



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**IMPACTOS DE FACTORES HIDROCLIMÁTICOS Y
ANTROPOGÉNICOS EN RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
DE LA CORDILLERA DE LA COSTA CENTRAL (ACUÍFERO DE
NILAHUE, REGIÓN DE O´HIGGINS)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

THOMAS ANDREW WILLIAMS DEL POZO

PROFESORA GUÍA:

LINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

BENOÎT VIGUIER

LUIS ALBERTO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por FONDECYT 1170569

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO
POR: THOMAS WILLIAMS DEL POZO
FECHA: JUNIO 2019
PROF. GUIA: LINDA DANIELE

IMPACTOS DE FACTORES HIDROCLIMÁTICOS Y ANTROPOGÉNICOS EN RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA CENTRAL (ACUÍFERO DE NILAHUE, REGIÓN DE O´HIGGINS)

Chile centro-sur ha sufrido un déficit en los balances hídricos regionales y los recursos hídricos han empezado a impactar el suministro de agua potable en algunos sectores. El presente estudio abarca la variación de los recursos hidrogeológicos de la cuenca semiárida de Nilahue (1390 km²), ubicada en la cordillera de la costa de la región de O´Higgins donde, las precipitaciones promedian 647mm/año con un potencial de evapotranspiración de 1310 mm/año durante el periodo 1986-2016.

Usando los datos hidrológicos mensuales disponibles provistos por la DGA (Dirección General de Aguas) y CR² (Centro del Clima y la Resiliencia) de precipitaciones, caudales de escorrentía superficial y potencial de evapotranspiración este estudio calcula las recargas difusas en el acuífero tanto a escalas mensuales como anuales a través de un balance hidrológico de la cuenca en el periodo 1986-2016.

A una escala anual, las recargas son muy variables y van desde los 0 mm/año (1990 y 1998) a 705 mm/año en 2002, promediando 277 ± 224 mm/año durante el periodo de estudio ocurriendo para años con precipitaciones mayores a 360 mm/año acorde la siguiente relación $Recarga = 0.96 * Pp - 343,5 (R^2: 0,9)$.

Para ambas escalas temporales se observa una clara relación temporal entre las recargas y la escorrentía superficial, validando el modelo hidrogeológico. Durante la megasequía de 2010-2016 en Chile sur y central las precipitaciones experimentaron una disminución de un 28% en la cuenca de Nilahue, llevando a una drástica baja en (i) la frecuencia de eventos de recarga en el acuífero y (ii) en las recargas anuales (141 ± 57 mm/año).

Pronósticos climáticos indican eventos de megasequías más frecuentes en Chile centro y sur para el periodo 2010-2050. Así, el presente estudio destaca una alarmante baja en las tasas de recarga difusa futura, que, junto con un incremento de la demanda de agua, llevarán a un agotamiento de los recursos hídricos.

Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto de adaptación de la agricultura al cambio climático de la sección de gestión de riesgos agrícolas del ministerio de agricultura, a quienes les agradezco por formar parte, especialmente a Carlos Quezada, que en paz descanse.

Quisiera agradecer a Benoît Viguier sus largas horas de ayuda, por creer en mi trabajo y sus enseñanzas que contribuyeron de gran manera en esta investigación. A mi profesora guía Linda Daniele por permitirme formar parte de este proyecto, su ayuda y asesoría durante este tiempo y a Luis Alberto González por disposición y ayuda.

Agradezco a la Universidad de Chile y al Departamento de Geología con todos sus trabajadores(as), profesores(as) y compañeros(as) por sus enseñanzas, excelentes terrenos y la gran experiencia que viví durante estos primeros años de la carrera. ¡Aún queda mucho por aprender!

Finalmente quisiera agradecer a mis amigos de siempre por su amistad y compañía, y a mi familia, especialmente a mis padres Cecilia y Rodrigo por estar a mi lado apoyándome en todo desde siempre.

¡Muchas gracias!

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo general	3
1.1.2	Objetivos específicos	3
1.2	Ubicación y vías de acceso.....	3
1.3	Descripción zona de estudio.....	4
1.4	Marco Geológico.....	8
1.4.1	Unidades Rocosas	8
1.4.2	Unidades no consolidadas.....	13
1.4.3	Estructuras.....	16
1.4.4	Geomorfología	18
1.5	Clima.....	20
1.5.1	Precipitaciones.....	20
1.5.2	Temperatura.....	30
2	Metodología	33
2.1	Definición espacial, emplazamiento de acuífero de Nilahue	33
2.1.1	Topografía y basamento.....	33
2.1.2	Piezometría	34
2.1.3	Régimen de aportes del acuífero a cursos superficiales	35
2.2	Cuantificación de recargas y descargas del sistema cuenca.....	35

