos de Thiessen de precipitaciones del área de estudio.....	77
Figura 37. Estaciones meteorológicas termométricas y polígonos de Thiessen.....	84
Figura 38. Polígonos de Thiessen recortados.....	85
Figura 39. Diagrama de obtención de valores de precipitaciones mensuales ajustadas.....	88
Figura 40. Composición de falso color estándar.	90
Figura 41. Composición de NDVI.....	91
Figura 42. Paradas de la visita a terreno.	92
Figura 43. Clasificación supervisada, Raster.	93
Figura 44. Clasificación supervisada, Polígonos.	95

Figura 45. Clasificación supervisada, Polígonos al detalle.	96
Figura 46. Pozos para cálculo de gradiente hidráulico.....	104
Figura 47. Estero Chacabuco al norte de Huertos Familiares.	106
Figura 48. Pozos de observación de nivel estático.....	110
Figura 49. Ubicación de pozos CORFO.	121
Figura 50. Pozos con derechos de agua otorgados por DGA.	122
Figura 51. Derechos de aprovechamiento de agua pendientes en el área de estudio.....	123

Lista de Tablas

Tabla 1. Número de derechos subterráneos distribuidos por regiones.	33
Tabla 2. Caudal otorgado de derechos subterráneos distribuidos por regiones.....	34
Tabla 3. Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la cuenca del río Maipo.	34
Tabla 4. Demanda estimada de agua por sector económico en m ³ /s.	35
Tabla 5. Datos geográficos de la estación meteorológica usada en ETo.	49
Tabla 6. Eficiencia de aplicación de agua según método de riego utilizado.	57
Tabla 7. Cálculo de la precipitación de la cuenca con media aritmética.	77
Tabla 8. Resumen de precipitación media y volúmenes de recarga anuales.	78
Tabla 9. Datos meteorológicos y ETo de estación Huechún.	86
Tabla 10. Cálculo de recarga potencial mensual y anual en mm/m ²	87
Tabla 11. Cálculo de recarga potencial ajustada mensual y anual en mm/m ²	89
Tabla 12. Valores de Kc de uso de suelo encontrados en terreno.....	96
Tabla 13. Valores de ETc de usos de suelo encontrados en terreno (mm/m ²).....	97
Tabla 14. Usos de suelo; área y porcentaje de la cuenca.	97
Tabla 15. Valores de ETc de suelos encontrados, (m ³ /mes), (enero a junio).	98
Tabla 16. Valores de ETc de usos de suelo encontrados, (m ³ /mes), (julio a diciembre).	98
Tabla 17. Resultados finales de ETc, (enero a junio).....	99
Tabla 18. Resultados finales de ETc, (julio a diciembre).	99
Tabla 19. Demanda de agua neta de cultivos (mm/mes).	107
Tabla 20. Eficiencia de riego de métodos presentes en el área de estudio.....	108
Tabla 21. Demanda de agua bruta de cultivos (mm/mes).....	108
Tabla 22. Demanda de agua de riego de cultivos (m ³ /mes).....	109
Tabla 23. Retornos de agua de riego (m ³ /mes).....	109
Tabla 24. Resumen de valores de R ² entre precipitaciones y niveles de pozos.....	120
Tabla 25. Derechos de aprovechamiento de agua otorgados en el área de estudio.	122
Tabla 26. Solicitudes de derechos de agua pendientes.	123
Tabla 27. Resumen de caudales y volúmenes de agua entregados por CORFO y DGA..	123
Tabla 28. Resumen de extracciones antrópicas de agua (m ³ /año).....	125
Tabla 29. Resumen de variables de recarga de acuífero, en millones de m ³ / año y % de las precipitaciones anuales.....	125
Tabla 30. Derechos de agua en porcentajes de las precipitaciones en millones de m ³ /año....	126
Tabla 31. Resumen de diferentes cálculos de recarga del acuífero, en millones de m ³ /año y % de las precipitaciones anuales.	127

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Porcentaje de consumo de agua en Chile.	35
Gráfico 2. Demanda estimada de agua en m ³ /s por región.	36
Gráfico 3. Precipitaciones en estación Fundo Las Bateas (mm/mes).	78
Gráfico 4. Precipitaciones en estación Huechún Embalse (mm/mes).	79
Gráfico 5. Precipitaciones en estación Los Panguiles (mm/mes).	79
Gráfico 6. Precipitaciones en estación Huechún Andina (mm/mes).	79
Gráfico 7. Precipitaciones en estación La Dehesa (mm/mes).	80
Gráfico 8. Precipitaciones en estación Los Andes (mm/mes).	80
Gráfico 9. Precipitaciones en estación Riecillos (mm/mes).	80
Gráfico 10. Precipitaciones en estación Rincón de Los Valles (mm/mes).	81
Gráfico 11. Precipitaciones en estación Rungue Embalse (mm/mes).	81
Gráfico 12. Precipitaciones en estación Tiltil (mm/mes).	81
Gráfico 13. Precipitaciones en estación Vilcuya (mm/mes).	82
Gráfico 14. Precipitaciones versus ETo medios mensuales, estación Huechún.	87
Gráfico 15. Precipitaciones ajustadas versus ETo medios mensuales, estación Huechún.	89
Gráfico 16. ETo y ETc general versus precipitación.	99
Gráfico 17. ETc en condiciones naturales versus precipitación.	100
Gráfico 18. Temperaturas medias mensuales en estación Vilcuya (°C).	101
Gráfico 19. Temperaturas medias mensuales en estación Rungue Embalse (°C).	101
Gráfico 20. Temperaturas medias mensuales en estación Cerro Calán (°C).	101
Gráfico 21. Temperaturas medias mensuales en estación Pudahuel (°C).	102
Gráfico 22. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Hacienda Chacabuco.	111
Gráfico 23. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fundo Los Talaveras.	112
Gráfico 24. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fundo Los Tahuretes.	112
Gráfico 25. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Asentamiento Chacabuco.	113
Gráfico 26. Mediciones de nivel estático en metros, pozo CERA Unión Huechún.	113
Gráfico 27. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Los Guayacanes.	114
Gráfico 28. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Chilectra Polpaico.	114
Gráfico 29. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Parcela 5 Polpaico.	115
Gráfico 30. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Reserva Fundo Polpaico.	115
Gráfico 31. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fundo Santa Ana.	116
Gráfico 32. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Asentamiento Los Maitenes.	116
Gráfico 33. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fabrica Polpaico.	117
Gráfico 34. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fundo Montecarlo, ex Venceremos.	117
Gráfico 35. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Huertos Familiares, Cerro Blanco.	118
Gráfico 36. Modelo de regresión entre niveles estáticos y precipitaciones anuales, pozo Hacienda Chacabuco.	119
Gráfico 37. Modelo de regresión entre niveles estáticos y precipitaciones mensuales, pozo Hacienda Chacabuco.	120

I. Introducción

En el contexto de las funciones de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de la Región Metropolitana (DGA-RM), este estudio nace del requerimiento de la Dirección Nacional de la institución respecto de actualizar la estimación de disponibilidad del recurso de aguas del sector acuífero Chacabuco-Polpaico ante las nuevas solicitudes de derechos provisionales de aprovechamiento de aguas subterráneas. Ello se plantea en un escenario de demanda de los propietarios de derechos definitivos de agua en el mencionado sector acuífero, el cual se ubica en el sector norte de la Región Metropolitana.

El sector acuífero Chacabuco-Polpaico fue declarado como *Área de Restricción*, lo que significa que se encuentra cerrado al otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de agua en carácter de definitivos desde el 1 de junio de 1997 (DGA, 2004). Desde esa fecha, se deja la posibilidad a la DGA-RM, de otorgar derechos de aprovechamiento de aguas con carácter provisional, los cuales pueden pasar a ser derechos definitivos luego de cinco años de ejercicio efectivo, siempre que los titulares de derechos ya constituidos no demuestren haber sufrido daños (art. 67 del Código de Aguas)¹.

Esta situación puede ser contradictoria, porque por una parte, se crea una *Área de Restricción* para mantener el volumen sustentable del acuífero, reconociendo que la cantidad de agua presente en este y su capacidad de recarga sólo son suficientes para asegurar la demanda de extracción de agua de los derechos ya otorgados, agrupados en la "*Comunidad de Aguas*" (art. 65 del Código de Aguas), la cual está compuesta por los propietarios de derechos definitivos de aprovechamiento de agua subterránea hasta 1997 y, por otra parte, se plantea la posibilidad de seguir otorgando derechos de aprovechamiento de agua provisionales, los cuales constituyen una mayor extracción del acuífero, hecho que puede conducir a un balance hídrico negativo.

Por otra parte existe una categoría en la cual ya no se puede entregar ningún tipo de derecho de aguas, la llamada *Zona de Prohibición*, mediante resolución fundada en la protección del acuífero (art. 63 del Código de Aguas).

El riesgo derivado de un balance hídrico negativo continuado en el tiempo es la disminución del nivel freático del acuífero y, por lo tanto, la disminución del nivel del agua de los pozos de extracción de propietarios de derechos definitivos, y del nivel freático de las norias de consumo de subsistencia, que por definición son de menor profundidad que los pozos.

Considerando que frente al continuo descenso del nivel freático del acuífero, la única alternativa es la profundización de los pozos hasta alcanzar nuevamente ese nivel, ello provocaría una situación en la que esta acción se podrá repetir solo hasta que sea viable por la tecnología y los recursos económicos disponibles, o hasta cuando se compruebe que se ha sobrepasado el rendimiento sustentable del acuífero y comiencen a generarse impactos adversos a los diversos rubros económicos presentes o al medioambiente.

¹ "Código de Aguas", República de Chile, 1981.

II. Problemática

La sobreexplotación de los recursos de aguas subterráneas es un grave problema que afecta a los acuíferos de diversos países, generando problemas de abastecimiento de agua para diversos fines y para millones de personas en el mundo.

2.1 Desafíos presentes y futuros en el manejo de aguas subterráneas.

Tres características de acuíferos determinan si los recursos de aguas subterráneas pueden ser sustentables:

- Vulnerabilidad a la contaminación bajo la presión de contaminantes desde la superficie terrestre.
- Susceptibilidad a la degradación irreversible por la explotación excesiva.
- Renovabilidad de reservas de almacenamiento bajo regímenes climáticos actuales y futuros. (Hiscock y Bense: 2014: 25).

En el caso de este estudio, sólo hace referencia a la segunda característica, abordando la tercera sólo con pronósticos basados en líneas de tendencia central de los registros de precipitaciones y temperaturas.

2.2 Disminución del agua subterránea.

Es probable que la cantidad de agua disponible para la agricultura sea afectada por la disminución de los recursos de aguas subterráneas en muchos lugares. Causado por un aumento explosivo en el uso de esta, impulsado por la tecnología de pozos profundos, energía más barata y mercados más rentables, han llevado a una disminución a nivel mundial de las reservas de aguas subterráneas, incluyendo la minería irreversible de acuíferos de aguas fósiles. (Shah, 2009; Llamas y Custodio, 2003; Morris et al., 2003; citado por FAO: 2011: 119)².

Las extracciones a gran escala a nivel mundial de aguas subterráneas por la agricultura, han resultado en la disminución y degradación de algunos de los acuíferos más accesibles y de alta calidad del mundo. Como es el caso del Valle central de California o el acuífero del Ogallala en las grandes llanuras de Estados Unidos. Otros ejemplos son el Acuífero Punjab (India y Pakistán), Llanura del norte de China y la Cuenca Souss en Marruecos, donde los descensos anuales superan los dos metros desde 1980. (Garduno & Foster: 2011; citado por FAO: 2011: 119).

La disminución de las aguas subterráneas también ha contribuido a la subsidencia como el colapso de estructuras de acuíferos, como el Valle Central de California, debido a la extracción continua de agua más profunda para irrigación. En Irán, la extracción intensiva de agua subterránea está contribuyendo al agotamiento de los tradicionales *Qanat* (*manantiales* y *pozos*)

² FAO: The state of the world's land and water resources for food and agriculture, managing systems at risk. pdf

someros), y también ha llevado a la subsidencia de tierras agrícolas debido a la compresión de acuíferos subyacentes a medida que el agua subterránea es retirada. (FAO: 2011: 119-120).

2.3 Cambio climático, aguas subterráneas y cultivos.

A nivel mundial, los sistemas agrícolas están considerados en riesgo por el cambio climático. El cambio climático y la variabilidad afectarán los regímenes hidrológicos y termales, y esto en cambio influye la estructura y funcionalidad de los ecosistemas y medios de subsistencia humanos. (FAO: 2011: 120)

Los cambios esperados en el promedio y variabilidad de las temperaturas y precipitaciones, elevado CO₂, más interacciones complejas entre estos, tendrán impactos en la tierra y los recursos hídricos, afectando la productividad de los cultivos y del sector agrícola en las décadas venideras (Tubiello y Van Der Velde, 2010; citado por FAO: 2011: 120-121).

Estos impactos variarán por regiones en el tiempo. Se espera que en el 2050, el calentamiento moderado podría beneficiar los campos de cultivos y pastoreo en regiones templadas, mientras se disminuirán cultivos en regiones semiáridas y tropicales. El calentamiento global así tiene el potencial de mejorar la producción de alimentos en algunas partes del mundo (ej. Canadá, Rusia), y limitarla en otras (ej. Sudáfrica). También se esperan cambios en los regímenes de precipitación. Los cambios asociados en evapotranspiración a razones de precipitación, modificarán la productividad y funcionamiento de los ecosistemas, particularmente en áreas marginales. (FAO: 2010; citado por FAO: 2011: 121).

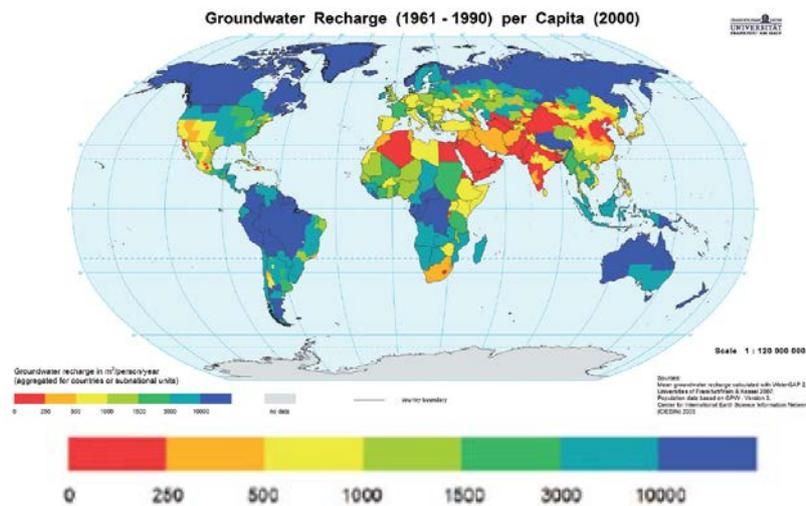
Es probable que se sea incrementada la frecuencia de eventos extremos, tales como olas de calor, tormentas de granizo, frío excesivo, precipitaciones fuertes y prolongadas, y sequías con impactos negativos en campos de cultivos. El cambio climático necesitará ser tomado en cuenta en todas las consideraciones de las estrategias de manejo de agua y tierra del futuro. (FAO: 2010; citado por FAO: 2011: 121).

Las proyecciones indican un incremento en el porcentaje de tierra actualmente cultivada, cayendo a condiciones áridas y semiáridas en África. Para el 2080, las áreas áridas y semiáridas en África podrían incrementarse en un 5 a 8 por ciento. Las áreas más áridas podrían llegar a ser menos productivas, o salir de la producción completamente. (FAO: 2011:121).

La figura 1 muestra la recarga de agua subterránea per cápita al año 2000, donde es posible observar las grandes diferencias a nivel mundial, ya sea por factores de precipitaciones y/o de población de las diversas zonas del mundo, donde resalta a la vista la situación de gravedad por muy baja tasa de recarga de aguas subterráneas per cápita, preferentemente en las zonas del norte de África, Medio Oriente, India y China.

Sin duda en el norte de África y Medio Oriente la razón sean las bajas precipitaciones al tratarse de zonas desérticas, pero en el caso de India y China, la razón puede hallarse en una combinación de bajas precipitaciones y muy elevada población, tal vez siendo este último el factor determinante de sus bajas tasas de recarga per cápita.

Figura 1. Recarga de agua subterránea (1961-1990) per cápita al año 2000.



Recarga de agua subterránea en m³/persona/año (agregado para países o unidades subnacionales)

Fuente: Döll y Fiedler (2008), citado por Hiscock y Bense (2014: 533)

En cuanto a Chile, se muestra en el color correspondiente entre los 3000 y 10000 m³/persona/año, pero sin hacer ninguna distinción entre las grandes diferencias de precipitaciones entre el norte y el sur del país.

2.4 Uso de aguas subterráneas en el mundo.

El agua subterránea es un importante recurso natural. A nivel mundial, más de 2 billones de personas dependen del agua subterránea para su consumo diario (Kemper: 2004, citado por Hiscock y Bense: 2014)

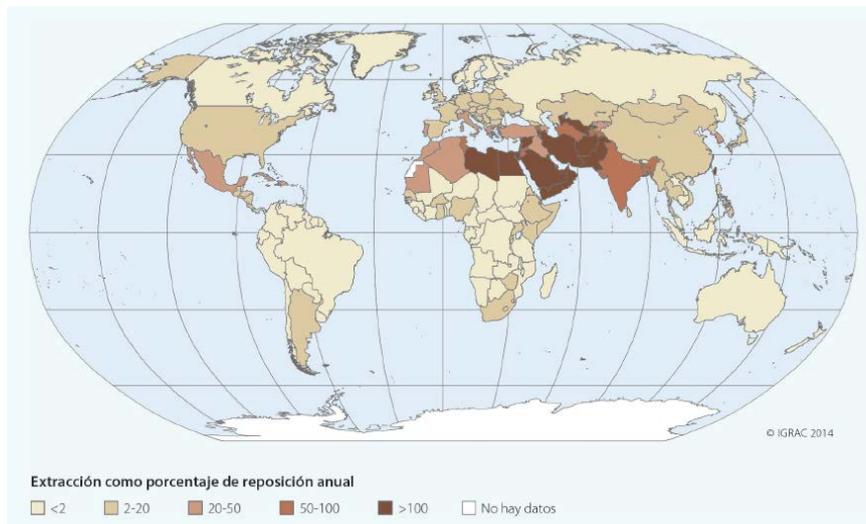
El agua subterránea constituye la mayor fuente de agua dulce accesible del mundo, aunque su cantidad es superada enormemente por la de los glaciares, esas masas de agua muchas veces se encuentra fuera del alcance de uso para los seres humanos.

El 99 % de las extracciones de aguas subterráneas provienen de fuentes renovables y solo el 1 % proviene de fuentes no renovables (aguas fósiles) principalmente en 3 países: Argelia, Libia y Arabia Saudita (Banco Mundial: 2007, citado por Hiscock y Bense: 2014), con fuerte estrés hídrico en los países del medio oriente y el norte de África, (IGRAC: 2014)³, (ver figura 2).

Usando un modelo hidrológico mundial, Wada et al. (2010) calcularon la cantidad de disminución de agua subterránea; definida como el exceso de extracción por sobre el reabastecimiento, y estimaron que para la áreas sub-húmedas y áridas, la tasa de disminución de agua subterránea mundial ha aumentado desde 126 ± 32 km³ al año en 1960 a 283 ± 40 km³ al año en 2000. (Wada et al. 2010, citado por Hiscock y Bense: 2014).

³ IGRAC: International Groundwater Resources Assessment Center.

Figura 2. Estrés de desarrollo de las aguas subterráneas, 2010.



Fuente: IGRAC, *International Groundwater Resources Assessment Center “Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas”*: 2014.

En las regiones del mundo donde la tasa de extracción de agua subterránea excede la tasa de recarga natural sobre áreas extensas y durante largos períodos de tiempo, la sobreexplotación o la disminución persistente de las aguas subterráneas es la consecuencia (Wada et al. 2000).

Las tasas de disminución más altas de aguas subterráneas fueron encontradas en algunas regiones agrícolas más importantes del mundo, incluyendo: noreste de Pakistán y noreste de India, noreste de China, el Acuífero de Ogallala en el centro de Estados Unidos, el Acuífero de San Joaquín en el Valle Central de California, Irán, Yemen y el sureste de España. (Wada et al. 2010, citado por Hiscock y Bense: 2014).

2.5 Uso de aguas subterráneas en países desarrollados.

De acuerdo a un informe encargado por la Comisión Europea, cerca del 75 % de los habitantes de Europa occidental dependen del agua subterránea para su consumo de agua potable (Rivm y Riza 1991, citado por Hiscock y Bense: 2014). Con porcentajes de uso de agua subterránea muy variables entre los diferentes países del continente. Presentando el porcentaje de uso más alto Dinamarca con un 99,9 % seguido por Bélgica con 66 % y Austria con un 56 %.

En el lado opuesto, el país con un menor porcentaje de uso de aguas subterráneas es Finlandia con un 10 % de uso, seguido por Irlanda con un 12 % y Holanda con un 13 %. (Servicio de datos de la Agencia del Medioambiente Europea, citado por Hiscock y Bense: 2014).

Un escenario similar se presenta en Norteamérica. En Canadá, casi 8 millones de personas confían en el agua subterránea para uso doméstico. 5 millones de esos usuarios viven en áreas rurales donde el agua subterránea es una fuente confiable y barata que puede ser extraída cerca del punto de uso y el resto de los usuarios se encuentran principalmente en municipios pequeños (Hiscock y Bense: 2014).

2.5.1 El caso de Dinamarca.

Según el Foro Danés del Agua, el porcentaje de agua subterránea extraída para todos los usos del país corresponde al 100 % en el 2013. Con un volumen de extracción de aguas subterráneas entre 600 y 700 millones de m³ al año. Contando con 2.500 plantas de extracción de agua subterránea y aproximadamente 75.000 pozos privados, de los cuales el uso de agua potable represente 2/3 del agua extraída. (Foro Danés del Agua: 2013).

Llama la atención que mientras en la mayoría de los casos mundiales, el consumo de agua potable ha aumentado, en Dinamarca esta situación es contraria, mostrando una disminución del consumo en un 30 % desde finales de 1980s hasta el 2012, desde 101 a 70 m³ per cápita anual. Y en su capital, Copenhague, se espera que el consumo descienda desde 105 litros al día per cápita en el 2012 a 100 litros en 2017. (Foro Danés del Agua: 2013).

La estructura de servicios de agua subterránea en Dinamarca es manejada por el Ministerio del Medioambiente, y su Agencia de la Naturaleza es responsable de la planeación completa, mapeo y monitoreo, como de la legislación de aguas subterráneas. (Foro Danés del Agua: 2013).

Existe un muestreo periódico de parámetros físicos, químicos y biológicos de la totalidad de los pozos de extracción de agua potable, debido a que más del 62 % del área total de tierra está dedicada a usos agrícolas, el Gobierno de Dinamarca ha determinado que el área total del país es vulnerable a contaminación de nitratos. (Ministerio Danés del Medioambiente: 2007)⁴

La recarga de acuíferos y la concentración de habitantes son desiguales, por lo tanto esto crea también una desigual sustentabilidad de las aguas subterráneas, siendo la zona oriente del país la que recibe en promedio la menor cantidad de lluvia anual, y además concentrando la mayor cantidad de habitantes (Isla donde se ubica la capital Copenhague), Lo que genera una extracción insostenible. Caso opuesto de la zona occidental del país, con mayor recarga de acuíferos y menor densidad poblacional. (Foro Danés del Agua: 2013)

2.6 Uso de aguas subterráneas en países en desarrollo.

En la mayoría de los países, la financiación de las infraestructuras hídricas procede de sus propios gobiernos, aunque muchos países en vías de desarrollo dependen todavía de las ayudas externas para financiar la gestión de los recursos hídricos y los servicios públicos (ONU: 2015).

Más de la mitad de los países con un índice de desarrollo humano bajo han informado que la financiación destinada al desarrollo y la gestión de los recursos hídricos procedente de los presupuestos de los gobiernos y de la ayuda oficial al desarrollo que ha ido en aumento durante los últimos 20 años (ONU: 2015). Sin embargo los desafíos como las crisis económicas, la escasez de alimentos y el cambio climático amenazan con socavar el progreso económico y social de los últimos años. (ONU-Agua: 2012).

⁴ *Groundwater monitoring in Denmark*, 2007. pdf

2.6.1 Dimensiones del desarrollo sostenible en países en desarrollo.

Pobreza: Cerca de 1.200 millones de personas viven en áreas donde el agua escasea físicamente (ONU-Agua y FAO, 2007, citado por ONU: 2015). Esto está relacionado de una u otra forma con la pobreza. Erradicar la pobreza extrema y el hambre ha sido la prioridad número uno en los Objetivos de Desarrollo del Milenio. Se han hecho grandes avances en muchos países (como Brasil, China e India) para reducir la pobreza. Sin embargo, en 2012, 1.200 millones de personas vivían aún en la pobreza extrema (Lockhart y Vincent, 2013, citado por ONU: 2015: 3).

Desarrollo económico: Las inversiones en infraestructuras hídricas son fundamentales para liberar todo el potencial de crecimiento económico en las etapas iniciales del desarrollo económico de un país. Una vez que los beneficios marginales del desarrollo posterior decrecen, el énfasis debe desplazarse paulatinamente hacia la construcción de capacidades humanas e institucionales para mejorar la eficiencia hídrica y la sostenibilidad, y garantizar los beneficios del desarrollo económico y social. (ONU: 2015: 3)

Ecosistemas: Los ecosistemas saludables proporcionan unos servicios hídricos que poseen un valor enorme para la sociedad, gracias al control de inundaciones, el reabastecimiento de las aguas del subsuelo, la estabilización de las orillas de los ríos y la protección contra la erosión, la purificación del agua, la conservación de la biodiversidad, así como el transporte, el entretenimiento y el turismo (MEA: 2005, citado por ONU: 2015: 4).

2.6.2 Agua, agricultura y alimentación en países en desarrollo.

- El sector agrícola representa aproximadamente el 70% de todas las extracciones de agua dulce a nivel mundial, y más del 90% en la mayoría de los países menos desarrollados del mundo (WWAP: 2014; citado por ONU-Agua:2015) y en 2050, se espera que la agricultura tenga que producir un 60% más de alimentos a nivel mundial, y un 100% más en los países en desarrollo (Alexandratos y Bruinsma: 2012; citado por ONU-Agua: 2015: 6).
- Las tasas de crecimiento actuales de la demanda agrícola de recursos de agua dulce son insostenibles ya que el uso ineficiente del agua para la producción de cultivos agota los acuíferos, reduce el caudal de los ríos, degrada los hábitats de la vida silvestre y ha provocado la salinización del 20 % de la superficie mundial de tierras de regadío (FAO, 2011; citado por ONU-Agua: 2015: 6).
- En la mayoría de los casos, el aumento de la productividad del agua (es decir, producir más cosechas o valor por volumen de agua empleado) es la vía más importante para la gestión de la demanda de agua en la agricultura. Esto es posible gracias a la combinación de un mejor control del agua, una mejor ordenación de tierras y mejores prácticas agrícolas. (ONU-Agua: 2015: 6).
- Las inversiones en infraestructuras hidráulicas por sí solas no son suficientes para mejorar la productividad agrícola. Los agricultores necesitan tener acceso a insumos como abonos y semillas, acceso al crédito y a una mejor educación e información acerca del uso de los insumos y de las técnicas más modernas. (ONU-Agua: 2015: 6).

2.7 Problemáticas de agua en Chile.

En el caso de Chile, la zona norte y centro norte de nuestro país también presenta problemas de escasez de agua, lo cual es producto de una continua disminución de precipitaciones, disminución de caudales de ríos y la consiguiente disminución de los niveles freáticos de los acuíferos. A ello se agrega el hecho que esta situación se tornaría cada vez más crítica ante los escenarios de cambio climático, dado que napas y ríos son la principal fuente de abastecimiento de agua potable y de riego⁵, particularmente desde la Región Metropolitana hasta el extremo norte del país.

En Chile, la extracción de aguas subterráneas es regulada legalmente por el Código de Aguas de 1981, el cual entrega a la DGA, organismo dependiente del Ministerio de Obras Públicas, la tarea de la administración de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

Dentro de la DGA, existe el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH), el cual tiene por función, entre otros, autorizar o denegar el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de agua, siempre y cuando la disponibilidad de los correspondientes sectores acuíferos donde recaen estas solicitudes de nuevos derechos de extracción, sea suficiente para mantener un volumen sustentable en el tiempo.

El volumen sustentable en el tiempo ha sido fijado a través de cálculos de volumen de disponibilidad total de agua y los niveles de extracción otorgados a derechos de tipo consuntivo. Sin embargo, la evidencia reciente muestra que tales volúmenes sustentables podrían no ser correctos, al observarse una crisis hídrica en la zona de estudio, en parte por variaciones en la recarga natural y en las extracciones actuales de agua de los diversos rubros económicos presentes, en especial de la agricultura.

La evidencia de actual escasez hídrica en el área de estudio queda reflejada en el agotamiento de los cauces superficiales, llegando incluso a mantenerse totalmente secos durante gran parte del año, sumado esto a las probables demandas de los habitantes y agricultores de la zona, debido a la escasez del recurso.

Se propone comparar la recarga efectiva de agua del sistema con las extracciones antrópicas, en la búsqueda de estimación del rendimiento sustentable del acuífero, para evitar efectos adversos en el sistema humano-natural dependiente e interrelacionado con el acuífero en cuestión.

⁵ Considerando también la desalinización de agua de mar para la generación de agua potable, especialmente en ciudades costeras del norte de nuestro país, y además tomando en cuenta los proyectos de usar agua desalinizada para riego de agricultura.

III. Fundamentos de Hidrología e Hidrogeología.

Primero se puede definir el concepto de **Hidrología** como la ciencia encargada del estudio de las aguas continentales, su ocurrencia, distribución temporal y espacial, movimiento y calidad química. Basado en esto, es posible definir la **Hidrogeología** como el estudio de las interrelaciones de los materiales y procesos geológicos con el agua subterránea, siendo una ciencia tanto descriptiva como analítica, que considera importantes tanto el desarrollo como el manejo de recursos de agua. (Fetter, C W: 2001)

La geografía, geología superficial, topografía de la cuenca de drenaje y la vegetación, influyen en la relación entre la precipitación sobre la cuenca y el drenaje de agua desde esta.

La creación y distribución de precipitaciones (recarga natural) es fuertemente influenciada por la presencia de cordilleras y otras formas topográficas. (Fetter, C W: 2001)

Las unidades básicas de la Hidrología Superficial son las **cuencas hidrográficas** o cuencas de drenaje, las cuales consisten de toda el área de tierra inclinada hacia un mismo punto de descarga particular.

A su vez, en Hidrología de aguas subterráneas o Hidrogeología, es utilizado el concepto de **Cuenca Hidrogeológica**, la cual es el volumen subsuperficial a través del cual el agua subterránea fluye hacia una zona de descarga específica.

Los límites de las cuencas hidrológicas superficiales no necesariamente coinciden con los límites de las cuencas hidrológicas subterráneas, aunque el balance hídrico debería contar tanto para el agua superficial como para la subterránea. (Fetter, C W: 2001)

3.1 Ecuaciones de balance hídrico.

La **ecuación de Balance Hídrico** o **Ecuación Hidrológica** provee un significado cuantitativo de evaluación del ciclo hidrológico, esta ecuación fundamental es una afirmación simple de la **Ley de conservación de masa**, (Fetter, C W: 2001) y puede expresarse de la siguiente manera:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{cambios en el almacenamiento.}$$

Siendo las entradas de agua (**Recargas potenciales**):

- Precipitación
- Entrada de agua superficial en el área (aguas corrientes y detenidas)
- Aportes de agua subterráneas desde otros acuíferos vecinos
- Aportes de derretimiento de glaciares y nieves
- Importación artificial de agua a través de tuberías y canales

Siendo las salidas de agua (**descargas**):

- Evapotranspiración desde superficies terrestres
- Evaporación desde superficies de agua
- Escorrentía de aguas superficiales
- Descargas de aguas subterráneas a los ríos
- Extracción y exportación artificial de aguas a través de tuberías y canales

Los cambios en el almacenamiento son necesarios para equilibrar la ecuación hidrológica. Siendo estos, **cambios de volumen de:**

- Aguas superficiales de ríos, lagos y humedales
- Humedad del suelo
- Hielo y nieve en la superficie
- Agua interceptada en superficies vegetadas
- Agua subterránea bajo el nivel freático (Fetter, C W: 2001)

La diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración (**precipitación efectiva**), mantiene la escorrentía superficial y la recarga subterránea de las napas.

La recarga de aguas subterráneas soporta al componente de descarga de aguas subterráneas; que incluye descarga natural a manantiales y ríos (**Flujo o caudal base de río**) y **extracciones artificiales**.

Asumiendo que la cuenca de captación superficial y la subterránea coinciden, se muestra la siguiente ecuación de balance hídrico de cuenca de captación (Hiscock y Bense: 2014).

$$\text{Ecuación A: } P = E + SR + GR \pm \Delta S$$

Donde:

P = Precipitación

E = Evapotranspiración

SR = Escorrentía superficial

GR = Descarga de aguas subterráneas

ΔS = cambios en el agua del suelo y almacenamiento subterráneo

En un corto periodo de tiempo desde semanas a meses, esta ecuación es balanceada por cambios en el agua contenida en el suelo (cambio de humedad) y el almacenamiento de agua subterránea (cambios en el nivel freático), (ΔS) (Hiscock y Bense: 2014).

En escalas temporales de varios años, los cambios el equilibrio de almacenamiento distintos de Cero, se expresan así:

$$\text{Ecuación B: } GR = Q_G + Q_A$$

Donde:

GR = Descarga de aguas subterráneas

Q_G = Descarga de aguas subterráneas a manantiales y ríos (Flujo o caudal base de río)

Q_A = Extracciones de agua subterránea

Tomando en cuenta la ecuación B, la ecuación A llega a ser:

$$\text{Ecuación C: } P - E = SR + Q_G + Q_A$$

En otras palabras, la diferencia entre precipitación y evapotranspiración, o precipitación efectiva, soporta la escorrentía superficial, la descarga de aguas subterráneas como caudal base de río y las extracciones de pozos. El caudal total en un río es calculado como la suma de SR (escorrentía superficial) y Q_G (Descarga de aguas subterráneas a manantiales y ríos: Caudal base de río), (Hiscock y Bense: 2014)

Si la ecuación C está equilibrada, cualquier aumento en la cantidad de extracción de agua subterránea (Q_A) será a expensas del caudal base del río (Q_G) y así potencialmente causando impactos en el medioambiente. Como una regla general, una medida ejemplo de la cantidad de agua requerida para mantener los caudales mínimos aceptables, es la estadística de caudal bajo el Q95, esto significa que durante el periodo de recesión del caudal base, cuando el caudal del río es dominado por las recargas de aguas subterráneas (Q_G), se debería esperar que el caudal del río no caiga bajo el promedio de caudal a largo plazo, que es igualado o excedido el 95 % del tiempo. (Hiscock y Bense: 2014)

Para un desarrollo de agua subterránea sostenible, y para reunir las demandas en conflictos medioambientales (Q_G) y socio-económicas (Q_A), es altamente deseable que esas demandas no excedan la tasa de recarga de agua subterránea (equiparada a GR). Tres condiciones pueden ser definidas, en las cuales:

- a) $Q_A < GR - Q_G$, los recursos de aguas subterráneas extra son disponibles para la explotación.
- b) $Q_A = GR - Q_G$, en cual caso el rendimiento seguro ha sido logrado.
- c) $Q_A > GR - Q_G$, cuando los recursos de agua subterráneas son sobre-explotados.

En el caso de (c), el agua subterránea en respaldo de las extracciones es tomada desde el almacenamiento del acuífero con potenciales impactos a largo plazo en los niveles de aguas subterráneas. (Hiscock y Bense: 2014).

3.2 Estimación de recarga de acuífero

Healy 2010, utiliza la siguiente ecuación para mostrar el balance hídrico de un acuífero. Al igual que Hiscock y Bense 2014, muestra la precipitación como entrada de agua al sistema, siendo esa misma cantidad de agua, la que luego saldrá desde el sistema como evapotranspiración y escorrentía superficial, quedando una última cantidad de agua para percolar hasta el nivel freático y convertirse en Recarga o **Drenaje** (Recarga efectiva del acuífero).

$$P = ET + \Delta S + R + D$$

Donde:

P: Precipitación

ET: Evapotranspiración

ΔS : Diferencia de almacenamiento

R: escorrentía

D: Drenaje (recarga del acuífero)

El cálculo del drenaje es esencial para determinar el volumen de extracción sustentable de agua desde el acuífero, utilizándose para esto la siguiente ecuación.

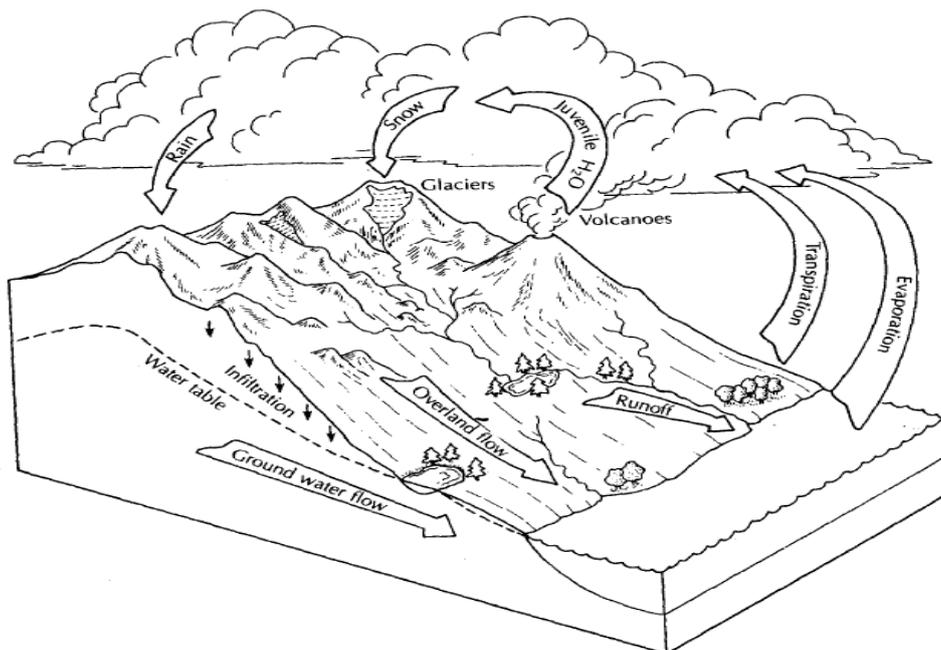
$$D = P - ET - R - \Delta S$$

El drenaje es la cantidad de agua que entra al acuífero en un tiempo dado, y eleva el nivel freático, aumentando el volumen de agua del acuífero. Dependiendo de esa cantidad de entrada de agua, está el concepto de **Rendimiento sustentable del acuífero**, el cual se define como: la tasa en la cual el agua puede ser retirada desde un acuífero sin causar **impactos adversos**. (Healy: 2010)

Definiendo esos **impactos adversos** como descarga disminuida a las corrientes de agua o humedales, subsidencia del suelo, contaminación inducida al agua subterránea (intrusión salina). Para no provocar impactos adversos en el acuífero, la extracción antrópica de aguas subterráneas no debería exceder el drenaje (recarga del acuífero), (Healy: 2010)

3.3 Elementos del ciclo hidrológico.

Figura 3. Representación de los elementos del ciclo hidrológico.



Fuente: Fetter, C W: 2001; *Applied Hydrogeology*.

3.3.1 Evaporación

Las moléculas de agua están continuamente siendo intercambiadas entre el agua líquida y el vapor de agua atmosférica. Si el número que pasa al estado de vapor excede al número que se une al líquido, el resultado es evaporación.

Este proceso consume 590 calorías desde la superficie evaporativa por cada gramo de agua evaporada, y continúa hasta que el aire llega a estar saturado con humedad. (Fetter, C W: 2001)

3.3.2 Transpiración

La evaporación de agua libre es sólo una parte del mecanismo para transferir masas de agua a la atmósfera, siendo el otro proceso la transpiración. El cual es generado por el continuo bombeo de agua desde el suelo a la atmósfera. Siendo la humedad del suelo o del mismo nivel de agua saturado (nivel freático), captada por las raíces, movida a través de la planta hacia las hojas, y por procesos biológicos vegetales el agua es transformada en vapor y sale a través de aperturas en la superficie de las hojas, conocidas como estomas. (Fetter, C W: 2001)

La cantidad transpiración es una función de la densidad y tamaño de la vegetación, mientras más densa y de mayor altura sea la vegetación, mayor será la capacidad de transpiración.

3.3.3 Evapotranspiración

Bajo condiciones de campo no es posible separar totalmente la evaporación de la transpiración. En cambio, es más fácil hablar de evapotranspiración; como la pérdida total de agua producida tanto por evaporación como por transpiración.

El término de **Evapotranspiración Potencial** fue introducido por Thornthwaite (1944), siendo esta: *“La pérdida de agua que ocurre si en algún tiempo hay una deficiencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación”*. Siendo esta, el límite superior a la cantidad de agua que un ecosistema perderá por evapotranspiración. Concentrándose principalmente en los meses de verano. (Fetter, C W: 2001)

En cambio; el término **Evapotranspiración Real**, se usa para describir la cantidad de evapotranspiración que ocurre bajo condiciones de campo. Bajo estas condiciones, la evapotranspiración real es menor que la potencial, especialmente si la capacidad de almacenamiento de agua del suelo es limitada.

El **método de Thornthwaite (1944)**, está basado en la suposición que la evapotranspiración potencial era dependiente sólo de las condiciones meteorológicas e ignoró el efecto de la densidad y madurez de la vegetación, aunque esta suposición es incorrecta, el método de Thornthwaite para calcular la evapotranspiración potencial todavía resulta útil. (Fetter, C W: 2001)

El **método de Penman (1948)**, combina el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método conocido como combinado, fue desarrollado posteriormente por

muchos investigadores y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia. (Allen et al: 2006: 18-19)⁶

El **método FAO Penman-Monteith (1998)**, calcula la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ETo), como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0,23 y que representa la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. (Allen et al: 2006: 24-25)⁷

La evapotranspiración de referencia (ETo) provee un estándar de comparación mediante el cual:

- se puede comparar la evapotranspiración en diversos periodos del año o en otras regiones;
- se puede relacionar la evapotranspiración de otros cultivos.

3.3.4 Precipitación

La precipitación es el resultado de la condensación atmosférica de vapor de agua, y cae por efecto de la gravedad, en estado líquido (lluvia, llovizna) o sólido (nieve, granizo).

También se refiere a la cantidad de partículas de agua que han alcanzado la superficie de la Tierra en un lugar dado en un periodo de tiempo dado. Esta cantidad es generalmente medida en unidades lineares de agua líquida (ej. milímetros o pulgadas) con la suposición que es por unidad de área. (Oliver: 2005: 574)⁸

Su formación depende de varias condiciones meteorológicas que deben reunirse:

- Una masa de aire húmedo debe ser enfriada hasta la **temperatura del punto de rocío**.
- Presencia de núcleos de condensación o congelamiento.
- Pequeñas gotas de lluvia deben coalescer.
- Las gotas de lluvia deben ser del tamaño suficiente cuando dejan las nubes para asegurar que no se evaporaran totalmente antes de alcanzar el suelo. (Fetter, C W: 2001)

Precipitación orográfica: el ascenso forzado de aire húmedo por barreras topográficas concentra la precipitación en las laderas de barlovento pero crea una sombra pluviométrica a sotavento, a causa del movimiento descendente y por tanto el calentamiento del aire ya deshumedecido. Aparte de las regiones tropicales, los lugares más lluviosos de la Tierra están a barlovento de las montañas expuestas a vientos con largo alcance a través de superficies de océanos cálidos. Las montañas por lo tanto tienden a contribuir a la desigualdad en la distribución de la precipitación. (Oliver: 2005: 579)

Estacionalidad de precipitaciones: las variaciones en la distribución espacial de la precipitación anual y los totales acumulados sobre un año dado son importantes climáticamente, pero la precipitación total anual es una medición insuficiente de la disponibilidad de humedad porque

^{6,7} Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

⁸ Oliver. (2005) Encyclopedia of world climatology.

esto no toma en cuenta cuanta precipitación es distribuida sobre el tiempo, con variaciones mes a mes en frecuencia e intensidad. (Oliver: 2005: 579)

3.3.5 Infiltración

La infiltración es un flujo de agua que penetra en algún material poroso a través de la superficie del suelo (Glosario Hidrológico de la UNESCO: 2016). Una vez que la precipitación en forma de lluvia alcanza la superficie del suelo, esta puede infiltrarse en un suelo permeable, el cual tiene una capacidad finita y variable de absorber agua (**Capacidad de infiltración**), que varía no sólo de suelo a suelo, sino también desde condiciones secas y húmedas del mismo suelo. Siendo una capacidad de infiltración alta para los suelos inicialmente secos. (Fetter, C W: 2001)

Los efectos superficiales entre las partículas del suelo y el agua ejercen una tensión que atrae la humedad hacia abajo a través de los pasajes capilares laberínticos. Como las fuerzas capilares disminuyen cuando aumenta la cantidad de humedad en el suelo, la capacidad de infiltración disminuye. Además las partículas coloidales en el suelo aumentan como aumenta también el contenido de humedad. Eventualmente, la capacidad de infiltración alcanza aproximadamente una constante, o valor de equilibrio. (Fetter, C W: 2001)

Si la tasa de precipitación es más baja que la capacidad de infiltración de equilibrio, entonces toda la precipitación que alcance la superficie del suelo se infiltrará. Si la tasa de precipitación es mayor que la capacidad de infiltración de equilibrio pero menos que la capacidad de infiltración inicial, en el principio toda la precipitación se infiltrará, pero cuando la tasa de infiltración desciende bajo la tasa de precipitación, una parte de la precipitación permanecerá en la superficie del suelo. Finalmente, si la tasa de precipitación es más grande que la capacidad de infiltración inicial, una porción de agua permanecerá inmediatamente en la superficie del suelo. (Fetter, C W: 2001)

Las condiciones que favorecen una alta tasa de infiltración incluyen suelos de materiales gruesos, tierra bien vegetada, baja humedad del suelo y una capa del suelo superficial llena de poros hechos por insectos y otros animales excavadores, además de prácticas de uso del suelo que eviten la compactación del mismo. Una vez que la tasa de infiltración final es alcanzada, la profundidad del agua estancada también promueve alta infiltración. El agua que alcanza la superficie puede infiltrarse en el suelo, formar charcos o fluir como una delgada lámina de agua a través de la superficie de la tierra.

El agua atrapada en charcos es llamada (**almacenamiento de depresión**). Está en última instancia o se evapora o se infiltra. (Fetter, C W: 2001)

3.3.6 Escorrentía

La escorrentía es el flujo de agua en la superficie del suelo, ya sea de manera laminar o concentrada en forma de cauces. La escorrentía puede tener origen en exceso de precipitación por sobre la tasa de infiltración del suelo, ser respuesta al flujo base de los acuíferos (descarga de agua subterránea que alimenta un río), o ambas. (Fetter, C W: 2001)

Como respuesta a las precipitaciones; cuando la tasa precipitación excede la capacidad de infiltración. En áreas donde los suelos tienen una alta capacidad de infiltración, este proceso sólo ocurre durante tormentas intensas o cuando el suelo está saturado o congelado. Para que ocurra flujo superficial, la capacidad de infiltración del suelo debe ser excedida, entonces el almacenamiento de depresión debe ser llenado. (Fetter, C W: 2001)

Si la zona no saturada es uniformemente permeable, la mayoría del agua infiltrada percola más o menos verticalmente, hasta llegar al nivel freático, pudiendo salir de la zona saturada en forma de flujo base hacia las corrientes superficiales. (Fetter, C W: 2001)

En caso que el nivel freático del acuífero está por debajo del lecho del río, sólo podría presentarse escorrentía subterránea, pudiéndose estimarse el caudal de agua a través de la Ley de Darcy ($Q = K * i * A$)⁹.

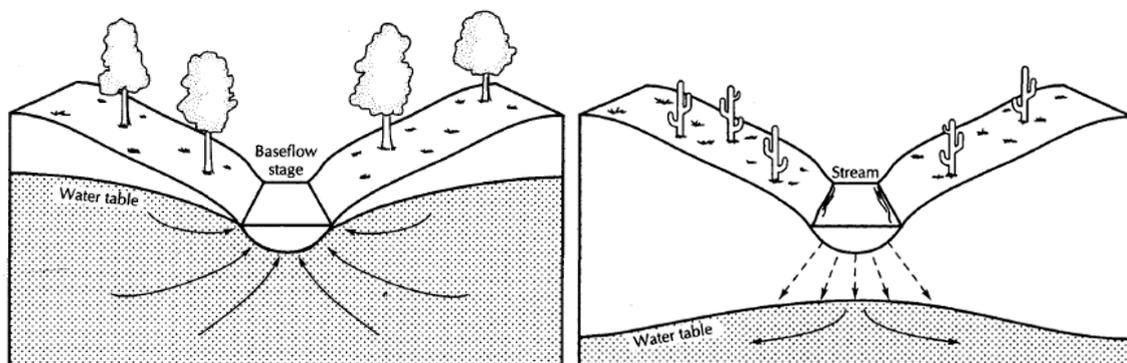
3.3.6.1 Ríos ganadores y ríos perdedores.

Los ríos típicos de las regiones húmedas reciben descarga de aguas subterráneas desde los acuíferos, por lo tanto, aguas arriba el flujo base aumenta incluso sin recibir ríos tributarios. Estos ríos son llamados **Ríos Ganadores** o **Efluentes**. El nivel freático desciende hacia el río, así el gradiente hidráulico del acuífero se inclina hacia el río (*Figura 4, izquierda*). (Fetter, C W: 2001)

En las regiones áridas, muchos ríos son alimentados por el escurrimiento superficial, flujo interior (Interflow), y flujo base en las mayores altitudes, luego descienden en altitud y con esto, las cantidades de precipitaciones también disminuyen, en consecuencia, hay menos infiltración y nivel freático más bajo. (Fetter, C W: 2001)

Si el lecho del río es más alto que el nivel freático local, el agua podría drenar desde el río hacia el sustrato y a medida que el río avanza, contará con cada vez menos cantidad de agua. Esto se conoce como **Ríos Perdedores** o **Influentes** (*Figura 4, derecha*). La tasa de pérdida de agua está en función de la profundidad del nivel freático y de la conductividad hidráulica del relleno subyacente al río. (Fetter, C W: 2001)

Figura 4. Sección transversal de un río efluente (izquierda) e influente (derecha).



Fuente: Fetter, C W: 2001; *Applied Hydrogeology*.

⁹ Ver detalles del cálculo de la Ley de Darcy, en el capítulo 10.3.3 (Estimación de Escorrentía Subterránea).

3.4 Explotación de pozos

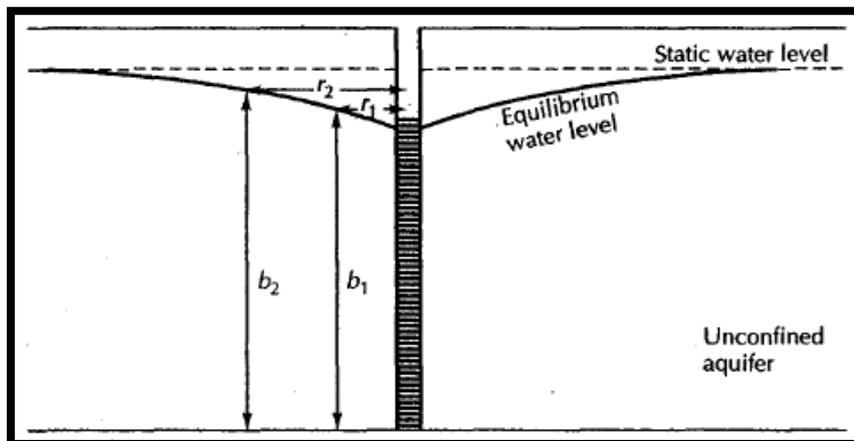
Los pozos son uno de los más importantes aspectos de la hidrogeología aplicada. Los pozos de agua son usados para la extracción de agua subterránea, que cubre en parte las necesidades domésticas, municipales, industriales y agrícolas. Los pozos también han sido usados para controlar la intrusión de agua salina, remover agua contaminada desde un acuífero, descender el nivel freático para proyectos de construcción, disminuir presiones bajo las represas y drenar tierras de cultivo. (Fetter, C W: 2001: 150)

Los pozos también funcionan para inyectar fluidos en el subsuelo y para realizar recargas artificiales de acuíferos a tasas mayores que las naturales.

Al realizar una extracción de aguas subterráneas desde un pozo, se formará un cono de bombeo o **cono de depresión**, a medida que el nivel del agua desciende. (Fetter, C W: 2001: 150)

La figura 5 a continuación muestra un diagrama simple de un cono de depresión formado por la extracción de aguas subterráneas, provocando una disminución del nivel freático en torno al pozo de explotación: r_1 y r_2 muestran distancias radiales desde la sección circular hasta el pozo, mientras que b_1 y b_2 muestran el espesor saturado del acuífero para r_1 y r_2 . (Fetter, C W: 2001)

Figura 5. Diagrama de un cono de depresión en un acuífero no confinado.



Fuente: Fetter, C W: 2001; *Applied Hydrogeology*.

Es común el uso de los términos **Pozos de Explotación** y **Pozos de Observación**; siendo los primeros, los pozos cuyo propósito de construcción y uso es la extracción de aguas subterráneas, mientras que los pozos de observación son pozos cuyo propósito de construcción o uso es el registro del nivel freático en una frecuencia temporal según las necesidades de estudio del acuífero, pudiendo ser una frecuencia diaria, semanal, mensual, bimensual (el caso de la DGA en Chile), o anual.

En la práctica en nuestro país, se constató por información entregada por el Departamento de Hidrología de la DGA de la RM, que es baja la cantidad de pozos exclusivamente de observación,

siendo la mayoría pozos de explotación que son utilizados además para registrar los niveles estáticos bimensualmente.

3.5 Procesos de recarga de acuíferos.

Recarga: es el flujo descendente de agua que alcanza el nivel freático, agregándose al almacenamiento de agua subterránea.

La recarga es usualmente expresada como un flujo volumétrico, en términos de volumen por unidad de tiempo (l/hora), (m³/día) o un flujo, en términos de volumen de unidad de área por unidad de tiempo (mm/año) (Healy: 2010).

La **Tasa de recarga** es uno de los componentes más importantes de cualquier evaluación de suministro de agua subterránea o vulnerabilidad de acuífero. Es la tasa a la cual el sistema es rellenado.

Dependiendo de la fuente de origen de la recarga, existen dos tipos de recarga: Recarga Difusa y Recarga Concentrada. (Healy: 2010).

Recarga Difusa (Diffused recharge): también llamada recarga local o directa; es la recarga distribuida sobre grandes áreas en respuesta a la precipitación que se infiltra en la superficie del suelo y percola a través de la zona insaturada a la zona saturada, (zona del nivel freático). Siendo la recarga dominante en los climas húmedos (Infiltración directa de lluvia). (Healy: 2010).

Recarga Concentrada (Focused recharge): es el movimiento de agua desde los cuerpos de agua superficiales (infiltración desde ríos, canales, lagos, embalses, fugas de agua potable, retornos de riego agrícola), a un acuífero subyacente. Esta recarga generalmente varía más en el espacio que la recarga difusa. En climas áridos, la recarga concentrada desde corrientes efímeras, a menudo es la dominante. (Healy: 2010).

Se debe destacar que los sistemas de agua subterránea reciben tanto recarga difusa como concentrada, pero la importancia de cada mecanismo varía desde sitio a sitio dentro de cada región.

Generalmente la recarga difusa domina en ambientes húmedos, pero como el grado de aridez aumenta, aumenta también la importancia de la recarga concentrada en términos de reabastecimiento del acuífero.

El agua que se infiltra puede ser vista como **Recarga Potencial**; y esta podría llegar a ser recarga, pero en vez de eso, podría ser devuelta a la atmósfera por evapotranspiración, o simplemente permanecer en almacenamiento en la zona no saturada por algún periodo de tiempo. (Healy: 2010).

El **Plano de Flujo – Cero (Zero – Flux Plane)** es el plano horizontal en alguna profundidad dentro de la zona no saturada, que separa el agua que se mueve hacia arriba y hacia abajo, siendo este un límite móvil en el tiempo.

El agua que drena bajo el Plano de Flujo – Cero en la zona no saturada es llamada como: ***Drenaje, Percolación o Infiltración de Red.***

Es aconsejable usar el término ***Agua Subterránea*** sólo para denominar el agua debajo del nivel freático (dentro de la zona saturada), y así distinguirla del ***Agua Capilar***, la cual es el agua sobre el nivel freático (dentro de la zona no saturada). (Healy: 2010).

Áreas de recarga y descarga: Las áreas de recarga están usualmente en lugares altos topográficamente, y las áreas de descarga están en lugares topográficamente bajos. En las áreas de recarga, hay a menudo una zona no saturada bastante profunda entre el nivel freático y la superficie del suelo. Por el contrario, el nivel freático se encuentra en las áreas de descarga o cerca o en la superficie del suelo. (Fetter, C W: 2001)

Las líneas de flujo o red de flujo tienden a divergir desde las áreas de recarga y converger hacia las áreas de descarga. Para determinar las áreas de recarga y descarga subterráneas es útil el uso de mapas de isolíneas de igual nivel freático. (Fetter, C W: 2001).

IV. Antecedentes sobre la situación de las aguas subterráneas en Chile

4.1 Aguas subterráneas en Chile.

*“La movilización y gestión de esfuerzos públicos y privados sólo será posible en la medida en que contemos con certezas sólidas y concretas de, por ejemplo, la situación actual de nuestros glaciares, **la disponibilidad real de los acuíferos**, las diversas demandas sectoriales y los requerimientos en cuantía y calidad que asegurarían la sustentabilidad de nuestro recurso superficial y subterráneo”.*

Alberto Undurraga Vicuña, Ministro de Obras Públicas (DGA: 2015)

Tal como señala el Ministro de Obras Públicas, se hace urgente en Chile una intensificación de estudios de las diversas fuentes de agua con las que cuenta el país (agua sólida y agua líquida, superficial y subterránea), para poder asegurar que las crecientes demandas de agua de los diversos rubros económicos puedan estar a la par con la sustentabilidad a largo plazo de estas fuentes hídricas.

4.1.1 Situación de acuíferos en Chile

Casi la totalidad 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: citado por DGA 2015). 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. (DGA 2015: 70)

Hasta el año 2015, la Dirección General de Aguas delimitó un total de 137 acuíferos a lo largo del territorio nacional, distinguiéndose 375 SHAC. Se debe indicar que en la Macrozona Austral (regiones de Aysén y Magallanes) hasta el momento, no se ha definido ningún acuífero, lo que no debe ser interpretado como la inexistencia de estas unidades. (DGA 2015: 70)

4.1.2 Disponibilidad y rendimientos sustentables de acuíferos.

La DGA expresa la cantidad de recursos hídricos almacenada en los acuíferos y SHAC en unidades de volumen por año. La definición de estos volúmenes se presenta a continuación:

Volumen Sustentable: es la cantidad de agua anual asociada a la recarga del acuífero, es decir, al flujo de agua que lo alimenta naturalmente que proviene de precipitaciones, embalsamientos y escurrimientos superficiales y subterráneos (DGA: 2013; citado por DGA: 2015). El volumen sustentable es aquel susceptible de constituir como derecho de aprovechamiento de aguas con carácter de definitivo. (DGA: 2015: 116)

Volumen Provisional: es la cantidad de agua anual asociada a derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas del tipo provisional, constituidos en un SHAC que ha sido declarado como Área de Restricción. (DGA: 2015: 116)

Volumen Disponible: corresponde a la suma de los volúmenes sustentables y provisionales estimados en un SHAC y que es posible otorgar como derechos definitivos y provisionales, respectivamente. (DGA: 2015: 116)

Volumen Total Comprometido: es la cantidad de agua que corresponde a todos los derechos constituidos y reconocidos y a las solicitudes tramitadas conforme a los artículos transitorios 2° (Código de Aguas, 1981), 3°, 4° y 6° (Ley N° 20.017, 2005). Se incluyen, además, las solicitudes pendientes tramitadas conforme al artículo 4° transitorio, siempre y cuando el sector acuífero no esté considerado en la ley N° 20.411 (2009), (DGA: 2015: 116)

Volumen Total Solicitado: es la cantidad de agua anual que corresponde a todas las solicitudes tanto resueltas como en trámite. (DGA: 2015: 116)

Unido al concepto de Volumen Sustentable de la DGA, Healy: 2010, define el concepto de **Rendimiento sustentable del acuífero;** como la tasa en la cual el agua puede ser retirada desde un acuífero sin causar impactos adversos; siendo definidos estos últimos:

Impactos Adversos: descarga disminuida a las corrientes de agua o humedales, subsidencia del suelo, contaminación inducida al agua subterránea e intrusión salina. (Healy: 2010).

4.1.3 Restricciones y prohibiciones de aguas subterráneas.

La **declaración de área de restricción** de aguas subterráneas es un instrumento utilizado por la Dirección General de Aguas para proteger Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) donde exista grave riesgo de descenso en los niveles de agua con el consiguiente perjuicio a los derechos de terceros establecidos en él, o bien, cuando los informes técnicos emitidos por el Servicio demuestren que está en peligro la sustentabilidad del acuífero. Una vez emitida esta declaración, la DGA sólo podrá otorgar derechos de aprovechamiento con carácter provisional. (DGA 2015: 94)

La **declaración de zona de prohibición** es un mecanismo mediante el cual la Dirección General de Aguas protege la sustentabilidad de un acuífero. Esta declaración, a diferencia del área de restricción, se produce cuando la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra totalmente comprometida tanto en carácter de definitivo como provisional, por lo que no es posible constituir nuevos derechos de aprovechamiento. Como se trata de una medida poco frecuente, la DGA sólo ha declarado 6 zonas de prohibición entre los años 1983 a 1999 con un total de 11.052 km² de superficie comprometida, siendo la Macrozona Norte la que concentra el mayor número de sectores con este mandato. (DGA 2015: 94)

4.1.4 Derechos de aguas otorgados a nivel nacional.

El número total de derechos subterráneos otorgados es de 47.569, de los cuales 46.962 corresponden a definitivos y 607 a provisionales. El caudal otorgado total para los derechos subterráneos es de 467.306 l/s, de los cuales 452.841 l/s corresponden a definitivos y 14.465 l/s son provisionales. (DGA 2015: 106)

El DARH de la DGA elaboró una tabla con los derechos subterráneos de las diferentes regiones del país, donde es posible ver la gran diferencia entre derechos definitivos y provisionales (ver tabla 1)

Tabla 1. Número de derechos subterráneos distribuidos por regiones.

Macrozona	Región	Número de Derechos Subterráneos								
		Definitivo	[Nº]	[%]	Provisional	[Nº]	[%]	Total	[Nº]	[%]
Norte	XV		558	1,2	7	1,2		565	1,2	
	I		877	1,9	9	1,5		886	1,9	
	II		545	1,2	17	2,8		562	1,2	
	III		970	2,1	56	9,2		1.026	2,2	
	IV		6.147	13,1	58	9,6		6.205	13,0	
Centro	V		8.496	18,0	119	19,6		8.615	18,1	
	RM		6.391	13,5	156	25,7		6.547	13,8	
	VI		5.951	12,7	185	30,4		6.136	12,9	
	VII		3.240	6,9	0	0		3.240	6,8	
Sur	VIII		5.951	12,7	0	0		5.951	12,5	
	IX		3.476	7,4	0	0		3.476	7,3	
	XIV		1.183	2,5	0	0		1.183	2,5	
	X		2.526	5,4	0	0		2.526	5,3	
Austral	XI		261	0,6	0	0		261	0,5	
	XII		390	0,8	0	0		390	0,8	
Total			46.962		Total	607		47.569		

Fuente (DARH, DGA: 2015)

Como puede observarse en la tabla 1, la región de Valparaíso es la que concentra el mayor número de derechos subterráneos (8.496), pudiéndose explicar la mayor cantidad de derechos subterráneos en esta región por la extensa superficie de cultivos de paltos y cítricos, junto a bajos caudales de la red hidrográfica comparados con las regiones del centro-sur del país.

Los derechos subterráneos definitivos se concentran entre las regiones de Coquimbo y del Biobío, que por lo demás son de gran producción agrícola.

Los derechos provisionales se concentran entre las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, siendo esta última región la que concentra la mayor cantidad de derechos previsionales. Debe destacarse que desde la región del Maule hacia el sur, no existen derechos subterráneos provisionales, por lo tanto todavía permiten la entrega de nuevos derechos definitivos. Pudiéndose explicar esta situación por la mayor pluviometría de las regiones desde el Maule hacia el sur.

No basta con realizar un análisis de las cantidades de derechos subterráneos, sino que es necesario analizar los caudales otorgados en las diferentes regiones (tabla 2).

A simple vista resalta la Región Metropolitana por el mayor caudal otorgado de aguas subterráneas a nivel nacional (poseyendo un 25,82 % de los derechos a nivel nacional), seguida desde lejos por la Región de Valparaíso con un 14 % de estos derechos.

La distribución de los caudales de derechos subterráneos es clara en nuestro país, existiendo una fuerte concentración de estos entre las regiones de Valparaíso hasta la del Maule (Regiones fuertemente agrícolas).

Tabla 2. Caudal otorgado de derechos subterráneos distribuidos por regiones.

Macrozona	Región	Derechos Subterráneos - Caudal Otorgado								
		Definitivo	[l/s]	[%]	Provisional	[l/s]	[%]	Total	[l/s]	[%]
Norte	XV		3.491	0,77		36	0,25		3.527	0,75
	I		6.426	1,42		212	1,47		6.638	1,42
	II		14.123	3,12		181	1,25		14.304	3,06
	III		28.381	6,27		385	2,66		28.766	6,16
	IV		26.115	5,77		1.780	12,31		27.895	5,97
Centro	V		65.220	14,40		910	6,29		66.130	14,15
	RM		116.950	25,82		6.560	45,34		123.510	26,43
	VI		53.980	11,92		4.401	30,43		58.381	12,49
	VII		54.515	12,04		0	0		54.515	11,67
	VIII		29.220	6,45		0	0		29.220	6,25
Sur	IX		18.110	4,00		0	0		18.110	3,88
	XIV		11.590	2,56		0	0		11.590	2,48
	X		23.598	5,21		0	0		23.598	5,05
	XI		465	0,10		0	0		465	0,10
Austral	XII		657	0,15		0	0		657	0,14
			Total	452.841		Total	14.465		467.306	

Fuente (DARH, DGA: 2015)

Las regiones agrícolas del sur de Chile (desde el Biobío hasta Los Lagos), no poseen gran cantidad de caudales otorgados de aguas subterráneas, talvez por su menor producción agrícola y mayor producción ganadera y/o forestal, como también por su mayor pluviometría que genera menor demanda de agua de riego, además de mayores caudales de ríos que sirven para sustentar una mayor cantidad de derechos de agua superficiales.

4.1.5 Cuenca y acuífero del Río Maipo.

La cuenca del Río Maipo posee 26 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) o Sectores Acuíferos (DGA: 2015). Uno de ellos es el Sector Acuífero Chacabuco-Polpaico (área de estudio del presente informe).

La cuenca del Río Maipo es la séptima cuenca hidrográfica exorreica del país en cuanto a extensión areal (DGA: 2015) con 15.273 km², siendo superada en extensión por las cuencas de los ríos Loa, Biobío, Maule, Baker, Copiapó y Bueno.

El acuífero de Río Maipo, abarca casi la totalidad del relleno sedimentario de la Región Metropolitana, extendiéndose en pequeñas extensiones hacia las regiones de Valparaíso y de O'Higgins (DGA: 2015).

4.1.5.1 Derechos de agua en la cuenca del Río Maipo.

La cuenca del Río Maipo lidera la cantidad de derechos de aguas subterráneas en el país, seguido de cerca por la cuenca del Río Rapel (Tabla 3). Pero en cuanto a caudales otorgados lidera de lejos con 112.841 l/s, superando por más del doble a la segunda cuenca del país (Cuenca del Río Rapel con 52.020 l/s).

Tabla 3. Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la cuenca del río Maipo.

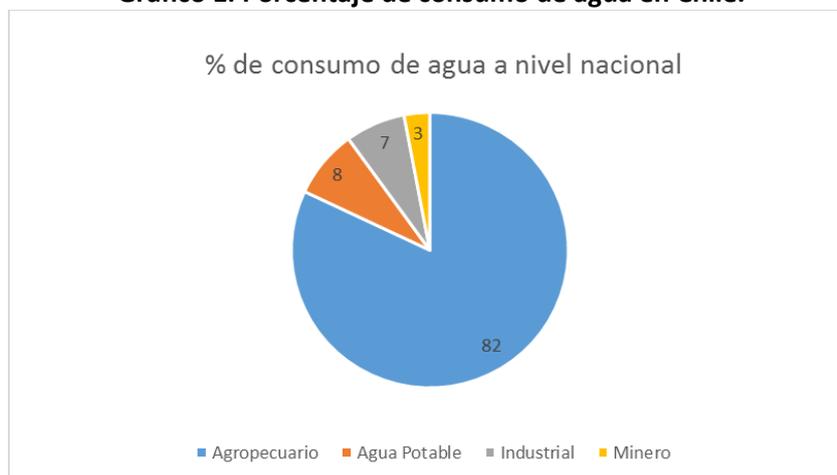
Cuenca	Definitivos		Provisionales		Total	
	cantidad	l/s	cantidad	l/s	cantidad	l/s
Río Maipo	5.822	112.841	164	6.513	5.986	119.354

Fuente: DGA 2015

4.1.6 Estimaciones de demanda de agua en Chile.

La mayor parte del recurso hídrico consumido es para la agricultura y la ganadería, la que equivale al 82 % de su uso en Chile, rubros como la industria y la minería, al igual que los servicios de agua potable, aumentan su demanda constantemente a través de los años. (DGA: 2015), (ver el gráfico 1)

Gráfico 1. Porcentaje de consumo de agua en Chile.



Fuente: (DGA 2015)

Las demandas de agua de cada sector económico en las distintas regiones del país pueden verse en la tabla 4.

Tabla 4. Demanda estimada de agua por sector económico en m³/s.

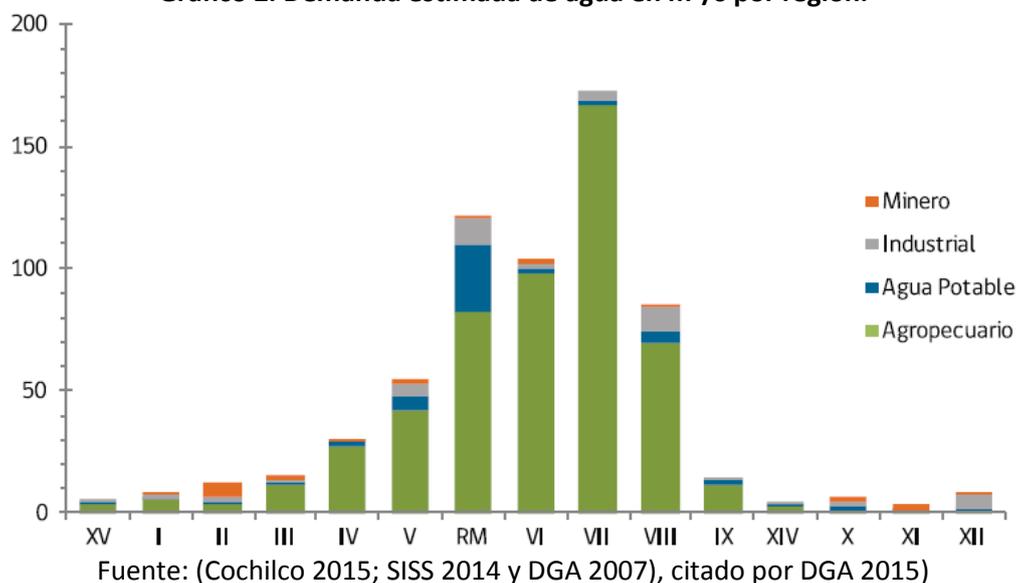
Macrozona	Región	Agropecuario	Agua Potable	Industrial	Minero	Total [m ³ /s]
Norte	XV	3,71	0,96	0,25	0,00	4,92
	I	5,21	0,69	1,43	1,54	8,87
	II	3,31	1,68	1,29	6,26	12,54
	III	12,03	0,87	0,52	1,90	15,32
	IV	27,19	1,89	0,25	0,71	30,04
Centro	V	42,44	5,82	4,81	1,26	54,33
	RM	82,36	27,41	10,42	0,90	121,09
	VI	97,96	2,41	1,23	1,88	103,48
	VII	166,49	2,53	3,77	0,00	172,79
Sur	VIII	69,44	5,16	9,54	1,21	85,35
	IX	11,51	2,34	0,26	0,00	14,11
	XIV	2,21	1,02	1,63	0,00	4,86
	X	1,10	1,39	2,46	1,50	6,45
Austral	XI	0,64	0,29	0,08	2,60	3,61
	XII	1,12	0,38	5,91	0,23	7,64
		526,72	54,84	43,85	1999	645,40

Fuente: (COCHILCO 2015; SISS 2014 y DGA 2007), citado por DGA 2015)

La tabla 4 permite observar como el consumo de agua del sector agropecuario es pequeño en cantidad en el extremo norte, pero se incrementa cada más a medida que se avanza por cada región hacia el sur del país, con su consumo máximo en la región del Maule, para comenzar a descender a medida que se acerca más hacia el extremo sur. Dado que las regiones de la zona

sur del país presentan mayores precipitaciones medias anuales que las regiones de la zona centro, la demanda de agua de riego es menor.

Gráfico 2. Demanda estimada de agua en m³/s por región.



El gráfico 2 permite reconocer el gran consumo de agua de la región del Maule, en su gran mayoría desde el rubro agropecuario, siendo el mayor consumidor de agua a nivel nacional, presentándose casi el mismo escenario en el resto de las regiones del país, con excepción de las regiones de Antofagasta y Aysén donde la Minería es el mayor consumidor, y Los Lagos y Magallanes donde la industria es el principal usuario de agua.

En cuanto al consumo de agua potable por región, destaca la Región Metropolitana como la mayor consumidora de agua a nivel nacional, seguida por la región de Valparaíso y Biobío; guardando a nivel general clara relación, el número de habitantes de las regiones con su consumo de agua potable.

4.1.7 Agua potable en Chile

En Chile, los servicios de abastecimiento de agua y saneamiento difieren para la población urbana y rural. Mientras la población urbana (estimada en un 87 %) es suministrada a través de empresas sanitarias, la población rural se abastece a través de cooperativas y comités de Agua Potable Rural (APR), las que en su mayoría forman parte del programa de APR de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas. (DGA: 2015)

4.1.7.1 Agua Potable Urbana.

En Chile, la cobertura urbana de agua potable alcanza el 99,8 %, en tanto, la cobertura a red de alcantarillado a nivel nacional llega al 95,9 %. Además, en términos de calidad, el país cumple con la norma nacional de calidad del agua potable. Como resultado de ello, el Estado de Chile

presenta una baja tasa de muertes causadas por enfermedades relacionadas con agua, saneamiento e higiene, de 7,7 por cada 100.000 habitantes. (SINIA: 2017)¹⁰

El rol de control y fiscalización lo ejerce la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), organismo dependiente del MOP, y comprende agua potable y saneamiento. Según datos de la SISS para el año 2014, las empresas sanitarias entregan servicios de agua potable a 5.000.449 clientes lo que corresponde a un total estimado de 16.407.743 habitantes en zonas urbanas del país. (DGA: 2015)

4.1.7.1.1 El caso de SMAPA.

SMAPA es un servicio de agua potable 100 % municipal y con abastecimiento de agua **100 % subterránea**, principalmente en las comunas de Maipú, Cerrillos y parte de Estación Central con una cobertura en agua potable del 100 % y en alcantarillado del 99,8 %. (SMAPA: 2017)

El Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado, SMAPA, basa su sistema de producción a partir del abastecimiento del recurso hídrico, a través de napas subterráneas, mediante la explotación de sondajes, distribuidos en forma estratégica en todo el territorio operacional. (SMAPA: 2017)

El sistema de distribución de agua potable está constituido por 18 sectores. Cada uno de ellos, cuenta con sus propios sistemas de producción, que están conformados por sondajes de captación de agua equipados con bombas de impulsión, con sus respectivos sistemas de desinfección y estanques de regulación. (SMAPA: 2017)

4.1.7.2 Agua Potable Rural (APR)

Según estimaciones del Programa APR, el 100 % de las localidades concentradas (aquellas con más de 150 habitantes y una densidad mayor a 15 viviendas por kilómetro de red de agua potable) se encuentran abastecidas, quedando como brecha de abastecimiento de agua potable las localidades semiconcentradas y dispersas. (DGA: 2015: 128)

Desde el año 2011, el Programa de APR depende de la Subdirección de Agua Potable Rural de la Dirección de Obras Hidráulicas, y tiene por objeto abastecer de agua potable a localidades rurales concentradas y semiconcentradas, ejecutando la inversión necesaria y realizando la asesoría respectiva a las organizaciones responsables de la administración, operación y mantenimiento de los sistemas, contribuyendo al desarrollo económico y su integración social al país. Dicha responsabilidad recae en organismos comunitarios denominados Comité o Cooperativa de APR. Hoy en día, el número estimado de beneficiarios con APR alcanza a 1.735.312 personas en base a 1.754 servicios de agua potable rural. A nivel nacional, en promedio, cada sistema beneficia a 989 personas. (DGA: 2015: 128)

¹⁰ SINIA: Servicio Nacional de Información Ambiental (www.sinia.cl)

V. Marco teórico legal de aguas de Chile.

Desde 1981, el Estado de Chile basa su gestión relativa a las aguas continentales en el Código de Aguas establecido en dicho año. Este señala, entre otros asuntos, las leyes que rigen el dominio y uso de las aguas continentales, tanto superficiales como subterráneas, como puede verse en el Artículo 5º del mismo Código.

Art. 5º. *“Las aguas son bienes nacionales de uso público y se otorga a los particulares el derecho de aprovechamiento de ellas, en conformidad a las disposiciones del presente Código”¹¹.*

Estos derechos de aprovechamiento de aguas, son entregados con un caudal de extracción expresado en litros por segundo, y un volumen máximo extracción de agua anual, que es expresado en metros cúbicos por año (Artículo 7º).

Art. 7º. *“El derecho de aprovechamiento se expresará en volumen por unidad de tiempo”¹².*

El volumen de extracción, de no existir una orden distinta (como en el caso de los derechos provisionales), corresponde al resultado de multiplicar el caudal otorgado en litros/segundo por la cantidad total de segundos de un año, esto es: un caudal de 1 l/s = 31.536 m³/año.

Estos derechos de aprovechamiento de aguas pueden ser consuntivos o no consuntivos, siendo los primeros, los derechos que permiten consumir por completo las aguas, esto es, no hay que devolver el agua al origen de su captación, en cambio los derechos no consuntivos, permiten el uso del agua, pero esta debe ser devuelta en la misma cantidad que la extraída (Art. 13).

Art. 13º. *“Derecho de aprovechamiento consuntivo es aquel que faculta a su titular para consumir totalmente las aguas en cualquier actividad”¹³.*

En el caso del acuífero Chacabuco-Polpaico, hasta la elaboración de este informe, sólo se han entregado derechos de tipo Consuntivo, los cuales son ocupados principalmente para el riego de predios agrícolas¹⁴.

Los derechos de aprovechamiento son de naturaleza superficial o subterránea, siendo los primeros los que permiten extraer agua desde cauces superficiales, tales como ríos, esteros, lagos y lagunas. En cambio los segundos permiten la extracción y uso de aguas extraídas desde acuíferos, como lo define el artículo 2º.

Art. 2º. *“Las aguas terrestres son superficiales o subterráneas. Son aguas superficiales aquellas que se encuentran naturalmente a la vista del hombre y pueden ser corrientes o detenidas. Son aguas corrientes las que escurren por cauces naturales o artificiales. Son aguas detenidas las que están acumuladas en depósitos naturales o artificiales, tales como lagos, lagunas, pantanos,*

^{11, 12, 13} Código de aguas, 1981.

¹⁴ Fuente: Base de datos de derechos de agua otorgados en el acuífero de Chacabuco-Polpaico, de la Dirección de Administración de Recursos Hídricos (DARH), de la DGA-RM.

*charcas, aguadas, ciénagas, estanques o embalses. Son aguas subterráneas las que están ocultas en el seno de la tierra y no han sido alumbradas*¹⁵.

En el caso del área de estudio, sólo existe entrega de derechos de naturaleza subterránea, señalando por lo demás, que los cauces superficiales se presentan agotados la mayor parte del año.

Además de lo anterior, los derechos de aprovechamiento de aguas pueden ser definitivos o provisionales, siendo los primeros, derechos de extracción de aguas de carácter perpetuo, los cuales son tratados como una propiedad y son inscritos en el Conservador de Bienes Raíces de la comuna correspondiente al derecho de extracción.

En cambio, los derechos de aprovechamiento de carácter provisional, nacen de la necesidad de restringir o moderar de algún modo la entrega de nuevos derechos en sectores acuíferos que ya han sido declarados como zona de restricción de otorgamiento de nuevos derechos definitivos, por razones de protección a los derechos constituidos ya, en la llamada Comunidad de aguas¹⁶ del sector acuífero, tal como se expresa en el Artículo 65º.

Art. 65º. *“Serán áreas de restricción aquellos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en los que exista el riesgo de grave disminución de un determinado acuífero, con el consiguiente perjuicio de derechos de terceros ya establecidos en él. Cuando los antecedentes sobre la explotación del acuífero demuestren la conveniencia de declarar área de restricción de conformidad con lo dispuesto en el inciso anterior, la Dirección General de Aguas deberá así decretarlo. Esta medida también podrá ser declarada a petición de cualquier usuario del respectivo sector, si concurren las circunstancias que lo ameriten. Será aplicable al área de restricción lo dispuesto en el artículo precedente. La declaración de un área de restricción dará origen a una Comunidad de Aguas formada por todos los usuarios de aguas subterráneas comprendidas en ella*¹⁷.

Una vez cerrado el sector acuífero al otorgamiento de nuevos derechos de extracción definitivos, existe la posibilidad de otorgamiento de derechos en carácter de provisional, tal como lo define el artículo 66º:

Art. 66º. *“La Dirección General de Aguas podrá otorgar provisionalmente derechos de aprovechamiento en aquellas zonas que haya declarado de restricción. En dichas zonas, la citada Dirección limitará prudencialmente los nuevos derechos pudiendo incluso dejarlos sin efecto en caso de constatar perjuicios a los derechos ya constituidos*¹⁸.

Teniendo estos derechos una categoría provisoria o momentánea, de comprobarse que perjudican los derechos de extracción de otros propietarios, pueden ser cancelados. De no demostrarse un menoscabo por parte de los propietarios de derechos definitivos, los derechos

^{15, 17, 18} Código de Aguas, 1981.

¹⁶ Comunidad de Aguas: Conjunto de propietarios de derechos de aguas dentro de un sector acuífero que ha sido cerrado al otorgamiento de nuevos derechos definitivos.

provisionales pueden pasar a ser definitivos en un plazo de cinco años desde su otorgamiento, lo cual se establece en el artículo 67º:

Art. 67º. *“Los derechos de aprovechamiento otorgados de acuerdo al artículo anterior, se podrán transformar en definitivos una vez transcurridos cinco años de ejercicio efectivo en los términos concedidos, y siempre que los titulares de derechos ya constituidos no demuestren haber sufrido daños. Lo anterior no será aplicable en el caso del inciso segundo del artículo”¹⁹.*

Relacionado al artículo anterior, el año 2014 se publica el **Decreto 203**, que lleva por título *“Aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas”*. De este Decreto, el **artículo 33** especifica la forma en que los derechos provisionales pueden pasar a ser definitivos.

Art. 33º del Decreto 203. *“La Dirección General de Aguas transformará derechos provisionales a definitivos, cuando se cumplan los siguientes requisitos:*

- a) Ejercicio de al menos el 80 por ciento del volumen total anual del derecho de aprovechamiento constituido provisionalmente, durante cada año del plazo establecido en el artículo 67 del Código de Aguas, medido e informado conforme al sistema de control de extracciones aprobado de acuerdo a lo establecido en el artículo 31, inciso cuarto, del presente Reglamento. En el evento que se interrumpiere la extracción en cualquiera de los años del plazo establecido en el artículo 67 del Código de Aguas, el plazo de 5 años se comenzará a contabilizar nuevamente a partir de la fecha en que se reinicie la extracción.*
- b) Que no se haya verificado afección a derechos de aprovechamiento definitivos ya constituidos en el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común”²⁰.*

Pero existe un mecanismo aún más restrictivo ante solicitudes de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas, que busca proteger la sustentabilidad de un acuífero, la **Zona de prohibición de aguas subterráneas**, que a diferencia del área de restricción, se produce cuando la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra totalmente comprometida tanto en carácter de definitivo como provisional, por lo que no es posible constituir nuevos derechos de aprovechamiento. (DGA: 2015). Como señala el Artículo 63:

Art. 63º. *“la Dirección General de Aguas podrá declarar zonas de prohibición para nuevas explotaciones, mediante resolución fundada en la protección del acuífero, la cual se publicará en el Diario Oficial.*

La declaración de una zona de prohibición dará origen a una comunidad de aguas formada por todos los usuarios de aguas subterráneas comprendidos en ella.

^{19, 20} Artículo 33 del Decreto 203: *“Aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas”*.

Las zonas que corresponden a acuíferos que alimentan vegas y los llamados bofedales de las Regiones de Tarapacá y de Antofagasta se entenderán prohibidas para mayores extracciones que las autorizadas, así como para nuevas explotaciones, sin necesidad de declaración expresa. La Dirección General de Aguas deberá previamente identificar y delimitar dichas zonas.

Sin perjuicio de lo dispuesto en el inciso anterior, la Dirección General de Aguas podrá alzar la prohibición de explotar, de acuerdo con el procedimiento indicado en el artículo siguiente". Ver Art. 65º.

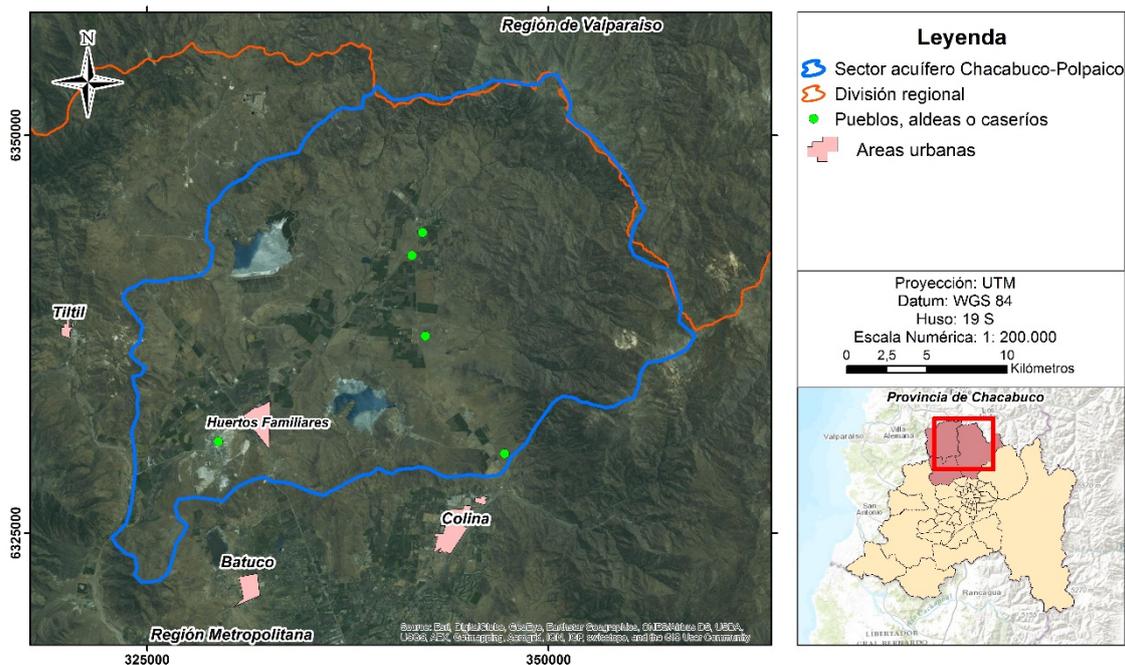
En este contexto normativo, este estudio se orienta en la búsqueda de la sustentabilidad del Sector Acuífero Chacabuco-Polpaico a través de la generación de un informe técnico que sirva de respaldo ante la posible necesidad de decretar al mencionado sector acuífero como **Zona de prohibición de aguas subterráneas**, si los resultados de las investigaciones lo ameriten.

La posible proposición de decretar **Zona de prohibición de aguas subterráneas** de este estudio se enmarca bajo una condición de conservación del medio ambiente, en cuyo contexto se busca dar estabilidad al nivel freático a través del cierre al otorgamiento de nuevos derechos provisionales, los que pueden terminar convirtiéndose en nuevos derechos de extracción definitivos, aumentando aún más la presión sobre el acuífero. Ello generaría una situación de déficit hídrico que pondría en peligro tanto al ecosistema del que es parte el acuífero, como a los habitantes principalmente de zonas rurales que se abastecen de aguas subterráneas.

VI. Área de estudio.

El área de estudio corresponde al sector acuífero Chacabuco-Polpaico, el cual fue delimitado por la DGA para crear sectores diferenciados de administración de recursos hídricos, donde todo tipo de cálculo de precipitaciones, escorrentía, balance hídrico y otorgamiento de derechos de aprovechamiento de agua, se realiza dentro de cada sector acuífero. (Figura 6)

Figura 6. Cartografía del área de estudio.



Este sector acuífero se encuentra en la provincia de Chacabuco, en el norte de la Región Metropolitana de Santiago (RMS), ocupando la parte derecha de la comuna de Tilti y la parte izquierda de la comuna de Colina. (Figura 7)

Las coordenadas de sus límites son las siguientes:

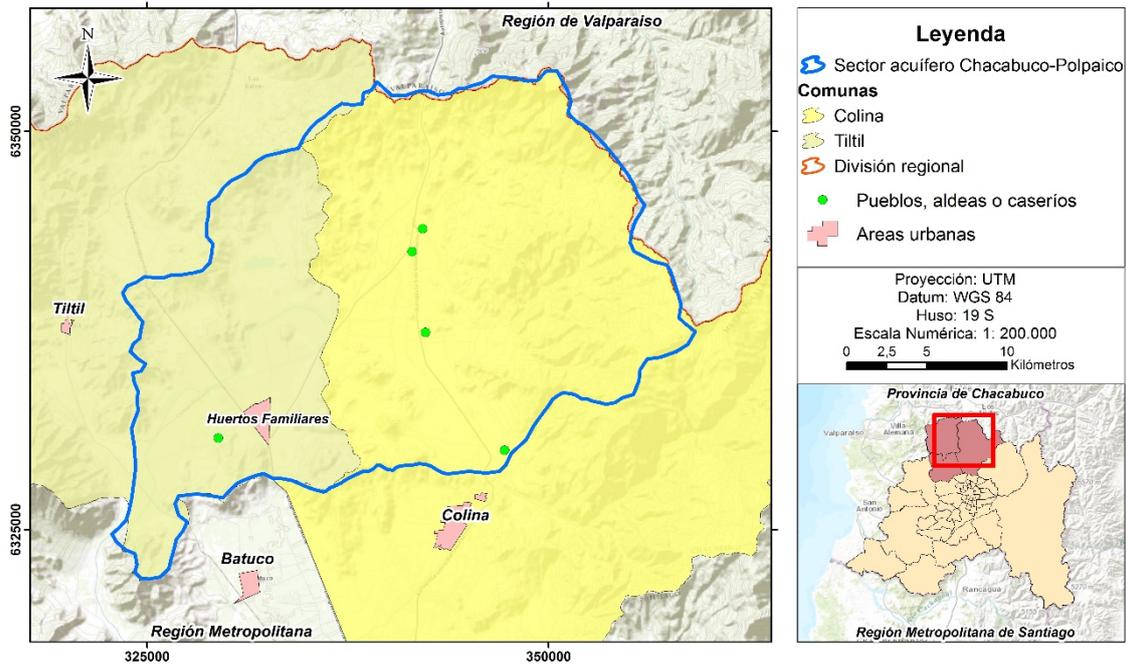
- Norte: 32° 56'
- Sur: 33° 13'
- Este: 70° 30'
- Oeste: 70° 54'

Su única área urbana corresponde a la localidad de Huertos Familiares con 2.993 habitantes según el censo del 2002.

El área del sector acuífero es de 663,63 km², siendo esta levemente superior al área urbana de la ciudad de Santiago.

El área de estudio presenta dos grandes espejos de agua, siendo ambos tranques de relaves de empresas mineras: el Tranque Ovejerías (Codelco) y el Tranque Las Tórtolas. (Anglo American S.A.).

Figura 7. Comunas del área de estudio.



Elaboración propia

VII. Pregunta de investigación

El evidente agotamiento actual de los recursos hídricos superficiales de la cuenca a las que pertenece el acuífero en estudio plantea una situación de alerta orientada a evitar que suceda lo mismo con los recursos subterráneos, lo que provocaría una crisis de abastecimiento de agua en las zonas rurales ubicadas en el área del acuífero Chacabuco-Polpaico.

Algunos estudios previos han demostrado una excesiva extracción de los derechos subterráneos, además estos cálculos no consideraron los derechos de agua de carácter histórico, como Mercedes de agua y otros derechos otorgados por instituciones anteriores a la creación de la DGA, tales como la CORFO y la CORA (Corporación de la Reforma Agraria).

En consecuencia, por una parte se requiere un estudio que sume todos los derechos de extracción, tanto históricos como recientes, y por otra, realizar una nueva estimación de balance hídrico en base a datos de precipitación y temperaturas medias mensuales actualizados al 2014, además de una estimación de evapotranspiración real en base a cultivos presentes en el área de estudio en la actualidad, a una escala de mayor detalle que la usada en el estudio de Balance Hídrico Nacional de la década de 1980.

Ello permitiría generar una visión completa, actualizada y real de la presión de extracción de dicho acuífero. Por esto se propone la siguiente pregunta de investigación;

¿Existe suficiente agua para seguir entregando nuevos derechos de aprovechamiento provisionales en el acuífero Chacabuco-Polpaico?

VIII. Objetivos

8.1 Objetivo General

Evaluar la disponibilidad hídrica del sector acuífero Chacabuco-Polpaico ante las solicitudes de otorgamiento de nuevos derechos provisionales de aprovechamiento de agua.

8.2 Objetivos específicos

1. Estimar la recarga potencial de agua del acuífero.
2. Estimar la evapotranspiración.
3. Estimar la escorrentía superficial y subterránea.
4. Estimar retornos al acuífero por conceptos de infiltración de agua de riego
5. Analizar la variación del nivel estático del acuífero.
6. Estimar el volumen de extracción artificial de agua del acuífero.
7. Estimar el rendimiento sustentable del acuífero.

IX. Metodología

9.1 Estimación de la recarga potencial de agua del acuífero.

Para este efecto se realiza un análisis de las precipitaciones mensuales, cuya información es obtenida de los datos de las estaciones meteorológicas presentes dentro del área de estudio y en los alrededores inmediatos a esta, esta información es obtenida desde datos meteorológicos de la DGA y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

En el caso de bases de datos con vacíos, estos son llenados usando una metodología de interpolación de datos (Método de las Razones), utilizando para esto la información completa que entrega la estación meteorológica de Quinta Normal.

Con estos datos se calcula la precipitación mensual, el promedio anual, además de la precipitación media de la cuenca del área de estudio.

La precipitación media de la cuenca es obtenida usando los métodos de Media aritmética, Polígonos de Thiessen e Isoyetas.

Paralelamente, se establece la línea de tendencia de las precipitaciones para considerar los escenarios futuros en cuanto a la recarga del acuífero.

9.2 Estimación de Evapotranspiración.

9.2.1 Evapotranspiración Potencial de Thornthwaite (1948).

Calcular un "Índice de calor mensual" (i) a partir de la temperatura media mensual (t):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

1. Calcular el "Índice de calor anual" (I) sumando los 12 valores de i :

$$I = \sum i$$

2. Calcular la ETP mensual "sin corregir" mediante la fórmula:

$$ETP_{sin\ corr.} = 16 * \left(\frac{10 t}{I}\right)^a$$

Donde: $ETP_{sin\ corr.}$ = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas).

t = temperatura media mensual en °C.

I = índice de calor anual obtenido en el punto 2.

$$a = (675 * 10^{-9} * I^3) - (771 * 10^{-7} * I^2) + (1792 * 10^{-5} * I) + 0,49239$$

3. Corregir para el número de días del mes y el número de horas de sol:

$$ETP = ETP_{sin\ corr.} * \frac{N}{12} * \frac{d}{30}$$

Donde: N = número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud.

d = número de días del mes.

9.2.2 Evapotranspiración Real de Turc (1961).

Formula de Turc:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real en mm/año.

P = precipitación en mm/año.

L = $300 + 25 t + 0,05 t^3$

t = temperatura media anual en Celsius.

9.2.3 Evapotranspiración Real de FAO Penman-Monteith (1998).

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua es transferida a la atmósfera a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración de las plantas.

El método de estimación de evapotranspiración real ajustada de FAO Penman-Monteith (1998). Se basa en la estimación de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) y la evapotranspiración del cultivo bajo varias condiciones de manejo y ambientales (ET_{c aj}) (Allen et al: 2006: 1)²¹.

9.2.3.1 Cálculo de Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_o).

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la **radiación**, la **temperatura del aire**, la **humedad atmosférica** y la **velocidad del viento**. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), (ver figura 8). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar (Allen et al: 2006: 5)²². Esta pérdida de

^{21, 22} Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

agua puede ser expresada en diversas unidades de volumen por tiempo. En el caso de este trabajo, se expresará en mm/mes, mm/año y m³/año.

Figura 8. Diagrama de evapotranspiración del cultivo de referencia.



Fuente: Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

El cultivo de referencia (ET₀), se trata de un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. (Allen et al: 2006: 24-25)²³.

La siguiente ecuación muestra el cálculo de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀):

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

- ET₀ evapotranspiración de referencia (mm/día)
- R_n radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²/día)
- R_a radiación extraterrestre (mm/día)
- G flujo de calor de suelo (MJ/m²/día)
- T temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- u₂ velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
- e_s presión de vapor de saturación (kPa)
- e_a presión real de vapor (kPa)
- e_s - e_a déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/ °C)
- γ constante psicrométrica (kPa/ °C)

9.2.3.2 Parámetros geográficos y climáticos para calcular ET₀.

Localización: La altura sobre el nivel del mar (m) de la zona para la que se determina la ET₀ y su latitud (grados norte o sur) deben ser especificados. Estos datos son necesarios para ajustar algunos parámetros climáticos al valor medio local de la **presión atmosférica** (función de la elevación del sitio sobre nivel del mar) y para calcular la **radiación extraterrestre (R_a)**, y en

²³ Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

algunos casos, la duración máxima de la **insolación (N)**. En los procedimientos del cálculo para Ra y N, la latitud se expresa en radianes (grados decimales $\pi/180$). Un valor positivo se utiliza para el hemisferio norte y un valor negativo para el hemisferio sur. (Allen et al: 2006: 27)²⁴.

Temperatura: Se requiere información de temperatura diaria (promedio) máxima y mínima en grados centígrados (°C). En los casos en que solamente se tenga disponibilidad de temperaturas medias diarias, el cálculo de ETo todavía es válido pero se podría esperar una cierta subestimación de ETo debido a la relación no-lineal de la presión de vapor de saturación en relación con la temperatura. El uso de la temperatura media del aire en lugar de la temperatura máxima y mínima tiene como resultado una presión de saturación más baja, (e_s) y por lo tanto un déficit de presión de vapor también más bajo ($e_s - e_a$), resultante en una estimación más baja de la evapotranspiración de referencia. (Allen et al: 2006: 27)²⁵.

Humedad: El valor de la presión real (promedio) diaria de vapor, (e_a) en kilopascales (kPa) se requiere como dato de entrada para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith. En caso de que los valores de presión real de vapor no estén disponibles, estos pueden ser derivados de la humedad relativa máxima y mínima (%), de los datos psicrométricos (temperaturas de bulbo seco y mojado en °C) o de la temperatura del punto de rocío (°C). (Allen et al: 2006: 27)²⁶.

Radiación: La radiación neta diaria (promedio) esta expresada en megajoules por metro cuadrado por día (MJ/m²/día). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) medida con un piranómetro o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo. (Allen et al: 2006: 27)²⁷.

Viento: Se requiere contar con la velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo (m/s) medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo. Es importante verificar la altura a la cual se mide la velocidad del viento, pues velocidades del viento medidas a diversas alturas sobre la superficie del suelo presentan con seguridad valores diferentes. (Allen et al: 2006: 27-28)²⁸

9.2.3.3 Cálculo automatizado de ETo mediante el software ETo Calculator.

Se realiza un cálculo automatizado de ETo usando el software ETo Calculator, versión 3.2, desarrollado por la FAO en 2012.

Tabla 5. Datos geográficos de la estación meteorológica usada en ETo.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Tipo de datos
Huechún	33°04' S	70°45' W	610 m	mensuales

Fuente: elaboración propia.

^{24, 25, 26, 27, 28} Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

Los datos meteorológicos fueron entregados por Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF), que pertenece a la Red Agroclima, la cual se ha constituido a partir de un convenio de colaboración entre distintas instituciones, las que han conectado sus estaciones meteorológicas en un sistema integrado que administra FDF, financiada por aportes públicos y privados. (www.agroclima.cl: 2016).

La serie de datos entregada para la estación Huechún, posee un rango de registros meteorológicos diarios desde el 01 de enero de 2013, hasta el 31 de diciembre de 2016, los cuales fueron transformados a datos mensuales para su ingreso al software ETo Calculator.

Los datos meteorológicos entregados por FDF contienen los siguientes parámetros:

- Temperatura máxima diaria
- Temperatura mínima diaria
- Humedad relativa máxima diaria
- Humedad relativa mínima diaria
- Velocidad máxima diaria del viento

Una vez creado el menú de cada estación meteorológica (Figura 9), el software además demanda la entrada de datos de localización como son:

- localización interior o costera
- Área árida a semiárida, o área húmeda a semihúmeda.
- Área de vientos: suaves, suaves a moderados o moderados a fuertes.