2.2.1	Recargas.....	36
2.2.2	Descarga.....	37
2.2.3	Balances anuales.....	43
2.3	Cuantificación de recarga difusa del acuífero de Nilahue.	44
3	Resultados y Discusiones.....	47
3.1	Definición espacial, emplazamiento del acuífero de Nilahue	47
3.1.1	Topografía.....	47
3.1.2	Basamento	48
3.1.3	Piezometría	48
3.1.4	Perfiles	52
3.2	Cuantificación de recargas y descargas del sistema cuenca.....	56
3.2.1	Recargas.....	57
3.2.2	Descargas	60
3.2.3	Balances anuales estimados para cuenca de Nilahue.....	75
3.3	Recargas difusas y resultados integrados de factores hidroclimáticos.	79
3.4	Impactos del Cambio Climático, Sequía 2010-actual	92
4	Conclusiones.....	95
5	Recomendaciones.....	96
6	Bibliografía	97
7	Anexos.....	103
7.1	Gráficos valores mensuales Pp, ETR, Inf. Prof, Esc. Sup para cuenca de Nilahue.....	103
7.2	Cálculos y valores de parámetros históricos cuenca de Nilahue	110

7.3 Promedios de temperaturas mensuales calculados para estación Curicó 120

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación de humedad relativa por índice SPI modificado de Gordjin y Ward (2012)	24
Tabla 2 SPI, Probabilidad de excedencia y Periodo de retorno calculados para los años de registro en cuenca de Nilahue	26
Tabla 3 Registros de derechos de agua otorgados en cuenca de Nilahue....	64
Tabla 4 Huella hídrica azul para la zona centro-centro sur de Chile por sectores. Modificado de (Fundación Chile, 2016)	66
Tabla 5 Potencial de evapotranspiración mensual en cuenca de Nilahue (Eaboración propia)	73
Tabla 6 Balances anuales cuenca de Nilahue 1986-2016. Elaboración propia (*dato rellenado con valor estimado)	75
Tabla 7 Disminución de parámetros hidroclimáticos durante megasequía. Elaboración propia	92

Índice de Figuras

Figura 1 Ubicación de área de estudio	4
Figura 2 Uso de suelos cuenca de Nilahue. Elaboración propia	6
Figura 3 Distribución uso de suelos cuenca de Nilahue. Elaboración propia... 6	6
Figura 4 Vista aérea por dron al sector de Nilahue Cornejo, Mayo de 2018. Foto por Sebastián Galaz Pizarro (google street view)	8
Figura 5 Vista panorámica desde el sur de la cuenca de Nilahue mostrando cuerpo intrusivo que rodea el relleno sedimentario que alberga al acuífero de Nilahue. Octubre, 2018. Captura y elaboración propias	11
Figura 6 Depósito de maicillo de superficie granítica meteorizada. Captura propia	14
Figura 7 Geología área de Nilahue. Elaboración propia con base en "mapa geológico de Chile, 2003	16
Figura 8 Imagen satelital combinada con DEM donde se indica expresión morfológica principal de la Falla Pichilemu (líneas blancas), polígonos azules se asocian a zonas de daño de la Palla Pichilemu (Lira et al., 2015)	17
<i>Figura 9 Formación unidades geomorfológicas Chile central. Modificado de (Farías, 2007)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10 Principales unidades geomorfológicas Chile central. Modificado de (Fock, 2005)</i>	<i>19</i>
Figura 11 Registro de precipitaciones para cuenca de Nilahue en plataforma CAMELS (CR2, 2018)	21
Figura 12 Promedio mensual precipitaciones Cuenca de Nilahue 1979-2016. Elaboración propia	22
Figura 13 Valores anuales de SPI para la cuenca de Nilahue vs probabilidad de ocurrencia de un evento menor. (Elaboración Propia)	25

Figura 14 Metodología para determinar índice de precipitación estándar. (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002)	26
Figura 15 Comparación entre TSM ONI 3.4 y valores de SPI para cada año en la cuenca de Nilahue (Elaboración Propia).....	28
Figura 16 Distribución anual de las lluvias por décadas para la cuenca de Nilahue (Elaboración Propia)	29
Figura 17 Promedio precipitaciones anuales por décadas para la cuenca de Nilahue (Elaboración Propia)	30
<i>Figura 18 Climograma para Cuenca de Nilahue (Elaboración Propia)</i>	<i>31</i>
Figura 19 Promedio de temperaturas mensuales históricas estación Curicó. Elaboración propia	31
Figura 20 Diagrama resumen de flujo de aguas y cuantificaciones reconocidas en Zona de estudio. Elaboración Propia	46
<i>Figura 21 Mapa de topografía para la cuenca de Nilahue en la sexta región de O´Higgins. (Elaboración Propia)</i>	<i>47</i>
<i>Figura 22 Cota de basamento en acuífero de Nilahue. (Elaboración Propia)</i>	<i>48</i>
Figura 23 Isopiezas calculadas a partir de Natural Neighbor con mediciones de niveles estáticos en 2013. (Elaboración Propia)	49
Figura 24 Isopiezas calculadas a partir de Natural Neighbor con mediciones de Niveles estáticos en 2018. (Elaboración Propia).....	51
Figura 25 Isopiezas calculadas a partir de IDW con mediciones de Niveles estáticos en 2018. (Elaboración Propia).....	51
Figura 26 Trazas de perfiles seleccionados en acuífero de Nilahue (Elaboración propia).....	53
Figura 37 Perfil 2(Elaboración propia).....	54
Figura 38 Perfil 1. Elaboración propia	54