Figura 9. Menú de características geográficas y climáticas en ETo Calculator.

The screenshot shows a software window titled "Update Station characteristics menu". At the top, there is a "File" field containing "Huechun" and a "DSC" button. Below this is the "Station description" section, which includes "Station" (Huechun) and "Country" (Chile) fields, accompanied by a world map icon. The "Location" section features two radio buttons: "Degrees and Minutes" (selected) and "Decimal degrees". Below these are input fields for "Latitude" (33 degrees, 4 minutes, South) and "Longitude" (70 degrees, 45 minutes, West). The "Altitude" field is set to 610 meter above sea level. A "Location" section has radio buttons for "at the coast", "interior location" (selected), "in arid or semi-arid area" (selected), "in semi-humid or humid area", "light winds in area" (selected), "light to moderate winds in area", and "moderate to strong winds in area". At the bottom are "Cancel" and "Save and Main menu" buttons.

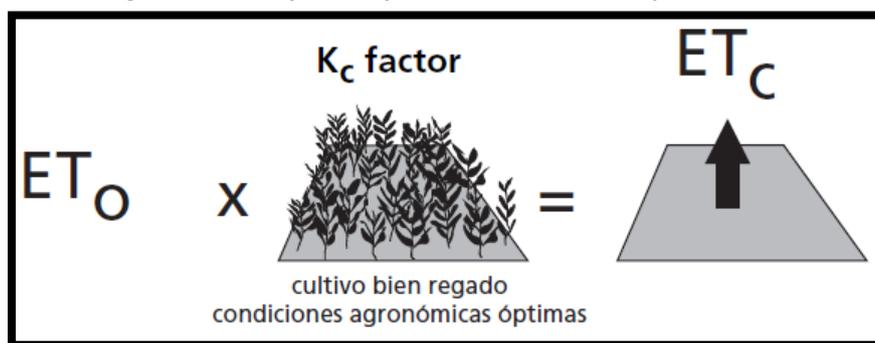
Fuente: Software ETo Calculator.

9.2.3.4 Cálculo de ET_c , evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar.

Factores de cultivo: El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura y rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radicales del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas.

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas. (Allen et al: 2006: 5)²⁹. ET_c es el producto entre la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el factor de cultivo distinto al de referencia (factor K_c). (Figura 10).

Figura 10. Diagrama de evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar.



Fuente: Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

El coeficiente del cultivo (K_c) representa el efecto integrado de cuatro características principales que diferencian a un cultivo en particular del cultivo del pasto de referencia. Las características mencionadas son las siguientes:

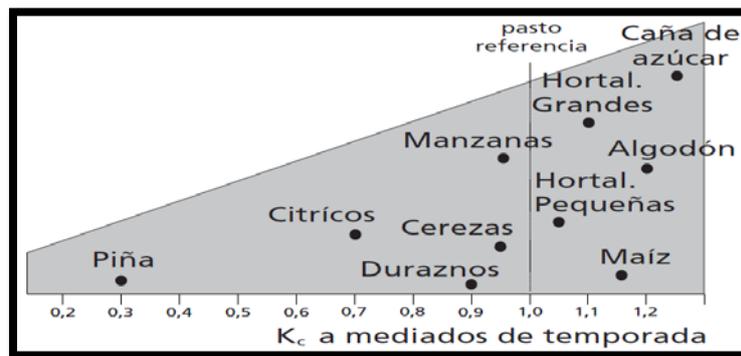
- **Altura del cultivo:** La altura del cultivo tiene influencia en el valor de la resistencia aerodinámica, r_a de la ecuación de Penman-Monteith, así como en la transferencia turbulenta del vapor del agua desde el cultivo hacia la atmósfera.
- **Albedo:** (reflectancia) de la superficie del cultivo y suelo. El valor del albedo está afectado por la porción del suelo cubierta por la vegetación, así como por la humedad presente en la superficie del suelo. El albedo de las superficies del cultivo y suelo afectan el valor de la radiación neta de la superficie, R_n la cual constituye la fuente principal de energía para el proceso de evapotranspiración.
- **Resistencia del cultivo:** La resistencia del cultivo a la transferencia del vapor de agua es afectada por el área foliar (cantidad de estomas), edad y condición de la hoja, así como por el grado de control estomático. La resistencia de la vegetación tiene influencia en el valor de la resistencia de la superficie, r_s .

²⁹ Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

- **Evaporación:** la cual ocurre en el suelo, especialmente en la parte expuesta del mismo. (Allen et al: 2006: 90)³⁰.

Las figuras 11 y 12 muestran ejemplos de valores de factores de cultivos (K_c) típicos de diferentes países del mundo. Su comparación con el cultivo de referencia en el caso de la figura 11, y los rangos de K_c esperables para las distintas etapas del crecimiento de cultivos típicos en el caso de la figura 12.

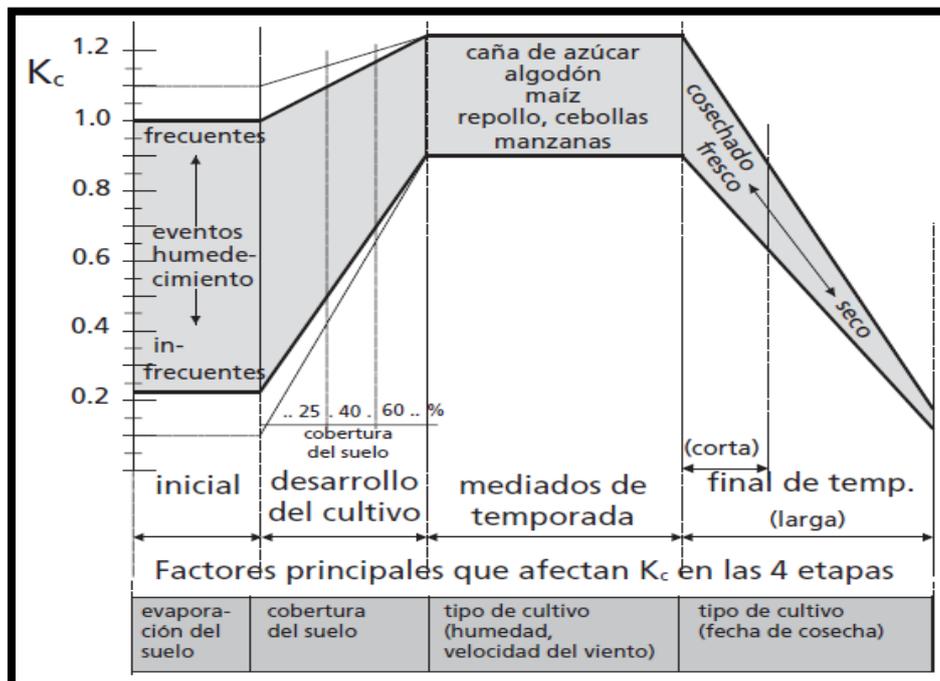
Figura 11. Valores típicos de K_c para diferentes cultivos completamente desarrollados.



Fuente: Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

Para determinar los valores de evapotranspiración de cultivos en condiciones estándar (ET_c), simplemente se deben multiplicar los valores del cultivo de referencia (ET_o) por el (K_c) de cada cultivo, obteniendo el valor de (ET_c) de cada superficie cultivada, procediendo a realizar un promedio de la ET_c de la cuenca, pesando los distintos valores de ET_c de acuerdo al porcentaje que ocupan dentro de la cuenca, y así obtener un valor de ET_c medio anual de la cuenca.

Figura 12. Rangos típicos esperados del valor de K_c para las cuatro etapas del crecimiento.



Fuente: Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

³⁰ Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

9.2.3.5 Determinación del Kc de los diferentes cultivos en el área de estudio.

Primero se realizará una delimitación de zonas de diferentes cultivos usando la clasificación de usos de suelo (Figura 29), elaborada para los Antecedentes Físicos de del área de estudio. Esta clasificación de usos de suelo sólo contempla una sola categoría para los cultivos, catalogándolos como **Uso de suelo Agrícola**, debiéndose entonces realizar una división de esta categoría en diversos polígonos, según el tipo de cultivo que presenten.

Se propone realizar una división de predios usando para esto composiciones de imágenes satelitales (NDVI, Falso color estándar) y color verdadero, además de apoyar la visión de estos sectores de cultivos con las imágenes de alta resolución espacial de Google Earth.

Una vez identificados los sectores de diferentes cultivos, se procederá a delimitarlos en polígonos en el software Arcgis 10.1, sin saber aún, que tipo de cultivo son en realidad.

Se realizarán visitas a terreno para la identificación del tipo de cultivo y así determinar los diferentes Kc según tablas presentadas por estudios de la FAO (2006), (Ver figuras 11 y 12).

Se debe utilizar en terreno un dispositivo GPS para georreferenciar los cultivos y determinar a qué polígono pertenecen, además de identificar los diferentes cultivos en terreno.

Una vez identificados y georreferenciados los cultivos observados en terreno, se procederá a la identificación de la totalidad de los cultivos del área de estudio, usando para esto la **Clasificación Supervisada** del SIG Arcgis 10.1, tomando huellas espectrales de los cultivos ya identificados y georreferenciados.

9.2.3.6 Cálculo de ETc, evapotranspiración del cultivo bajo condiciones NO estándar.

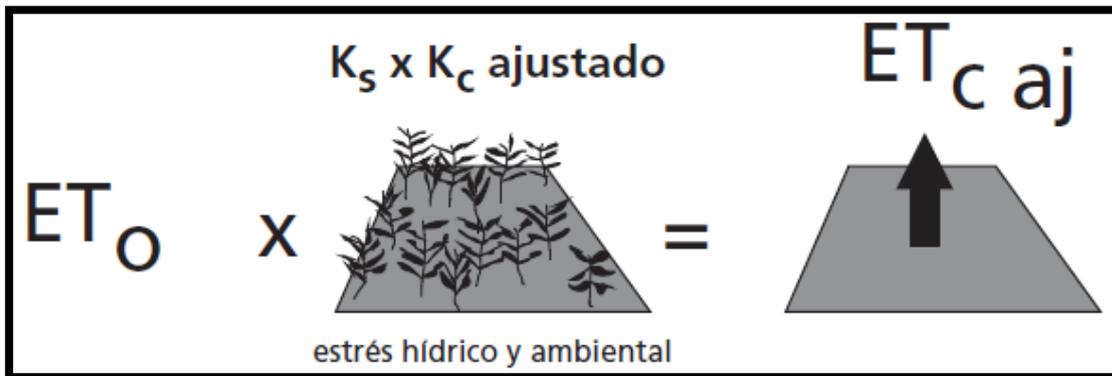
Manejo y condiciones ambientales: Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo.

Cuando se evalúa la tasa de ET, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo. Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar ETc (ETc aj).

Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo (Allen et al: 2006: 5-6)³¹. (ETc aj) es el producto entre la evapotranspiración de referencia (ETo), el factor de cultivo distinto al de referencia (factor Kc) y el factor de corrección (Ks). (Figura 13).

³¹ Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

Figura 13. Diagrama de evapotranspiración del cultivo bajo condiciones NO estándar.



Fuente: Allen et al. (2006) Estudio FAO riego y drenaje 56.

Para todos los efectos, en el área de estudio sólo se calculará ET_c , (*Evapotranspiración de cultivos bajo condiciones estándar*).

9.3 Estimación de escorrentía superficial y subterránea.

Dentro de la cuenca de estudio no existen estaciones de aforo para poder conocer el caudal medio anual en la desembocadura y así determinar la salida de agua a través de escorrentía superficial. Por este motivo, se realizan estimaciones de escorrentía media anual a través de fórmulas propuestas por distintos autores.

Además se realiza un cálculo de la escorrentía subterránea media anual a través de la Ley de Darcy, conociendo la sección saturada del acuífero.

9.3.1 Escorrentía superficial de Grunsky.

La fórmula de Grunsky para la estimación de escorrentía superficial fue desarrollada en EEUU a comienzos de siglo XX, donde:

$$E_s = 0,4 * P^2 \quad (P = \text{precipitación anual en metros})$$

Los valores de caudales son entregados en m^3/s , debiéndose posteriormente multiplicarse por 31.536.000 (total de segundos de un año) para obtener resultados en $m^3/año$.

9.3.2 Escorrentía superficial de Peñuelas.

La fórmula de Peñuelas para la estimación de escorrentía superficial fue desarrollada en Chile en la década de 1930, donde:

$$E_s = 0,5 * P^2 \quad (P = \text{precipitación anual en metros})$$

Los valores de caudales son entregados en m^3/s , debiéndose posteriormente multiplicarse por 31.536.000 (total de segundos de un año) para obtener resultados en $m^3/año$.

9.3.3 Escorrentía superficial de Coutagne.

La fórmula de Coutagne para la estimación de escorrentía superficial fue desarrollada en Francia, donde:

$$E_s = P - D$$

$$\text{Donde: } D = P - \lambda P^2$$

$$\lambda = \frac{1}{(0,8 + 0,14T)}$$

$$\frac{1}{8}\lambda < P < \frac{1}{2}\lambda \quad \text{si } (P < 1/8 \lambda) \text{ entonces } D = P \quad \text{si } (P > 1/2 \lambda) \text{ entonces } D = 0,2 + 0,035 T$$

Los valores de caudales son entregados en m³/s, debiéndose posteriormente multiplicarse por 31.536.000 (total de segundos de un año) para obtener resultados en m³/año.

9.3.4 Escorrentía superficial de Turc.

La fórmula de Turc para la estimación de escorrentía superficial, es mostrada a continuación:

$$E_s = P - D$$

$$\text{Donde: } D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + (\frac{P}{L})^2}}$$

$$L = 300 + 25T + 0,0T^3$$

Los valores de caudales son entregados en m³/s, debiéndose posteriormente multiplicarse por 31.536.000 (total de segundos de un año) para obtener resultados en m³/año.

9.3.5 Estimación de Escorrentía Subterránea.

Para la estimación de escorrentía subterránea (caudal subterráneo) es necesario tener conocimiento de la conductividad hidráulica y gradiente hidráulico en múltiples ubicaciones y profundidades, con esta información se pueden obtener tasas de flujo de aguas subterráneas (Healy: 2010).

Siendo la **conductividad hidráulica** (k) entendida como la capacidad de flujo del agua a través de los distintos materiales del subsuelo. Siendo usualmente representado en metros por segundo (m/s), (medida de velocidad).

Entendiéndose el **gradiente hidráulico** (i) como la pendiente de desnivel entre el nivel freático de dos pozos, obteniéndose la medición de elevación con respecto al nivel del mar, restando la medición de nivel de agua de los pozos a la altitud de nivel del mar de la superficie de cada pozo.

El cálculo del gradiente hidráulico es el siguiente: $i = \Delta H / \Delta L$

i = gradiente hidráulico

ΔH = desnivel de altura entre los pozos

ΔL = distancia entre los pozos

El flujo de agua subterránea (Q), puede ser estimado con la **Ley de Darcy** ($Q = K * A * \Delta H / \Delta L$), al ser multiplicado el factor K (m/s) por la sección transversal de la zona saturada del acuífero en m^2 (A) y esta sección transversal es multiplicada por el valor medio típico de **Porosidad Efectiva**, entregando como resultado una medida de caudal en m^3/s , finalmente multiplicando este resultado por el gradiente hidráulico (i).

9.4 Estimación de retornos por infiltración de agua de riego.

Los retornos de agua de riego surgen de la ineficiencia de los sistemas de riego, puesto que ningún sistema de riego ofrece una eficiencia del 100 % (Antúnez y Felmer: 2009). La infiltración de agua de riego será el porcentaje restante de la eficiencia de riego. Una vez conocida la demanda de agua de los cultivos, la superficie ocupada por estos y la eficiencia de riego, es posible estimar la cantidad de agua que se infiltra mensualmente y anualmente, la cual ingresa o regresa al acuífero, según la procedencia del agua de riego.

Para estimar los retornos de agua de riego de cultivos, es necesario primero determinar la **Demanda de agua neta de los cultivos (Dn)**, que es la cantidad de agua que se ha de suministrar a la zona radical del cultivo mediante el riego. El cálculo de (Dn) se obtiene descontando la **evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (ETc)**, de la cantidad de agua aportada por la **Precipitación Efectiva (Pe)**³², que representa la fracción de la precipitación que contribuye a satisfacer la ETc de un cultivo ($Dn = ETc - Pe$), (Antúnez y Felmer: 2009: 68)³³. Cuando se determina ETc para un periodo sin precipitaciones, entonces la Dn es igual a la ETc.

En el caso de la zona de estudios, donde la escorrentía superficial es cero o tan cercana a cero que es posible considerarla como insignificante, el valor de la precipitación efectiva será equivalente a la precipitación media mensual de la cuenca.

Como se ha mencionado, las eficiencias de riego nunca alcanzan el 100 %, por lo que es necesario ajustar la demanda de agua a las eficiencias de riego, surgiendo el concepto de **Demanda de agua bruta de los cultivos (Db)**, siendo esta la cantidad de agua que realmente se almacena en la zona radical de los cultivos. Mostrándose en la siguiente ecuación: (Antúnez y Felmer: 2009).

$$Db = \frac{Dn}{Efr} * 100$$

Donde:

Db: Demanda de agua bruta (mm/día)

Dn: Demanda de agua neta (mm/día)

Efr: Eficiencia de riego (%)

³² Según Diccionario Hidrológico de la WMO-UNESCO: En agricultura, parte de la lluvia que permanece en el suelo y contribuye al crecimiento de las cosechas.

³³ Antúnez y Felmer (2009) *Boletín del Nodo de Riego en el Secano, Región de O'Higgins*.

Presentándose ahora una tabla con las eficiencias de riego según los diversos métodos utilizados (ver tabla 6).

Tabla 6. Eficiencia de aplicación de agua según método de riego utilizado.

Método de Riego	Eficiencia de aplicación (%)
Tendido	30
Surco	45
Borde Recto	50
Borde en Contorno	60
Pretilos	60
Taza	65
Californiano	65
Aspersión	75
Microjet	85
Goteo (cinta)	90

Fuente: CNR (2000)³⁴

9.5.1 Determinación de cultivos, superficies y métodos de riego.

La metodología de como determinar los diferentes cultivos y su superficie de manera preliminar, fueron explicados en el Capítulo 10.2.3.5, (delimitación de diferentes cultivos y su superficie usando Sistemas de Información Geográficos) y su identificación mediante visitas a terreno.

Se propone utilizar esas mismas visitas a terreno para identificar el método de riego de cada polígono de cultivo. Usando un dispositivo GPS para la obtención de coordenadas e identificación de los polígonos en terreno.

9.5 Análisis de variaciones del nivel estático del acuífero.

Para ello se realiza un análisis estadístico de los registros históricos de nivel estático de pozos de observación presentes en el acuífero. Esta información luego es contrastada con la obtenida del balance hídrico del acuífero Chacabuco-Polpaico.

El comportamiento del nivel freático del acuífero permite establecer si la recarga ha llevado a un balance positivo o negativo de las reservas del acuífero en las actuales condiciones de explotación y proyectar la tendencia de este en el tiempo. Ello se contrasta con las tendencias de los volúmenes de agua de infiltración, información proporcionada por el balance hídrico como diferencial de la suma de las precipitaciones y los caudales registrados por los cursos de agua. Pero lamentablemente, el área de estudio no posee estaciones fluviométricas que puedan entregar esta información, por lo que se entiende como escorrentía el cálculo simple de restar la evapotranspiración a las precipitaciones anuales.

Como procedimiento estadístico inferencial se realizarán modelos de regresión entre los datos de niveles estáticos de pozos (mediciones mensuales y promedios anuales) y los datos de

³⁴ CNR. (2000) Estimación de la demanda de agua en los cultivos.

precipitaciones (mensuales y anuales), en búsqueda de determinar en qué grado la variable independiente (precipitaciones) influye en la variable dependiente (niveles estáticos de pozos).

La idea de este análisis inferencial es determinar si las fluctuaciones de los niveles estáticos de pozos propuestos en el punto anterior, son causadas por acción natural (variaciones temporales de precipitaciones) o por acción antrópica (sobre explotación de pozos).

Actualmente no existen datos de las cantidades de agua extraída por día, mes o año desde pozos con derechos de aprovechamiento de agua. Los volúmenes anuales de agua entregados como derecho de aprovechamiento no son fiscalizados, por lo tanto no hay datos para generar una regresión entre niveles estáticos de pozos y volúmenes de extracción de agua diaria, mensual o anual.

Por lo tanto la influencia de las extracciones antrópicas sobre las fluctuaciones mensuales y anuales de niveles freáticos de pozos, será inferida o deducida a partir del grado de influencia obtenido de las precipitaciones sobre los pozos. Tomando estas dos variables (precipitaciones y extracciones antrópicas), como las principales que explican las variaciones de nivel freático.

9.6 Estimación de extracción artificial de agua del acuífero.

Se digitalizan y exportan en formato JPG, las cartas del Instituto Geográfico Militar correspondientes a las comunas de Colina y Tiltil, para luego georreferenciarlas. Estas cartas IGM, del año 1970, tienen una escala 1:50.000, Datum PSAD 56 y muestran los pozos de derechos de agua entregados con anterioridad a la creación de la DGA, por instituciones como la CORFO.

Las cartas IGM con la información de los pozos, una vez digitalizadas, son georreferenciadas usando el SIG Arcgis 10.1, para luego proceder a digitalizar los pozos, creando un archivo Shape de puntos. A este archivo se le asocia una tabla de atributos con los datos de: Propietario, Año de construcción y Caudal entregado.

Para los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados después de la creación de la DGA, se utiliza una tabla Excel con la base de datos de derechos de agua con información que se encuentra actualizada hasta mayo de 2016, utilizando para esto la información disponible en el **Catastro Público de Aguas (CPA)**³⁵.

Con los volúmenes de agua de extracción anual otorgados como derechos definitivos, los que son almacenados como tabla Excel por la DGA, además de los volúmenes de extracción derivados de los caudales otorgados por instituciones como CORFO, se efectúa una sumatoria de la extracción, para estimar la salida artificial teórica anual de agua desde el acuífero en estudio (volumen legalmente permitido).

³⁵ **Catastro Público de Aguas**: Software de almacenamiento y manejo de información de derechos otorgados y de solicitudes de derechos de aprovechamiento de agua, de uso interno de la DGA.

La información de los derechos de agua otorgados muestra cuánta agua se puede extraer legalmente desde el acuífero, pero no refleja la extracción real de agua, la cual puede ser menor o incluso mayor que la que ha sido otorgada por derecho de extracción.

La extracción artificial de agua del acuífero se refiere a la extracción destinada a los distintos sectores económicos del país: **Agricultura, Industria, Minería y Agua potable**. En el caso de la agricultura, se utilizarán los cálculos realizados para estimar la **Demanda de agua bruta de cultivos** explicada en el capítulo 10.5, en el caso de la Minería, sólo es posible solicitar información de extracciones de agua relacionada con el Relave Ovejerías de CODELCO, a través de Ley de Transparencia Pública, y luego extrapolar esta información al relave Las Tórtolas (propiedad de Anglo American) por ser esta una empresa privada y no tener obligación de entregar esta información.

En el caso de extracción para producción de agua potable, se elevará una solicitud de información de Transparencia Pública a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), pidiendo la información de extracciones de aguas subterráneas destinadas a la producción de agua potable urbana (Huertos Familiares) y el consumo de agua de las APRs del área de estudio.

Finalmente en el caso de la Industria, es difícil estimar este dato, ya que se trata de empresas privadas que no tienen obligación de entregar información a terceros, por lo que se omitirán estos valores.

9.7 Estimación del rendimiento sustentable del acuífero.

Se estimará la recarga efectiva media anual de agua del acuífero usando la ecuación de Drenaje de (Healy: 2010) $D = P - ET - R - \Delta S$, donde una vez calculados todos los elementos del balance hídrico en los objetivos anteriores, se procede a resolver la ecuación, logrando con esto determinar el volumen medio anual de recarga efectiva del acuífero (D), además mostrando que porcentaje representa la recarga efectiva de la precipitación media anual. (Recarga positiva o negativa).

En búsqueda del rendimiento sustentable, se comparará la estimación de recarga media anual con la estimación de extracción anual antrópica, y con este resultado se evaluarán los posibles impactos adversos en el acuífero, si es que la tasa de extracción antrópica supera la tasa de recarga media anual.

Con este cruce de información, se procede a generar las conclusiones de este estudio, donde se evalúa si la recarga de agua actual del acuífero y los escenarios climáticos futuros permiten, bajo una óptica sustentable, la entrega de nuevos derechos de aprovechamiento provisionales, a partir de lo cual se genera una recomendación, acerca del cese o no de entrega de derechos provisionales de aguas en el acuífero Chacabuco-Polpaico, pasando a convertirse este sector en una nueva **Zona de Prohibición** en el país.

X. Resultados

10.1 Aspectos físicos del Área de Estudio.

10.1.1 Topografía

La topografía de superficie de suelo juega un rol importante tanto para la recarga difusa como para la recarga concentrada, (Healy: 2010) en los siguientes factores:

Pendientes: Las pendientes pronunciadas tienden a tener bajas tasas de infiltración y altas tasas de escorrentía.

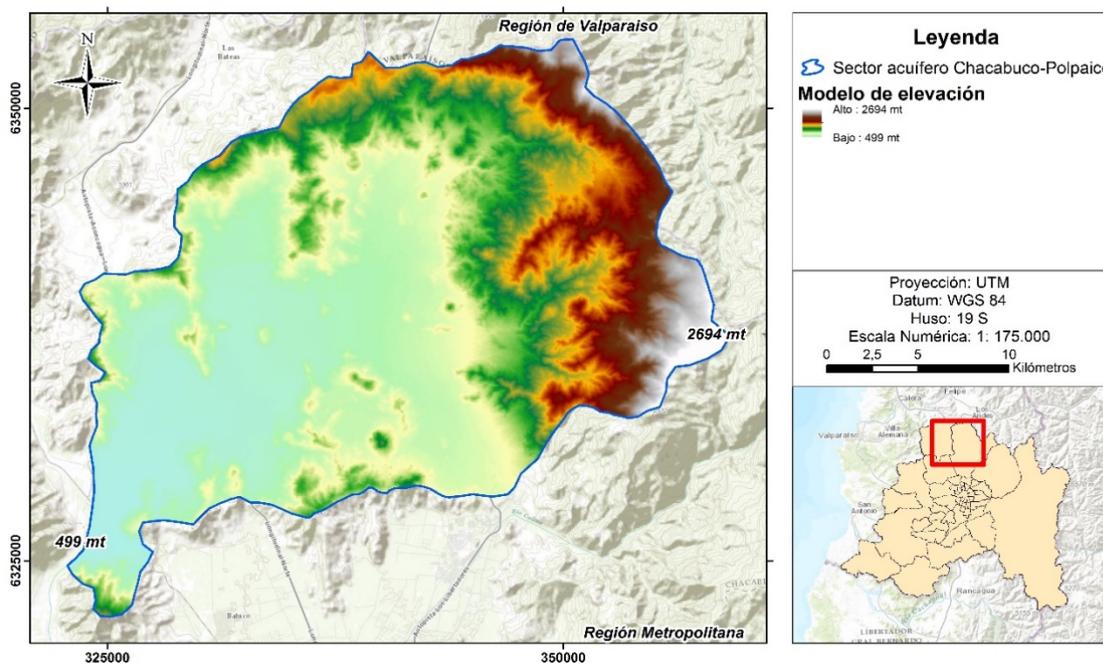
Orientación: Presentando mayor evapotranspiración en la orientación de solana y menor en la de umbría.

Altitud: Provocando efectos de precipitación orográfica, la cual aumenta con la altitud, además de delimitar la precipitación líquida de la sólida.

Depresiones: Las depresiones en el terreno ayudan a disminuir la escorrentía superficial al acumular el agua en sus cavidades.

En el caso del área de estudio, la cartografía topográfica muestra con claridad la distribución de los relieves del área de estudio, pudiéndose identificar las zonas montañosas a la derecha de esta, con una altura máxima de 2694 msnm, lo que sugiere que eventualmente puede producirse precipitación sólida en esta zona. Las zonas bajas corresponden a los rellenos sedimentarios donde se asienta el acuífero de la cuenca (Figura 14), pudiéndose distinguir claramente las zonas de pendientes pronunciadas de alta escorrentía y las zonas de baja pendiente y de menor escorrentía superficial.

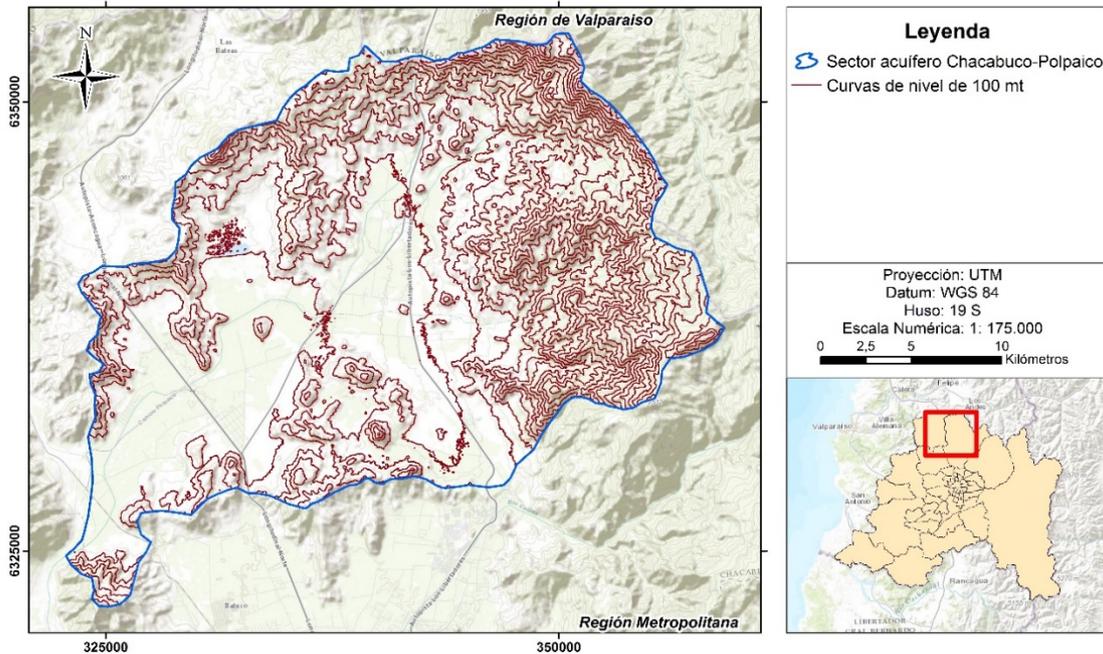
Figura 14. Cartografía de topografía.



Elaboración propia

Este Modelo de Elevación fue elaborado a través de la unión de cuatro DEMs de 30 metros de pixel, de ASTER GDEM. Creando con esto un mapa de curvas de nivel (Figura 15) permite una mejor interpretación de la configuración topográfica del sector. En base a ella se genera la cartografía de pendientes areales.

Figura 15. Curvas de nivel.

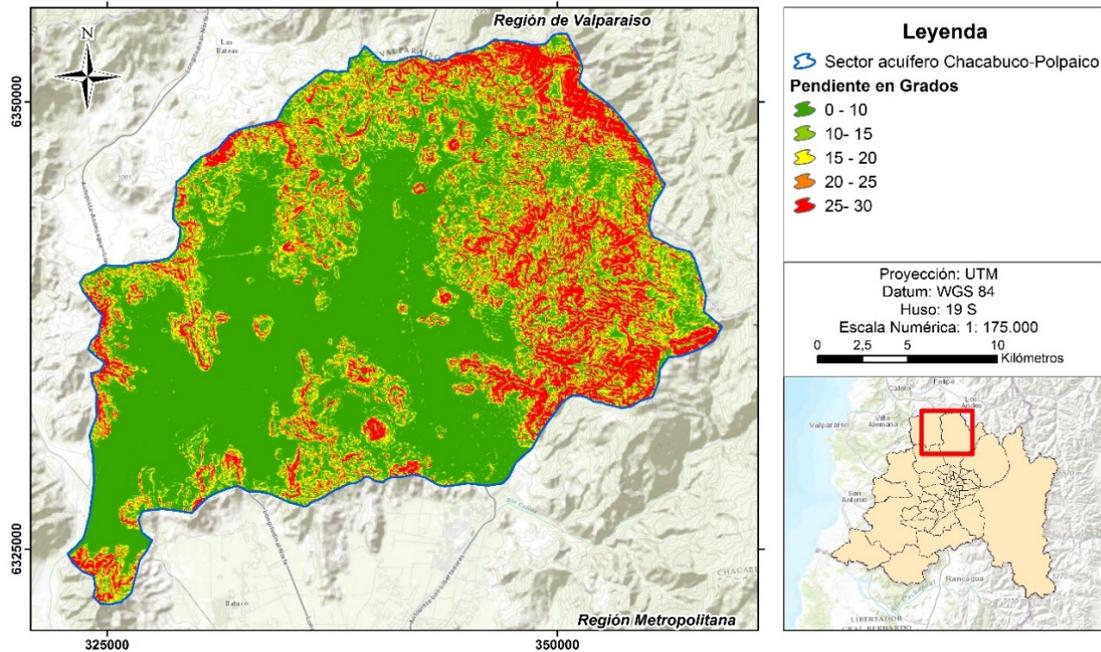


Elaboración propia

Las curvas de nivel fueron obtenidas con la herramienta CONTOUR de Arcgis 10.1, desde el DEM generado para la cartografía anterior (DEM de pixel de 30 metros de ASTER GDEM).

En la cartografía de pendientes se observa un claro predominio areal de los gradientes bajo los 10° de inclinación, así como un predominio de gradientes moderados a fuertes en los sectores montañosos y cabeceras de los sistemas de drenaje superficial (Figura 16), siendo las zonas de baja gradiente y baja altitud, las que poseen las cualidades para generar la mayor infiltración de agua desde la precipitación.

Figura 16. Cartografía de pendientes.

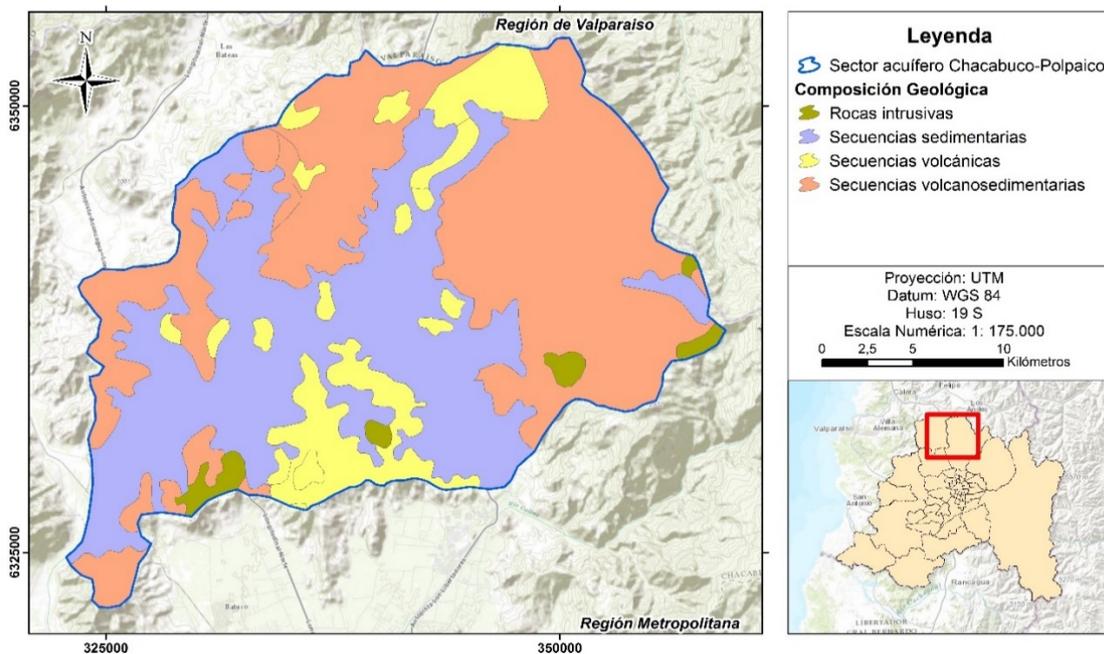


Elaboración propia en base al DEM de ASTER GDEM.

10.1.2 Geología

En esta cartografía (Figura 17) puede verse como las zonas montañosas están formadas por secuencias volcano-sedimentarias, o secuencias volcánicas. Las secuencias sedimentarias equivalen a las zonas donde se ubica la formación acuífera dentro de la cuenca.

Figura 17. Composición geológica.



Elaboración propia

Considerando los efectos de la tectónica orogénica en las formaciones rocosas, principalmente el alto grado de fracturamiento resultante, así como la naturaleza semipermeable de algunas de ellas (Ej.: brechas volcánicas), se considera que los relieves montañosos del área en estudio cumplen también un rol hidrogeológico, aunque de menor magnitud en cuanto a almacenamiento y aporte a la napa del sustrato sedimentario, así como en cantidad y velocidad del mismo.

En cuanto a la delimitación del acuífero, desde el punto de vista de la mayor extensión de las formaciones sedimentario-volcánicas, puede asumirse la existencia de algún grado de comunicación y trasvase de agua con acuíferos adyacentes a través de la incuantificable red de grietas presentes en la masa rocosa.

10.1.3 Suelos

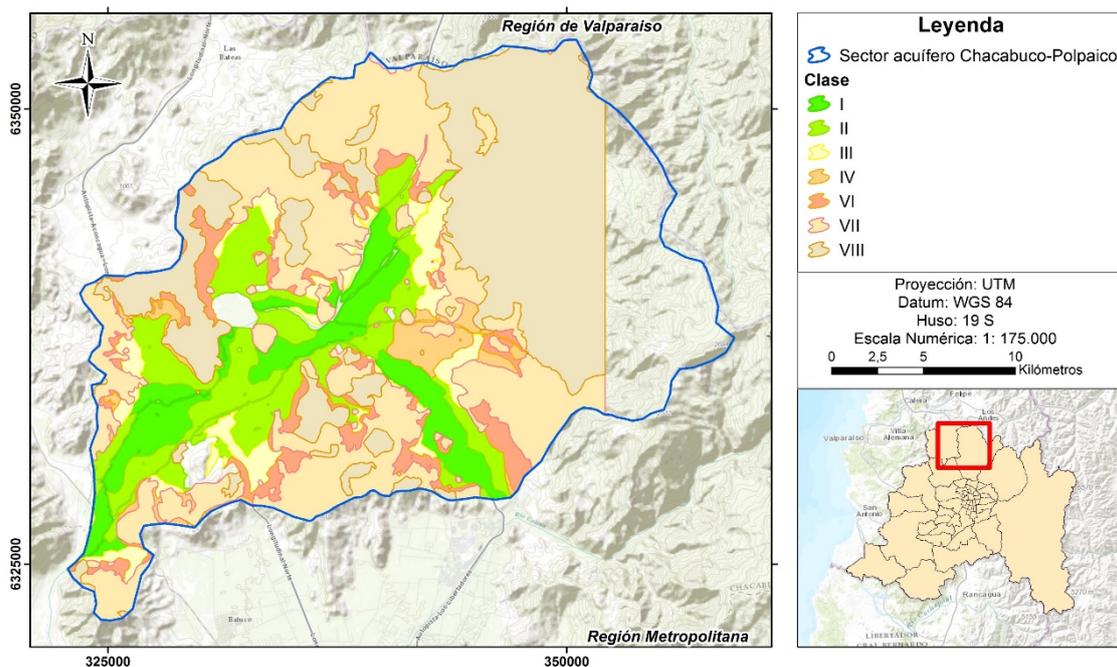
La configuración de los suelos, específicamente su permeabilidad, pueden afectar grandemente lo procesos de recarga (Healy: 2010), de tal manera que:

Los materiales con granos más gruesos presentan mayor espacio intersticial, lo que los hace más permeables, favoreciendo con ello la recarga a través de la infiltración.

Los materiales más finos (arcillas, limos) son más impermeables, lo que favorece la escorrentía superficial y dificulta la recarga.

La mayor permeabilidad de los materiales facilita los movimientos de aguas superficiales hacia las subterráneas y viceversa, de esto modo se favorecen los procesos de recarga como también los de descarga.

Figura 18. Clases de suelo.



Elaboración propia con Shape de CIREN: 1996

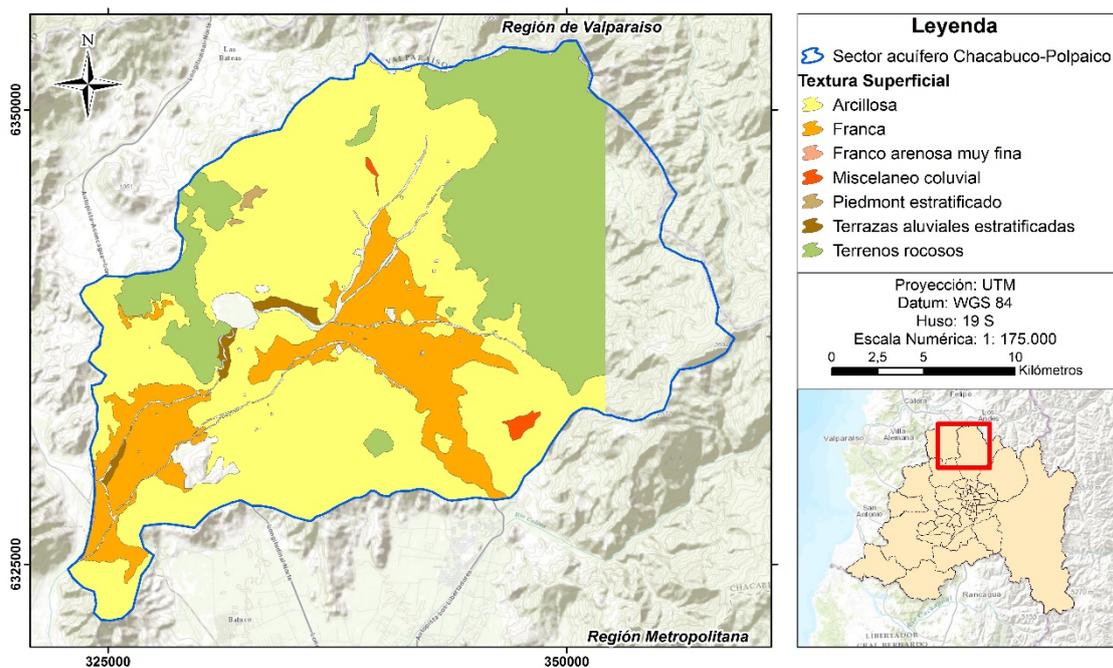
La cartografía de clases de suelos del área de estudio fue elaborada a partir de los estudio de suelos disponibles. En las zonas más planas predominan los suelos de muy buena y buena calidad (clases I y II respectivamente), en los que se concentra la actividad agrícola del sector. (Figura 18).

En esta cartografía se puede observar la diferenciación entre series de suelos de fondos de valle y las series de suelos correspondientes a conos aluviales y de deyección menores (Clases III a VI), así como aquellas correspondientes a formas de base de laderas (depósitos coluviales con clases VII a VIII).

En cuanto a la textura de los suelos, en la Figura 19 puede observarse la predominancia en extensión de la textura arcillosa, lo que viene a favorecer la escorrentía superficial, mientras que los suelos ubicados sobre los rellenos sedimentarios son de textura franca, lo cual favorece la infiltración.

Los terrenos rocosos se presentan en las zonas montañosas y puede asumirse cierto grado de permeabilidad tanto adquirida como por la naturaleza litológica de los materiales.

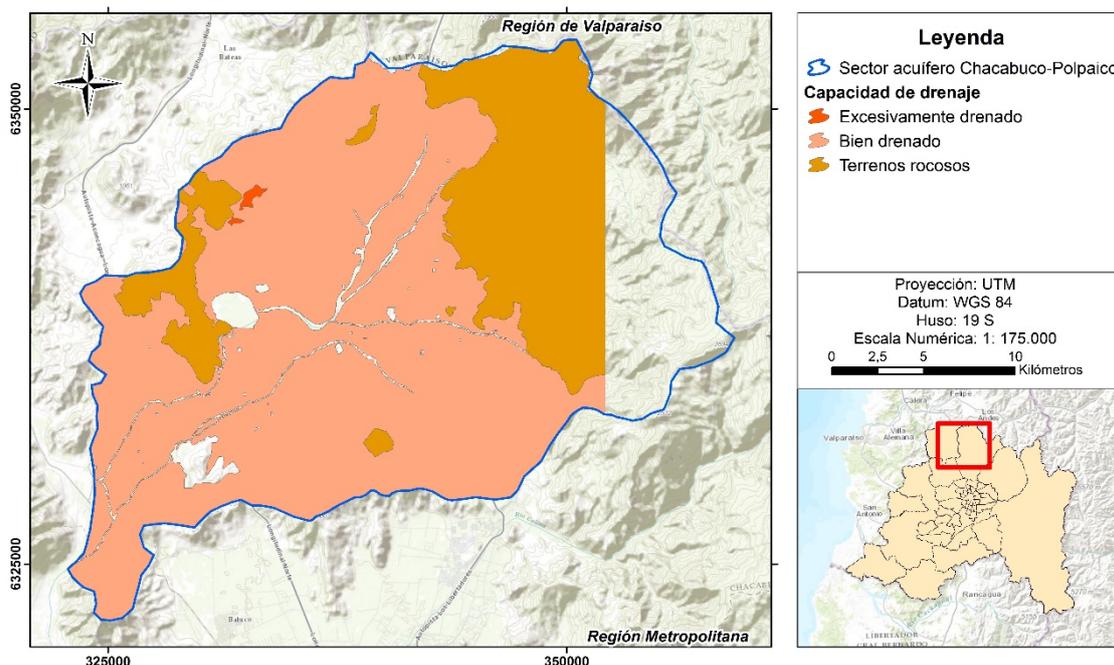
Figura 19. Textura de suelo.



Elaboración propia con Shape de CIREN: 1996

En cuanto a la capacidad de drenaje de los suelos (Figura 20), puede observarse una predominancia de los suelos bien drenados (suelos de textura arcillosa o franca). Favoreciendo esto la infiltración de las precipitaciones y de los excedentes de riego en los suelos agrícolas.

Figura 20. Capacidad de drenaje de suelo.



Elaboración propia con Shape de CIREN: 1996

10.1.4 Hidrología

Hidrológicamente, el área de estudio corresponde a la subsubsub-cuenca del Estero Chacabuco, perteneciente a la subsub-cuenca del Estero Lampa y esta a la sub-cuenca del Río Mapocho, afluente principal de la cuenca del Río Maipo. (Figura 21).

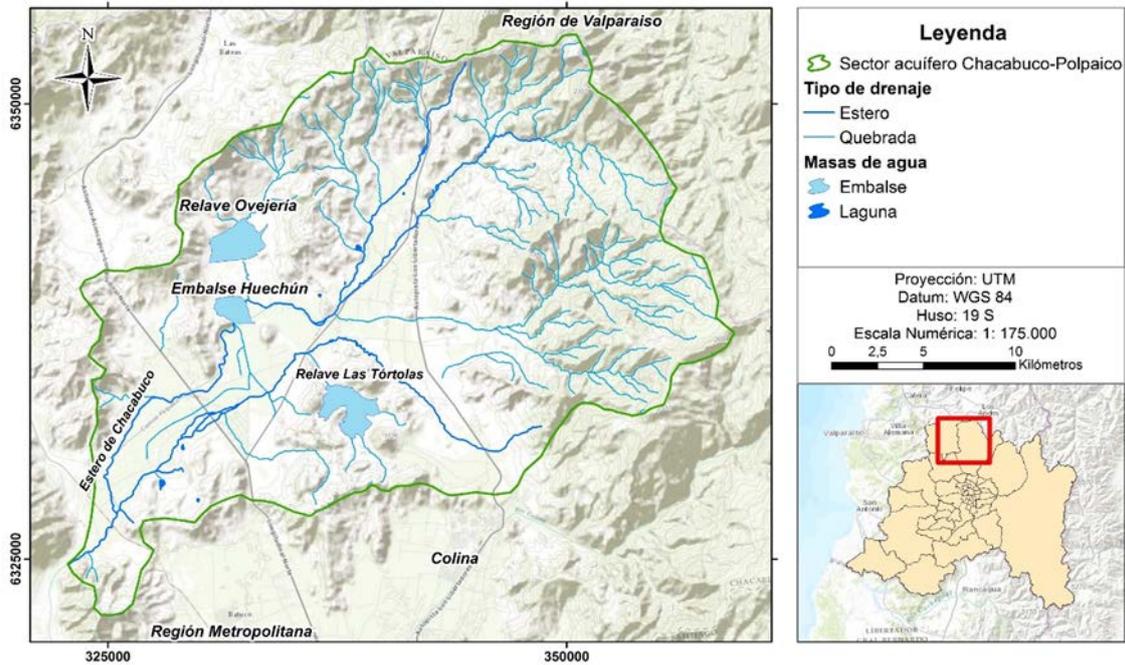
Información de visitas a terreno por parte de la DGA RM, indican que el caudal del Estero Chacabuco (cauce principal del área de estudio), posee un carácter de *efímero*, queriendo decir esto que el río sólo presenta escorrentía como respuesta a precipitaciones, estando seco la mayor parte del año (ver fotos de la DGA, figuras 46 y 47).

Del análisis de la cartografía de elevaciones respecto de la altitud de la isoterma de 0° C de invierno, se deduce que el régimen de esta cuenca es predominantemente pluvial, presentándose precipitación sólida ocasional en invierno en las partes más altas o nacientes, donde se registra una elevación máxima de 2.694 msnm.

En su superficie presenta dos grandes espejos de agua, siendo estos dos tranques de relaves mineros: el Tranque Las tórtolas y el Tranque Ovejería. Estos poseen sistemas de transporte de desechos mineros a través de tuberías desde cuencas altas de la Cordillera de Los Andes, pero que sólo eliminan esa entrega de agua por evaporación, porque poseen medidas que impiden la infiltración de aguas contaminadas hasta el acuífero.

Estos relaves cuentan con una barrera hidráulica, la cual es una cortina de pozos de bombeo, transversal a la salida del acuífero del tranque, cuyo objetivo es captar la pluma de aguas claras, retornarlas al tranque y así, evitar la mezcla de estas con las aguas subterráneas acuífero principal del Chacabuco-Polpaico. (CODELCO, División Andina: 2012: 25).

Figura 21. Red hidrográfica.



Elaboración propia

En cuanto al Embalse Huechún, este fue construido para almacenar agua del Estero Chacabuco, pero como este último ya no posee escorrentía superficial, este embalse se presenta seco en la actualidad, (imagen de Google Earth, Figura 23). Usando la secuencia de imágenes históricas del mismo software, se logra observar que la última imagen captada del embalse con presencia de agua, fue del 04-10-2005 (Figura 22).

Figura 22. Embalse Huechún (04-10-2005).



Fuente: Google Earth.

Figura 23. Embalse Huechún (23-02-2016).