Figura 39 Perfil 4 (Elaboración propia).....	55
Figura 30 Canal de interconexión de sociedad Convento Viejo. Octubre 2018. Captura propia	58
Figura 31 Ubicación de canales de interconexión Convento Viejo. Elaboración propia con base en datos entregados por Sociedad Convento Viejo	58
Figura 32 Caudales base, acuífero de Nilahue durante los meses de verano (dic-mar). Elaboración Propia.....	59
Figura 33 Volúmenes de entradas por precipitaciones junto a su respectiva salida por escorrentía superficial en cuenca de Nilahue. (Elaboración Propia)	60
Figura 34 Relación lineal entre volumen de desagüe por escorrentía superficial anual y volumen por aporte de precipitaciones anuales para cuenca de Nilahue. (Elaboración Propia)	61
Figura 35 Relación lineal precipitación anual y coeficiente de escorrentía para cuenca de Nilahue. (Elaboración Propia)	62
Figura 36 Relación estero de Nilahue-Acuífero (DGA, 2013)	63
Figura 37 Promedio anuales de derechos de aguas en cuenca de Nilahue (Elaboración propia)	65
Figura 38 Distribución de derechos de aguas subterráneas en cuenca de Nilahue registrados por DGA. (Elaboración Propia).....	65
Figura 39 Distribución de derechos de aguas superficiales en cuenca de Nilahue registrados por DGA. (Elaboración Propia)	66
Figura 40 Áreas con vegetación en terrenos agrícolas para región de O´Higgins y cuenca de Nilahue a partir de NDVI en imagen Landsat8 del 6 de diciembre, 2018. (Elaboración Propia)	68

Figura 41 Diferencias de extracciones entre un gran agricultor de la industria vitivinícola (izq.) y un pequeño agricultor de arándanos (der). Elaboración propia	70
Figura 42 Derechos de agua subterránea otorgados acumulados por año. Elaboración propia con base en reportes digitales DGA.	70
Figura 43 Noria seca durante periodo octubre de 2018 cercana a grandes lugares de extracciones en el sector de Pumanque.....	72
Figura 44 Evapotranspiración mensual 1986-2016. Elaboración propia	75
Figura 45 Balances hídricos cuenca de Nilahue	76
Figura 46 Balances hidrológicos acumulados para cuenca de Nilahue 1986-2016. Elaboración propia	77
Figura 32 Resumen integrado de volúmenes mensuales para PP, ETR, Inf. prof, Esc. Superficial (escala vertical igualada para los parámetros) Elaboración propia	81
Figura 48 Diagrama de Piper en relación porcentual de Miliequivalentes de los principales iones presentes en las muestras del aforo de Estero Nilahue en Santa Teresa. Elaboración propia con base en los datos de (DGA, 2018) ...	82
Figura 49 Diagramas de Stiff para distintos periodos y meses en muestras de agua del aforo de Estero Nilahue en Santa Teresa. Elaboración propia con base en los datos de (DGA, 2018).....	83
Figura 50 Relación mensual recargas con precipitaciones y distribución anual de recargas, Acuífero de Nilahue 1986-2016.....	84
Figura 51 Precipitaciones vs coeficiente de escorrentía mensual, cuenca de Nilahue. Elaboración propia.....	85
Figura 52 Precipitaciones vs escorrentía mensual, cuenca de Nilahue. Elaboración propia	85