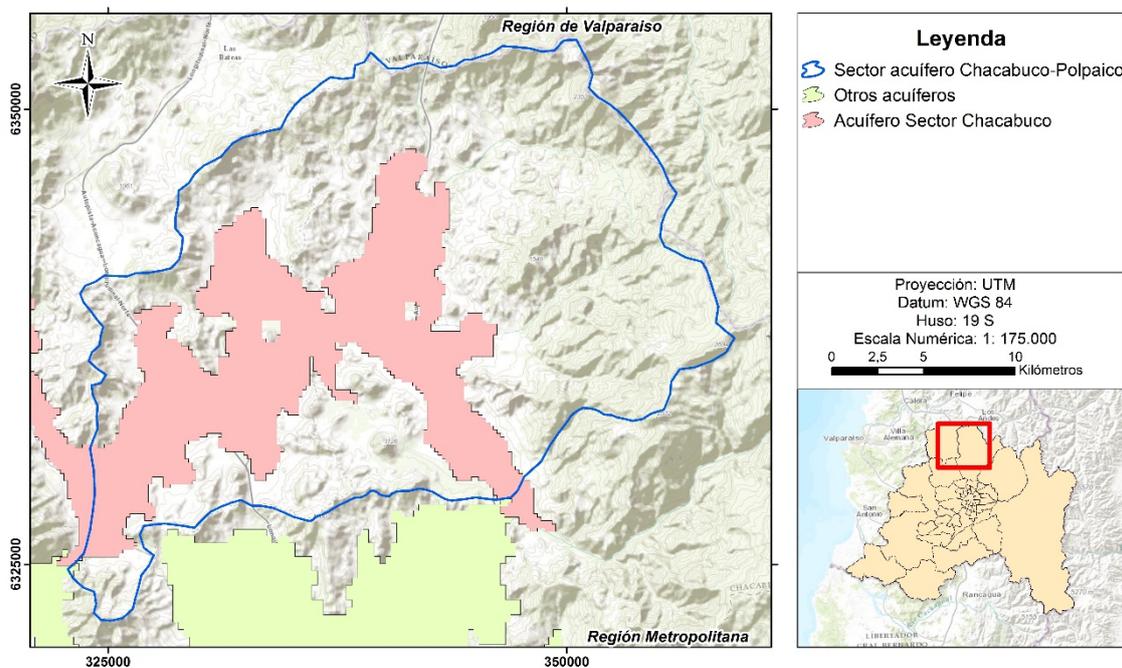


Fuente: Google Earth.

10.1.5 Hidrogeología

En la cartografía siguiente (Figura 24) se representa el acuífero modelado dentro de la cuenca de estudio, ubicándose en las partes más bajas y planas de la cuenca (zona del relleno sedimentario). Se indica en color rosado el área del acuífero, delimitado por rocas impermeables.

Figura 24. Acuíferos modelados.



Elaboración propia

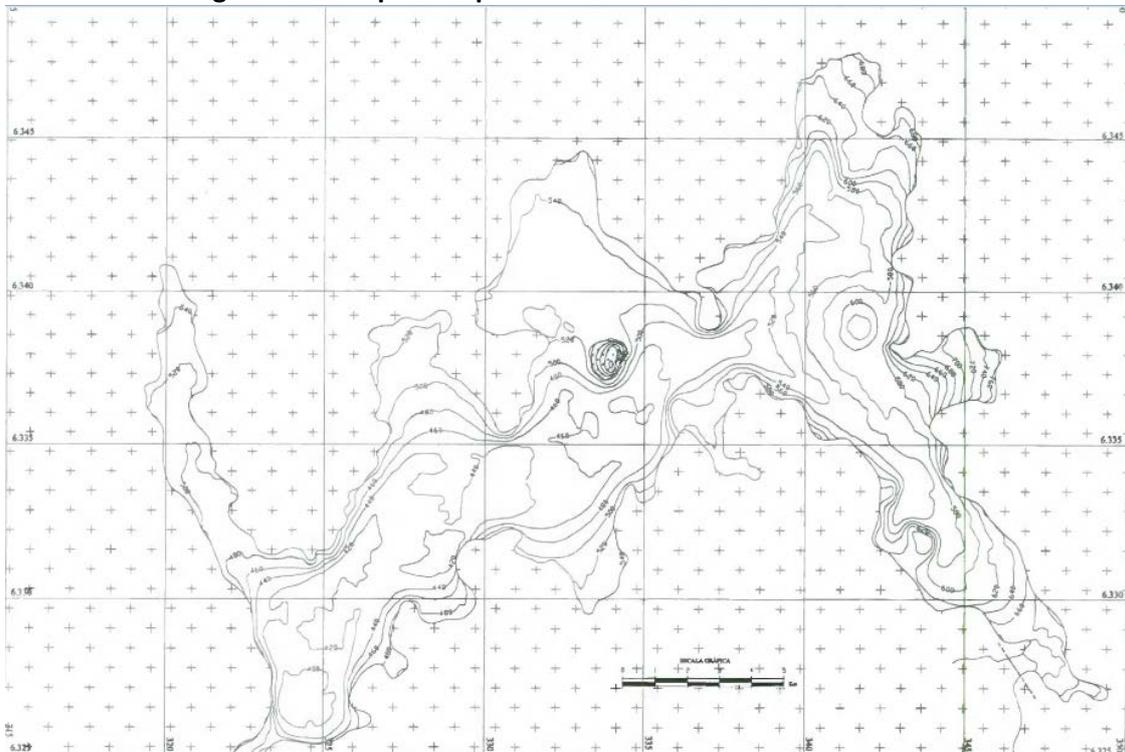
El análisis del acuífero de Chacabuco-Polpaico fue elaborado dentro del estudio llamado “Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuencas de los Ríos Maipo y Mapocho” DGA 2000/ SIT N°62.

Entre los principales resultados y conclusiones de este estudio se encuentran los siguientes:

- Descenso sostenido del nivel freático a partir de 1985 causado por la sobreexplotación de pozos, principalmente para uso de riego.
- Existencia de retornos de agua al acuífero en cantidades importantes, proviniendo esta agua del excedente del riego de cultivos agrícolas.
- Delimitación del acuífero.

Se presenta a continuación una cartografía de isohipsas de profundidad de relleno sedimentario, generada en el estudio de modelación de acuíferos de la Región Metropolitana.³⁶

Figura 25. Isohispas de profundidad del relleno sedimentario.



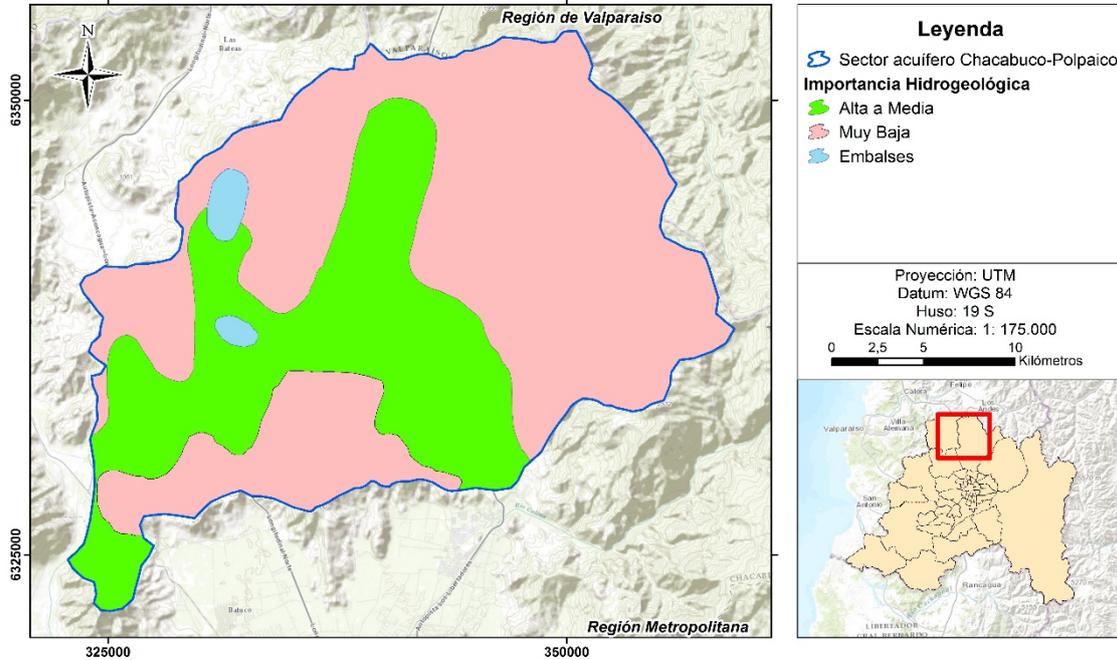
Fuente: DGA: 2000: F. 3-9. “Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuencas de los Ríos Maipo y Mapocho”.

De la figura 25 se desprende que las curvas de menor profundidad del relleno sedimentario (menor potencia del estrato sedimentario), se presentan en la desembocadura de la cuenca del sector acuífero Chacabuco-Polpaico (zona sur-poniente), por otro lado la mayor potencia del estrato sedimentario se presenta en la zona oriente de la cuenca, con valores entre los 600 a 700 metros de espesor bajo la superficie.

³⁶ DGA: 2000: F. 3-9. “Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuencas de los Ríos Maipo y Mapocho”.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona de relleno sedimentario es la que posee la mayor importancia, siendo el resto de la cuenca despreciable en términos de explotación hidrogeológica, aunque esas zonas altas se consideran como las zonas de recarga de la cuenca. (Figura 26)³⁷

Figura 26. Importancia hidrogeológica.

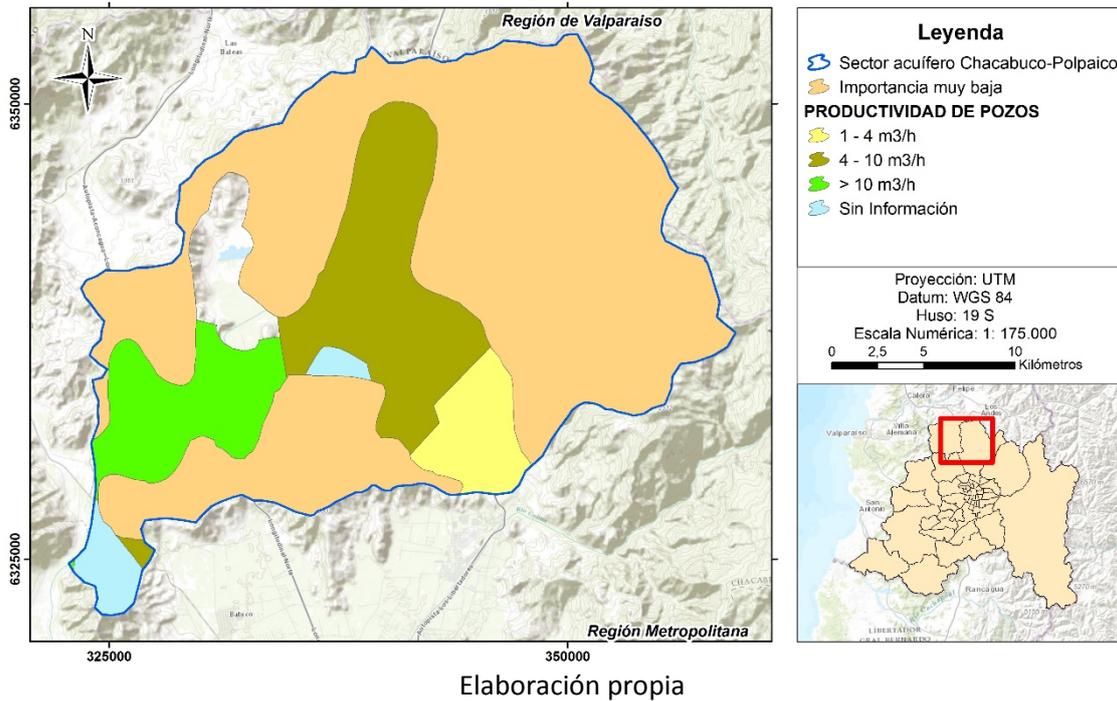


Elaboración propia

En cuanto a los pozos, puede observarse que las zonas de mayor productividad son las zonas planas del relleno sedimentario, cercano a la salida de la cuenca (productividad mayor a 10 m³/h o 2,7 l/s). El resto de la zona de relleno sedimentario posee una productividad menor (de 4 a 10 m³/h o de 1,1 a 2,7 l/s), teniendo las zonas altas y de mayor pendiente una productividad muy baja o inexistente. (Figura 27)

³⁷ DGA. (2008). Estudio del mapa hidrogeológico nacional, escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000.

Figura 27. Productividad de pozos.



10.1.6 Climatología.

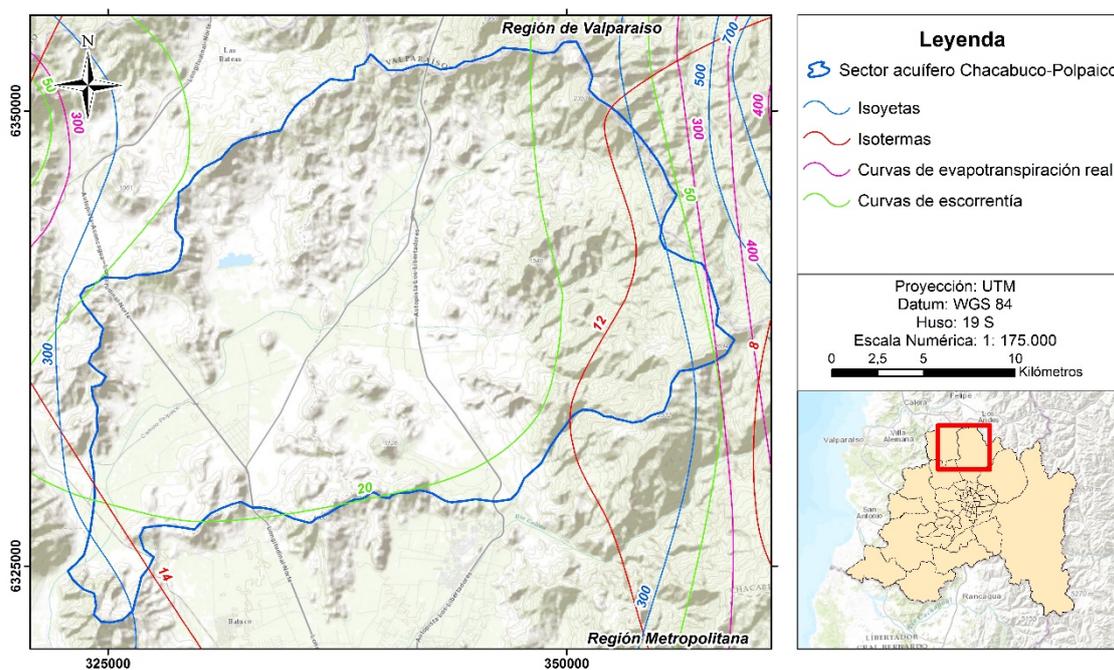
La variable climática posee factores que afectan los procesos de recarga; generando variabilidad diaria, mensual, estacional y anual. Los factores climáticos más importantes que determinan los procesos de recarga son las Precipitaciones y la Temperatura del aire, siendo factores de menor importancia: la Radiación solar, la Velocidad del viento, la Humedad del aire y la Presión atmosférica (Healy: 2010).

Las precipitaciones muestran la *Recarga Potencial*, mientras el resto de variables climáticas son usadas para calcular la *Evapotranspiración*, ambos son componentes de cualquier cálculo de *Balance Hídrico*.

Con una precipitación media anual de 265 mm, el área de estudio corresponde a una zona semiárida, donde la *Recarga Concentrada* desde corrientes efímeras, a menudo es la dominante (Healy: 2010).

La cartografía siguiente (Figura 28) fue elaborada con las distintas isolíneas de balance hídrico, derivadas del estudio de Balance Hídrico Nacional del año 1988, de la Dirección General de Aguas.

Figura 28. Cartografía de balance hídrico.



Elaboración propia

A partir de Figura 28 se pueden desprender algunos datos climáticos generales, como que la precipitación media de la cuenca estaría entre los 200 y los 300 mm, y que la temperatura media es cercana a los 13 grados Celsius.

Se observa también una evapotranspiración media de la cuenca cercana a los 300 mm, lo cual deja entrever que la mayor parte de lo que precipita se devuelve a la atmósfera por este proceso, y así simple vista muestra una baja tasa de recarga del acuífero. (Se debe destacar que estos datos fueron generados en el año 1988, presentando claramente cambios a la fecha de este informe; 2017).

10.1.7 Actividad agrícola y usos de suelo.

Healy: 2010 señala que el tipo de vegetación (autóctona y/o cultivos) y los usos de suelo, tienen profundos efectos en los procesos de recarga, favoreciendo o restringiendo la infiltración.

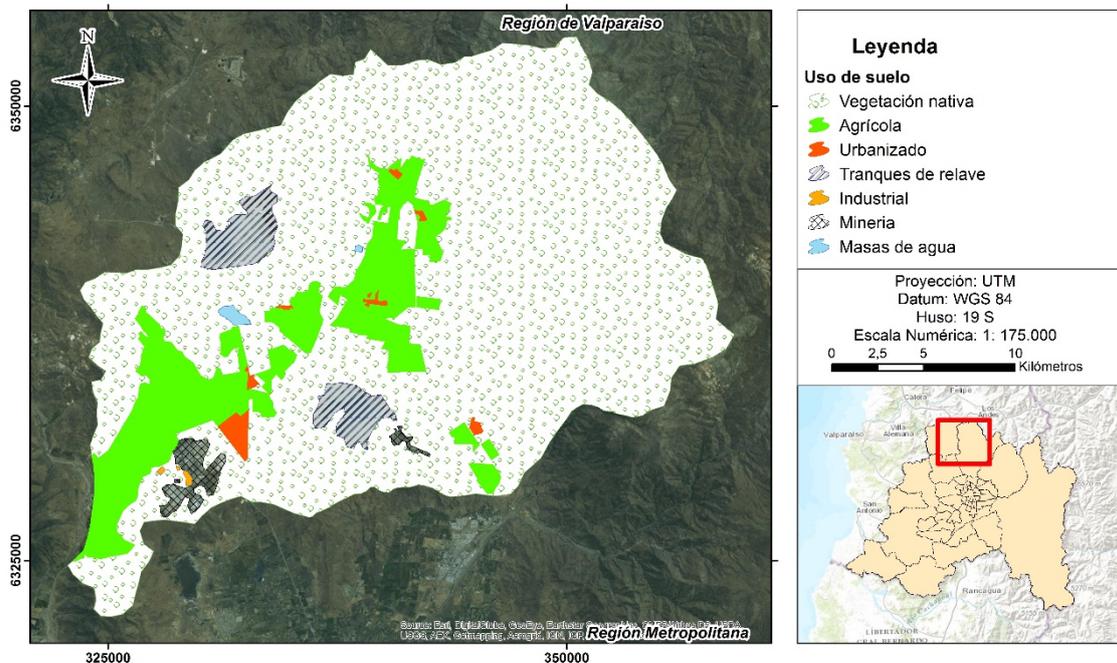
Los tipos y densidades de vegetación influyen en los patrones de evapotranspiración, donde una superficie vegetada tiene típicamente una tasa de evapotranspiración más alta que una sin vegetación, además la profundidad de las raíces de las plantas, influye en la eficiencia para extraer agua subterránea (Healy: 2010).

Los árboles generalmente pueden alcanzar con sus raíces el nivel freático, en cambio las plantas menores (arbustos, gramíneas) sólo alcanzan la zona no saturada (Healy: 2010).

La cartografía de usos del suelo revela como gran parte de la zona de relleno sedimentario y a la vez de los suelos de mejor calidad y la principal formación acuífera, presenta la mayor cantidad de los terrenos agrícolas del área de estudio (Figura 29).

Los suelos “sin aptitudes agrícolas” se presentan con una cobertura vegetal compuesta por especies nativas arborescentes y/o matorrales, predominando la estepa de *Acacia caven* (Espino) junto con árboles y arbustos propios del bosque esclerófilo, con un estrato herbáceo de dinámica estacional, debido a la baja precipitación promedio de la cuenca, que alcanza un promedio de 265 mm anuales, concentrados en los meses de invierno.

Figura 29. Usos de suelo.



Elaboración propia

La única área urbana dentro del área de estudio corresponde a la localidad de Huertos Familiares, lo que genera una escasa superficie impermeabilizada que dificulte la infiltración de precipitaciones, el resto de localidades no alcanzan a ser consideradas áreas urbanas, pero para efectos hidrológicos son consideradas como áreas urbanizadas.

Los usos de suelo con denominación de Minería, corresponden uno a la extracción de caliza de Cerro Blanco (Junto a Huertos Familiares), y el otro la planta “Los Bronces” de chancado de minería de cobre de Anglo American S.A., cercana al relave “Las Tórtolas”.

Los dos tranques de relave corresponden a Las Tórtolas, propiedad de Anglo American S.A. y Ovejería, propiedad de CODELCO.

Con respecto a los tipos de cultivos, junto con el área respectiva dentro del área de estudio, serán expuestos en detalle en el capítulo 10.3.4.2.

10.2 Estimación de la recarga potencial de agua del acuífero.

Para estimar la recarga potencial del acuífero se procedió a realizar el cálculo de la precipitación media anual de la cuenca. En base a datos de precipitaciones de estaciones meteorológicas pluviométricas emplazadas tanto dentro del área de estudio como en las inmediaciones a esta.

Como la mayoría de las bases de datos de precipitaciones de las diferentes estaciones presentan datos faltantes (mutilaciones), se procedió a completar esos vacíos de información a través del **Método de las razones** (Villarroel: 2012)³⁸

Este método sirve para completar los datos faltantes de precipitación de una estación Asignada (A), usando la interpolación de datos del mismo periodo de tiempo de una estación Base (B), la cual no debe tener interrupciones; en este caso la estación Base es la estación de Quinta Normal.

Se debe determinar el periodo común para ambas series pluviométricas (A y B), luego ambas series, se calculan sus respectivos promedios para el mismo periodo (n) y con ambos promedios se determina el coeficiente Q de cada mes:

$$Q = \frac{\text{media de A}}{\text{media de B}}$$

Los nuevos valores de la estación asignada a ampliar (A_j) quedan determinados por la multiplicación del dato pluviométrico de Quinta Normal (B_j) por el coeficiente Q, a saber:

$$A_j = Q * B_j$$

Donde:

A_j son los nuevos datos calculados para la estación asignada (A).

B_j son los valores observados en la estación base (B), (Quinta Normal).

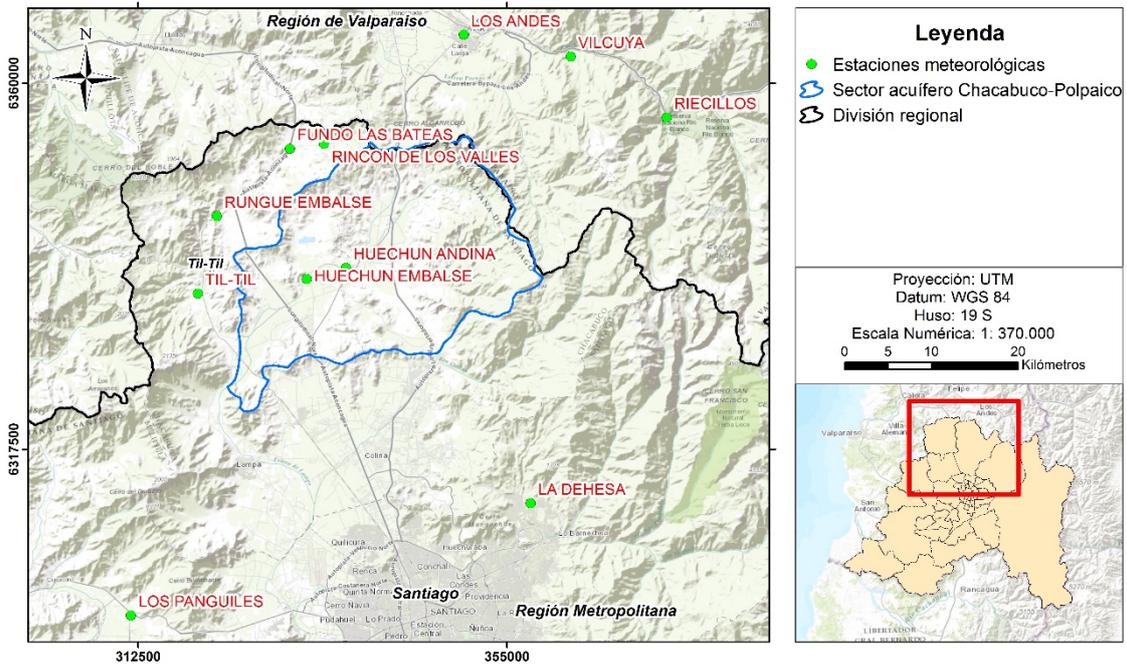
Una vez rellenados los datos faltantes de cada estación pluviométrica, con los registros de los mismos periodos de tiempo de la estación Quinta Normal, se procede a calcular la precipitación media de la cuenca.

Para ello se recurrió a los métodos de Polígonos de Thiessen, Isoyetas y Media aritmética. En el caso de la figura 30, se muestran las estaciones usadas para la realización del método de los Polígonos de Thiessen, estaciones presentes tanto dentro de la Región Metropolitana como dentro de la Región de Valparaíso.

En la figura 31 se indican los montos de las precipitaciones medias de cada estación meteorológica seleccionada (módulo pluviométrico anual), los cuales son empleados en la aplicación de los tres métodos de cálculo de precipitación media de la cuenca.

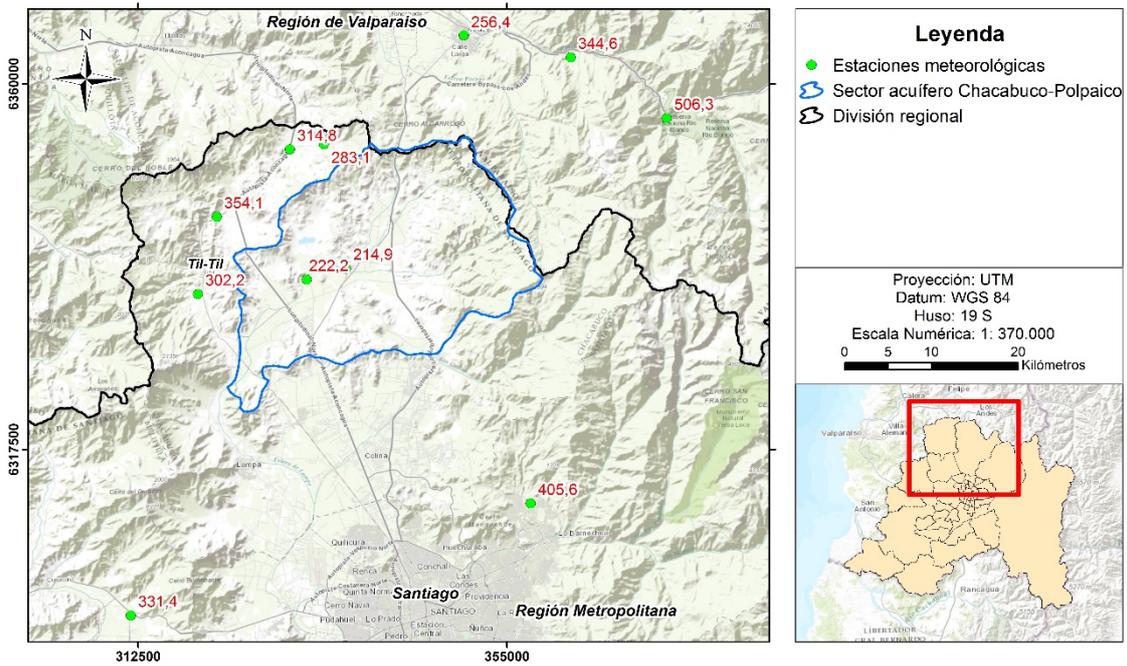
³⁸ Villarroel (2012). Caracterización del comportamiento de las precipitaciones en la cuenca del río Maipo-Mapocho a nivel regional y local.

Figura 30. Estaciones meteorológicas pluviométricas usadas.



Elaboración propia

Figura 31. Precipitaciones medias de estaciones usadas en los tres métodos.

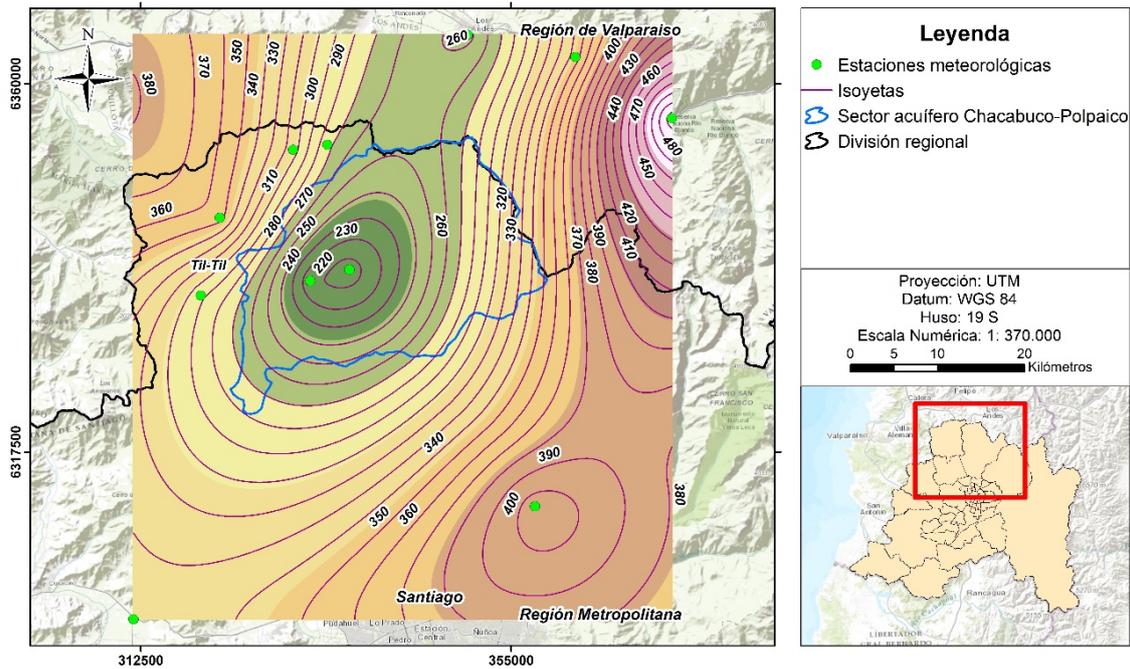


Elaboración propia

10.2.1 Método de las Isoyetas

Con la información generada en la figura 31, se crea un archivo Raster resultado del método de interpolación KRIGING, usando el SIG Arcgis 10.1, usando como factor Z, la precipitación anual media de las estaciones pluviométricas. (Figura 32)

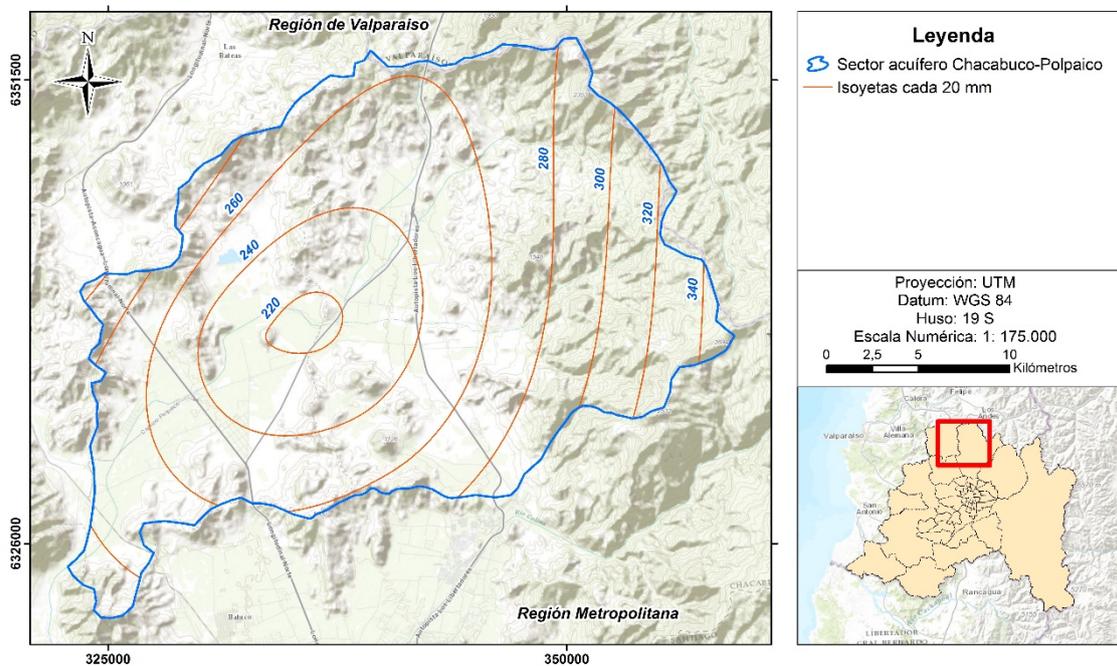
Figura 32. Raster de precipitación interpolada.



Elaboración propia

La cartografía de Isoyetas (Figura 33) es generada a partir del Raster de interpolación de puntos de igual precipitación media anual, mostrado en la cartografía anterior.

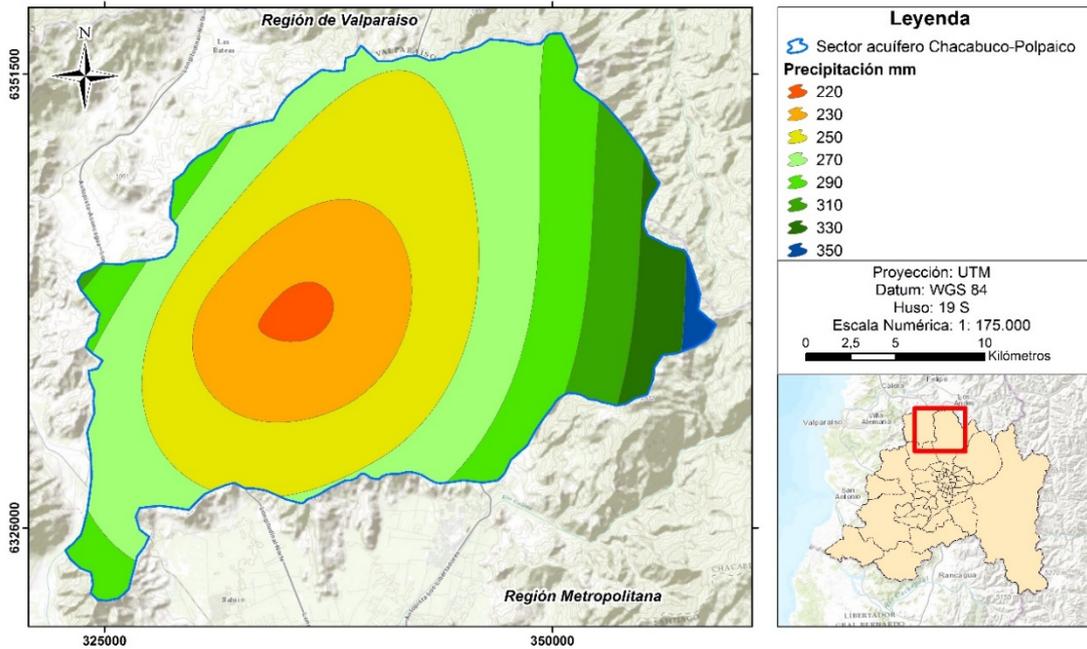
Figura 33. Cartografía de Isoyetas.



Elaboración propia

La cartografía anterior muestra la ubicación del sector de precipitación media mínima, el que corresponde a la isoyeta de 220 mm y el área de máxima precipitación media en la parte más alta de la cuenca, representado por las isoyetas sobre 300 mm, llegando a alcanzar 350 mm/año. Sobre esta base se genera la cartografía siguiente de áreas de precipitación media (Figura 34).

Figura 34. Áreas de precipitación media.



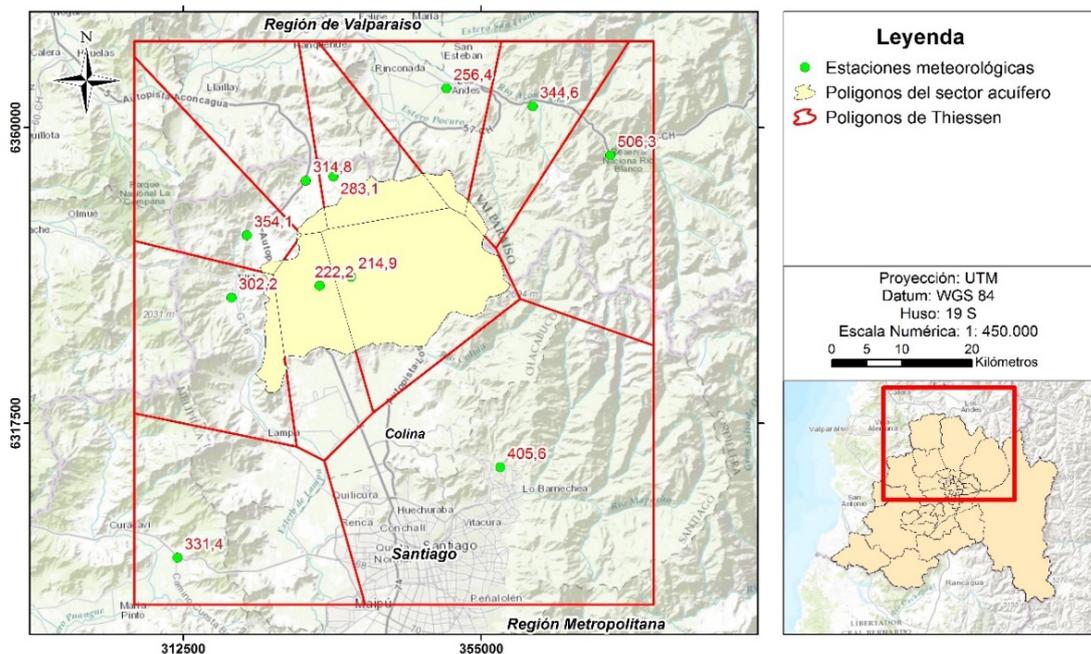
Elaboración propia

De acuerdo al método de las isoyetas, la precipitación media de la cuenca es de 265,04 mm por año, y el área de la cuenca es de 663,63 km², representando un volumen de agua de 175.890.354,9 m³/año, lo que corresponde al aporte promedio de agua de lluvia a la cuenca.

10.2.2 Método de los Polígonos de Thiessen.

Usando el Shape de estaciones meteorológicas que contiene por atributo la precipitación media anual, se obtiene la siguiente distribución de áreas por estación meteorológica (Figura 35).

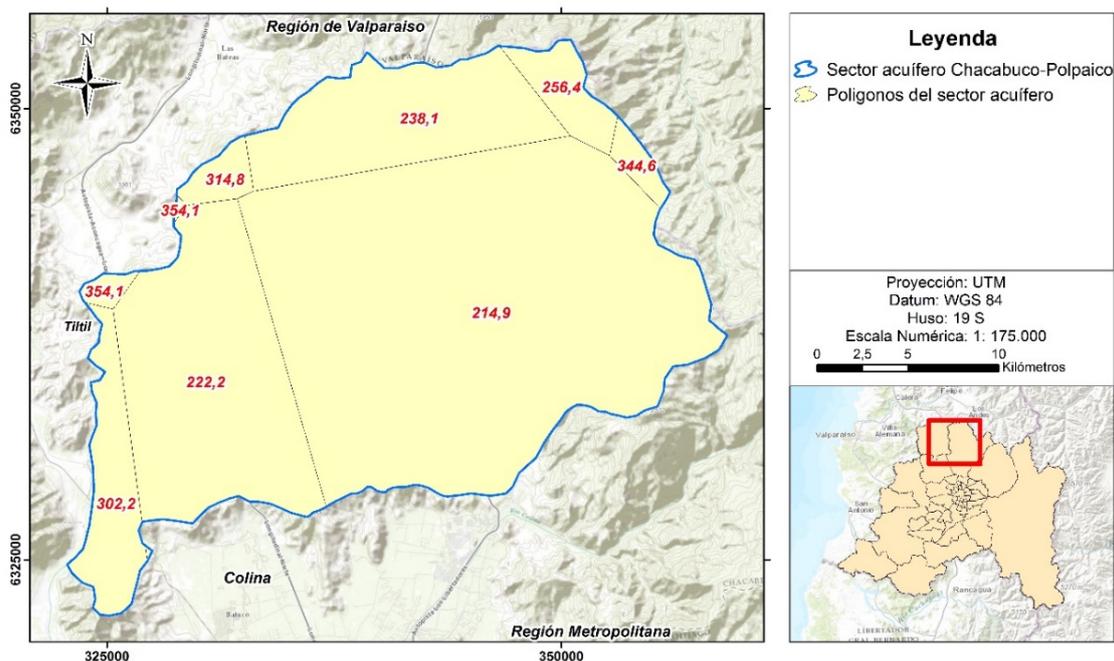
Figura 35. Polígonos de Thiessen de estaciones meteorológicas pluviométricas.



Elaboración propia

Con este método, se obtienen las siguientes áreas representativas para cada pluviómetro y la precipitación media correspondiente a cada uno de los polígonos resultantes. (Figura 36)

Figura 36. Polígonos de Thiessen de precipitaciones del área de estudio.



Elaboración propia

Como resultado de este método, la precipitación media de la cuenca resulta de 228,9 mm/año, y como el área de la cuenca es de 663.63 km², ello representa un volumen de agua de 151.906.513,1 m³/año, lo que expresa el monto anual de aporte de agua de lluvia a la cuenca.

10.2.3 Método de la media aritmética.

Al ser este método el simple cálculo de la media de los módulos anuales de precipitación, no requiere una mayor metodología que el cálculo de la media de las precipitaciones anuales de las estaciones que tienen injerencia en la cuenca, ya usadas en los dos métodos anteriores y presentados en la tabla 7.

Tabla 7. Cálculo de la precipitación de la cuenca con media aritmética.

Estación Meteorológica	mm anuales
Los Andes	256,4
Rincón de los Valles	238,1
Vilcuya	344,6
Huechún Andina	214,9
Fundo Las Bateas	314,8
Rungue Embalse	354,1
Huechún Embalse	222,2
Tiltit	302,2
Media	280,9

Elaboración propia

10.2.4 Resumen de resultados de recarga potencial anual.

Tabla 8. Resumen de precipitación media y volúmenes de recarga anuales.

Método	PP Media anual (mm)	Volumen recarga potencial anual (m3/año)
Isoyetas	265,04	175.890.354,9
Polígonos de Thiessen	228,9	151.906.513,1
Media aritmética	280,9	186.413.667

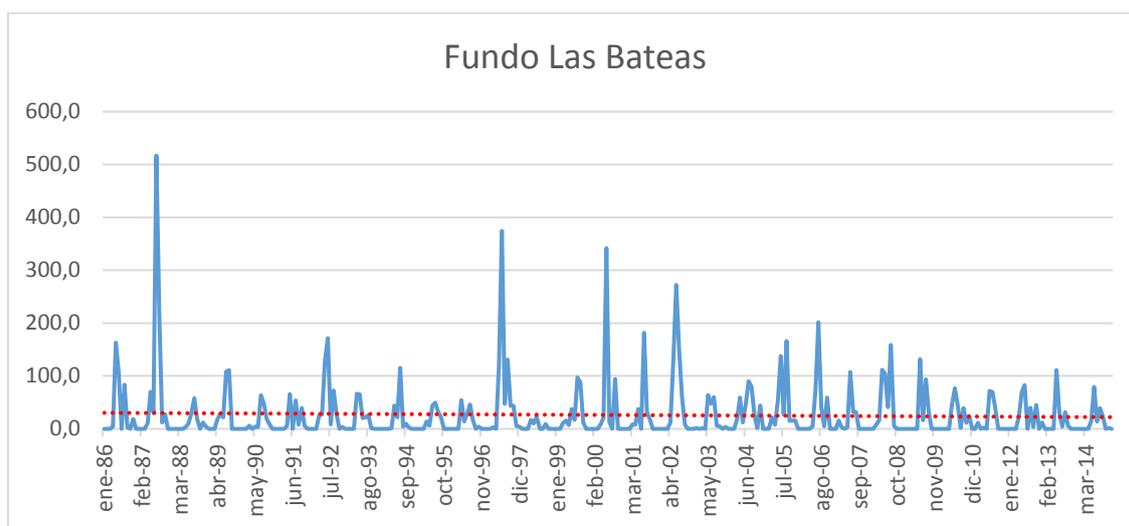
Elaboración propia.

Como se desprende de la tabla 8, el método de las isoyetas arroja una diferencia de módulo pluviométrico cercano a los 36 mm/año por sobre el método de Thiessen, pero 16,86 mm/año bajo el método de la Media aritmética, pudiendo constatarse diferencias considerables entre los distintos métodos.

10.2.5 Líneas de tendencia de precipitaciones medias mensuales.

Como se observa en los 11 gráficos a continuación, aunque casi imperceptible a simple vista, las líneas de tendencia central de precipitaciones medias mensuales de las estaciones del área de estudio, manifiestan una débil inclinación negativa, indicando ello una mínima reducción en el período 1929-2014. (La estación con el mayor rango temporal de datos corresponde a Estación Riecillos con 85 años, 1929 al 2014). (Todas estas series de datos fueron obtenidas desde la página web de la DGA: 2016)³⁹.

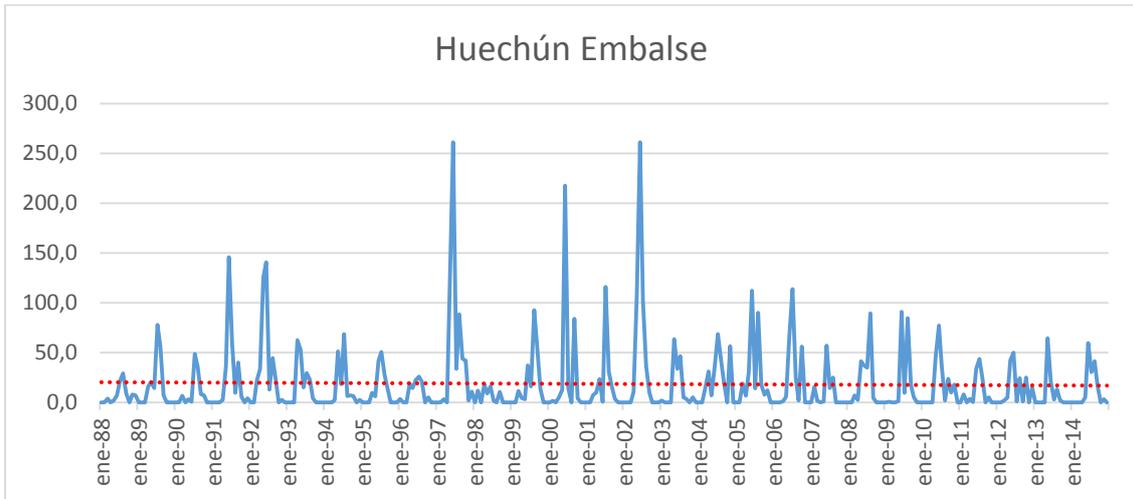
Gráfico 3. Precipitaciones en estación Fundo Las Bateas (mm/mes).



Elaboración propia

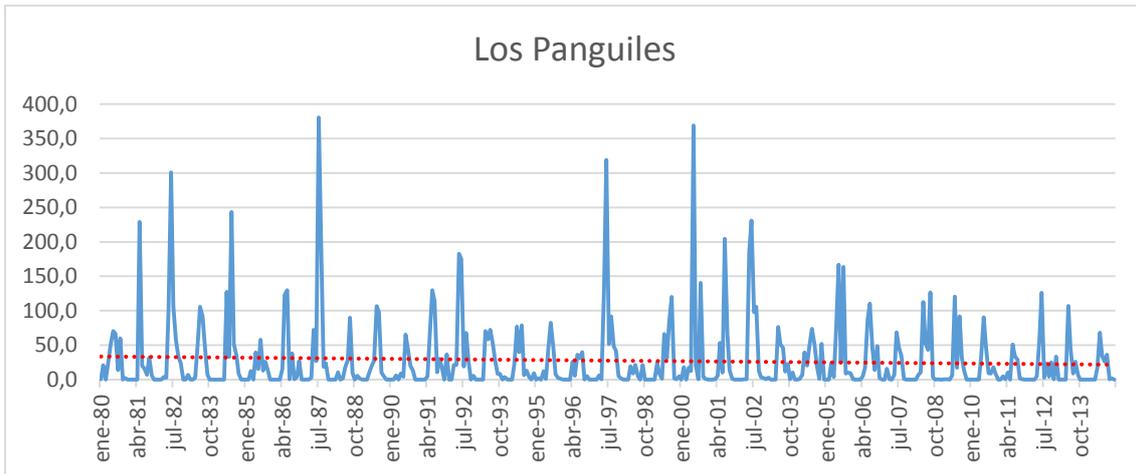
³⁹ <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>

Gráfico 4. Precipitaciones en estación Huechún Embalse (mm/mes).



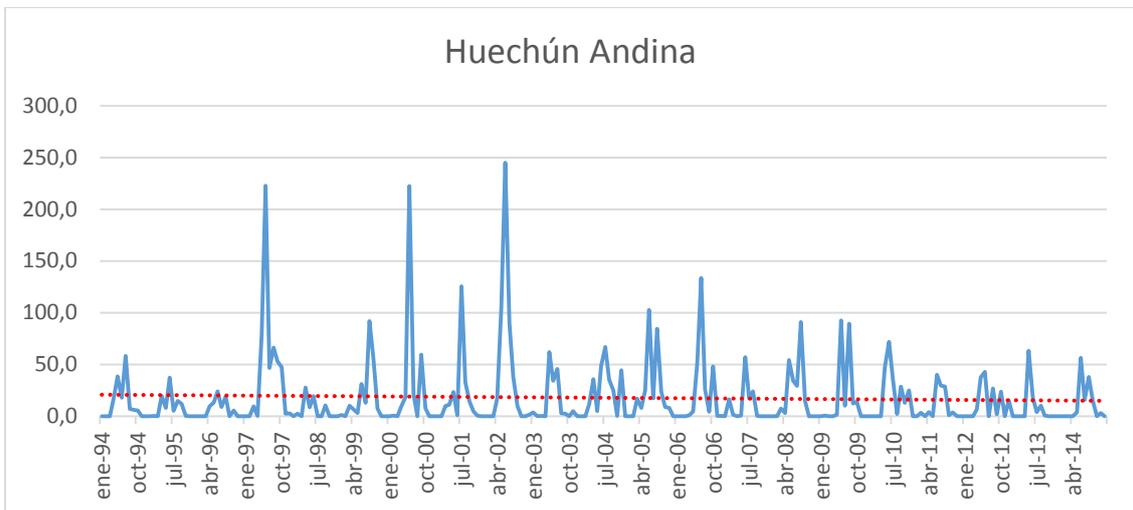
Elaboración propia.

Gráfico 5. Precipitaciones en estación Los Panguiles (mm/mes).



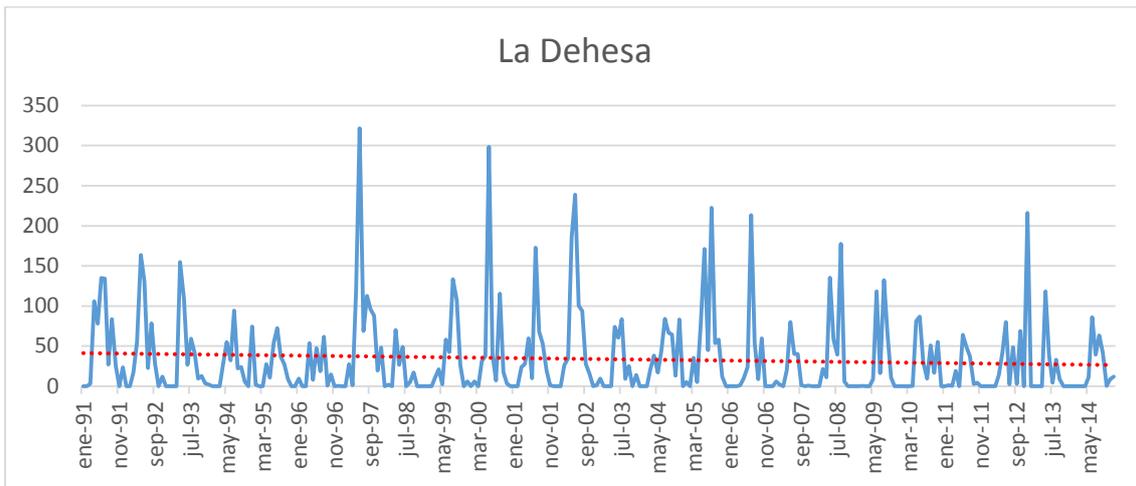
Elaboración propia.

Gráfico 6. Precipitaciones en estación Huechún Andina (mm/mes).



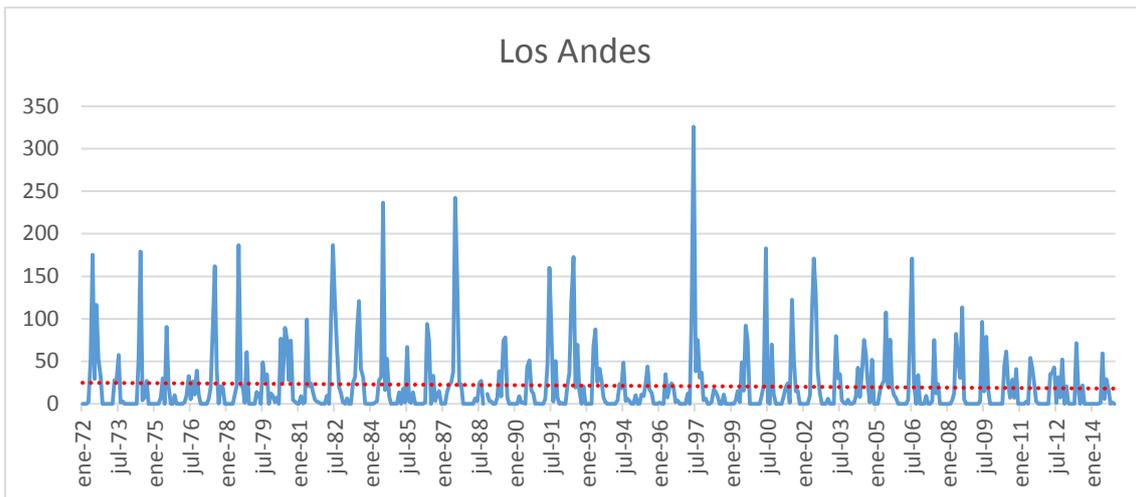
Elaboración propia.

Gráfico 7. Precipitaciones en estación La Dehesa (mm/mes).



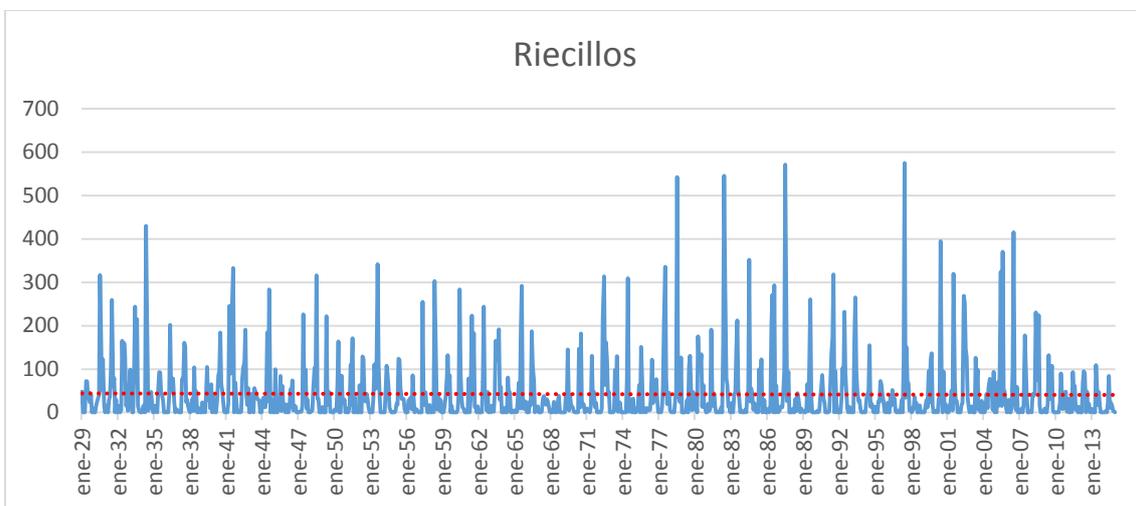
Elaboración propia.

Gráfico 8. Precipitaciones en estación Los Andes (mm/mes).



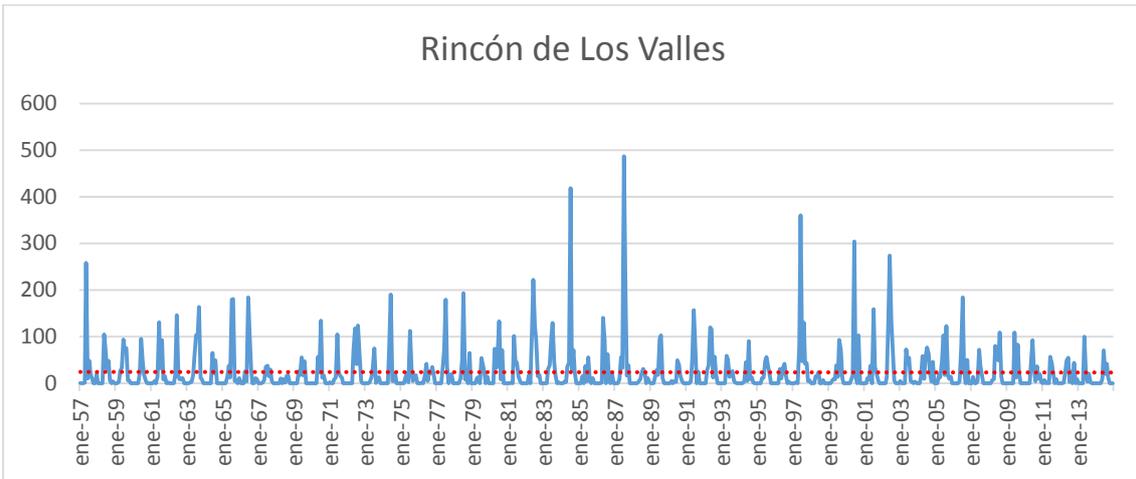
Elaboración propia.

Gráfico 9. Precipitaciones en estación Riecillos (mm/mes).



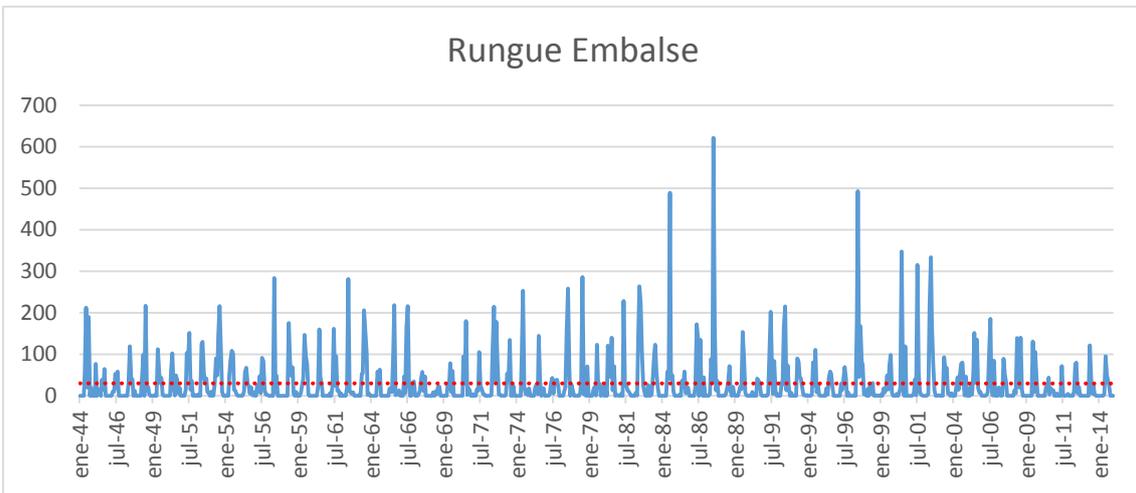
Elaboración propia.

Gráfico 10. Precipitaciones en estación Rincón de Los Valles (mm/mes).



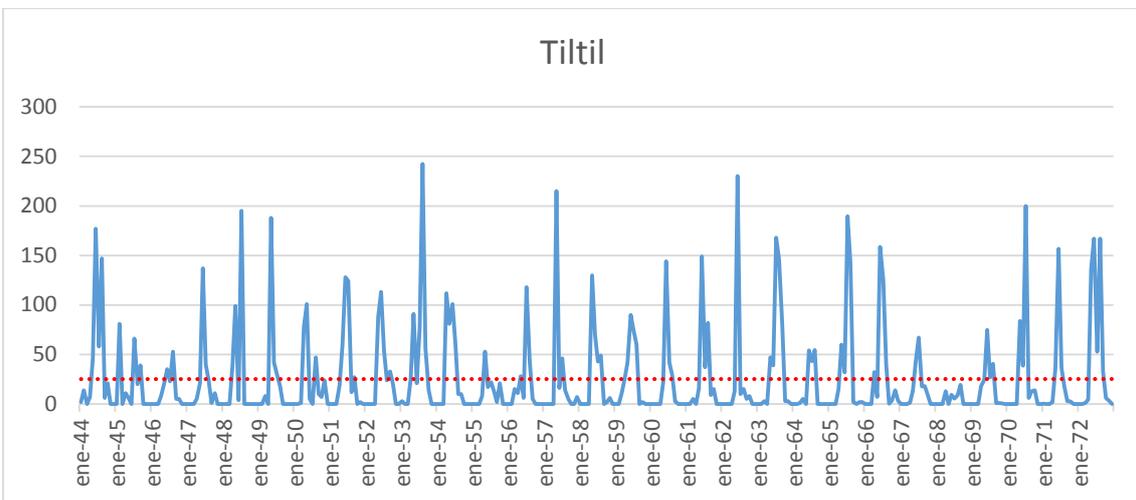
Elaboración propia.

Gráfico 11. Precipitaciones en estación Rungue Embalse (mm/mes).



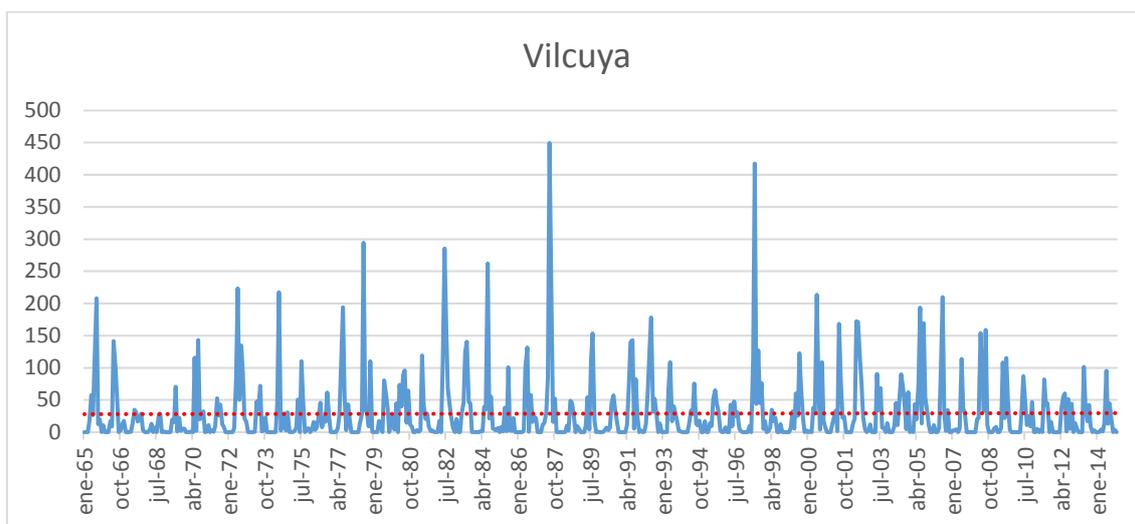
Elaboración propia.

Gráfico 12. Precipitaciones en estación Tilttil (mm/mes).



Elaboración propia.

Gráfico 13. Precipitaciones en estación Vilcuya (mm/mes).



Elaboración propia.

10.3 Estimación de Evapotranspiración.

10.3.1 Evapotranspiración Potencial de Thornthwaite (1948).

Por otra parte, utilizando la relación establecida por Thornthwaite para el cálculo indirecto de la EVT real, el procedimiento desarrollado es el siguiente:

1°) Índice de calor mensual (i), a partir de la temperatura media mensual (t), $i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$

Temperatura media mensual											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
21,78	21,06	19,06	15,21	11,85	9,70	9,08	10,22	12,00	15,06	17,90	20,53

Índice de calor mensual											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
9,28	8,82	7,59	5,39	3,69	2,73	2,47	2,95	3,77	5,31	6,90	8,48

2°) Índice de calor anual $I = \sum i = 67,37$

3°) cálculo de ETP mensual sin corregir = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas).

$$ETP_{\text{sin corr.}} = 16 * \left(\frac{10 t}{I}\right)^a$$

t = Temperatura media mensual en grados Celsius. (Temperatura media mensual de la cuenca calculada con método de la media aritmética).

I = Índice de calor anual = 67,37

$$a = (675 * 10^{-9} * I^3) - (771 * 10^{-7} * I^2) + (1792 * 10^{-5} * I) + 0,49239$$

$$a = 1,556$$

Evapotranspiración potencial sin corregir											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
464,16	440,42	377,29	265,45	180,11	131,81	119,02	142,94	183,68	261,39	342,06	423,31

4°) Corrección para el número de días del mes y el número de horas de sol.

Número de días del mes.											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31

Número de horas de sol Lat. 33 Sur. (día 15 de cada mes).											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
13,95	13,15	12,2	11,15	10,3	9,8	10	10,75	11,8	12,85	13,75	14,2

$$ETP = ETP_{sin\ corr.} * \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{d}{30}\right)$$

Dónde: N = Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y la latitud⁴⁰.

D = Número de días del mes.

Evapotranspiración potencial corregida.											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
557,57	450,46	396,37	246,65	159,75	107,65	102,49	132,32	180,62	289,24	391,95	517,61

5°) Calculo de la Evapotranspiración Potencial Anual = Σ (evapotranspiración mensual)

Evapotranspiración Potencial (m3/mes)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
3,7E+08	3E+08	2,6E+08	1,6E+08	1,1E+08	7,1E+07	6,8E+07	8,8E+07	1,2E+08	1,9E+08	2,6E+08	3,4E+08

Como resultado según la metodología de Thornthwaite, la evapotranspiración potencial de la cuenca⁴¹ alcanza los 294,39 mm/año/m², y como el área de la cuenca es de 663.637.016 m², resulta una salida potencial de agua desde la cuenca por evapotranspiración de 2.344.412.218 m³/año.

10.3.2 Evapotranspiración Real de Turc (1961).

Formula de Turc:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

⁴⁰ En este caso se calculó usando la latitud 33° sur, donde se ubica el área de estudio.

⁴¹ Se calcula la evapotranspiración de una cuenca hidrográfica, porque en este caso, esta coincide con el sector acuífero definido por la DGA.

Donde:

ETR = evapotranspiración real en mm/año.

P = precipitación en mm/año.

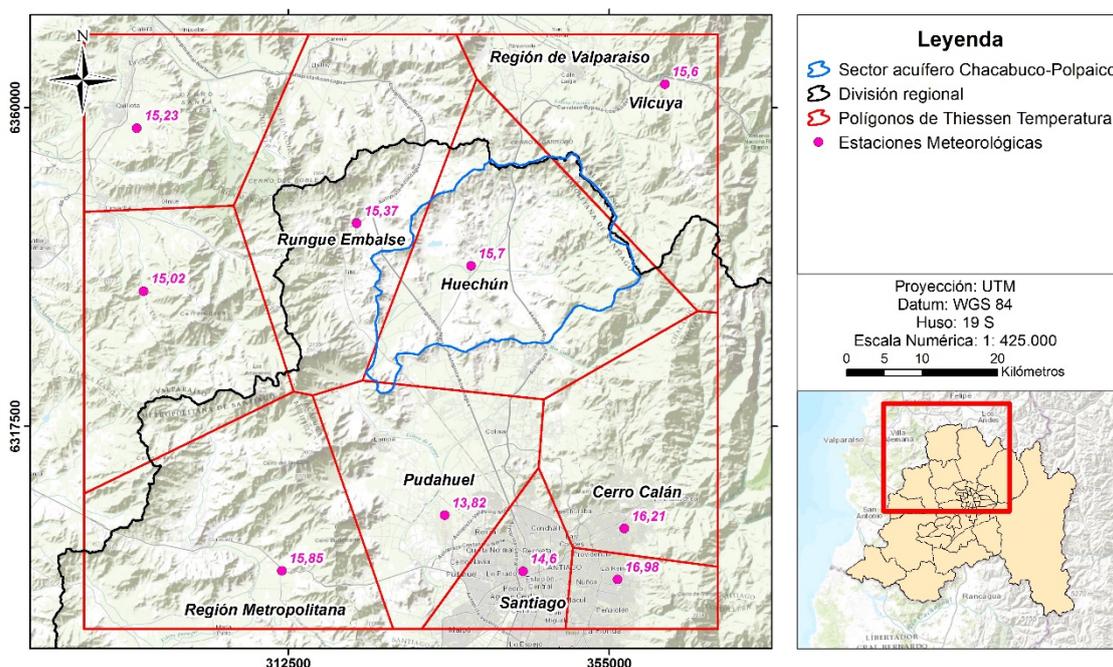
$$L = 300 + 25 t + 0,05 t^3$$

t = temperatura media anual en °C.

En primer lugar, se determinó la temperatura media anual de la cuenca, para lo cual se utilizaron los datos de temperaturas medias mensuales de diversas estaciones meteorológicas termométricas de los alrededores de la cuenca más los datos de la única estación termométrica dentro de cuenca. Con los datos de temperatura media mensual se calculó la temperatura media anual de todas estas estaciones.

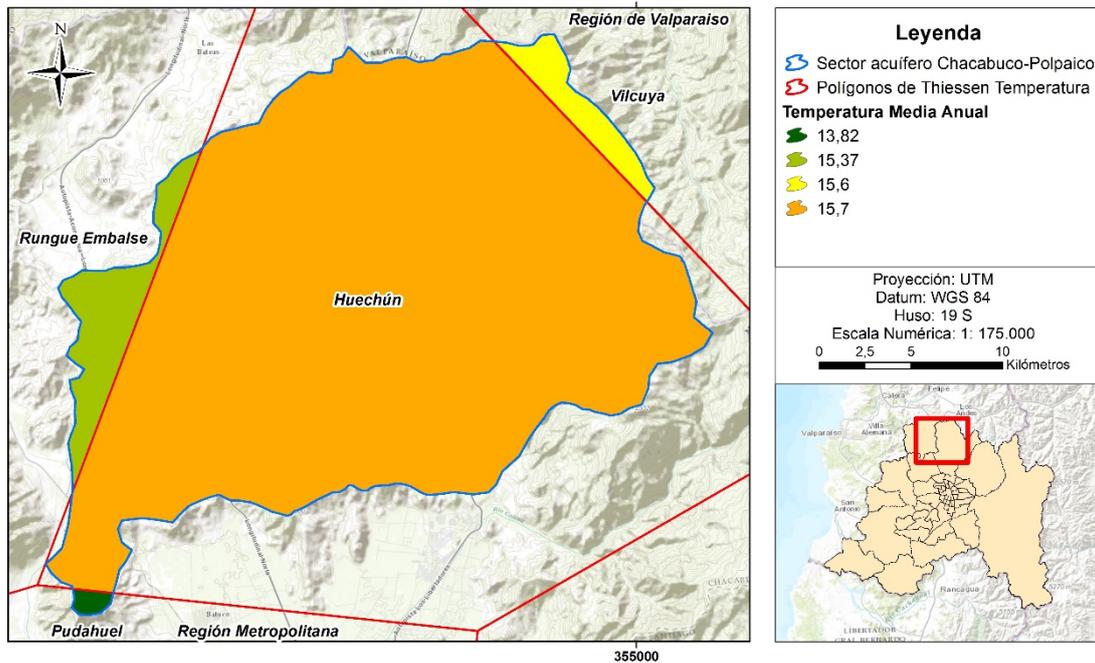
Luego con las coordenadas de localización de estas estaciones se crearon Polígonos de Thiessen, para calcular la temperatura media anual de la cuenca, usando la misma metodología usada para calcular la precipitación media anual de la cuenca. (Figuras 37 y 38)

Figura 37. Estaciones meteorológicas termométricas y polígonos de Thiessen.



Elaboración propia

Figura 38. Polígonos de Thiessen recortados.



Elaboración propia

De acuerdo con este método, se obtiene que la temperatura media anual de la cuenca sería de 15,67 grados Celsius. Por otra parte, previamente se estableció que la precipitación media anual de la cuenca alcanza los 265,04 mm. Con estos datos se procedió a calcular la evapotranspiración real media de área de estudio.

Donde:

ETR = evapotranspiración real en mm/año.

P = precipitación en mm/año. (265,04 mm)

$L = 300 + 25 t + 0,05 t^3$

t = temperatura media anual en °C. (15,67 °C).

$$L = 300 + (25 * t) + 0,05 * t^3$$

$$L = 300 + (25 * 15,67) + 0,05 * 15,67^3$$

$$L = 300 + 391,75 + (0,05 * 3.847,75)$$

$$L = 300 + 385 + 192,38$$

$$L = 877,38$$

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$ETR = \frac{265,04}{\sqrt{0,9 + \frac{265,04^2}{877,38^2}}}$$

$$ETR = \frac{265,04}{\sqrt{0,9 + \frac{70.246,20}{769.795,66}}}$$

$$ETR = \frac{265,04}{\sqrt{0,9 + 0,091253}}$$

$$ETR = \frac{265,04}{\sqrt{0,991253}}$$

$$ETR = \frac{265,04}{0,995616}$$

$$ETR = 266,207$$

Según la metodología de Turc, la evapotranspiración real del sector alcanza los 266,2 mm/m² al año, y siendo el área de la cuenca es 663,6 km², resulta una salida de agua desde la cuenca por evapotranspiración de 176.660.173 m³/año.

10.3.3 Evapotranspiración Real de FAO Penman-Monteith (1998). Cultivo de referencia.

Los datos proporcionados por la FDF (Fundación para el Desarrollo Frutícola), fueron ingresados al software ETo Calculator, desarrollado por la FAO. Como la FDF sólo pudo proporcionar los datos de viento máximo diario, se optó por la opción ofrecida por el software, en el cual, en caso de velocidad media del viento, se puede adoptar una velocidad promedio de 0,5 m/s (zona de vientos suaves). Por su parte, el dato de Radiación Solar fue llenado con las horas de sol medias mensuales de la latitud 33° S. (ver tabla 9).

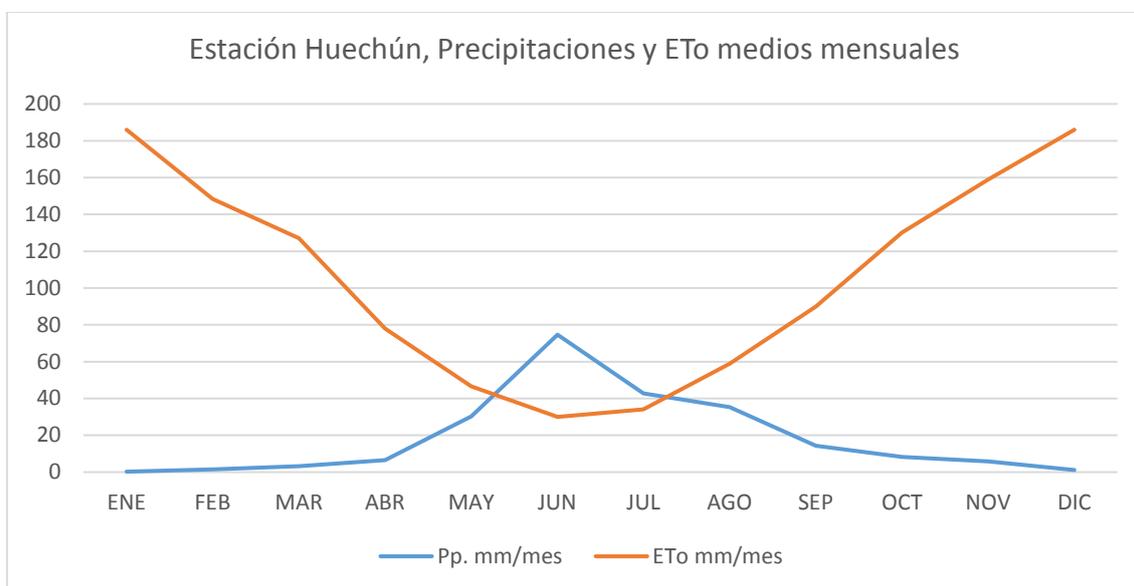
Tabla 9. Datos meteorológicos y ETo de estación Huechún.

Estación Huechún										
MES	Días	Horas de día	Pp. mm/mes	T max C°	T min C°	Hr max %	Hr min %	Viento Max m/s	ET0 mm/día	ET0 mm/mes
ENE	31	14,0	0,3	34,0	11,3	88,0	29,5	2,1	6,0	186,0
FEB	28	13,2	1,4	33,6	9,8	86,8	27,5	2,1	5,3	148,4
MAR	31	12,2	3,2	31,8	7,4	89,1	26,8	1,9	4,1	127,1
ABR	30	11,2	6,5	26,0	4,2	91,0	33,9	1,7	2,6	78,0
MAY	31	10,3	30,3	21,3	2,7	94,2	43,5	1,4	1,5	46,5
JUN	30	9,8	74,7	18,7	-0,6	93,3	44,1	1,3	1,0	30,0
JUL	31	10,0	42,8	17,3	0,8	95,5	48,6	1,4	1,1	34,1
AGO	31	10,8	35,3	19,8	2,2	97,0	45,8	1,9	1,9	58,9
SEP	30	11,8	14,3	22,6	3,9	94,7	37,6	2,2	3,0	90,0
OCT	31	12,9	8,3	26,4	5,6	92,6	31,5	2,2	4,2	130,2
NOV	30	13,8	5,8	30,0	6,3	90,5	27,2	2,1	5,3	159,0
DIC	31	14,2	1,2	32,9	8,8	88,2	26,7	2,2	6,0	186,0

Elaboración propia

Los resultados obtenidos de ETo diario se multiplicaron por la cantidad de días de cada mes y se obtuvo el ETo medio mensual (mm/mes). Con esta información se elaboró un gráfico que muestra las precipitaciones versus los ETo medios mensuales de la estación meteorológica Huechún (ver gráfico 14).

Gráfico 14. Precipitaciones versus ETo medios mensuales, estación Huechún.



Elaboración propia

Con esta información se procedió a calcular la recarga potencial de sobre el área de estudio (sólo considerando una estación meteorológica (en las partes bajas de la cuenca), por lo que se espera que el valor de la recarga sea mayor en una cantidad por estimar (tabla 10).

Esta estimación de recarga potencial sólo considera variables climáticas (Pp – ETo mensuales), considerando un cultivo de referencia, por lo que es un cálculo preliminar que debe ser ajustado a la realidad en base a los diversos cultivos y vegetación nativa del área de estudio.

Tabla 10. Cálculo de recarga potencial mensual y anual en mm/m².

Estación	mes	Pp. mm	ETo mm	Recarga Potencial mm	Total anual mm
Huechún	JUN	75	30	45	
	JUL	43	34	9	54

Elaboración propia

La tabla 10 sólo fue elaborada considerando los meses en los cuales las Precipitaciones (Pp. mm) superan la Evapotranspiración del cultivo de Referencia (ETo mm).

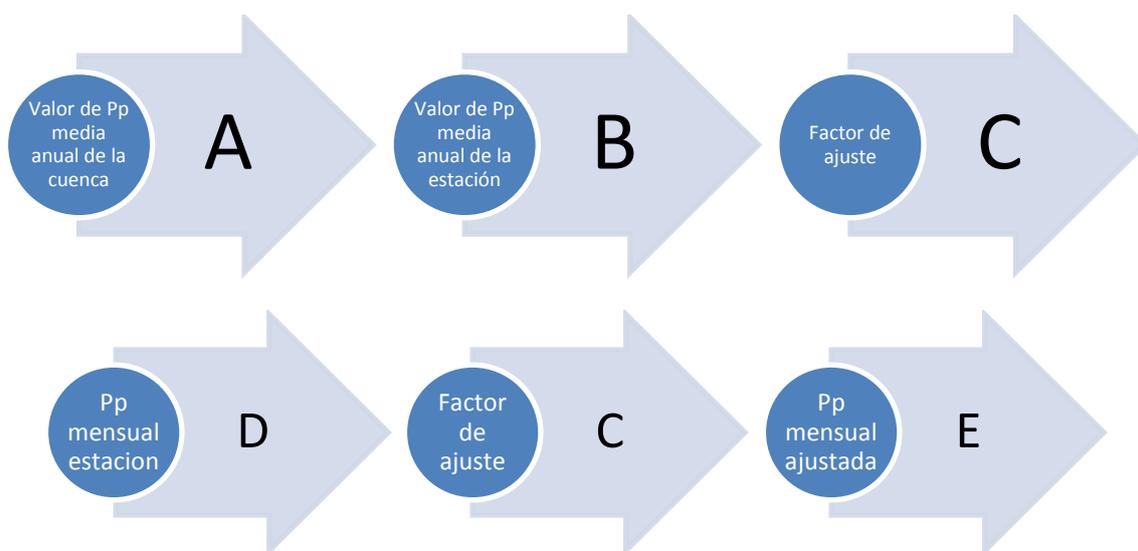
10.3.3.1 Cálculo de recarga potencial mensual y anual con precipitación ajustada.

Los cálculos de ETo fueron hechos con datos meteorológicos de la estación Huechún, luego con los valores de precipitación media mensual de esta estación, fue elaborado un gráfico que

muestra las variables de ETo versus precipitación media mensual. Se hace notar que los valores de precipitación de esta estación distan en gran cantidad de los valores medios de la cuenca, la cual alcanza los 265 mm/año, calculado con isoyetas, mientras que los valores de precipitación media anual de Huechún alcanzan los 224 mm (por estar esta estación en una zona baja de la cuenca). En busca de igualar las precipitaciones de esta estación con los valores obtenidos con isoyetas (método más preciso), se procedió a ajustar los valores de precipitación mensual de Huechún.

Para ajustar las precipitaciones mensuales se procedió a obtener un **factor de ajuste**, el cual se obtuvo dividiendo la precipitación media anual de la cuenca por la precipitación de Huechún. Dicho factor de ajuste fue usado para multiplicar los valores mensuales de la estación, obteniendo como resultado valores de precipitación mensual ajustados a la media de la cuenca (Figura 39). Esta posee zonas altas con valores de precipitación de hasta 350 mm. Esta metodología fue deducida del **Método de las Razones**, mencionado al rellenar series de datos de precipitación. (Capítulo 10.2)

Figura 39. Diagrama de obtención de valores de precipitaciones mensuales ajustadas.



$$A/B = C$$

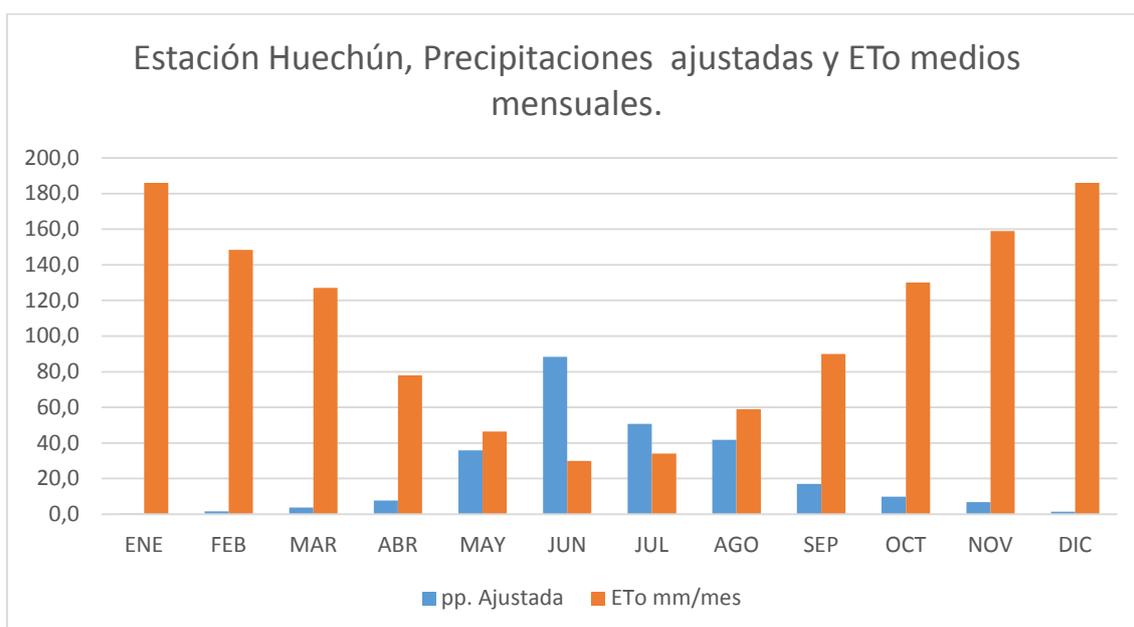
$$D * C = E$$

Elaboración propia.

Para obtener el valor ajustado de precipitación de cada mes, basta con multiplicar el *Factor de Ajuste* de cada estación por cada mes. Obteniendo con esto, valores cercanos a la precipitación de toda la cuenca y no sólo de las zonas bajas y menos lluviosas.

Con el método anterior, el valor anual de precipitación de Huechún igualó al de la cuenca (265 mm/año), por lo que se procedió a realizar un gráfico de precipitaciones mensuales versus la ETo. Con el objetivo de determinar los meses en los cuales la precipitación excede a la ETo y con esto conocer la recarga potencial de precipitación (Cultivo de referencia), (ver gráfico 15).

Gráfico 15. Precipitaciones ajustadas versus ETo medios mensuales, estación Huechún.



Elaboración propia.

Al igual que la primera tabla de recarga mensual (tabla 10), con los valores de precipitación ajustados, siguen siendo sólo dos los meses del año en que la precipitación excede a la evapotranspiración de referencia (ETo), (junio y julio), (tabla 11).

Tabla 11. Cálculo de recarga potencial ajustada mensual y anual en mm/m².

Estación	mes	Pp. mm	ETo mm	Recarga Potencial mm	Total anual mm
Huechún	JUN	88,3	30	58,3	75
	JUL	50,7	34	16,7	

Elaboración propia

Como la recarga total anual de Huechún es de 75 mm, se obtiene un valor de **75 mm/m² de recarga potencial media anual de la cuenca para el cultivo de referencia**. (Precipitación menos la evapotranspiración mensual).

Debe notarse que este valor obtenido es preliminar, pues se desarrolló únicamente con los datos de *evapotranspiración de referencia*, debiendo obtenerse los valores mensuales de *evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar*, para acercar los valores a la realidad de uso de suelo de la cuenca en estudio. Producto de ello, los valores reales de evapotranspiración mensuales podrían aumentar así como disminuir.

Además de debe mencionar que no se consideró ajustar los valores de temperaturas de Huechún usadas para calcular ETo con los valores de temperaturas medias de la cuenca, porque la diferencia es baja. La temperatura media de la cuenca es de 15,4 °C, mientras que la media de Huechún es de 15,7 °C.

10.3.4. Evapotranspiración Real de FAO Penman-Monteith (1998). Cultivo en condiciones estándar.

El objetivo de la estimación de evapotranspiración real de FAO Penman-Monteith es la determinación de la cantidad de agua que evapotranspiran los diferentes cultivos y con esta información poder determinar las cantidades de agua necesarias para satisfacer las necesidades hídricas de los mismos cultivos.

Como primer paso se realizó un procesamiento de una imagen satelital del área de estudio, para poder identificar con claridad donde se ubican los cultivos y con esta información poder planificar la visita a terreno.

Los datos de la imagen satelital usada son los siguientes:

Satélite: Sentinel 2 (Agencia Espacial Europea)

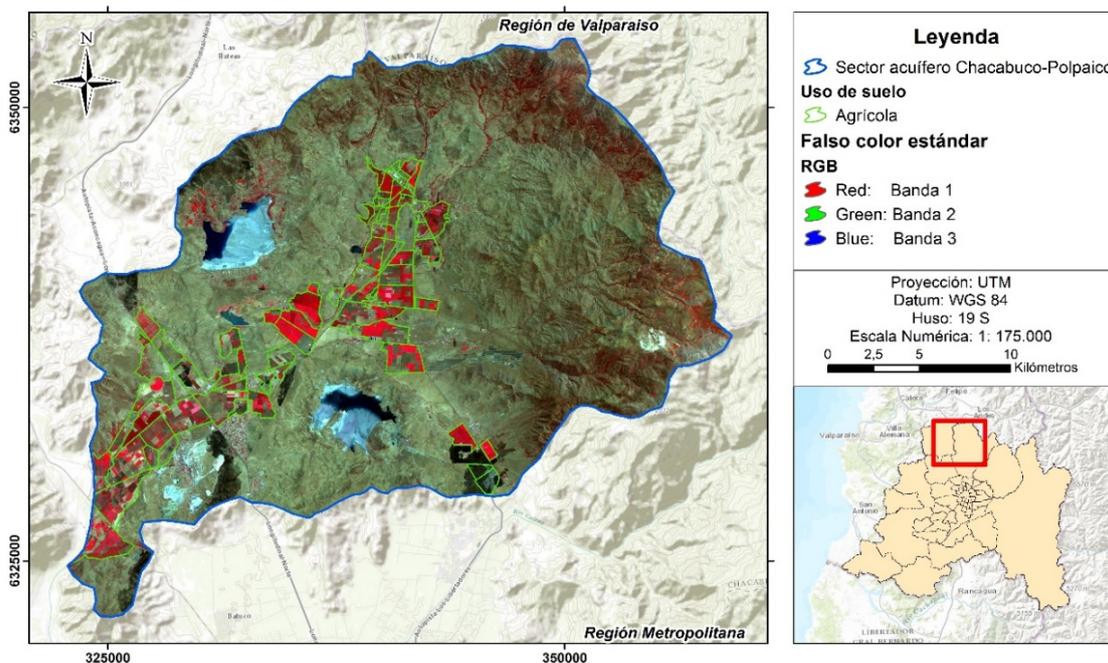
Resolución espacial: 10 m (bandas Roja, verde, azul e infrarroja), las demás bandas poseen resoluciones de 20 y 60 m.

Número de bandas: 12

Fecha de la imagen: 10/12/2016

Con esta imagen satelital se realizaron dos composiciones elementales para poder delimitar áreas de cultivos, las composiciones de Falso color estándar (Figura 40) y NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Figura 41).

Figura 40. Composición de falso color estándar.

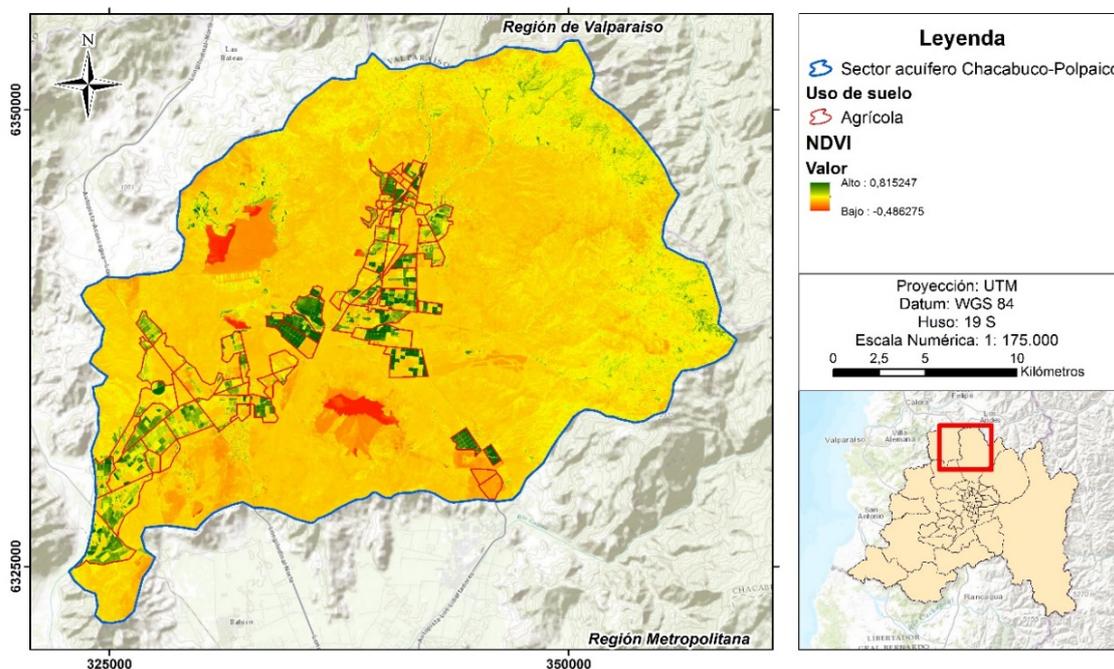


Elaboración propia

La composición de falso color estándar es formada por las bandas infrarroja, azul y verde, y sirve para identificar fácilmente las zonas de vegetación de los demás usos de suelo. En ella se aprecia

la vegetación vigorosa en colores rojos intensos, el agua en tonos azules oscuros y vegetación poco vigorosa en tonos cafés, mientras las zonas urbanizadas se muestran en colores grises.

Figura 41. Composición de NDVI.



Elaboración propia

La composición de NDVI es formada por la siguiente cálculo de bandas de imágenes satelitales: $(\text{Infrarroja} - \text{roja} / \text{infrarroja} + \text{roja})$. Este cálculo entrega como resultado una imagen cuyos pixeles varían desde el 1 hasta el -1, representando el valor 1 el mayor valor posible para la vegetación, dicho de otra manera, la vegetación más vigorosa que se puede encontrar. En el caso del área de estudio el valor más alto corresponde a los cultivos como vides y nogales.

En cambio el valor de -1 indica el valor más bajo de vegetación, esto es, zonas completamente desprovistas de vegetación. En el caso del área de estudio, el valor más cercano a -1 es alcanzado sólo por los espejos de agua presentes, dejando valores intermedios para vegetación nativa y áreas industriales y urbanas.

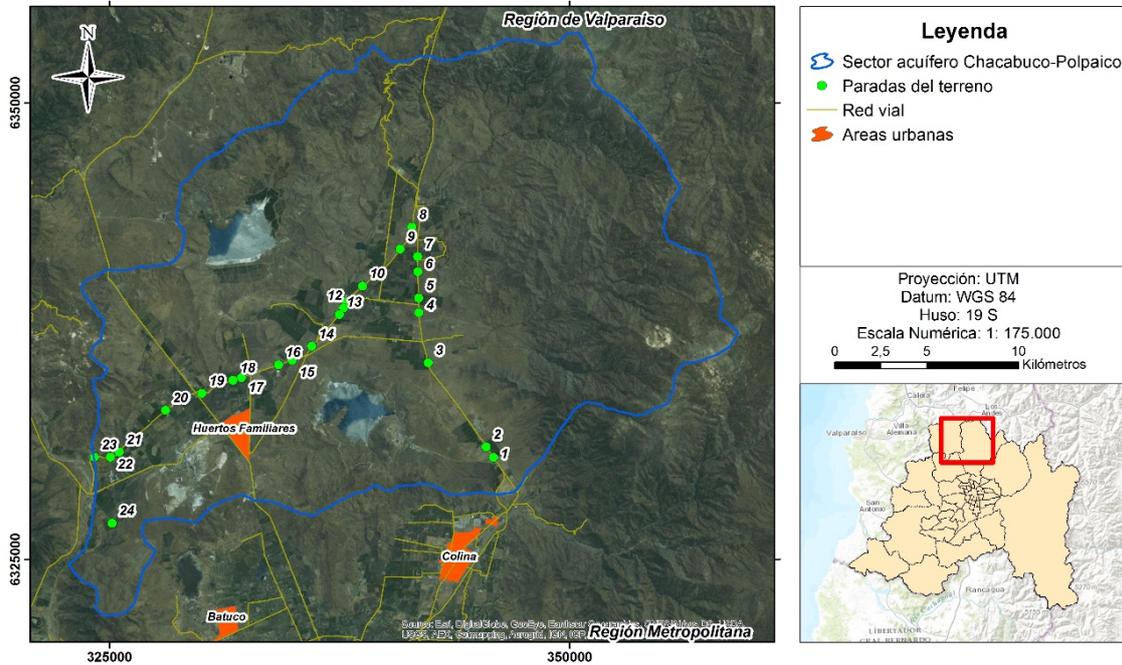
10.3.4.1. Visita a terreno.

Se realizó una visita a terreno el día 07 de enero de 2017, para determinar los cultivos presentes en el área de estudio, y el estado de ellos, para así determinar los distintos valores de Coeficientes de Cultivo (Kc) y con esto poder establecer los valores de evapotranspiración de cultivos en condiciones estándar (ETc). Para ello se multiplican los valores del cultivo de referencia (ETo) por el (Kc) de cada cultivo, obteniendo el valor de (ETc) de cada superficie cultivada.

Se realizaron 24 paradas en la visita a terreno (figura 42), buscando visitar la mayor cantidad de lugares dentro del área de estudio, y tratando de identificar y georreferenciar la mayor cantidad de cultivos presentes en el área, (además del sistema de riego empleado). La georreferenciación

se realizó con un dispositivo GPS de 7 metros de margen de error. Además la visita a terreno sirvió para la toma de fotografías y recolección de muestras de cultivos que no pudieron ser identificados in situ.

Figura 42. Paradas de la visita a terreno.



Elaboración propia

Una vez identificados la mayor cantidad de cultivos, se procedió a delimitar cada tipo de cultivo dentro del área de estudio mediante una **Clasificación supervisada** de una imagen satelital. Luego se empleó el área de la imagen de los cultivos identificados y georreferenciados en terreno para la extracción de sus **Huellas espectrales** y la posterior clasificación de los diferentes cultivos y usos de suelo presentes a enero de 2017.

10.3.4.2. Clasificación supervisada de imagen satelital.

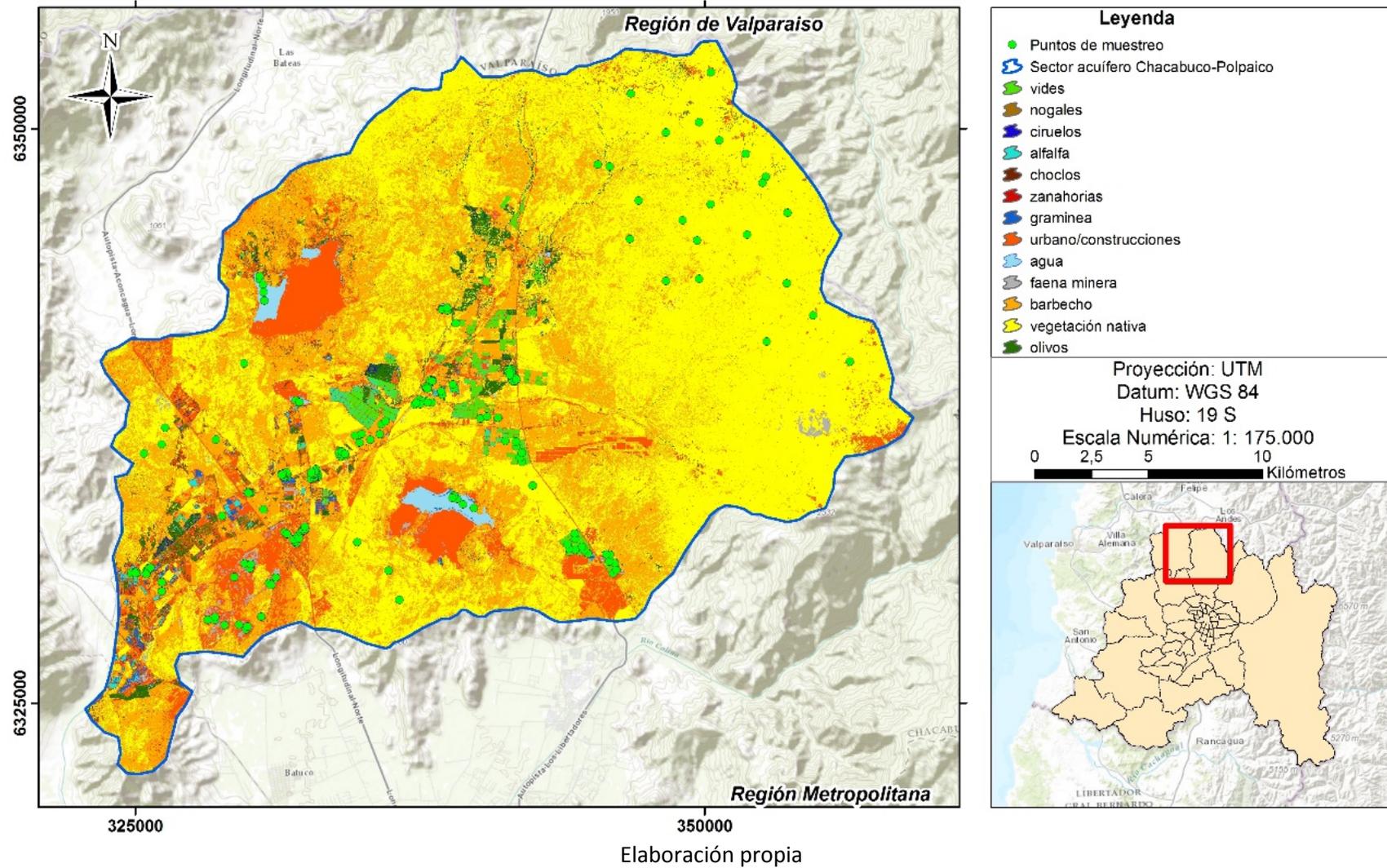
Una vez identificado y georreferenciados los diferentes cultivos, se procedió a realizar la clasificación supervisada en el SIG Arcgis 10.1 (Figura 43).

De la imagen generada por la clasificación supervisada es posible distinguir con bastante claridad los cultivos de vides, los cuales permitieron realizar una extracción de huellas espectrales con mucha precisión, al contar con una cobertura de suelo muy cercana a 100 %.

La cobertura de suelo disminuye en otros cultivos, tales como ciruelos u olivos, en donde existe mayor distancia entre los árboles, dejando zonas descubiertas, las cuales reflejan huellas espectrales de malezas o suelos desnudos, lo cual entrega menor nitidez comparado con las vides, a la hora de identificar estos cultivos dentro de las clasificaciones supervisadas.

Ocurren también otras imperfecciones menores, como clasificaciones de sedimentos secos de relave como zonas urbanas.

Figura 43. Clasificación supervisada, Raster.



Con la imagen de clasificación supervisada de la figura 43, se delimitan polígonos de los diferentes usos de suelo, además de los distintos cultivos presentes en el área de estudio, junto con una clasificación de suelo en barbecho (suelo de uso agrícola en desuso temporal). Estos polígonos de usos de suelo más la diferenciación de cultivos son presentados en la dos siguientes cartografías (Figuras 44 y 45).

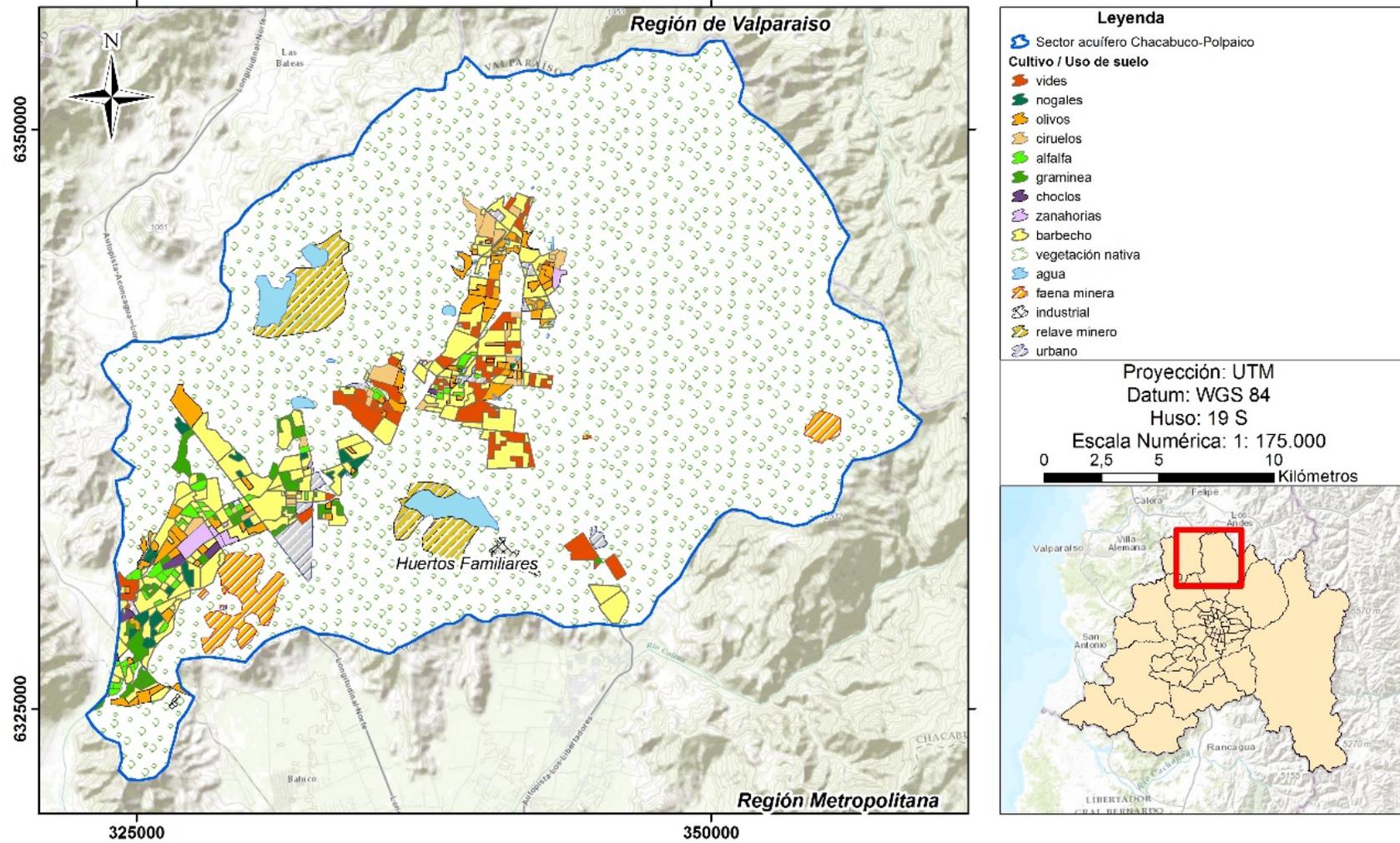
Observando las figuras 44 y 45, puede observarse como los cultivos de vides son considerablemente mayores en extensión en la comuna de Colina (cultivo con consumo de agua medio- alto). En cambio, la comuna de Tiltil, presenta mayor extensión de cultivos de nogales y alfalfa (ambos cultivos de alta demanda de agua).

En cuanto al suelo en estado de barbecho, este se presenta de manera uniforme en el área de estudio, extendiéndose por un área mayor que cualquier cultivo.

En relación a los espejos de agua, estos se presentan mayoritariamente dentro de los relaves mineros, por excepción del Embalse Huechún y otros embalses menores destinados al agua de riego, (el agua posee un elevado factor K_c), por lo que estos espejos de agua son fuentes continuas de evaporación.

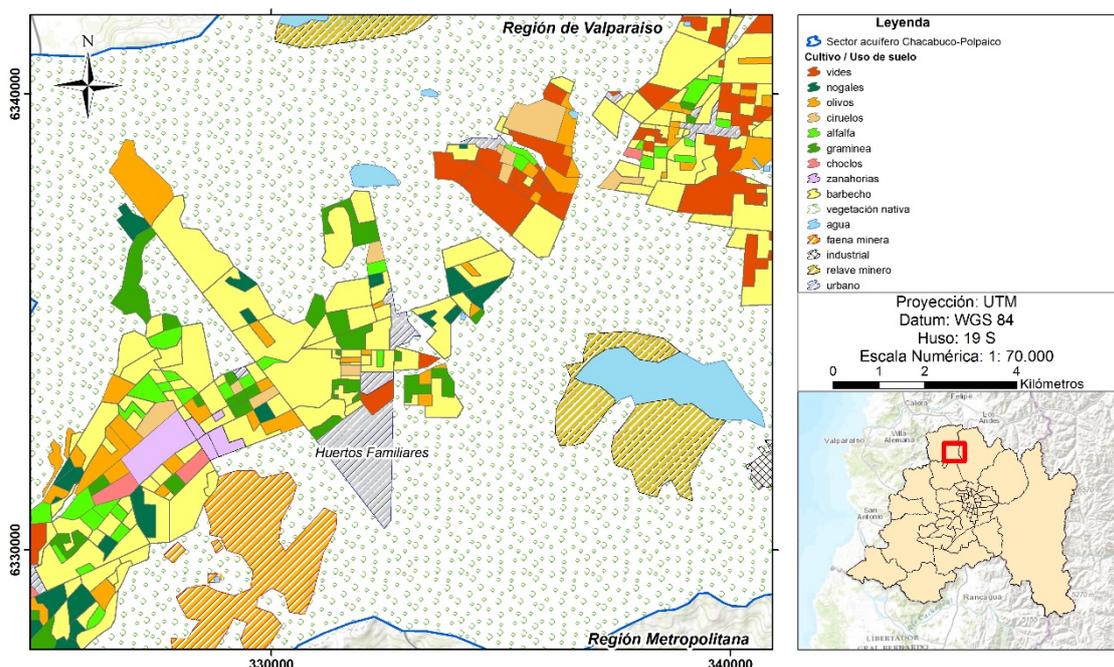
La mayor parte del área de estudio está cubierta por vegetación nativa, cual posee un factor K_c muy bajo, por estar estas plantas adaptadas a la supervivencia en condiciones áridas o semiáridas.

Figura 44. Clasificación supervisada, Polígonos.



Elaboración propia

Figura 45. Clasificación supervisada, Polígonos al detalle.



Elaboración propia

En la figura 45 puede observarse como en las inmediaciones de la localidad de Huertos Familiares se presenta gran cantidad de predios en barbecho, los cuales pueden aumentar la superficie de cultivos en el área de estudio.

10.3.4.3 Resultados de ETc de cultivos y otros usos de suelo.

Los datos mensuales de valores de Kc de uso de suelo que fueron encontrados en la visita a terreno son presentados en la tabla 12.

Tabla 12. Valores de Kc de uso de suelo encontrados en terreno.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETo mm/mes	186	148	127	78	47	30	34	59	90	130	159	186
Uso suelo	KC de Uso suelo											
agua riego	1,25	1,25	0,95	0,95	0,65	0,65	0,65	0,95	0,95	1,25	1,25	1,25
agua relave	1,25	1,25	0,95	0,95	0,65	0,65	0,65	0,95	0,95	1,25	1,25	1,25
alfalfa	1,15	1,15	0,75	0,75	0,40	0,40	0,40	0,40	0,75	0,75	1,15	1,15
barbecho	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
choclos	0,87	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,40	0,77	1,12
ciruelos	0,90	0,90	0,70	0,65	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,40	0,55	0,75
faena minera	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
gramínea	1,15	1,15	0,75	0,75	0,40	0,40	0,40	0,40	0,75	0,75	1,15	1,15
industrial	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
nogales	1,14	1,14	1,02	0,70	0,28	0,10	0,10	0,10	0,12	0,60	0,80	0,96
olivos	0,55	0,55	0,55	0,60	0,65	0,50	0,50	0,50	0,65	0,60	0,55	0,55
relave minero	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
urbano	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
vides	0,85	0,85	0,70	0,60	0,50	0,10	0,10	0,10	0,10	0,45	0,60	0,70
zanahorias	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
vegetacion esclerofila	0,25	0,05	0,08	0,05	0,13	0,27	0,24	0,21	0,28	0,21	0,21	0,16
Kc promedio general	0,67	0,61	0,50	0,47	0,33	0,29	0,29	0,33	0,38	0,50	0,61	0,65
Kc promedio cultivos	0,94	0,84	0,68	0,63	0,42	0,33	0,33	0,33	0,43	0,61	0,81	0,91

Elaboración propia

Con los valores de Kc obtenidos en la tabla 12 son calculados los valores de ETc, que representa la evapotranspiración real mensual en mm/m², producto de multiplicar los valores de Kc mensuales por la evapotranspiración de referencia (ETo) de cada mes (tabla 13).

Tabla 13. Valores de ETc de usos de suelo encontrados en terreno (mm/m²)

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETo mm/mes	186	148	127	78	47	30	34	59	90	130	159	186
Uso suelo	ETc de Uso suelo (mm/m ²)											
agua riego	232,5	185,5	120,7	74,1	30,2	19,5	22,2	56,0	85,5	162,8	198,8	232,5
agua relave	232,5	185,5	120,7	74,1	30,2	19,5	22,2	56,0	85,5	162,8	198,8	232,5
alfalfa	213,9	170,7	95,3	58,5	18,6	12,0	13,6	23,6	67,5	97,7	182,9	213,9
barbecho	18,6	14,8	12,7	7,8	4,7	3,0	3,4	5,9	9,0	13,0	15,9	18,6
choclos	161,8	14,8	12,7	7,8	4,7	3,0	3,4	5,9	9,0	52,1	122,4	208,3
ciruelos	167,4	133,6	89,0	50,7	4,7	3,0	3,4	5,9	9,0	52,1	87,5	139,5
faena minera	18,6	14,8	12,7	7,8	4,7	3,0	3,4	5,9	9,0	13,0	15,9	18,6
gramínea	213,9	170,7	95,3	58,5	18,6	12,0	13,6	23,6	67,5	97,7	182,9	213,9
industrial	18,6	14,8	12,7	7,8	4,7	3,0	3,4	5,9	9,0	13,0	15,9	18,6
nogales	212,0	169,2	129,6	54,6	13,0	3,0	3,4	5,9	10,8	78,1	127,2	178,6
olivos	102,3	81,6	69,9	46,8	30,2	15,0	17,1	29,5	58,5	78,1	87,5	102,3
relave minero	18,6	14,8	12,7	7,8	4,7	3,0	3,4	5,9	9,0	13,0	15,9	18,6
urbano	18,6	14,8	12,7	7,8	4,7	3,0	3,4	5,9	9,0	13,0	15,9	18,6
vides	158,1	126,1	89,0	46,8	23,3	3,0	3,4	5,9	9,0	58,6	95,4	130,2
zanahorias	167,4	133,6	114,4	70,2	41,9	27,0	30,7	53,0	81,0	117,2	143,1	167,4
vegetación esclerófila	46,5	6,7	10,2	3,5	5,8	8,1	8,3	12,4	25,5	27,8	33,9	30,4

Elaboración propia

Se realiza un resumen del área de cada uso de suelo, junto con el porcentaje que representa esa área con respecto a la cuenca (tabla 14), donde puede observarse la amplia predominancia del uso de suelo “vegetación esclerófila” (vegetación nativa o área silvestres), con el 81,2 % de la superficie total del área de estudio. El segundo uso de suelo más abundante es el de “Barbecho” con un 6,4 %, el resto de los usos de suelo no alcanzan el 2 % cada uno.

Tabla 14. Usos de suelo; área y porcentaje de la cuenca.

Uso suelo	AREA (m ²)	% de la cuenca
agua riego	981926,0	0,148
agua relave	6872814,6	1,036
alfalfa	3759980,3	0,567
barbecho	42761948,2	6,444
choclos	939503,3	0,142
ciruelos	4511460,3	0,680
faena minera	9042268,9	1,363
gramínea	5783031,5	0,871
industrial	1096834,4	0,165
nogales	3143221,8	0,474
olivos	12343918,4	1,860
relave minero	13965666,3	2,104
urbano	5121601,4	0,772
vides	12113365,8	1,825
zanahorias	2019944,5	0,304
vegetación esclerófila	539179530,3	81,246
TOTAL CUENCA	663637016,0	100

Elaboración propia

Con los cálculos de ETC mensuales (mm/m²) de cada uso de suelo, se procede a multiplicarlos por su área (m²) para poder obtener los valores ETC mensual en m³/mes, los cuales son presentados en las dos siguientes tablas (tablas 15 y 16).

Tabla 15. Valores de ETC de suelos encontrados, (m³/mes), (enero a junio).

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
ETo mm/mes	186	148	127	78	47	30
Uso suelo	ETC de Uso suelo (m3/mes)					
agua riego	228297,8	182147,3	118562,7	72760,7	29678,7	19147,6
agua relave	1597929,4	1274907,1	829858,0	509275,6	207730,8	134019,9
alfalfa	804259,8	641678,2	358420,1	219958,8	69935,6	45119,8
barbecho	795372,2	634587,3	543504,4	333543,2	198843,1	128285,8
choclos	152030,4	13942,2	11941,1	7328,1	4368,7	2818,5
ciruelos	755218,4	602550,6	401384,6	228731,0	20978,3	13534,4
faena minera	168186,2	134187,3	114927,2	70529,7	42046,6	27126,8
gramínea	1236990,4	986932,2	551267,5	338307,3	107564,4	69396,4
industrial	20401,1	16277,0	13940,8	8555,3	5100,3	3290,5
nogales	666488,7	531757,7	407493,6	171619,9	40924,7	9429,7
olivos	1262782,8	1007510,6	862901,6	577695,4	373094,9	185158,8
relave minero	259761,4	207250,5	177503,6	108932,2	64940,3	41897,0
urbano	95261,8	76004,6	65095,6	39948,5	23815,4	15364,8
vides	1915123,1	1527980,0	1077726,2	566905,5	281635,8	36340,1
zanahorias	338138,7	269783,8	231061,5	141800,1	84534,7	54538,5
vegetación esclerófila	25071848,2	3600640,9	5482377,5	1892520,2	3133981,0	4367354,2

Elaboración propia

Tabla 16. Valores de ETC de usos de suelo encontrados, (m³/mes), (julio a diciembre).

MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETo mm/mes	34	59	90	130	159	186
Uso suelo	ETC de Uso suelo (m3/mes)					
agua riego	21764,4	54943,7	83954,7	159808,5	195157,8	228297,8
agua relave	152335,9	384568,3	587625,7	1118550,6	1365971,9	1597929,4
alfalfa	51286,1	88585,1	253798,7	367162,1	687512,4	804259,8
barbecho	145818,2	251867,9	384857,5	556760,6	679915,0	795372,2
choclos	3203,7	5533,7	8455,5	48929,3	115023,4	195717,3
ciruelos	15384,1	26572,5	40603,1	234956,9	394527,2	629348,7
faena minera	30834,1	53259,0	81380,4	117730,3	143772,1	168186,2
gramínea	78880,5	136248,2	390354,6	564713,0	1057427,3	1236990,4
industrial	3740,2	6460,4	9871,5	14280,8	17439,7	20401,1
nogales	10718,4	18513,6	33946,8	245548,5	399817,8	561253,7
olivos	210463,8	363528,4	722119,2	964306,9	1079475,7	1262782,8
relave minero	47622,9	82257,8	125691,0	181833,0	222054,1	259761,4
urbano	17464,7	30166,2	46094,4	66683,3	81433,5	95261,8
vides	41306,6	71347,7	109020,3	709722,1	1155615,1	1577160,2
zanahorias	61992,1	107077,3	163615,5	236697,1	289054,1	338138,7
vegetación esclerófila	4473932,0	6669111,6	13749078,0	14976250,6	18288969,7	16380274,1

Elaboración propia

Los resultados generales de evapotranspiración mensual del área de estudio completa son presentados tanto en mm/mes como en m³/mes en las dos siguientes tablas (tablas 17 y 18).

Tabla 17. Resultados finales de ETc, (enero a junio).

MES	Resultados de Etc					
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
ETc general (mm/mes)	125,1	90,8	63,2	36,5	15,3	8,8
ETc general (m3/mes)	35368090,6	11708137,3	11247965,7	5288411,6	4689173,4	5152822,7

Elaboración propia

Tabla 18. Resultados finales de ETc, (julio a diciembre).

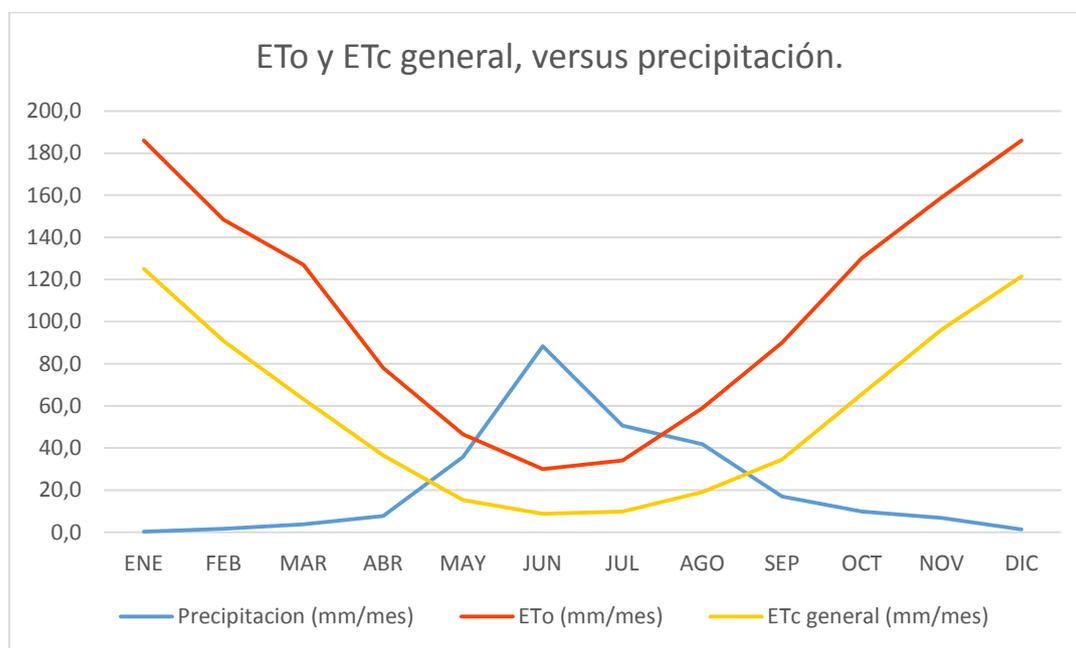
MES	Resultados de Etc					
	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETc general (mm/mes)	9,9	19,2	34,6	65,6	96,2	121,4
ETc general (m3/mes)	5366747,8	8350041,3	16790467,0	20563933,5	26173166,6	26151135,8

Elaboración propia

Según el método FAO Penman-Monteith (1998), la evapotranspiración media anual de la cuenca es de 176.850.093,2 m³.

Una vez calculados por valores de ETo y ETc mensuales, se procede a comparar ambos datos de evapotranspiración con los valores de precipitación mensual (ver gráfico 16).

Gráfico 16. ETo y ETc general versus precipitación.



Elaboración propia

El gráfico 16 muestra como la evapotranspiración de cultivo de referencia "ETc" es menor que la de referencia "ETo" en todos los meses del año, ampliando los meses de recarga potencial del acuífero hasta los cuatro meses, recordando que los meses de recarga potencial son aquellos en los cuales la precipitación es mayor a la evapotranspiración real.

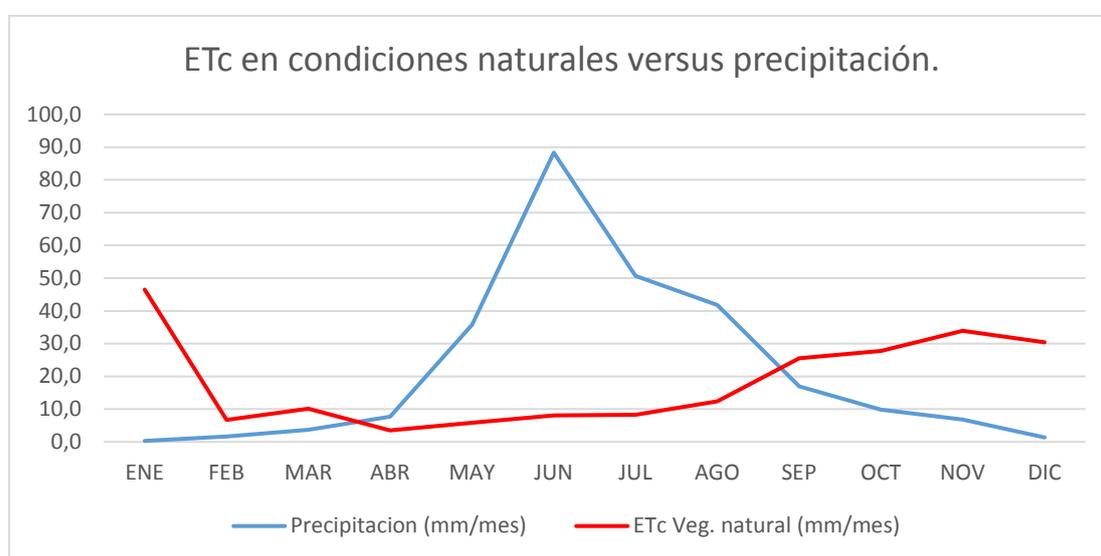
La recarga potencial del acuífero se concentra desde comienzos de mayo hasta finales de agosto en el área de estudio.

10.3.4.4 Simulación de ETc en condiciones naturales.

Se propone realizar una estimación de evapotranspiración hipotética de la cuenca en condiciones naturales, al realizar el cálculo de ETc en el supuesto que la cuenca estuviera cubierta sólo de vegetación esclerófila nativa, para estimar la evapotranspiración media anual de la cuenca en condiciones no antrópicas y poder comparar los meses de hipotética recarga potencial del acuífero con los meses de recarga potencial reales.

Los valores Kc de la vegetación esclerófila fueron obtenidos de un estudio experimental de Kc de vegetación esclerófila (*Chaparral*) del Estado de California (EEUU) de Howes et al: 2015⁴², (gráfico 17).

Gráfico 17. ETc en condiciones naturales versus precipitación.



Elaboración propia

La evapotranspiración hipotética media anual de la cuenca resulta ser de 145.343.917,1 metros cúbicos. (31,5 millones de metros cúbicos menos que la ETc general real), obteniendo mayores periodos de recarga potencial del acuífero, aproximadamente de abril a fines de agosto (Pero sobre todo en mayor cantidad de recarga potencial mensual).

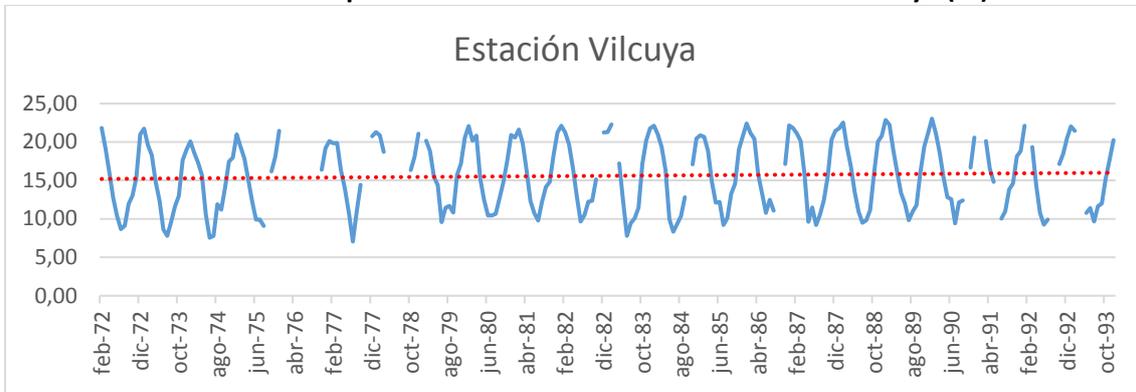
Así se muestra como las cuencas intervenidas por el hombre disminuyen su capacidad de recarga de acuíferos, por factores como: mayor impermeabilización por áreas urbanas y construcciones, introducción de plantas que tienen un mayor consumo de agua (mayor factor Kc) y por la extracción de aguas subterráneas y superficiales para la agricultura, agua potable y otros usos.

⁴² Howes et al (2015) *Evapotranspiration from Natural Vegetation in the Central Valley of California: Monthly Grass Reference-Based Vegetation Coefficients and the Dual Crop Coefficient Approach*. California, Estados Unidos de América.

10.3.5 Líneas de tendencia de temperaturas medias mensuales.

En el caso de las estaciones usadas con influencia dentro del área de estudio, el análisis de las líneas de tendencia central para ver la evolución temporal de las temperaturas medias mensuales revela una tendencia al alza en todas ellas. (Ver gráficos del 18 al 21).

Gráfico 18. Temperaturas medias mensuales en estación Vilcuya (°C).



Elaboración propia

Estación meteorológica Termométrica Vilcuya: Datos desde Febrero de 1972, Hasta Octubre de 1993.

Gráfico 19. Temperaturas medias mensuales en estación Rungue Embalse (°C).



Elaboración propia

Estación meteorológica Termométrica Rungue Embalse: Datos desde Agosto de 1977, Hasta Agosto de 1993.

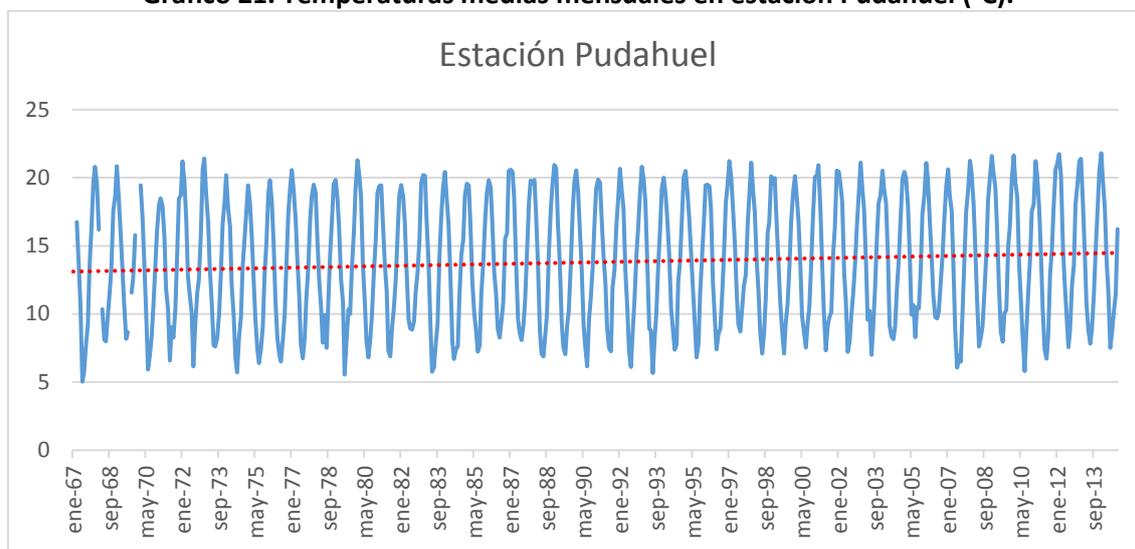
Gráfico 20. Temperaturas medias mensuales en estación Cerro Calán (°C).



Elaboración propia

Estación meteorológica Termométrica Cerro Calán: Datos desde Enero de 1978, Hasta Octubre de 1993, (Datos con fuertes mutilaciones).

Gráfico 21. Temperaturas medias mensuales en estación Pudahuel (°C).



Elaboración propia

Estación meteorológica Termométrica Pudahuel: Datos desde Enero de 1967, Hasta Septiembre de 2013.

La tendencia al alza es clara en las temperaturas de la estación Pudahuel, en menor grado para la estación Vilcuya y un alza poco notoria en Rungue Embalse y Cerro Calán.

10.4 Estimación de escorrentía superficial y subterránea.

En todas las fórmulas de cálculo de escorrentía superficial, es ocupado el dato de precipitación media anual de la cuenca, la cual asciende a los 265,04 mm.

10.4.1 Escorrentía superficial de Grunsky.

$$E_s = 0,4 * P^2 \quad (P = \text{precipitación anual en metros} = 0,26504 \text{ m})$$

$E_s = 0,028 \text{ m}^3/\text{s}$, debiéndose posteriormente multiplicarse por 31.536.000 (total de segundos de un año) para obtener resultados en $\text{m}^3/\text{año}$.

Por lo tanto $E_s = 883.008 \text{ m}^3/\text{año}$.

10.4.2 Escorrentía superficial de Peñuelas.

$$E_s = 0,5 * P^2 \quad (P = \text{precipitación anual en metros} = 0,26504 \text{ m})$$

$E_s = 0,035 \text{ m}^3/\text{s}$, debiéndose posteriormente multiplicarse por 31.536.000 (total de segundos de un año) para obtener resultados en $\text{m}^3/\text{año}$.

Por lo tanto $E_s = 1.103.760 \text{ m}^3/\text{año}$.

10.4.3 Escorrentía superficial de Coutagne.

Datos principales: Precipitación media de la cuenca anual en metros = 0,26504 m

Temperatura media anual: 15,4 °C. = T

$$E_s = P - D$$

$$\text{Donde: } D = P - \lambda P^2 = 0,26504 - \lambda 0,26504^2$$

$$\lambda = \frac{1}{(0,8+0,14T)} = \lambda = \frac{1}{(0,8+0,14*15,4)}$$

$$\frac{1}{8}\lambda < P < \frac{1}{2}\lambda \quad \text{si } (P < 1/8 \lambda) \text{ entonces } D = P \quad \text{si } (P > 1/2 \lambda) \text{ entonces } D = 0,2 + 0,035 T$$

$$\frac{1}{8}\lambda = 0,04; \quad \frac{1}{2}\lambda = 0,16; \quad \text{por lo tanto } P > \frac{1}{2}\lambda; \quad \text{esto significa que } D = 0,2 + 0,035 * 15,4 = 0,2005$$

$$\text{Finalmente } E_s = 0,26 - 0,2$$

$E_s = 0,064 \text{ m}^3/\text{s}$, debiéndose posteriormente multiplicarse por 31.536.000 (total de segundos de un año) para obtener resultados en $\text{m}^3/\text{año}$.

Por lo tanto $E_s = 2.018.304 \text{ m}^3/\text{año}$.

10.4.4 Escorrentía superficial de Turc.

Datos principales: Precipitación media de la cuenca anual = 265,04 mm o 0,26504 m

Temperatura media anual: 15,4 °C. = T

La fórmula de Turc para la estimación de escorrentía superficial, es mostrada a continuación:

$$E_s = P - D$$

$$\text{Donde: } D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

$$L = 300 + 25T + 0,0T^3$$

$$\text{Por lo tanto } E_s = 0,26504 - 0,00027$$

Finalmente $E_s = 0,264 \text{ m}^3/\text{s}$, debiéndose posteriormente multiplicarse por 31.536.000 (total de segundos de un año) para obtener resultados en $\text{m}^3/\text{año}$.

Por lo tanto $E_s = 8.325.504 \text{ m}^3/\text{año}$.

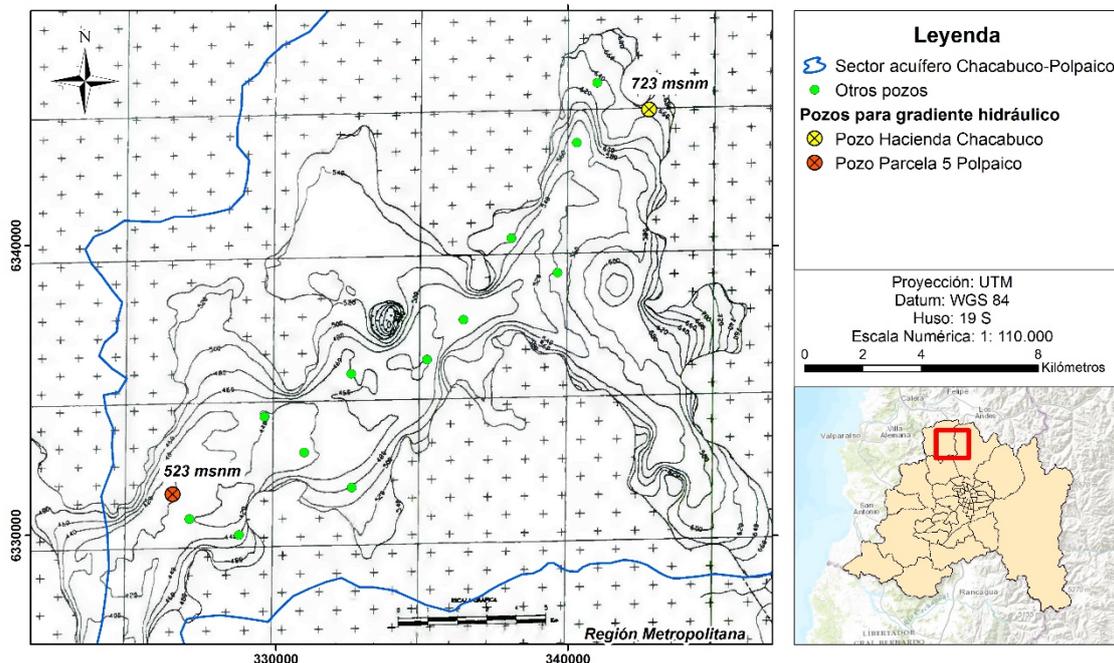
10.4.5 Estimación de Escorrentía Subterránea.

Para la estimación de escorrentía subterránea se calculó un valor de caudal medio anual en base a la siguiente ecuación: $Q = K * i * A$

Donde se utilizó un valor de conductividad hidráulica medio para el acuífero en estudio, obtenido por (CNR: 2013; citado por Urtubia et al: 2015)⁴³ el cual muestra un valor de $K = 7,5 * 10^{-5} \text{ m/s} = 0,000075 \text{ m/s}$.

El cálculo del gradiente hidráulico fue elaborado con isolíneas de basamento rocoso de estudio previo⁴⁴ y niveles freáticos de pozos de observación de DGA. (Figura 46)

Figura 46. Pozos para cálculo de gradiente hidráulico.



El cálculo del gradiente hidráulico es el siguiente:

$$i = \Delta H / \Delta L$$

$$\Delta H = 204,3 \text{ m}$$

$$\Delta L = 21.051,3 \text{ m}$$

$$i = 204,3 / 21.051,3 = 0,0097$$

Se calcula la velocidad de flujo subterráneo basándose en la **Ley de Darcy** ($Q = K * \Delta H / \Delta L$)

⁴³ Gestión de la Recarga en la Cuenca de Santiago: sectores y métodos para su implementación: Urtubia et al: 2015; pdf.

⁴⁴ Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho del año 2000: Ayala et al: 2000.

$$Q = 0,000075 \text{ m/s} * 0,0097$$

$$Q = 0,0000007275 \text{ m/s}$$

En tanto la sección transversal de la zona saturada cercana a la desembocadura de la cuenca a la cual pertenece el acuífero, es estimada en base a isolíneas de profundidad de basamento rocoso (bajo el relleno sedimentario), generadas en el estudio *Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho del año 2000. Estudio hecho para la DGA por Ayala, Cabrera y Asociados.*⁴⁵ Cuyas dimensiones son las siguientes:

Ancho: 2850 m

Potencia del estrato sedimentario: 103 m

Nivel freático en la sección transversal: 32 m

Altura de la zona saturada = Potencia del estrato sedimentario - Nivel freático en la sección transversal

$$\text{Altura de la zona saturada} = 103 \text{ m} - 32 \text{ m} = 71 \text{ m}$$

En el software Autocad se dibujó una figura geométrica representando la sección transversal del acuífero en la cual se estimará el caudal subterráneo medio anual, uniendo un arco entre el inicio y término de la línea de ancho 103 m con la profundidad de 71 m, entregando una superficie de 134.966,9 m².

El área anterior debe ser multiplicada por la Porosidad Efectiva media de la sección, eligiéndose en este caso, un valor medio típico de 0,3. Entonces (134.966,9 m² * 0,3 = 40.490 m²), por lo tanto el **Área Real de Flujo** es de **40.490 m²**.

Procediéndose a la estimación de caudal subterráneo medio anual.

$$Q_{sub} = K * i * A$$

$$Q_{sub} = 0,000075 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0097 * 40.490 \text{ m}^2$$

$$Q_{sub} = 0,029456 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Considerando un total de 31.536.000 segundos en un año calendario.

$$Q_{sub} \text{ medio anual} = 0,029456 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 31.536.000 \text{ s}$$

$$Q_{sub} \text{ medio anual} = 928.939,3 \text{ m}^3$$

Según los cálculos realizados, el caudal subterráneo medio anual de la cuenca alcanza los **928.939,3 m³**.

⁴⁵ Ayala et al. (2000)

10.4.5.1 Aspecto del cauce del estero Chacabuco.

Se presentan a continuación fotografías del principal estero del área de estudio (Estero Chacabuco), al norte de la localidad de Huertos Familiares. (Figura 46).

Figura 47. Estero Chacabuco al norte de Huertos Familiares.



Fuente: DARH, DGA-RM 10-09-2014.

Como se puede observar, el principal río del área de estudio se presenta completamente seco en el mes de septiembre, al no recibir precipitaciones y no contar con un caudal base aportante desde el acuífero subyacente.

Por lo que se deduce que los caudales superficiales calculados por los diferentes métodos teóricos, se pueden desarrollar en los meses preferentemente de invierno como respuesta a precipitaciones intensas.

10.5 Estimación de retornos por infiltración de agua de riego.

Como ya se había mencionado, ningún sistema de riego ofrece una eficiencia del 100 %, lo que significa que necesariamente una porción del agua de riego se perderá por infiltración, y eventualmente podría llegar al nivel freático para convertirse en recarga para el acuífero.

Esa porción de pérdida de agua por eficiencia sólo representaría infiltración, puesto que los cálculos de demanda de agua de riego fueron considerados en la base de la demanda de agua de riego por evapotranspiración de cultivos en condiciones estándar basado en el método de la FAO Penman-Monteith (1998), por lo que toda la pérdida de agua por evapotranspiración ya fue considerada y cubierta en su totalidad.

10.5.1 Cálculo de Demanda de agua neta de los cultivos (D_n).

Se había mencionado anteriormente que para estimar los retornos de agua de riego de cultivos, es necesario primero determinar la Demanda de agua neta de los cultivos (D_n), que es la cantidad de agua que se ha de suministrar a la zona radical del cultivo mediante el riego. El cálculo de D_n se obtiene descontando la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (ET_c) de la cantidad de agua aportada por la Precipitación Efectiva (Pe), que representa la fracción de la precipitación que contribuye a satisfacer la ET_c de un cultivo ($D_n = ET_c - Pe$),

(Antúnez y Felmer: 2009: 68). Cuando se determina ETc para un periodo sin precipitaciones, entonces la Dn es igual a la ETc.

Como ya se había mencionado, donde la escorrentía superficial es cero o tan cercana a cero que es posible considerarla como insignificante, el valor de la precipitación efectiva será equivalente a la precipitación media mensual de la cuenca, como es el caso de la cuenca en estudio.

Los resultados mensuales de Demanda de agua neta de cultivos (mm/mes), se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Demanda de agua neta de cultivos (mm/mes).

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación mm/mes	0,3	1,7	3,7	7,7	35,8	88,3	50,7	41,8	16,9	9,8	6,9	1,4
Uso suelo	Demanda de agua neta de cultivos (Dn), (mm/mes)											
agua riego												
agua relave												
alfalfa	213,6	169,0	91,6	50,8	-17,2	-76,3	-37,0	-18,2	50,6	87,8	176,0	212,5
barbecho												
choclos	161,5	13,2	9,0	0,1	-31,1	-85,3	-47,3	-35,9	-7,9	42,2	115,6	206,9
ciruelos	167,1	131,9	85,2	43,0	-31,1	-85,3	-47,3	-35,9	-7,9	42,2	80,6	138,1
faena minera												
gramínea	213,6	169,0	91,6	50,8	-17,2	-76,3	-37,0	-18,2	50,6	87,8	176,0	212,5
industrial												
nogales	211,7	167,5	125,9	46,9	-22,8	-85,3	-47,3	-35,9	-6,1	68,3	120,3	177,2
olivos	102,0	79,9	66,2	39,1	-5,6	-73,3	-33,6	-12,4	41,6	68,3	80,6	100,9
relave minero												
urbano												
vides	157,8	124,5	85,2	39,1	-12,5	-85,3	-47,3	-35,9	-7,9	48,8	88,5	128,8
zanahorias	167,1	131,9	110,7	62,5	6,1	-61,3	-20,0	11,2	64,1	107,3	136,2	166,0
vegetación esclerófila												

Elaboración propia

Como es posible observar en la tabla 19, los valores negativos de Dn corresponden a los meses de invierno, cuando las necesidades de riego de cultivos son menores que los aportes por precipitaciones.

10.5.2 Cálculo de Demanda de agua bruta de los cultivos (Db).

Como las eficiencias de riego nunca alcanzan el 100 %, es necesario ajustar la demanda de agua a las eficiencias de riego, surgiendo el concepto de Demanda de agua bruta de los cultivos (Db), siendo esta la cantidad de agua que realmente se almacena en la zona radical de los cultivos, mostrándose en la siguiente ecuación: (Antúnez y Felmer: 2009).

$$Db = Dn/Efr * 100$$

Donde:

Db: Demanda de agua bruta (mm/día)

Dn: Demanda de agua neta (mm/día)

Efr: Eficiencia de riego (%)

Presentándose ahora una tabla con las eficiencias de riego de los métodos utilizados en el área de estudio (ver tabla 20).

Tabla 20. Eficiencia de riego de métodos presentes en el área de estudio.

Método de Riego	Eficiencia de aplicación (%)
Surco	45
Aspersión	75
Microjet	85

Fuente: C.N.R. (2000)⁴⁶

Con los datos listos de Demanda de agua neta y obtenidas ya las eficiencias de los diferentes sistemas de riego, se elabora la siguiente tabla de Demanda de agua bruta de cultivos (mm/mes), (tabla 21).

Como se ha mencionado anteriormente la Demanda de agua bruta es el cociente entre la Dn y la eficiencia de riego multiplicada por 100, (tabla 20).

Los espacios en blanco corresponden a los usos de suelo que no son cultivos y los meses cuando no existe demanda de agua de riego, por una combinación de bajo consumo de los cultivos y aportes de precipitación.

Tabla 21. Demanda de agua bruta de cultivos (mm/mes).

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Precipitación mm/mes	0,3	1,7	3,7	7,7	35,8	88,3	50,7	41,8	16,9	9,8	6,9	1,4		
Uso suelo	Demanda de agua bruta de cultivos (Db), (mm/mes)												sistema riego	Efr
agua riego														
agua relave														
alfalfa	284,8	225,3	122,1	67,8					67,4	117,1	234,7	283,4	aspersion	75
barbecho														
choclos	358,9	29,2	19,9	0,3						93,9	256,8	459,9	surco	45
ciruelos	196,6	155,1	100,3	50,6						49,7	94,8	162,5	microjet	85
faena minera														
gramínea	251,3	198,8	107,7	59,8					59,5	103,3	207,1	250,0	microjet	85
industrial														
nogales	249,1	197,0	148,1	55,2						80,3	141,6	208,5	microjet	85
olivos	120,0	94,0	77,8	46,0					48,9	80,3	94,8	118,7	microjet	85
relave minero														
urbano														
vides	185,6	146,4	100,3	46,0						57,4	104,2	151,6	microjet	85
zanahorias	371,3	293,0	245,9	139,0	13,4			24,9	142,3	238,5	302,8	369,0	surco	45
vegetación esclerófila														

Elaboración propia

Ahora se procede al cálculo de la Demanda de agua de riego de cultivos en m³/mes, cuyo cálculo de realiza multiplicando la Demanda de agua bruta por la superficie de cada cultivo.

Como los valores de Db están expresados en mm/mes y la superficie de cultivos esta en m², se procedió a dividir los valores en 1000, pero a esos valores se debió sumar la diferencia de la eficiencia de riego. Por ejemplo la alfalfa se riega por el método de Aspersión el que posee una eficiencia de riego del 75 %, lo que significa que los cultivos aprovechan el 75 % del agua de riego

⁴⁶ CNR. (2000) Estimación de la demanda de agua en los cultivos.

y se infiltra el restante 25 % y esto significa que se debe agregar a la Demanda de agua de riego el 25 % restante de la eficiencia de riego. Los resultados se muestran en m³/mes en la tabla 22.

Tabla 22. Demanda de agua de riego de cultivos (m³/mes).

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación mm/mes	0,3	1,7	3,7	7,7	35,8	88,3	50,7	41,8	16,9	9,8	6,9	1,4
Uso suelo	Demanda de agua de riego de cultivos (m ³ /mes)											
agua riego												
agua relave												
alfalfa	1070843,9	847109,8	459152,3	254847,3					253430,5	440245,2	882324,4	1065466,7
barbecho												
choclos	337219,7	27459,1	18731,0	280,1						88199,2	241298,9	432062,4
ciruelos	886901,6	699925,2	452375,9	228408,1						224221,3	427773,9	733126,7
faena minera												
gramínea	1453243,9	1149614,0	623116,3	345853,6					343930,9	597457,4	1197403,8	1445946,5
industrial												
nogales	782996,2	619356,1	465580,4	173558,2						252512,9	445030,2	655223,9
olivos	1481274,7	1160796,7	960890,1	568316,3					603422,3	991657,1	1170442,9	1465698,3
relave minero												
urbano												
vides	2248815,1	1773571,4	1214638,8	557701,6						694813,1	1261877,6	1835926,2
zanahorias	750074,1	591943,6	496689,6	280701,2	27167,9			50286,7	287512,4	481848,0	611578,5	745259,5
vegetación esclerófila												

Elaboración propia

La tabla 22 muestra que los mayores de valores de demanda de riego pertenecen a los cultivos de vides, ya sea tanto por su alto coeficiente de cultivo (Kc) como por su gran superficie de cultivo, esto preferentemente en los meses de verano. Otros valores altos pertenecen a los cultivos de olivos.

Una vez obtenidos los valores de Demanda anual de agua de riego de cultivos (42.935.131,2 o 42,9 millones de m³ al año), se procede al cálculo de los Retornos de agua de riego en m³/mes y m³/año, los que son obtenidos como los resultados de la diferencia de la Eficiencia de riego.

Por ejemplo, las vides son regadas por el método de Microjet, el que posee una eficiencia de riego del 85 %, lo que significa que teóricamente se infiltra el 15 % de la Demanda de agua de riego de cultivos en m³/mes. Estos valores de infiltración son los Retornos de agua de riego en m³/mes, mostrados en la tabla 23.

Tabla 23. Retornos de agua de riego (m³/mes).

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación mm/mes	0,3	1,7	3,7	7,7	35,8	88,3	50,7	41,8	16,9	9,8	6,9	1,4
Uso suelo	Retornos de agua de riego (m ³ /mes)											
agua riego												
agua relave												
alfalfa	267711,0	211777,4	114788,1	63711,8					63357,6	110061,3	220581,1	266366,7
barbecho												
choclos	185470,8	15102,5	10302,1	154,1						48509,5	132714,4	237634,3
ciruelos	133035,2	104988,8	67856,4	34261,2						33633,2	64166,1	109969,0
faena minera												
gramínea	217986,6	172442,1	93467,5	51878,0					51589,6	89618,6	179610,6	216892,0
industrial												
nogales	117449,4	92903,4	69837,1	26033,7						37876,9	66754,5	98283,6
olivos	222191,2	174119,5	144133,5	85247,4					90513,3	148748,6	175566,4	219854,7
relave minero												
urbano												
vides	337322,3	266035,7	182195,8	83655,2						104222,0	189281,6	275388,9
zanahorias	412540,8	325569,0	273179,3	154385,7	14942,3			27657,7	158131,8	265016,4	336368,2	409892,7
vegetación esclerófila												

Elaboración propia

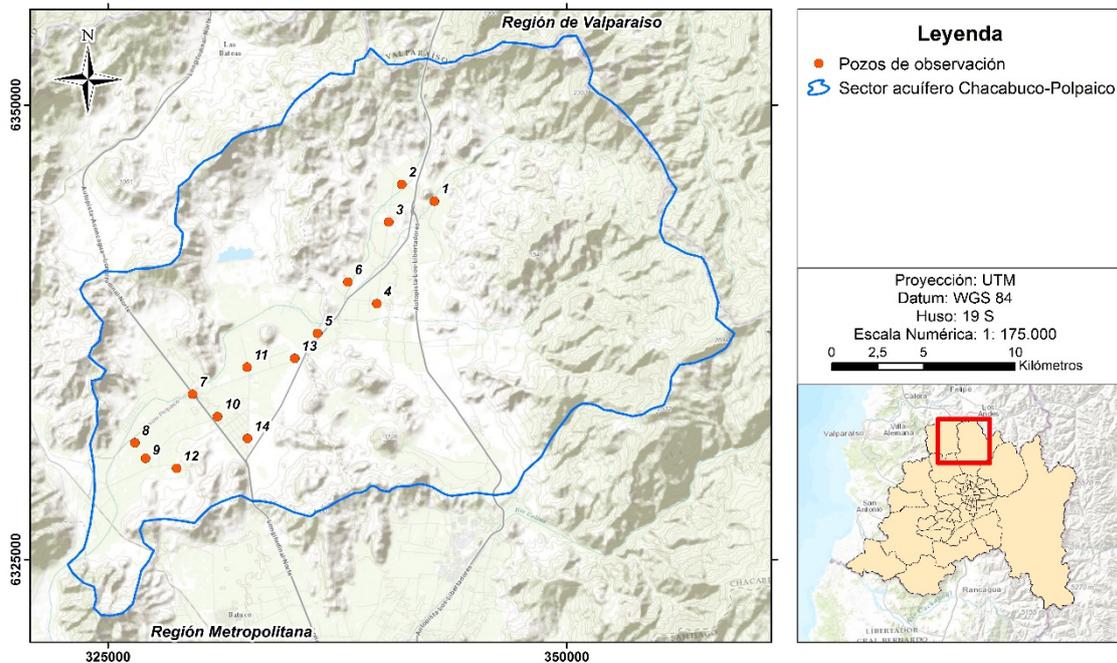
La tabla 23 muestra que los mayores valores de Retornos de agua de riego son obtenidos desde los cultivos de zanahorias, los cuales no son los que poseen las mayores áreas de cultivos dentro del área de estudio, sin embargo, su alto Factor de cultivo (K_c) además de su baja eficiencia de riego (Riego de surco con 45 % de eficiencia), resultan en su gran aporte como retorno de riego al acuífero.

Una vez sumados los valores de los retornos de agua de riego de cada mes de todos los cultivos, se calculan los Retornos de agua de riego medios anuales, los cuales corresponden a 9.154.936,4 m^3 . (9,15 millones de $m^3/año$).

10.6 Análisis de variaciones del nivel estático del acuífero.

En este capítulo se analizan los datos de los pozos de observación existentes en el área de estudio, los cuales se distribuyen según la siguiente cartografía. (Figura 48)

Figura 48. Pozos de observación de nivel estático.



Elaboración propia

La información sobre nivel estático existente de estos pozos se expresa en los siguientes gráficos (los números de los pozos corresponden a los números en los gráficos siguientes).

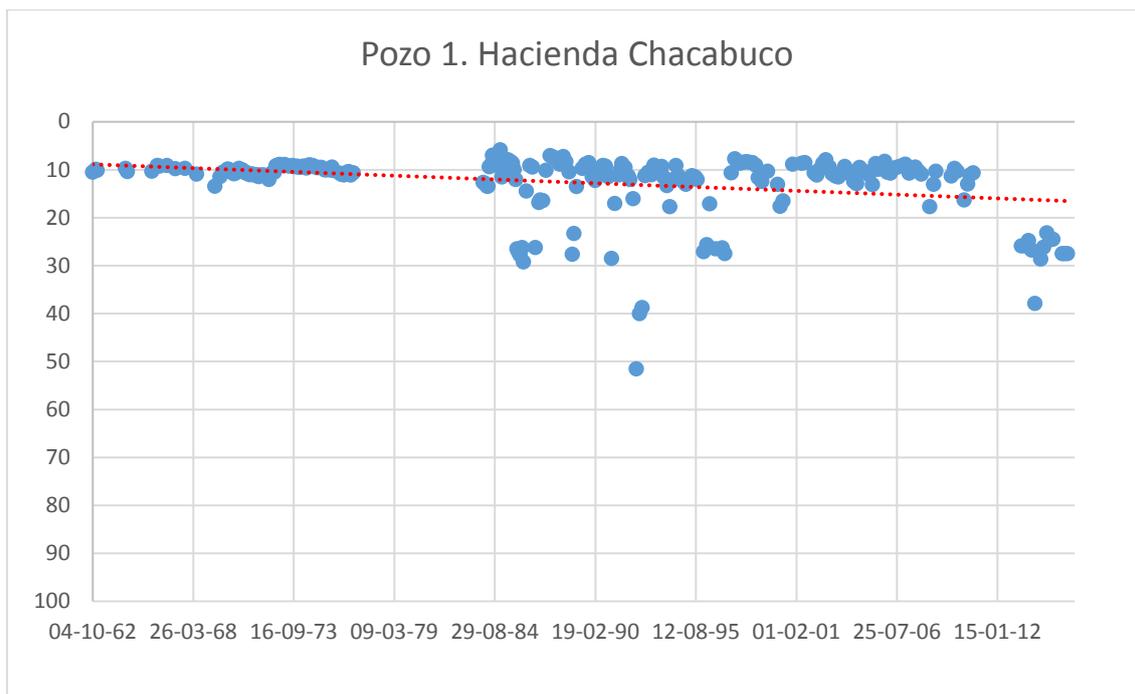
10.6.1 Gráficos de niveles de pozos de observación.

La información de nivel estático de pozos dentro del área de estudio posee series incompletas y no continuas desde la década de 1960 hasta 1976. Luego existe una carencia de mediciones entre 1977 y 1983, para retomar nuevamente las mediciones desde 1984 hasta el presente,

siendo este último periodo donde las mediciones han sido más constantes en el tiempo. (DGA: 2000)⁴⁷.

Se debe señalar que no todos los pozos donde se toman mediciones del nivel freático son exclusivos para este fin, existiendo algunos pozos en los cuales se realizan extracciones de agua para diversos usos y además son usados para mediciones periódicas del nivel de agua del acuífero por el Departamento de Hidrología de la DGA, (ver detalles de pozos de observación en el capítulo 15, sección de anexos).

Gráfico 22. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Hacienda Chacabuco.

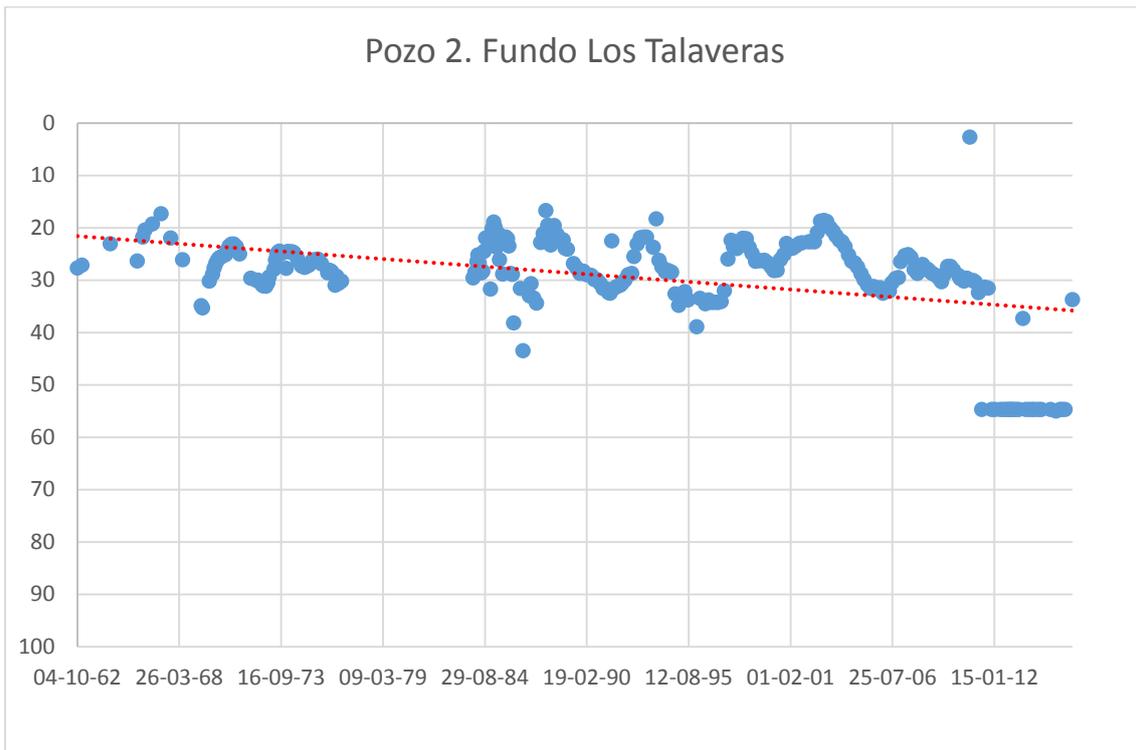


Elaboración propia

Pozo Hacienda Chacabuco: Datos desde 04-10-1962, Hasta 06-11-2015.

⁴⁷ DGA: 2000 “Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho” Tomo I Informe.

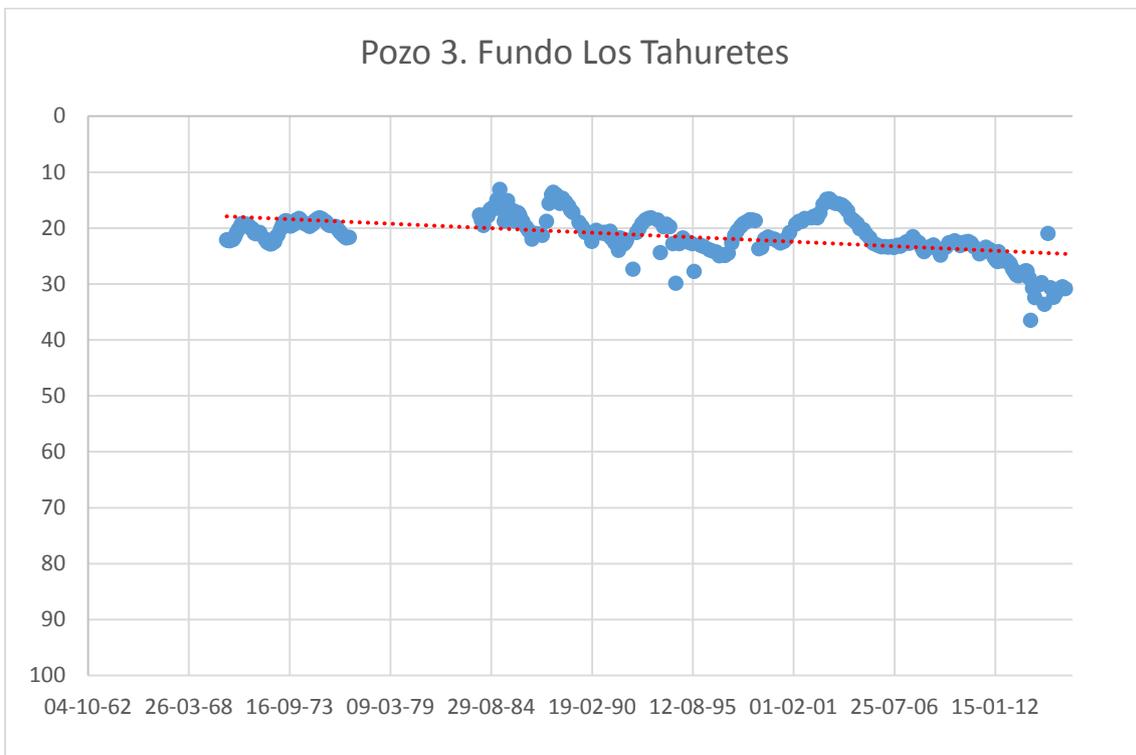
Gráfico 23. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fundo Los Talaveras.



Elaboración propia

Fundo Los Talaveras: Datos desde 04-10-1962, Hasta 28-03-2016.

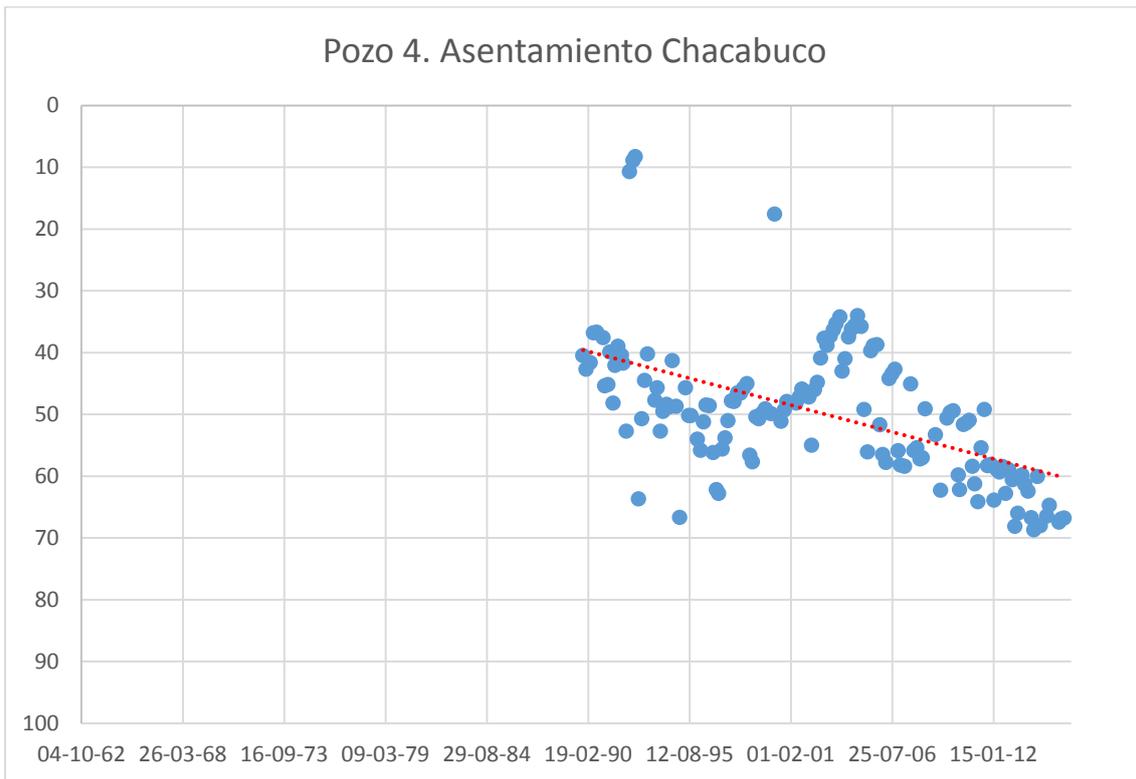
Gráfico 24. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fundo Los Tahuretes.



Elaboración propia

Fundo Los Tahuretes: Datos desde 15-04-1970, hasta 06-11-2015.

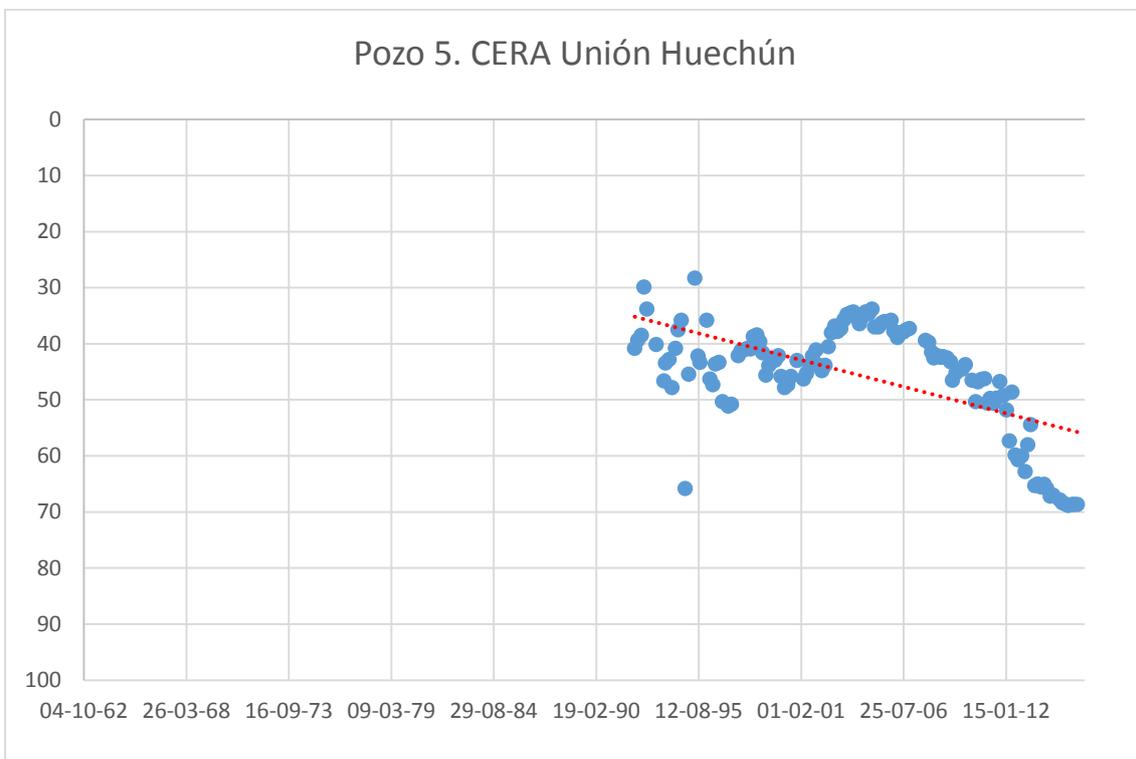
Gráfico 25. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Asentamiento Chacabuco.



Elaboración propia

Asentamiento Chacabuco: Datos desde 08-11-1989, hasta 06-11-2015.

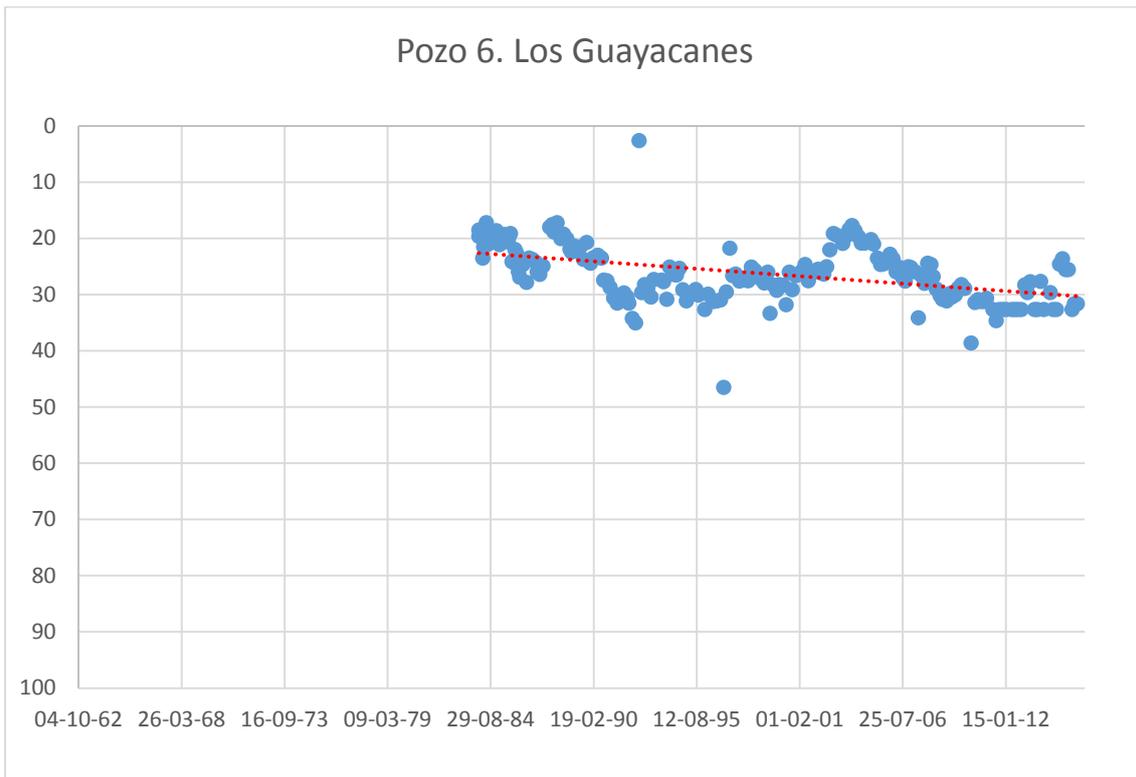
Gráfico 26. Mediciones de nivel estático en metros, pozo CERA Unión Huechún.



Elaboración propia

CERA Unión Huechún: Datos desde 01-03-1992, hasta 06-11-2015.

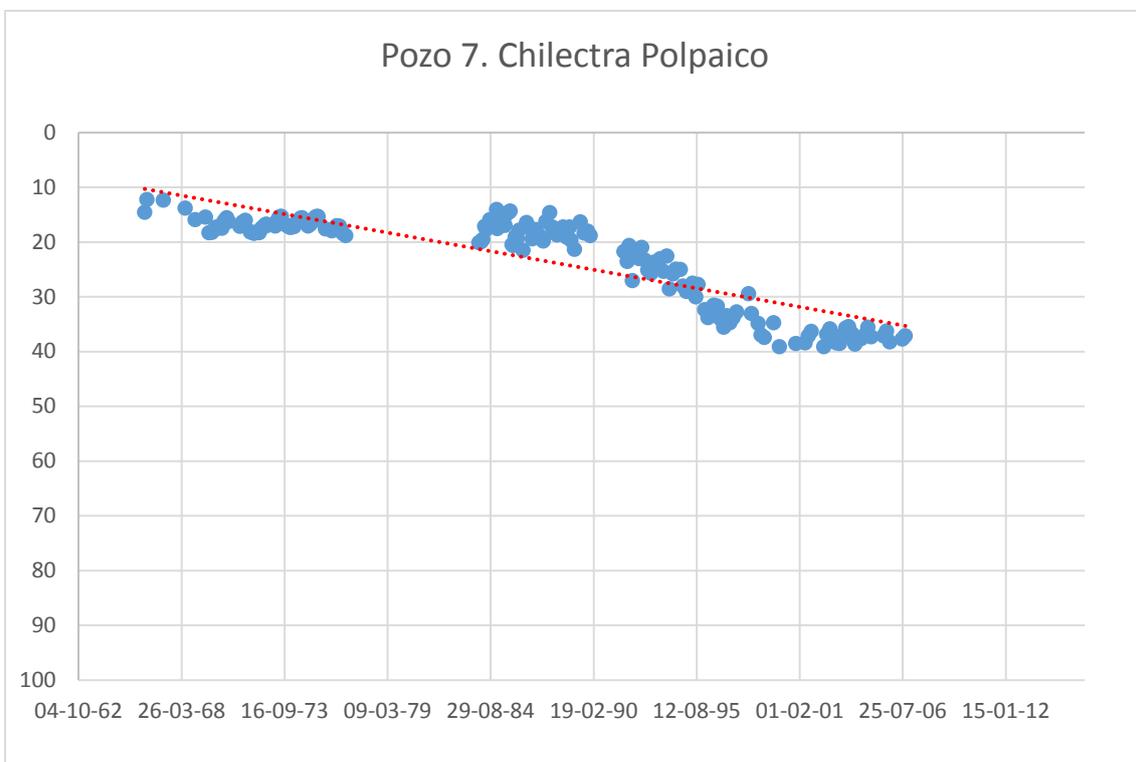
Gráfico 27. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Los Guayacanes.



Elaboración propia

Los Guayacanes: Datos desde 13-01-1984, hasta 06-11-2015.

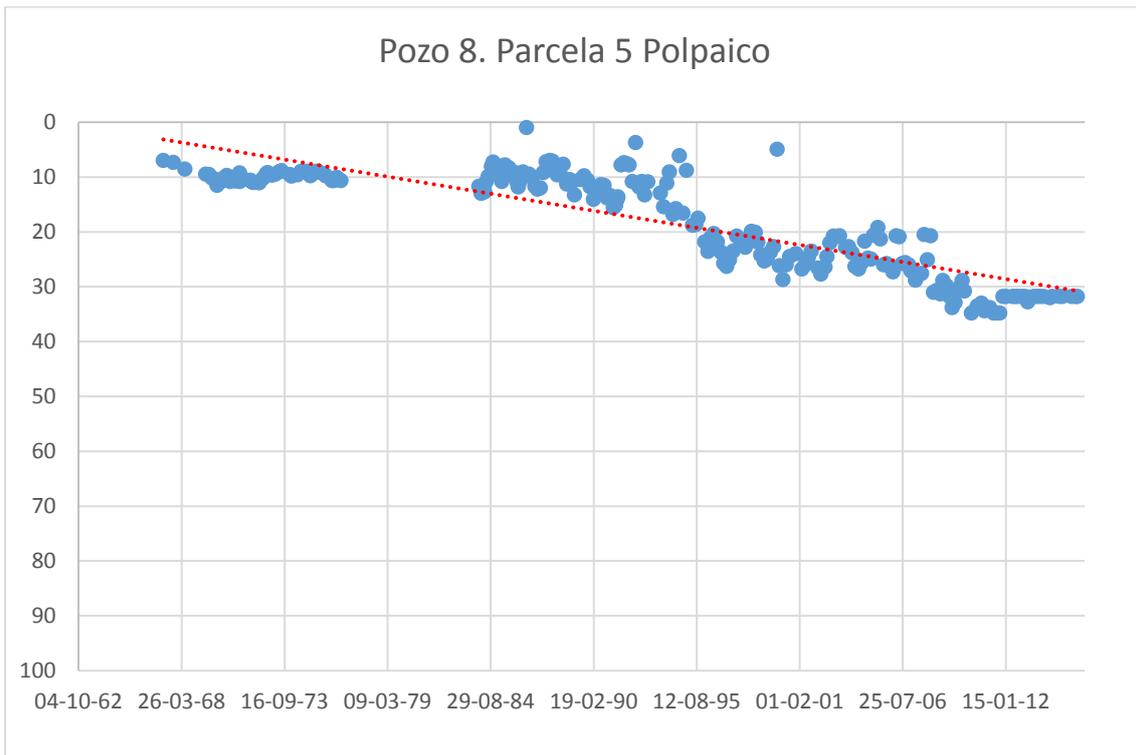
Gráfico 28. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Chilectra Polpaico.



Elaboración propia

Chilectra Polpaico: Datos desde 11-04-1966, hasta 12-09-2006.

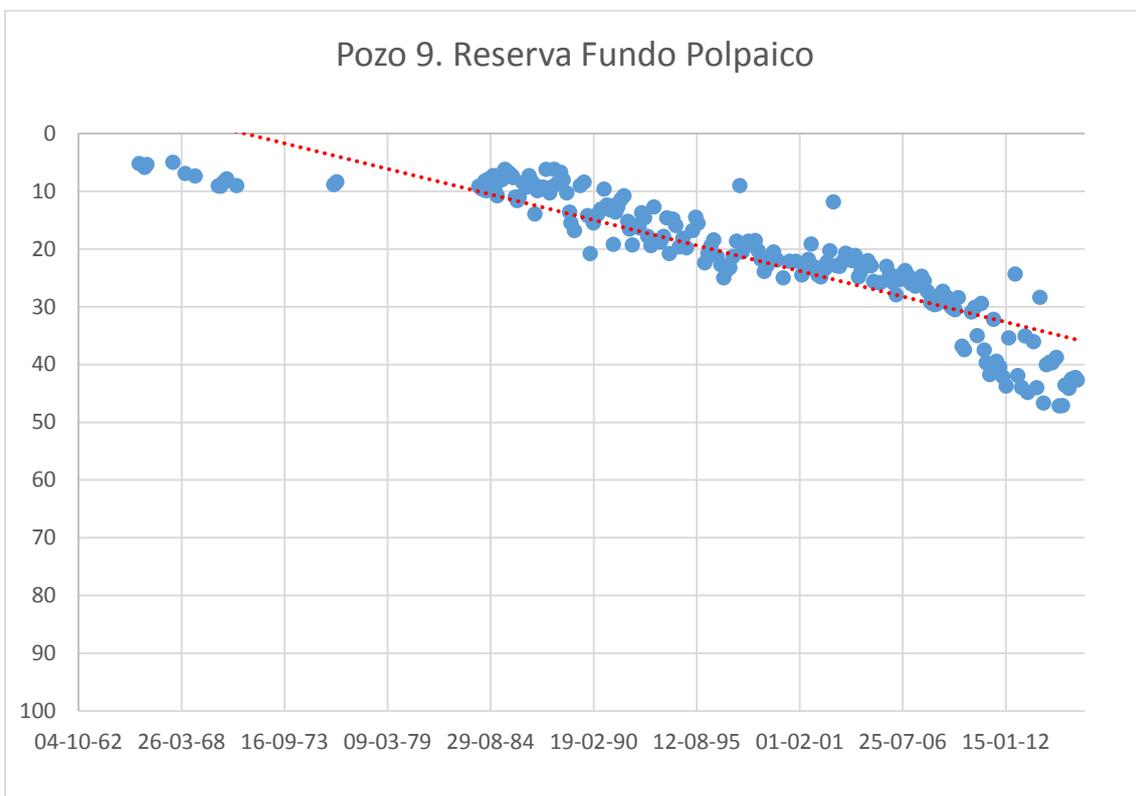
Gráfico 29. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Parcela 5 Polpaico.



Elaboración propia

Parcela 5 Polpaico: Datos desde 06-04-1967, hasta 03-11-2015.

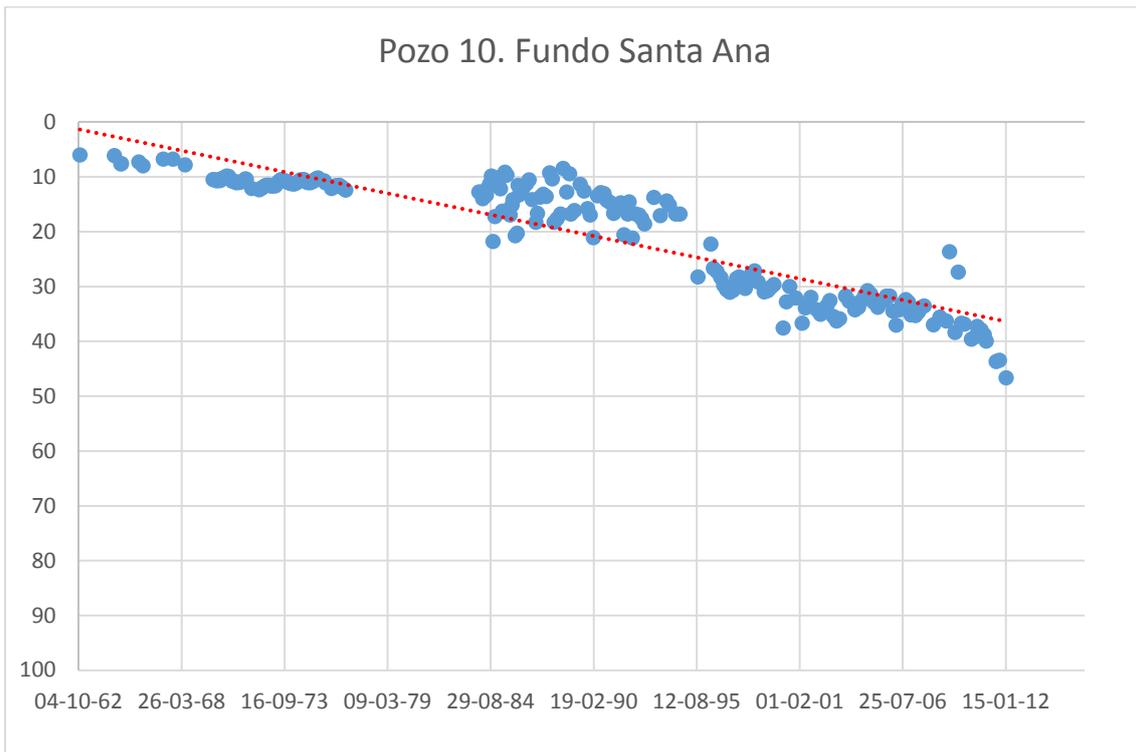
Gráfico 30. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Reserva Fundo Polpaico.



Elaboración propia

Reserva Fundo Polpaico: Datos desde 22-12-1965, hasta 03-11-2015.

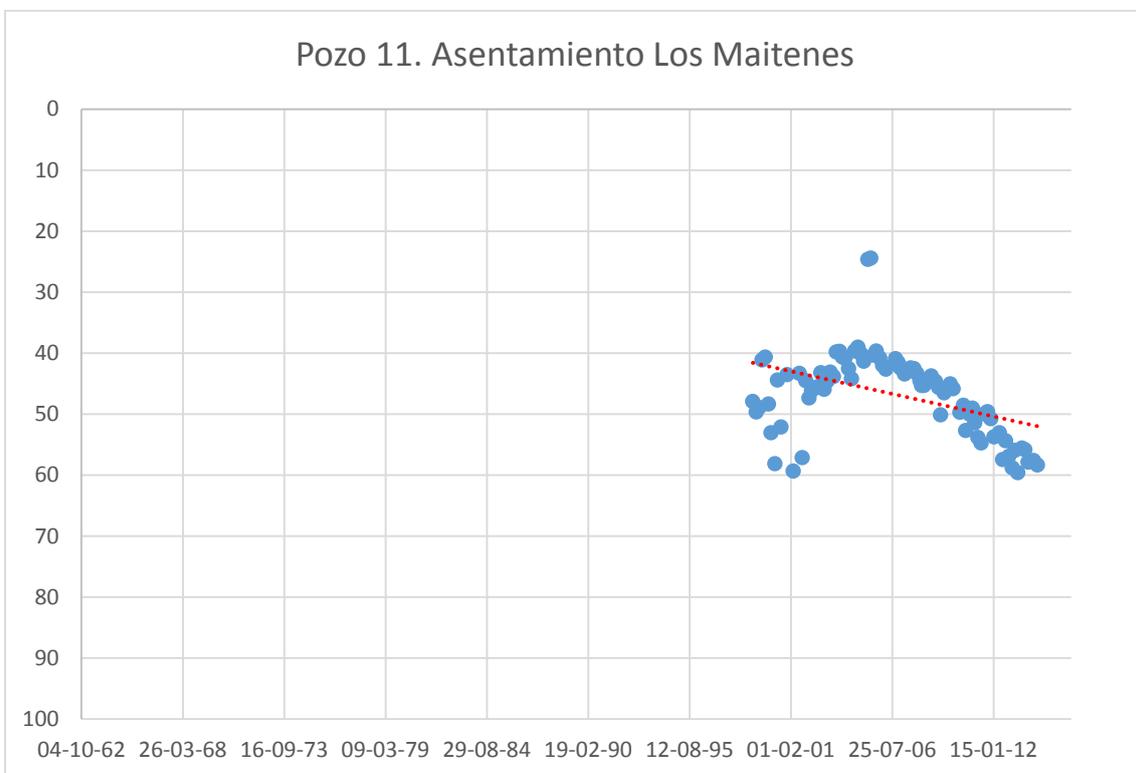
Gráfico 31. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fundo Santa Ana.



Elaboración propia

Fundo Santa Ana: Datos desde 30-10-1962, hasta 23-01-2012.

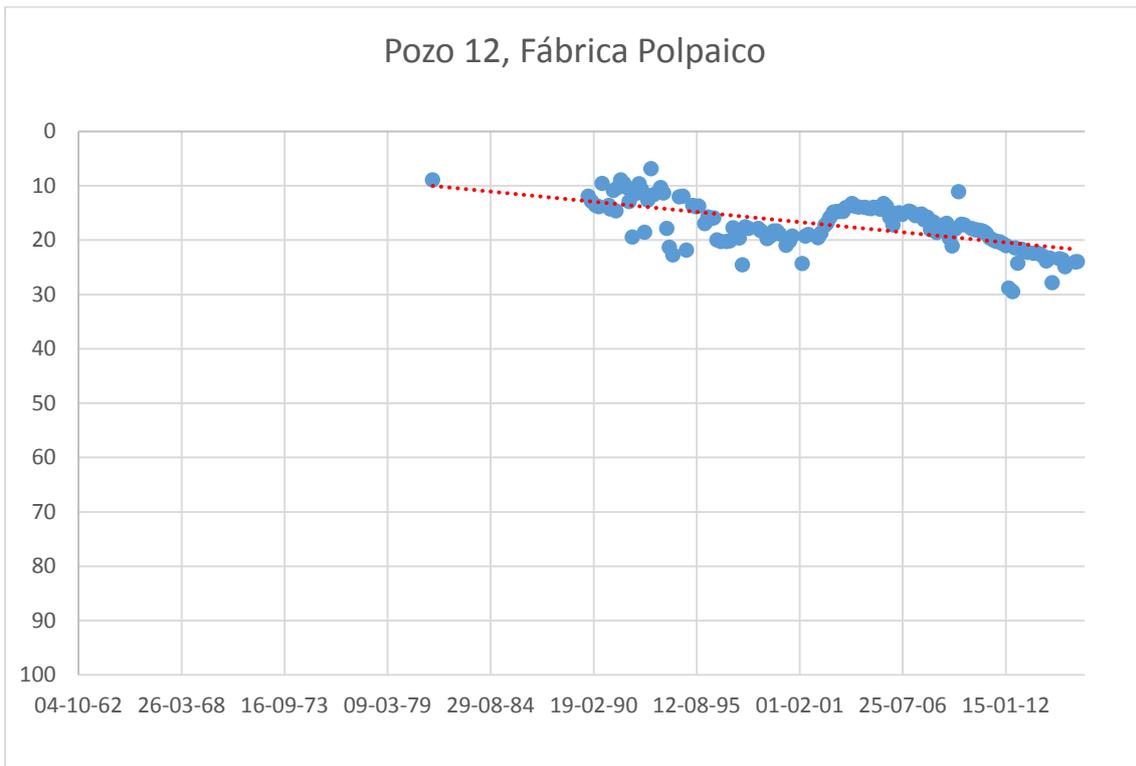
Gráfico 32. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Asentamiento Los Maitenes.



Elaboración propia

Asentamiento Los Maitenes: Datos desde 12-01-1999, hasta 26-05-2014.

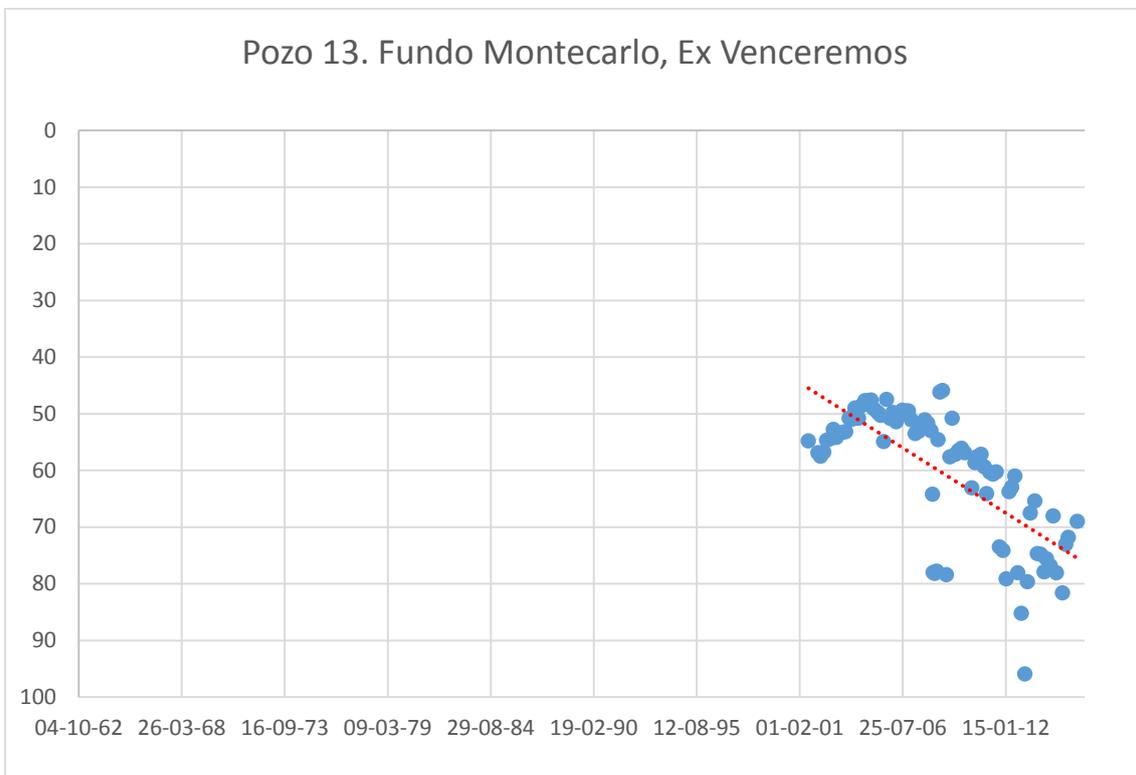
Gráfico 33. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fabrica Polpaico.



Elaboración propia

Fábrica Polpaico: Datos desde 01-08-1981, hasta 03-11-2015.

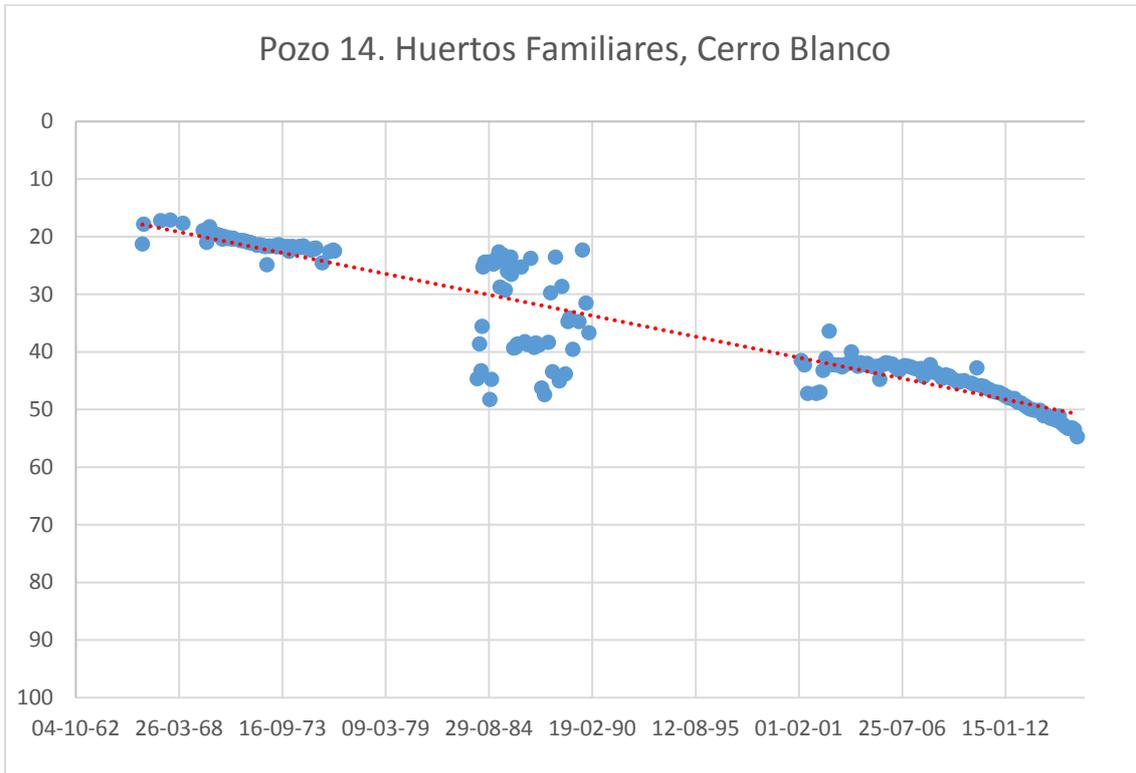
Gráfico 34. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Fundo Montecarlo, ex Venceremos.



Elaboración propia

Fundo Montecarlo, ex Venceremos: Datos desde 20-07-2001, hasta 06-11-2015.

Gráfico 35. Mediciones de nivel estático en metros, pozo Huertos Familiares, Cerro Blanco.



Elaboración propia

Huertos Familiares, Cerro Blanco: Datos desde 12-04-1966, hasta 03-11-2015.

Los gráficos de las series de datos de nivel estático muestran en todos los casos tendencias a la baja del nivel freático general del acuífero, lo que está en directa relación con el balance hídrico negativo, causado por la sobreexplotación de los pozos dentro del área de estudio.

Toda la información de nivel estático de pozos del área de estudio fue entregada directamente por el Departamento de Hidrología de la DGA Región Metropolitana. (Ver alternativa para descarga en línea)⁴⁸

10.6.2 Modelo de regresión entre niveles de pozos y precipitaciones.

Se realiza un Modelo de regresión entre las variables de niveles freáticos de pozos y precipitaciones mensuales y anuales. Como variable dependiente se asume a los datos de niveles estáticos de los pozos de observación, medidos por la DGA dentro del área de estudio (14 pozos), y como variable independiente se asume a las precipitaciones (datos mensuales y anuales), cuyos datos provienen de los promedios simples de precipitación mensual y anual de las únicas dos estaciones meteorológicas de precipitaciones dentro del área de estudio (estaciones de DGA), ambas estaciones están a pocos kilómetros de todos los pozos de

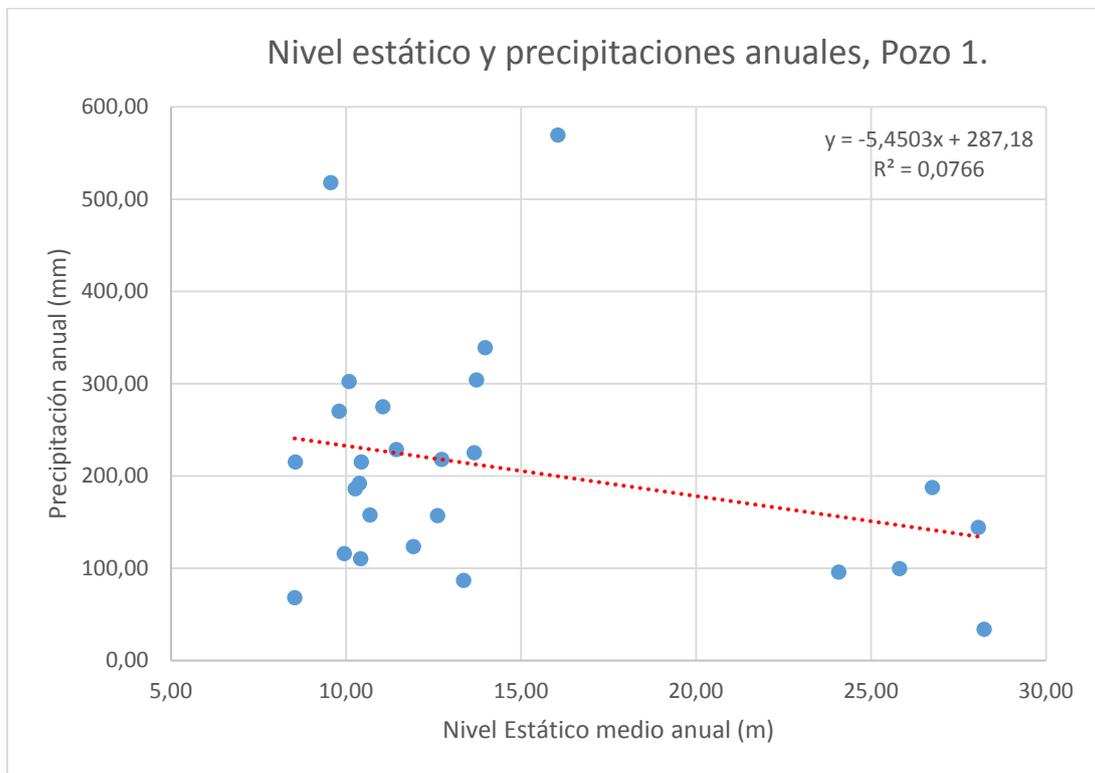
⁴⁸ También puede ser descargada desde la página web de la institución <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes> aunque con un desfase de hasta 6 meses desde la toma de mediciones hasta la publicación.

observación de variación freática. Estas estaciones meteorológicas son: Huechún Embalse y Huechún Andina.

Los rangos de datos usados en estos cálculos de regresión abarcan desde enero de 1988 hasta diciembre de 2015, tanto para precipitaciones como para niveles de pozos (27 años o 324 meses). (Gráficos 36 y 37)

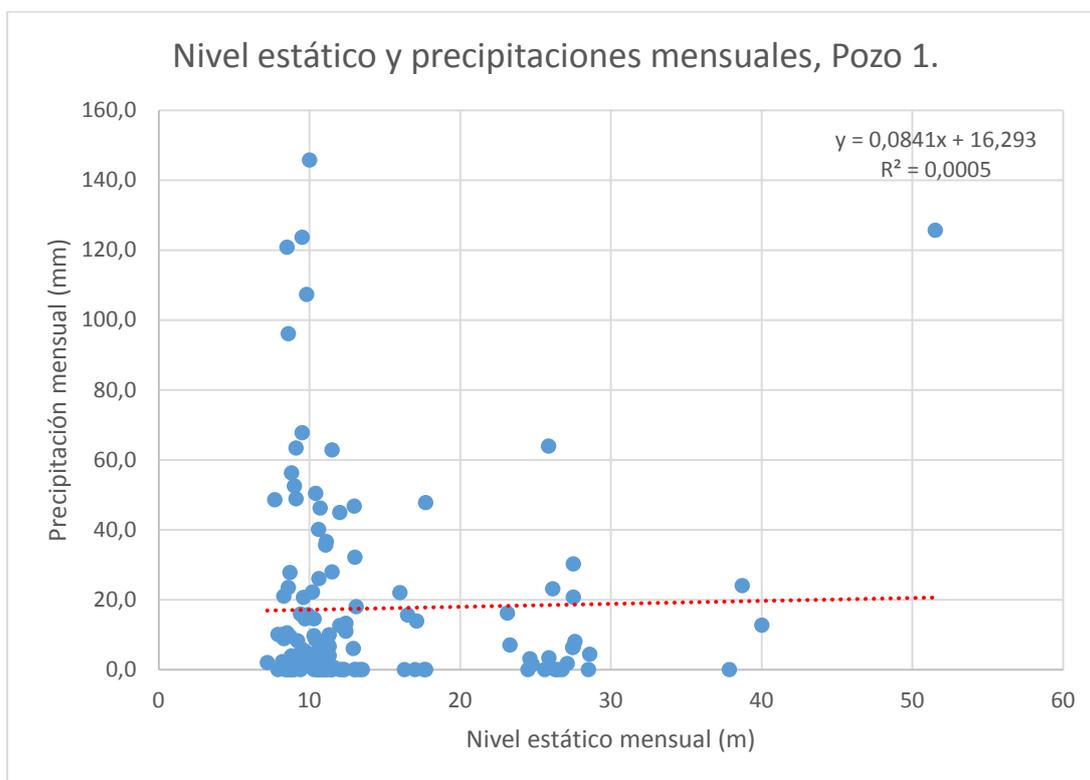
Se asume a modo de hipótesis que la respuesta de los niveles de pozos ante las precipitaciones debiese ser inversamente proporcional. De este modo; mientras mayor sea la cantidad de precipitación anual o mensual, menor debiese ser el nivel estático de los pozos (más cercano al nivel de la superficie del suelo), de modo contrario; a menor precipitación anual o mensual, mayor debiese ser el nivel estático de los pozos (más distante a la superficie del suelo). (Tabla 24)

Gráfico 36. Modelo de regresión entre niveles estáticos y precipitaciones anuales, pozo Hacienda Chacabuco.



Elaboración propia

Gráfico 37. Modelo de regresión entre niveles estáticos y precipitaciones mensuales, pozo Hacienda Chacabuco.



Elaboración propia

Tabla 24. Resumen de valores de R² entre precipitaciones y niveles de pozos.

Pozos de medición	R2 anual	R2 mensual
Pozo 1	0,0766	0,0005
Pozo 2	0,0211	0,013
Pozo 3	0,0011	0,0034
Pozo 4	0,0078	0,0538
Pozo 5	0,0008	0,0266
Pozo 6	0,0021	0,0005
Pozo 7	0,0027	0,0084
Pozo 8	0,0255	0,0017
Pozo 9	0,0024	0,0175
Pozo 10	0,057	0,0002
Pozo 11	0,0042	0,0312
Pozo 12	0,0027	0,0077
Pozo 13	0,0002	0,0527
Pozo 14	0,0194	0,009

Elaboración propia

Es posible observar en la tabla 24 la muy baja o nula relación entre los valores de precipitaciones anuales con sus respectivos niveles de pozos anuales, junto con valores de precipitaciones mensuales y sus contrapartes de niveles de pozos. Los resultados de las regresiones son tan bajos que indican que las precipitaciones mensuales o anuales no son una variable que explique los cambios en los niveles de los pozos del área de estudio.

Los resultados de los valores de R^2 junto con los gráficos y tendencias de niveles de pozos, pueden indicar un baja recarga en los meses de invierno comparada con la fuerte extracción en los meses cuando se riegan los cultivos, de preferencia en primavera y verano, agregándole complejidad al proceso de la recarga potencial al acuífero por concepto de retornos de agua de riego.

Como se descarta la precipitación como variable que explique los cambios en los niveles de pozos, se propone a la variable de extracción de agua de riego como la variable que explique esos cambios en los niveles freáticos, lamentablemente en la actualidad no existen registros del agua extraída desde los pozos con Derechos de Aprovechamiento de agua.

Se asume una variación estacional del nivel freático de los pozos, causada por las diferencias en las precipitaciones, mientras las variaciones semanales o diarias dependerían más directamente de la extracción.

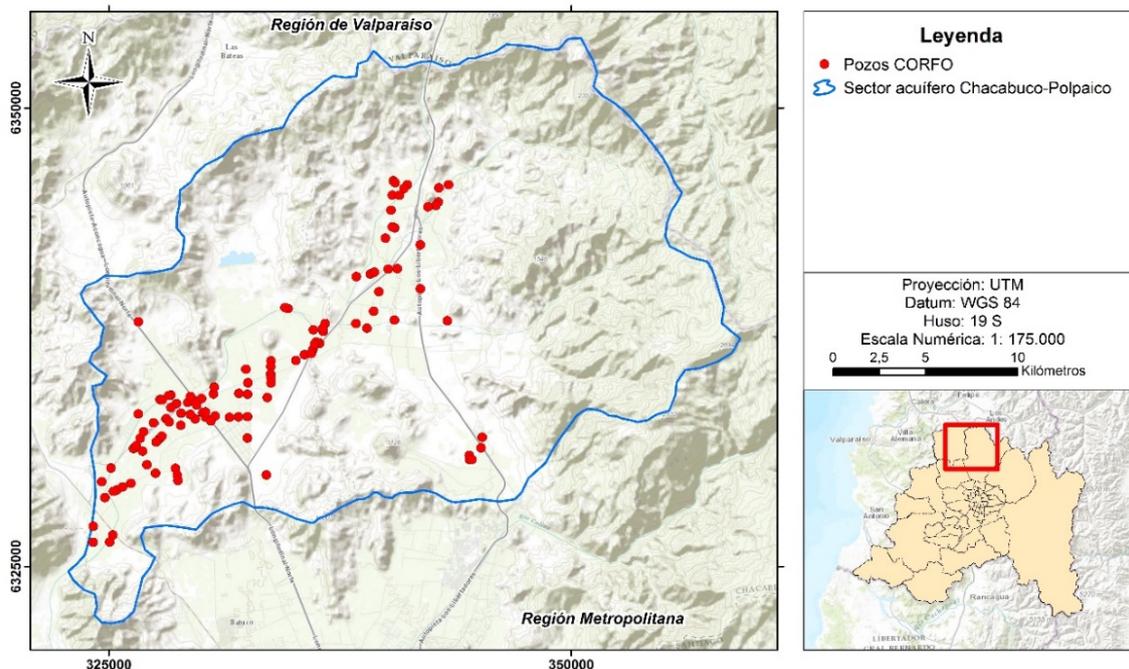
10.7 Estimación de extracción artificial de agua del acuífero.

10.7.1 Derechos de aguas otorgados y pendientes

10.7.1.1 Solicitudes de derechos de agua otorgadas.

Los derechos de agua, definidos como Pozos CORFO en el área de estudio, se expresan en 112 pozos, de los cuales sólo hay información de caudal otorgado de extracción de 82 de ellos, los que en suma representan derechos de extracción de 4.194,9 l/s. (Figura 49)

Figura 49. Ubicación de pozos CORFO.



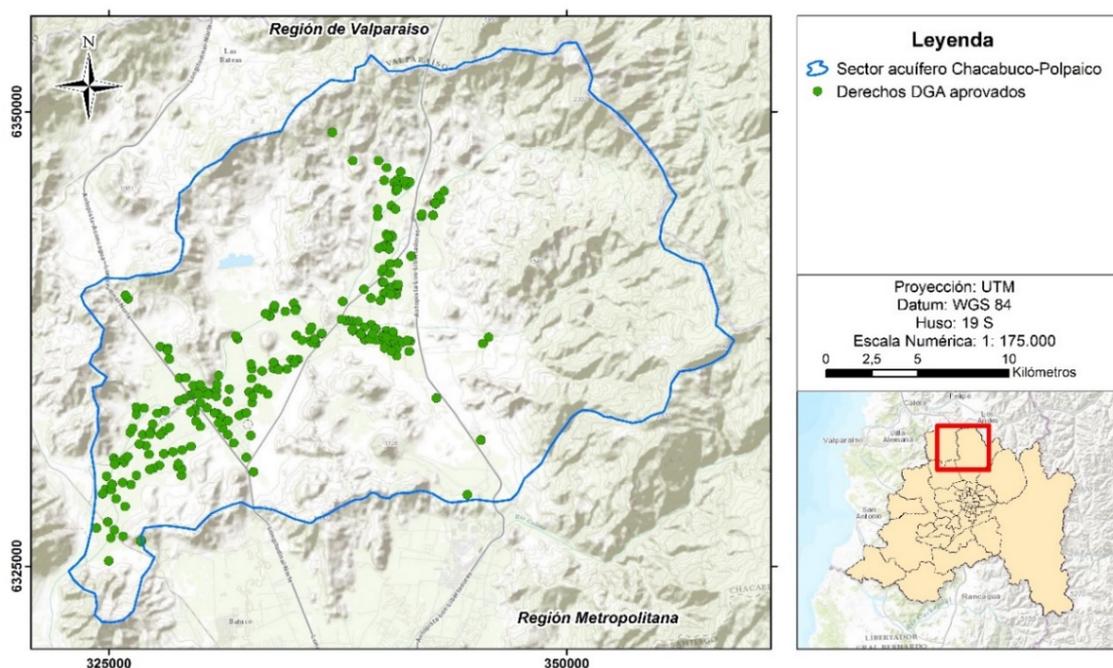
Elaboración propia

Estos caudales representan un volumen de extracción anual de 132.290.366,4 m³/año, como resultado de multiplicar los caudales en l/s por la cantidad total de segundos de un año calendario y luego transfórmalos a m³/año.

$$4.194,9 \text{ l/s} * 31.536.000 \text{ s} = 132.290.366.400 \text{ l/año} = 132.290.366,4 \text{ m}^3/\text{año}.$$

En cuanto a los derechos de agua otorgados por la DGA (Figura 50), estos cuentan un total de 250 derechos aprobados, siendo 12 de estos provisionales. Ellos representan un caudal total otorgado de 10.172,49 l/s, lo que equivale a un caudal total otorgado de 302.325.300 m³/año.

Figura 50. Pozos con derechos de agua otorgados por DGA.



Elaboración propia

Comparativamente, los caudales otorgados por ambos organismos se resumen en la tabla 25.

Tabla 25. Derechos de aprovechamiento de agua otorgados en el área de estudio.

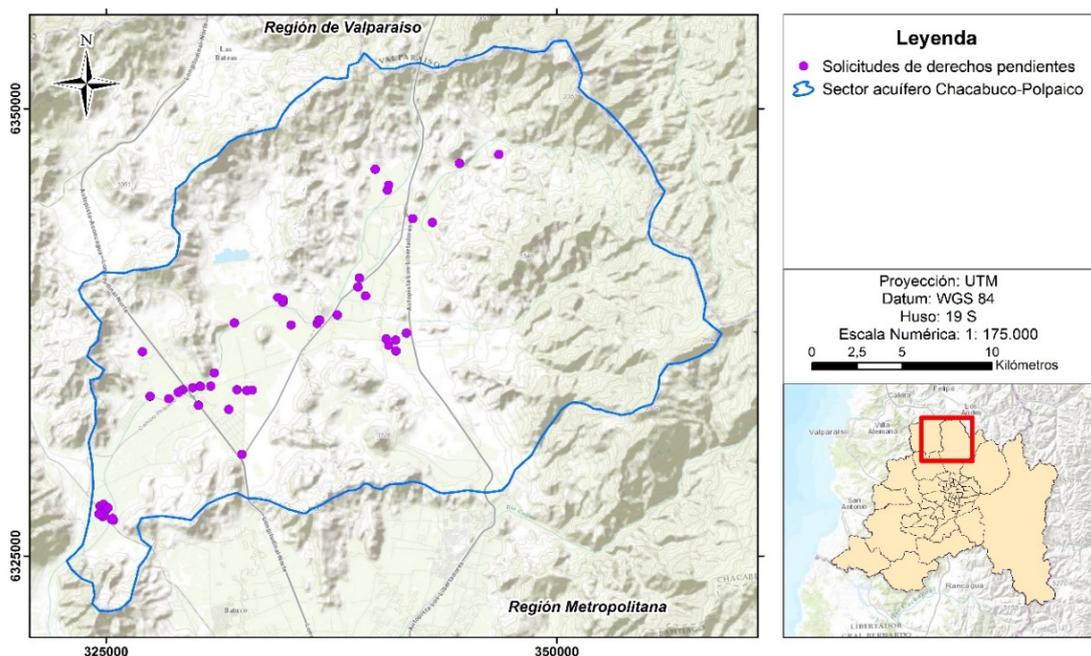
	Derechos CORFO	Derechos DGA
Caudal otorgado l/s	4.194,9	10.172,5
Volumen otorgado m ³ /año	132.290.366,4	302.325.300

Elaboración propia

10.7.1.2 Solicitudes de derechos de agua pendientes.

Por otra parte, se encuentran las solicitudes de derechos de aprovechamiento de agua pendientes, las que se distribuyen según la siguiente cartografía (Figura 51).

Figura 51. Derechos de aprovechamiento de agua pendientes en el área de estudio.



Elaboración propia

Cuantitativamente, estas solicitudes representan las siguientes demandas hídricas sobre el acuífero, mostradas en la tabla 26.

Tabla 26. Solicitudes de derechos de agua pendientes.

Caudal total pendiente (l/s)	1.891,6
Volumen total pendiente (m³/año)	57.559.114

Elaboración propia

10.7.1.3 Estimación de volúmenes legales totales de agua del acuífero.

En la tabla siguiente (tabla 27), se resumen y comparan los caudales otorgados y los caudales pendientes, tanto de la CORFO como de la DGA-RM dentro del sector acuífero Chacabuco-Polpaico.

Tabla 27. Resumen de caudales y volúmenes de agua entregados por CORFO y DGA.⁴⁹

	Derechos CORFO	Derechos DGA	TOTAL
Caudal otorgado (l/s)	4.194,9	10.172,5	14.367,4
Volumen otorgado (m ³ /año)	132.290.366,4	302.325.300	434.615.666,4
Caudal pendiente (l/s)	0	1.891,6	
Volumen pendiente (m ³ /año)	0	57.559.113,6	492.174.780

Elaboración propia

Conforme a lo expuesto, el volumen total de agua comprometido en este acuífero es de **434.615.666,4 m³/año**, existiendo una cantidad máxima pendiente de 57.559.113,6 m³/año.

⁴⁹ Sólo DGA posee solicitudes de derechos de agua pendientes, ya que desde la creación de la DGA en 1969, solo esta se encargó de la entrega de derechos de agua.

En este contexto, si se concretara la entrega de todos los derechos provisionales pendientes, ello constituiría un escenario muy desfavorable para el balance hídrico del acuífero en estudio, ya que aumentaría el volumen de extracción anual de 434.616.666,4 m³/año a un volumen máximo de 492.174.780 m³/año.

10.7.2 Estimación de extracción real de agua.

Los volúmenes calculados en el capítulo anterior sólo muestran las extracciones máximas permitidas por Ley, en relación a los derechos de aprovechamiento de agua otorgados por CORFO y DGA, sin embargo no reflejan la realidad de las extracciones.

La principal demanda nacional de agua viene desde la Agricultura (80 %), según DGA (2015), y como ya se calculó, esta se concentra principalmente en los meses de primavera y verano, por lo tanto, no es común que los volúmenes de extracción de agua otorgados coincidan con los valores reales de extracción, siendo estos últimos generalmente menores que los volúmenes otorgados.

10.7.2.1 Estimación de extracción para Agricultura.

Los valores ya calculados en el capítulo 12.4.2 (Cálculo de Demanda de agua bruta de los cultivos (Db), específicamente los cálculos de Demanda de agua de riego de cultivos, son equivalente al agua extraída por el rubro Agrícola para el riego anual de sus cultivos.

Estos alcanzan un volumen medio anual de 42.935.131,2 m³, (42,9 millones de m³ al año).

10.7.2.2 Estimación de extracción para la Industria.

Dada la inexistencia de una metodología para la estimación de extracción de agua subterránea de parte de la Industria, los montos comprometidos pasan a constituir una incertidumbre en la determinación de los montos de agua extraída.

10.7.2.3 Estimación de extracción para la Minería.

Al igual que en el caso anterior, la carencia de datos a nivel de detalle para el área de estudio por parte de COCHILCO, plantea un nuevo vacío en la determinación de los montos de agua extraída. COCHILCO (2016)⁵⁰ tampoco menciona al área de relaves dentro de las áreas que más demandan agua en el sector, pasando a estar en el segmento de “otros procesos mineros” donde, en el caso de la Región Metropolitana al año 2015 representaría un consumo de agua de solo 0,04 m³/s, ello en un escenario donde, en general, la Región Metropolitana registra un consumo de agua continental bajo en comparación con las regiones del norte del país.

10.7.2.4. Estimación de extracción para Agua Potable.

La SISS sólo posee información de la extracción de agua subterránea para abastecimiento de agua potable urbana. En el caso del área de estudio, la única área urbana corresponde a Huertos

⁵⁰ COCHILCO. (2016) *Consumo de agua en la minería del cobre al 2015*.

Familiares, con información de consumo de agua potable del año 2015 que alcanzó a los 207.494 m³. (0,207 millones de m³/año).

10.7.2.5. Estimación de extracción real total de agua del acuífero (m³/año).

El total estimado de extracción real de agua del acuífero sería de: 43.142.625,2 m³/año, (sólo agricultura y agua potable), (43,1 millones de m³/año). (Tabla 28)

Tabla 28. Resumen de extracciones antrópicas de agua (m³/año).

Rubro económico	Agricultura	Industria	Minería	Agua Potable
Extracción anual	42.935.131,2			207.494

Elaboración propia

10.8. Estimación del rendimiento sustentable del acuífero.

Los resultados de las diversas variables que influyen en la tasa de recarga del acuífero son presentados en la tabla 29.

Tabla 29. Resumen de variables de recarga de acuífero, en millones de m³/ año y % de las precipitaciones anuales.

<i>Entradas</i>		<i>Salidas</i>				
Precipitaciones	Retornos Riego	ETc. General	Escorrentía Superficial	Escorrentía Subterránea	Riego Cultivos	Agua Potable
175,8	9,1	176,8	1,1	0,9	42,9	0,2
100 %	5,2 %	100,6 %	0,6 %	0,5 %	24,4 %	0,1 %

Elaboración propia

De ello resulta una recarga final negativa del acuífero de -37 millones de m³ anuales. En consecuencia el acuífero presenta una pérdida media anual de 37 millones de m³, lo que representa un 21 % de las precipitaciones anuales.

Esta situación se evidencia al comparar las precipitaciones medias anuales (la única entrada real de agua al acuífero), con los volúmenes de derechos de agua otorgados y pendientes (tabla 30).

Con los datos de variables de balance hídrico de la tabla 29, se procede a resolver la ecuación de recarga efectiva media anual del acuífero, según la ecuación de Healy: 2010. (Detalles los componentes de la ecuación en el capítulo 3.2)

$$D = P - ET - R - \Delta S$$

Considerando sólo las variables naturales para determinar la recarga media anual del acuífero, para luego compararlas con la estimación de extracción anual antrópica, y con este resultado se evaluarán los posibles impactos adversos en el acuífero.

La ecuación de recarga es la siguiente (valores en millones de m³/año).

$$D = 175,8 - 176,8 - 2$$

$$D = -3$$

La ecuación de recarga muestra un resultado de -3 millones de m³/año, esto es una pérdida natural de agua desde el acuífero anualmente bajo las condiciones de uso de suelo actuales. Por lo que ninguna cantidad de extracción puede ser sustentable en este acuífero. (No se consideran los cambios en el almacenamiento “ΔS” de aguas subterráneas por tratarse de un cálculo de balance hídrico anual y la baja variación en este periodo de tiempo).

Este valor de recarga negativa o Descarga del acuífero debe ser comparada con los Derechos de Extracción definitivos y provisionales entregados por la DGA y por instituciones anteriores (Principalmente CORFO y en menor medida la CORA), pero para todos los efectos se entenderán en este informe todos los derechos de agua anteriores a la DGA como Derechos CORFO, (ver tabla 30)

Tabla 30. Derechos de agua en porcentajes de las precipitaciones en millones de m³/año.

Precipitaciones año: 175,8	Derechos CORFO	%	Derechos DGA	%	TOTAL	%
Volumen otorgado	132,2	75,2	302,3	172,0	434,6	247,2
Volumen pendiente	0,0	0,0	57,5	32,7	492,1	279,9
Volúmenes totales	132,2	75,2	359,8	204,7	926,7	527,1

Elaboración propia

De los datos de la tabla 30 se desprende que actualmente han sido otorgados como derechos de extracción, un mayor volumen anual agua del acuífero de la que puede recargarse nuevamente. Cuando en realidad no existe recarga, sino al contrario, el acuífero naturalmente está perdiendo agua.

Al estar el acuífero bajo una cuenca hidrográfica de condición semiárida, la evapotranspiración actualmente iguala a las precipitaciones, por lo que cada extracción de agua significa una disminución de las reservas del acuífero, siendo el riego agrícola el principal responsable de esta situación al tener que abastecer de agua a cultivos de alta demanda de riego en una zona de alta radiación solar y alto potencial de evaporación.

En la tabla 30 es posible observar como los volúmenes de derechos de agua otorgados están muy por sobre los volúmenes de agua caída anualmente en el área de estudio, ello sin descontar la evapotranspiración que prácticamente la iguala.

Se debe señalar que los resultados finales de volúmenes pendientes de derechos provisionales de agua pueden ser menores que los calculados en la tabla 30, ya que generalmente a este tipo de derechos se les otorga sólo una fracción del volumen total comparados con los derechos definitivos antes de ser declarada la *Zona de Restricción*.

Sin embargo, con los volúmenes actualmente extraídos el acuífero está enfrentando una reducción de sus reservas que alcanza al 21 % de las precipitaciones medias anuales. Por este motivo se cree impropio la entrega de nuevos Derechos Provisionales, aun cuando estos

sean de volúmenes anuales reducidos. Cualquier extracción extra del acuífero significará mayores descensos de su nivel freático.

Si bien el decretar para este acuífero una nueva Zona de Prohibición (lo cual implica su cierre a nuevas entregas de Derechos Provisionales), no limitará la extracción de aguas que no están siendo nuevamente recargadas, por lo menos ayudaría a que el descenso del nivel freático general no se agrave aún más.

1.8.1 Estimación de recarga hipotética en condiciones naturales.

Se desea conocer el comportamiento hipotético de las condiciones de recarga en el acuífero de la cuenca en estudio; esto es, una estimación de la recarga media anual que presentaría el acuífero si estuviese la cuenca cubierta en su totalidad por vegetación nativa esclerófila.

En el capítulo 10.3.4.4 se realizó la simulación de la evapotranspiración de la cuenca en condiciones naturales, entregando un valor de ETc natural de 145.343.917,1 m³/año.

Usando nuevamente la ecuación de recarga de Healy: 2010. (Detalles los componentes de la ecuación en el capítulo 3.2)

$$D = P - ET - R - \Delta S$$

$$D = 175,8 - 145,3 - 2$$

$$D = 28,5$$

La ecuación de recarga hipotética del acuífero muestra un resultado de 28,5 millones de m³/año, esto representaría el 16,2 % de las precipitaciones medias anuales. (No se consideran los cambios en el almacenamiento “ΔS” de aguas subterráneas por tratarse de un cálculo de balance hídrico anual y la baja variación en este periodo de tiempo).

Mostrando el resultado de recarga natural hipotética una gran diferencia con los cálculos de recarga negativa obtenidos con las variables actuales de uso de suelo y extracción antrópica. (Ver resumen en tabla 31)

Tabla 31. Resumen de diferentes cálculos de recarga del acuífero, en millones de m³/año y % de las precipitaciones anuales.

Recarga natural hipotética	%	Recarga natural actual	%	Recarga antrópica actual	%
28,5	16,2	-3	1,7	-37	21

Elaboración propia

De la tabla 31, es posible observar como la recarga natural de los acuíferos disminuye al ser intervenida de diversos modos; ya sea al cambiar los patrones de uso de suelo, con la introducción de cultivos y vegetaciones exóticas; además de la extracción de agua para diversos propósitos humanos.

10.9 Análisis de las incertidumbres de las variables.

Healy: 2010 señala la dificultad de entregar cálculos precisos de tasas de recarga de acuíferos a causa de las incertidumbres asociadas con estos mismo cálculos. También indica que los errores más serios son aquellos asociados con un modelo conceptual incorrecto, dado que este puede llevar a la aplicación de técnicas de estimación inapropiadas y estimaciones de recarga sin sentido.

Los errores de medición relacionados con pequeñas inexactitudes en la recolección de datos o periodos carentes de estos mismos, llevarían a inexactitudes menores en comparación con los errores asociados a los modelos conceptuales. (Healy: 2010)

Un modelo conceptual puede ser una representación gráfica de la recarga, o ser una ecuación que muestre cuales son las variables hidrológicas tanto naturales como antrópicas que influyen en los procesos de recarga. Un error grave en el modelo sería por ejemplo sumar una variable cuando en realidad esa variable debiese restarse del aporte al cuerpo de agua que se esté estudiando (acuífero, rio, lago, cuenca).

Siendo las siguientes, las principales incertidumbres enfrentadas en el estudio:

Mutilación de datos meteorológicos y de niveles de pozos.

Existen fuertes mutilaciones en los registros de precipitaciones y temperaturas. Las primeras fueron completadas usando para ello la Metodología de Las Razones, la cual consiste en la utilización de datos del mismo periodo de una estación meteorológica cercana, llamada Estación Base. Luego adaptando esos datos a la realidad climática de la estación a rellenar. En este caso fue utilizada la Estación Quinta Normal, la cual presenta la serie de registros meteorológicos más completa y larga del país.

En el caso de los registros de temperaturas que presentaban mutilaciones, se optó por no rellenarlos, considerando lo poco que cambian las temperaturas con las distancias, comparado con las precipitaciones.

En cuanto a los extensos periodos sin registros de niveles de pozos, ello no representa un gran problema porque los datos existentes son usados para la generación de líneas de tendencia central, las cuales señalan con facilidad si la tendencia a largo plazo de los pozos es descendente, ascendente o estable.

Baja cantidad de años de datos de meteorología Estación Huechún, para elaboración de ETo.

Sólo fue posible la obtención de cuatro años de datos meteorológicos de la Estación Huechún, (dentro de la cuenca de estudio).

Los datos meteorológicos obtenidos por la Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF), de esta estación son de difícil acceso en nuestro país (*Radiación solar, Humedad relativa máxima y*

mínima, velocidad del viento), además de *temperaturas y precipitaciones* (que son los parámetros más comunes de las estaciones). Por lo tanto estos datos meteorológicos no son de acceso libre y son vendidos para la financiación de la continuidad de las estaciones de medición.

Sólo fue posible la obtención de estos datos meteorológicos de manera gratuita por el periodo de los años 2013, 2014, 2015 y 2016, en registros diarios.

No se optó por la extrapolación de datos desde Quinta Normal porque estos parámetros meteorológicos son muy variables desde una cuenca a otra por efectos de factores orográficos y/o microclimáticos.

Nula información de valores de Kc de vegetación nativa esclerófila de Chile.

El factor Kc de la vegetación muestra el valor de evapotranspiración comparado con el cultivo de referencia. Estos cálculos de factor Kc han sido elaborados para la mayoría de los cultivos mundiales, pero con escasos cálculos para la vegetación nativa a nivel global. Puesto que la metodología de FAO Penman-Monteith fue desarrollada pensando en la evapotranspiración de cultivos y sus requerimientos de agua de riego. Como la vegetación nativa no necesita ser regada, no se han desarrollado muchos cálculos de Kc para este tipo de vegetación.

Para la obtención de valores de Kc de la vegetación esclerófila del área de estudio, se procedió a la extrapolación de valores experimentales calculados para la vegetación del *Chaparral* de California (considerados bastante parecidos), sin embargo cualquier tipo de diferencia climática entre el Estado de California y la zona central de Chile puede generar incertidumbres en el cálculo final de ETc del mayor uso de suelo de la zona de estudio.

Falta de información de extracción de agua del sector económico Industrial y minero.

Es difícil la obtención de datos de extracción de agua subterránea por el rubro industrial. A menos de que sean empresas públicas afectas a la Ley de Transparencia, no se puede conseguir esta información de las empresas. Además, no existen en el área de estudio empresas industriales del Estado.

En cuanto al rubro minero existente en el área de estudio, corresponde a dos tranques de relaves y una empresa de extracción de materiales para la elaboración de cemento. En cuanto a los primeros, COCHILCO declaró bajo Ley de Transparencia sólo poseer información de extracciones de aguas subterráneas a escala regional y las otras mineras no están afectas a entregar información por ser empresas privadas. Por lo tanto no existe información disponible de extracción de agua subterránea por parte de empresas mineras en el área de estudio.

Las estimaciones de DGA (2015) señalan que la demanda de la Industria alcanza al 7 % del consumo de agua anual en Chile, y se espera que este valor sea acertado o aún menor en el área de estudio, al ser esta una zona netamente agrícola de baja densidad de población y pocas industrias. En cuanto el rubro minero, según esta fuente la demanda de agua alcanza el 3 % a nivel nacional. En total se estima un desconocimiento de extracciones antrópicas en torno al 10

% en el área de estudio. Por lo tanto el desconocimiento de las extracciones de agua subterránea de la Industria y de la Minería no generan incertidumbres trascendentales en las variables para calcular la recarga media anual.

Falta de estación de aforo en la cuenca.

El área de estudio no cuenta con alguna estación de aforo que permita conocer los caudales medios mensuales y anuales. Al ser el Estero Chacabuco una red hidrográfica menor en comparación con los ríos cercanos (Río Aconcagua, Maipo, etc.), además gran parte del año se presenta completamente seco, por lo que una estación de aforo sólo sería útil para medir los caudales generados en periodos de tormentas en los meses de invierno preferentemente.

El cálculo de escorrentía superficial teórica de diferentes autores, en especial el de Peñuelas, señalan un muy bajo caudal medio anual en comparación con el tamaño de la cuenca y su precipitación. Alcanzando la escorrentía superficial sólo el 0,6 % del total de las precipitaciones, siendo esta variable muy poco relevante comparada con la evapotranspiración, extracciones de riego y retornos de riego al acuífero.

Por lo tanto el desconocimiento de las mediciones directas de caudales de esta área de estudio, no generan mayores incertidumbres en las variables para calcular la recarga media anual.

Se concluye que las mayores incertidumbres a las que se enfrenta el cálculo de recarga media anual del acuífero provienen de *Mutilaciones de datos de temperaturas* (datos de DGA y DMC) y de la baja cantidad de años de datos de las variables meteorológicas usadas para calcular ETo (*Radiación solar, Humedad relativa máxima y mínima, velocidad del viento y temperatura*) cuyos datos fueron proporcionados por la FDF.

La importancia de estos factores son explicados, debido a que la evapotranspiración es el factor más relevante para el cálculo de recarga del acuífero. (Prácticamente equivalente a las precipitaciones).

XI. Conclusiones

El balance hídrico del acuífero en estudio presenta cifras negativas, lo cual significa que la cantidad de agua proveniente de la precipitación no es suficiente para recargar los volúmenes que le son extraídos por conceptos de derechos de aprovechamiento de agua, principalmente para fines de riego.

El balance hídrico natural, que en este caso sólo considera las entradas y salidas de agua desde la cuenca, tiende a cero. Ello significa que las entradas de agua por precipitación sólo cubren las salidas de agua por evapotranspiración, lo cual no posibilita que exista escorrentía superficial permanente, quedando esta destinada a caudales menores como respuesta a tormentas.

La carencia de escorrentía superficial permanente, por una parte no permite la oferta de agua para otorgamientos de derechos de aprovechamiento de agua superficiales, y por otra parte refleja la realidad de la situación de escasez hídrica dentro de este sector acuífero.

La serie histórica de precipitaciones muestra una leve tendencia a la disminución, lo cual significa que la precipitación media anual del área de estudio sería cada vez menor, siguiendo la tendencia a la disminución de estas de la zona central y sur de nuestro país.

Por otra parte, la serie histórica de las temperaturas muestra una leve tendencia al alza, lo cual significa que la temperatura media anual del área de estudio sería cada vez mayor, aumentando la evapotranspiración, reflejando la misma tendencia de esta en la zona central y sur de nuestro país.

Ambas líneas de tendencia central, de precipitaciones a la baja y temperaturas al alza, plantean un escenario futuro cercano de mayor aridez dentro de la zona de estudio.

La situación actual de extracción de agua desde el acuífero, principalmente para riego, genera un escenario complejo que deriva en un balance hídrico negativo en él, en un volumen igual a la extracción anual derivada de la actividad agrícola principalmente. Sumado a ello existe una gran cantidad de agua que está siendo solicitada actualmente como derechos provisionales, los que además podrían pasar a ser definitivos y agravar aún más el escenario actual de balance hídrico negativo.

La extracción de agua de riego representa el 24,4 % de las precipitaciones medias anuales siendo la mayor salida artificial de agua, la cual es destinada a cultivos de alto coeficiente de evapotranspiración y por lo tanto de alta demanda de agua. Estos cultivos de alta demanda de agua, con fuerte presencia en el área de estudio (vides, nogales y ciruelos), ya cuentan con sistemas de riego tecnificado (riego de Microjet), con una eficiencia del 85 %, por lo que ya no es posible la inversión en tecnologías para mayor optimización del uso del recurso agua.

La recarga actual del acuífero es de -37 millones de m³ anuales, con lo cual el acuífero pierde anualmente el equivalente al 21 % de la precipitaciones.

Los cálculos de balance hídrico negativo son concordantes con la línea de tendencia central descendente del nivel estático de los pozos de observación presentes en el área de estudio, lo

que significa que con el ritmo actual de extracción de agua, y sin condición de recarga, el acuífero continuará su descenso hasta un punto insostenible para la agricultura y para el abastecimiento de agua de los habitantes.

Los gráficos de mediciones de nivel estático de la DGA muestran en todos los casos tendencias de disminución del nivel freático. Los pozos que poseen mediciones desde la década de 1960 muestran tendencias relativamente estables o leves disminuciones hasta mediados de la década de 1980, donde se produce un fuerte cambio en la tendencia de disminución, provocando un abrupto descenso del nivel freático, lo que se conserva hasta el presente.

Cabe hacer notar que este fuerte descenso del nivel freático se produce 3 o 4 años después de la creación del nuevo Código de Aguas de Chile de 1981, donde se modifica radicalmente el sistema de entrega de derechos de aguas a particulares, y especialmente en la década de 1980, cuando se entregaron grandes cantidades de derechos de aprovechamiento dentro de este sector acuífero⁵¹, lo que podría haber causado una sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos y el abrupto y continuado descenso del nivel freático.

Esta continua disminución del acuífero se ha reflejado en el nivel del agua en las norias y pozos que se abastecen de él, afectando esto en primera instancia a las norias, por ser estas de menor profundidad que los pozos. Ello está llevando a una situación de desabastecimiento hídrico progresivo de los habitantes dentro del área de estudio, derivado en un desabastecimiento de agua en los pozos profundos destinados a los diversos usos, tales como Agua Potable Rural, usos industriales, minería y principalmente el riego de diversos cultivos.

Debido a estas razones, se concluye que no existe disponibilidad de agua en el acuífero Chacabuco-Polpaico para otorgar nuevos derechos provisionales de aprovechamiento.

Bajo la legislación actual, lo recomendable es proceder a cerrar el acuífero de manera definitiva a las solicitudes de derechos provisionales de aprovechamiento de aguas, dado que no es posible disminuir el volumen anual ya otorgado a los propietarios de derechos de agua, ni tampoco su expropiación completa. En consecuencia, todo indica que se debería proceder a decretar el sector acuífero Chacabuco-Polpaico como una nueva Zona de Prohibición en el país.

Sin embargo, aun declarando este sector acuífero como Zona de Prohibición, de continuar la actual tasa de extracción de agua subterránea, se prevé un continuo descenso del nivel freático del acuífero, lo cual en un futuro causaría graves daños a la economía agrícola, al medioambiente y a las formas de vida de los habitantes dentro del área en cuestión.

Cualquier cantidad de extracción de agua extra en este acuífero agudizaría su balance negativo, y mientras mayor sea el volumen extraído anualmente, más rápido será el descenso del nivel freático. Lo señalado lleva a recomendar cambios en el Código de Aguas de Chile, donde se limiten las cantidades de agua otorgadas como derecho, o se realicen cobros por hacer uso del agua, y no cobros por no hacer uso de los derechos de agua como sucede actualmente.

⁵¹ Datos de derechos de aprovechamiento de aguas obtenidos directamente de bases de datos del Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) de la DGA Región Metropolitana de Santiago, 2016.

XII. Discusiones

Actualmente se están discutiendo las reformas al Código de Aguas vigente, tal vez como respuesta a la creciente demanda ciudadana por equidad y justicia en materias tan esenciales a la vida humana como lo es el acceso al agua potable, o el acceso al agua para su uso en cultivos.

El Código de Aguas actual es un instrumento normativo que separa los derechos de uso de aguas de la tierra, de este modo hace muy difícil cualquier tipo de emprendimiento agropecuario por parte de pequeños propietarios de tierra, los cuales deben en el mejor de los casos, construir pozos profundos de gran coste para poder solicitar un derecho de agua, sin respaldo alguno que le garantice la obtención del tal derecho de extracción.

En un resultado desfavorable, el pequeño propietario de tierra que quisiese cultivar su predio más allá de los cultivos de subsistencia, debe comprar un Derecho de aprovechamiento de aguas en el mercado, alcanzando estas cifras millonarias en los portales de compra-venta de derechos de agua, cifras que con mucha frecuencia pueden exceder por mucho los valores de los mismos terrenos bajo los cuales se localizan, especialmente en las regiones del norte de nuestro país, que por su condición de extrema aridez unida a su condición minera, elevan los valores de tales derechos de agua a cifras inalcanzables para pequeños agricultores.

Sin dudas se considera un error la separación legal del agua de la tierra, condición que permite el trato del derecho a usar el agua como una mercancía más, que generalmente tiende como otros bienes a ser acaparada por las personas o empresas con más recursos económicos, ya sea que los hayan obtenido de manera gratuita de parte del Estado en décadas pasadas o que los hayan comprado para luego especular por su valor y esperar el mejor momento para su nueva venta, obteniendo generalmente buenos márgenes de ganancias.

Se espera de las reformas al Código de Aguas estén a la altura de las necesidades y condiciones actuales del país, y que formen parte de los mecanismos de adaptación al cambio climático, junto con incrementar las acciones de protección del medio ambiente y de los diversos ecosistemas dependientes de las aguas superficiales y/o subterráneas. Por otra parte, las reformas a los cuerpos legales y normativos existentes deben considerar adecuadamente las necesidades de la naturaleza respecto de este recurso, y no velar por los intereses de los privados de perpetuar la privatización del agua, recurso que es de todos.

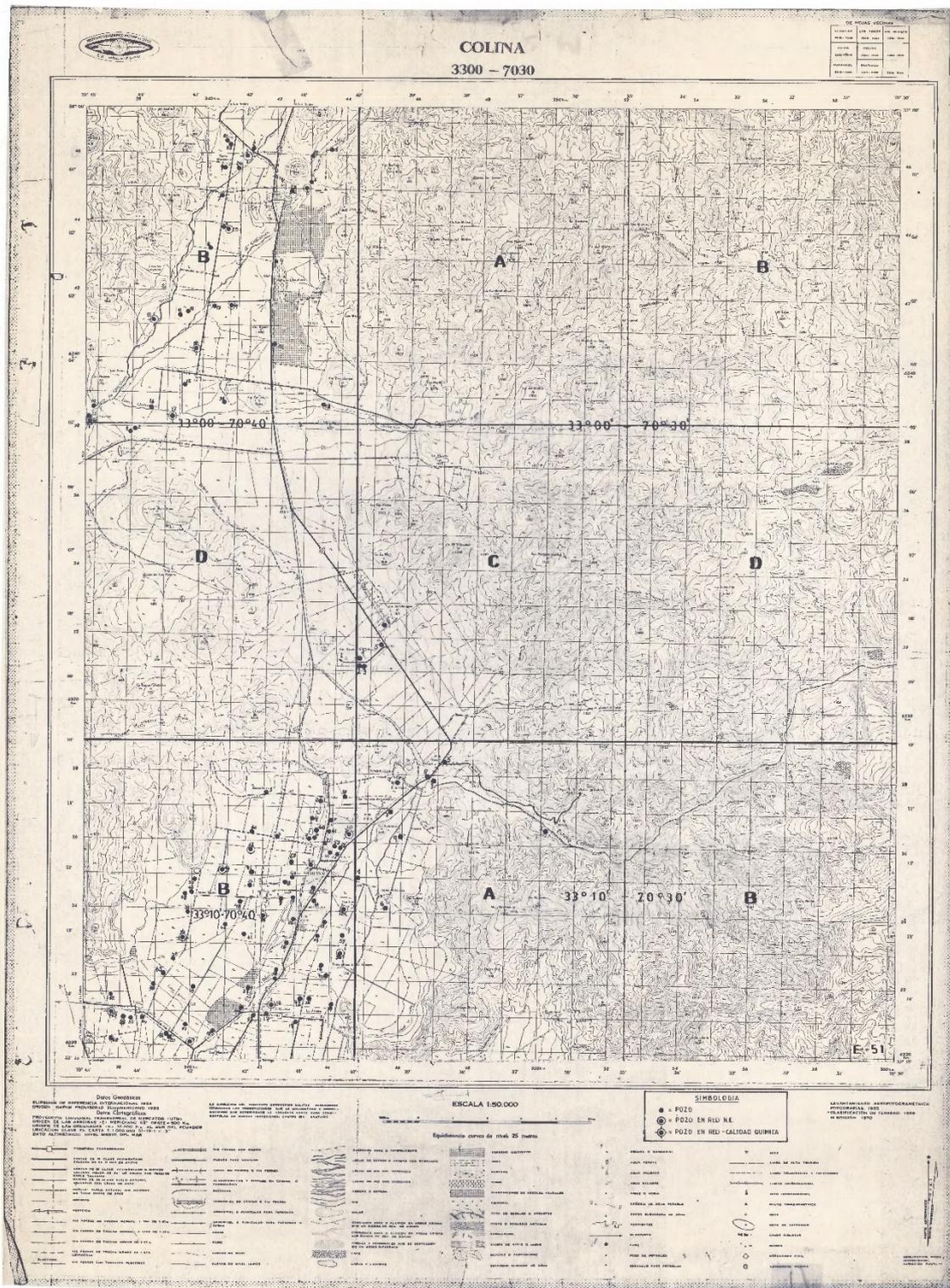
XIII. Bibliografía

- Agroclima. (2016-2017) <www.agroclima.cl> [consultado el 22/12/2016 y 03/01/2017]
- Allen et al. (2006) *Estudio FAO riego y drenaje 56, Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia. pdf
- Antúnez, Alejandro y Felmer, Sofía. (2009) *Boletín del Nodo de Riego en el Secano, Región de O'Higgins*. Boletín INIA Nº190, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Litueche, Chile. Pdf
- Ayala et al. (2000) *Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho del año 2000*. Santiago, Chile. Pdf
- CNR. (2000) *Estimación de la demanda de agua en los cultivos*. Coquimbo, Chile. Pdf.
- COCHILCO. (2016) *Consumo de agua en la minería del cobre al 2015*. Dirección de estudios y políticas públicas. Santiago de Chile. Pdf
- CODELCO, División Andina. (2012) *Plan de seguimiento y control de infiltraciones Tranque Ovejería*. Santiago de Chile. Pdf.
- Danish Ministry of Environment. (2007). *Groundwater monitoring in Denmark*. Pdf.
- Danish Water Forum. (2013). *Groundwater Governance in Denmark Experiences and recommendations*. Pdf
- DGA. (1988). *Balance hídrico de Chile*. Santiago de Chile. Pdf
- DGA. (2004). *Determinación de la disponibilidad de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la cuenca del Rio Maipo hasta la confluencia con el Estero Puangue*. Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago de Chile. Pdf
- DGA. (2008). *Estudio del mapa hidrogeológico nacional, escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000*. Santiago de Chile. Pdf
- DGA. (2015). *Atlas del Agua Chile 2016*. Santiago de Chile. Pdf
- DMC. (2016). *Anuario climatológico 2015*. Santiago de Chile. Pdf
- FDL. (2016). *Bases de datos meteorológicas de Estación Huechún, periodo 2013-2016*. Archivo Excel.
- Fetter, C W. (2001). *Applied Hydrogeology*. New Jersey. Estados Unidos de América. Pdf
- FAO. (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture, managing systems at risk*. Pdf
- Healy, Richard (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge, Reino Unido.
- Hiscock, Kevin y Bense, Victor (2014). *Hydrogeology, Principles and practice*. Oxford, Reino Unido. Pdf

- Howes et al (2015). *Evapotranspiration from Natural Vegetation in the Central Valley of California: Monthly Grass Reference-Based Vegetation Coefficients and the Dual Crop Coefficient Approach*. California, Estados Unidos de America. Pdf
- IGM (1969). *Carta 1:50.000 de pozos CORFO Sector Tiltil*. Santiago de Chile.
- IGM (1970). *Carta 1:50.000 de pozos CORFO Sector Colina*. Santiago de Chile.
- Oliver, John. (2005). *Encyclopedia of world climatology*, Indiana, Estados Unidos de América. Pdf
- ONU. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo*. Pdf
- República de Chile. (1981). *Código de aguas*. Santiago de Chile. Pdf
- República de Chile. (2014). *Decreto 203. Aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas*. Santiago de Chile, 07 de marzo de 2014.
- SISS. (2017). Respuesta Solicitud de transparencia Folio AM011T0000710. Santiago de Chile.
- SMAPA. (2017). <www.smapa.cl> [consultado el 26/02/2017]
- Urtubia et al. (2015). *Gestión de la Recarga en la Cuenca de Santiago: sectores y métodos para su implementación*: La Serena, Chile. Pdf
- Villarroel, Leonardo (2012). *Caracterización del comportamiento de las precipitaciones en la cuenca del río Maipo-Mapocho a nivel regional y local*. Santiago de Chile.
- World Meteorological Organization - UNESCO. (2012). *International Glossary of Hydrology*. Ginebra, Suiza. Pdf

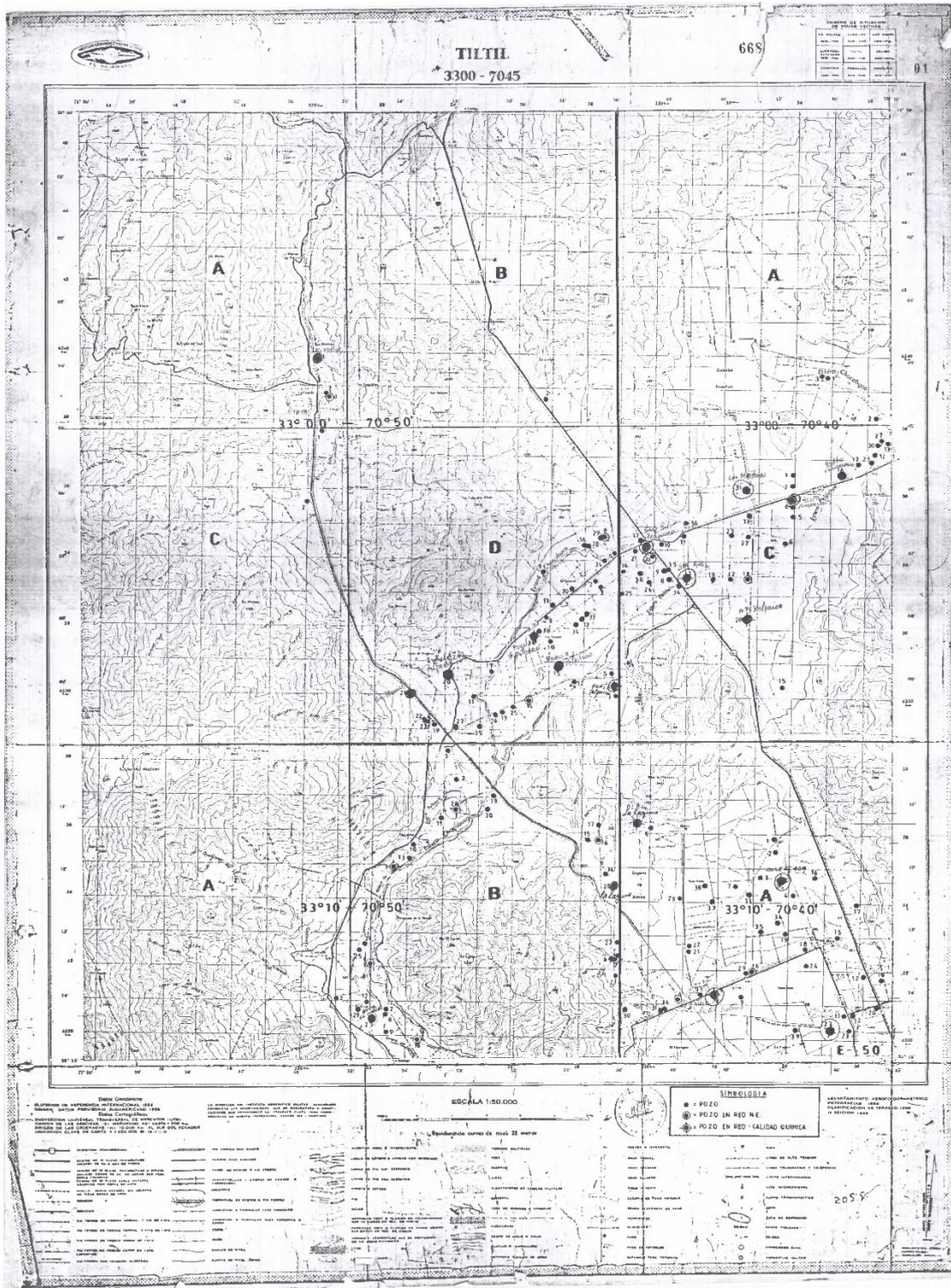
XIV. Anexos

14.1 Carta IGM 1:50.000 de Pozos CORFO, sector Colina. (IGM: 1970).



Fuente: Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) de la DGA Región Metropolitana de Santiago.

14.2 Carta IGM 1:50.000 de Pozos CORFO, sector Tiltil. (IGM: 1969).



Fuente: Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) de la DGA Región Metropolitana de Santiago.

14.3 Tabla de pozos de medición de nivel freático de la DGA en la Provincia de Chacabuco.

BNA		NOMBRE	NORTE	ESTE	ALTURA	OBSERVACIONES	ESTADO
05731001	4	FUNDO LOS TALAVERAS	6345630	341010	696	OBSERVACIÓN	BUENO
05731002	2	HACIENDA CHACABUCO	6344707	342791	723	OBSERVACIÓN	TAPADO
05731003	0	FUNDO LOS TAHURETES	6343563	340306	664	OBSERVACIÓN	BUENO
05731004	9	LOS GUAYACANES	6340262	338064	624	OBSERVACIÓN	BUENO
05731005	7	ASENTAMIENTO CHACABUCO	6339071	339646	632	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05731006	5	CERA UNION HUECHUN	6337447	336424	606	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05732003	6	CHILECTRA POLPAICO	6334094	329604	549	OBSERVACIÓN	TAPADO
05732004	4	RESERVA FUNDO POLPAICO	6330568	327037	528	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05732005	2	PARCELA 5 POLPAICO	6331422	326461	523	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05732006	0	FUNDO SANTA ANA	6332866	330970	548	OBSERVACIÓN	BUENO
05732007	9	HUERTOS FAM. CERRO BLANCO	6331658	332602	566	EXPLOTACIÓN - AGUA POTABLE	BUENO
05732008	7	FABRICA POLPAICO	6330014	328728	535	INDUSTRIA - EXPLOTACIÓN	BUENO
05732010	9	ASENTAMIENTO LOS MAITENES	6335582	332582	569	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05732011	7	FUNDO MONTECARLO (EX VENCEREMOS)	6336067	335175	590	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05733011	2	RINCON DE LOS MOLINOS	6339868	319980	601	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05733012	0	ESCUELA 293 POLPAICO	6330207	323929	532	OBSERVACIÓN	TAPADO
05733013	9	R. FUNDO SAN MANUEL	6329657	322885	523	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05734003	7	FUNDO LA CADELLADA	6324291	333736	487	OBSERVACIÓN	BUENO
05734004	5	FUNDO SANTA ROSA DE LAMPA	6319896	334826	502	OBSERVACIÓN	BUENO
05734005	3	ENTEL BATUCO	6320788	331669	491	OBSERVACIÓN	BUENO
05734006	1	FUNDO LA LAGUNA	6325015	328334	478	OBSERVACIÓN	BUENO
05734007	K	ASENTAMIENTO LAGUNA	6323637	330738	494	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05734008	8	FDO. EL ALMENDRAL	6318506	329548	486	OBSERVACIÓN	BUENO
05734010	K	ASENTAMIENTO LO VARGAS	6316870	325617	500	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05734011	8	FUNDO SANTA ERMINIA	6318096	324709	497	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05734012	6	PARCELA 4 EL VALLE CHICAUMA	6320560	321466	509	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05735006	7	LO ARCAYA	6321029	342183	538	OBSERVACIÓN	BUENO
05735009	1	FUNDO LA MONTAÑA	6312232	339505	506	INDUSTRIA - EXPLOTACIÓN	BUENO
05735010	5	ASENTAMIENTO EL TAQUERAL	6314326	334807	482	OBSERVACIÓN	BUENO
05735011	3	PARCELA 7 LIRAY	6320750	337583	503	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05735012	1	FUNDO REINA SUR 1	6324973	343108	503	OBSERVACIÓN	TAPADO
05735013	K	SANITARIOS COLINAS	6315385	338647	500	INDUSTRIA - EXPLOTACIÓN	BUENO
05735014	8	SAN LUIS DE COLINA	6324455	345571	598	OBSERVACIÓN	BUENO
05735015	6	FUNDO REINA SUR 3	6325942	341240	559	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05736003	8	PARCELA 62 NOVICIADO	6302991	324286	474	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO
05736005	4	POZO FUNDO EL ALGARROBAL	6317222	341097	520	EXPLOTACIÓN - AGUA POTABLE	BUENO
05736007	0	POZO CRUCERO PERALILLO	6306435	327999	474	EXPLOTACIÓN - RIEGO	BUENO

Fuente: Departamento de Hidrología de la DGA Región Metropolitana de Santiago (2016).