Figura 53 Ilustración de proceso de recarga difusa más aporte a cursos superficiales. Elaboración propia.....	86
Figura 54 Caudal promedio mensual vs Total iones principales, estero de Nilahue en Santa Teresa. Elaboración propia.....	87
Figura 55 Ilustración de modelo conceptual de interacción entre aguas superficiales, subterráneas y acuífero granular con fracturado. (Elaboración propia).....	88
Figura 56 Resumen integrado de volúmenes anuales para PP, ETR, Inf. prof, Esc. Superficial (escala vertical igualada para los parámetros) Elaboración propia	89
Figura 57 Recarga difusa vs precipitaciones, Acuífero de Nilahue. Elaboración propia	90
Figura 58 Precipitaciones anuales vs Coeficiente de escorrentía. Elaboración propia	91
Figura 59 Precipitaciones vs Coeficiente de escorrentía anuales en cuenca de Río Turbio. (Jourde et al., 2011).....	91
Figura 60 Período de recurrencia en años (escala a la izquierda) de una sequía (>30% de déficit de precipitación en Chile central) de tres o más años de duración, empleando siete modelos climáticos que simulan climas pasados, presentes y futuros. El período de recurrencia se calculó para cada modelo. Los círculos rojos indican el promedio y las líneas verticales la desviación estándar entre modelos. ((CR2), 2015).....	93

1 Introducción

En el marco del proyecto de adaptación al cambio climático del ministerio de agricultura, se busca apoyar la investigación en riesgos climáticos y cambio climático, con el objetivo de determinar los impactos que estos provocan, pero, además, usar este conocimiento en el sector agrícola para hacer frente a los tiempos que vienen. La agricultura depende fuertemente de las condiciones climatológicas del territorio donde se encuentra ya que éstas condicionan los cultivos que se pueden desarrollar.

Chile central entre la VI y VII región basan su actividad económica en la agricultura, estas basadas principalmente en la producción de cereales, frutos y verduras. Los valles de Chile central presentan un clima idóneo para la producción de uva, lo que ha impulsado al país a producir grandes cantidades de vino de exportación de calidad internacional, llegando a posicionarse en 2018 como el 5to país con mayores exportaciones de vino a nivel mundial, concentrando el 4% de la producción mundial.

El crecimiento de la agricultura a nivel regional ha implicado una mayor demanda de agua, que junto a la una baja en las precipitaciones en la última década ha llevado a una escasez del recurso e incluso ha llevado a impactar en el suministro de agua potable para consumo humano en algunos sectores. La escasez ha llevado a muchos agricultores a optar por obtener agua subterránea para abastecer sus cultivos bombeando de manera indiscriminada.

Debido a la alta cantidad de pozos destinados a la agricultura local hechos de manera personal, se desconoce el número exacto de pozos de extracción que existen en el sector. Es por esto que hace algunos años, la dirección general

de aguas llamó a la ciudadanía a regularizar la inscripción de sus pozos y así poder tener información clara de la situación actual.

Al momento de recibir estas solicitudes se percataron de que el número era varias veces mayor al que habían estimado, por lo que no pudieron seguir con la regularización y entregar estos permisos. En la actualidad se desconoce realmente cuál es el escenario de extracciones.

Es por esto, que se ha propuesto caracterizar a través de un modelo conceptual el funcionamiento del acuífero de Nilahue, junto con los sistemas que lo dominan, influencias antrópicas e hidroclimáticos en éste con el fin de aprovechar de mejor manera los recursos hídricos que soportan la mayor actividad económica de la zona.

La cuenca de Nilahue se caracteriza por un área de depósitos cuaternarios de baja pendiente encajonados por cerros de la cordillera de la costa conformadas por rocas volcánicas y cuerpos intrusivos Jurásicos de la cordillera de la costa de Chile central. Esta zona es cruzada por el estero Nilahue, un río de caudal intermitente que presenta grandes variaciones en su caudal a lo largo del año.

La cuenca, al estar encajonada en la cordillera de la costa no recibe aportes directos de agua desde la cordillera ni de la depresión central. El recurso hídrico está limitado exclusivamente a los aportes por precipitaciones locales y a lo almacenado en el acuífero detrítico albergado en los depósitos no consolidados de la cuenca.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Frente a la creciente demanda por los recursos hídricos de la cuenca de Nilahue por parte de la agricultura local y cambios aparentes en las condiciones climatológicas en los últimos años. Se busca caracterizar a través de un modelo conceptual el funcionamiento del acuífero de Nilahue, junto con los sistemas que lo dominan, influencias antrópicas e hidroclimáticos en éste con el fin de aprovechar de mejor manera los recursos hídricos que soportan la mayor actividad económica de la zona.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Definición espacial, geológica y unidades hidrogeológicas de la zona de estudio.
- c) Identificar mecanismos de recarga y descarga para el acuífero de Nilahue.
- d) Cuantificar recargas y descargas históricas.
- e) Establecer condiciones actuales para la cuenca de Nilahue, diferenciándolas de las condiciones en décadas pasadas, asociándolas tanto a cambios hidroclimáticos como antrópicos.
- f) Estimar balances hidrológicos preliminares anuales para la cuenca de Nilahue integrando resultados obtenidos.

1.2 Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio se encuentra al sur oeste de la Región de O'Higgins, más específicamente en las comunas de Lolol y Pumanque.

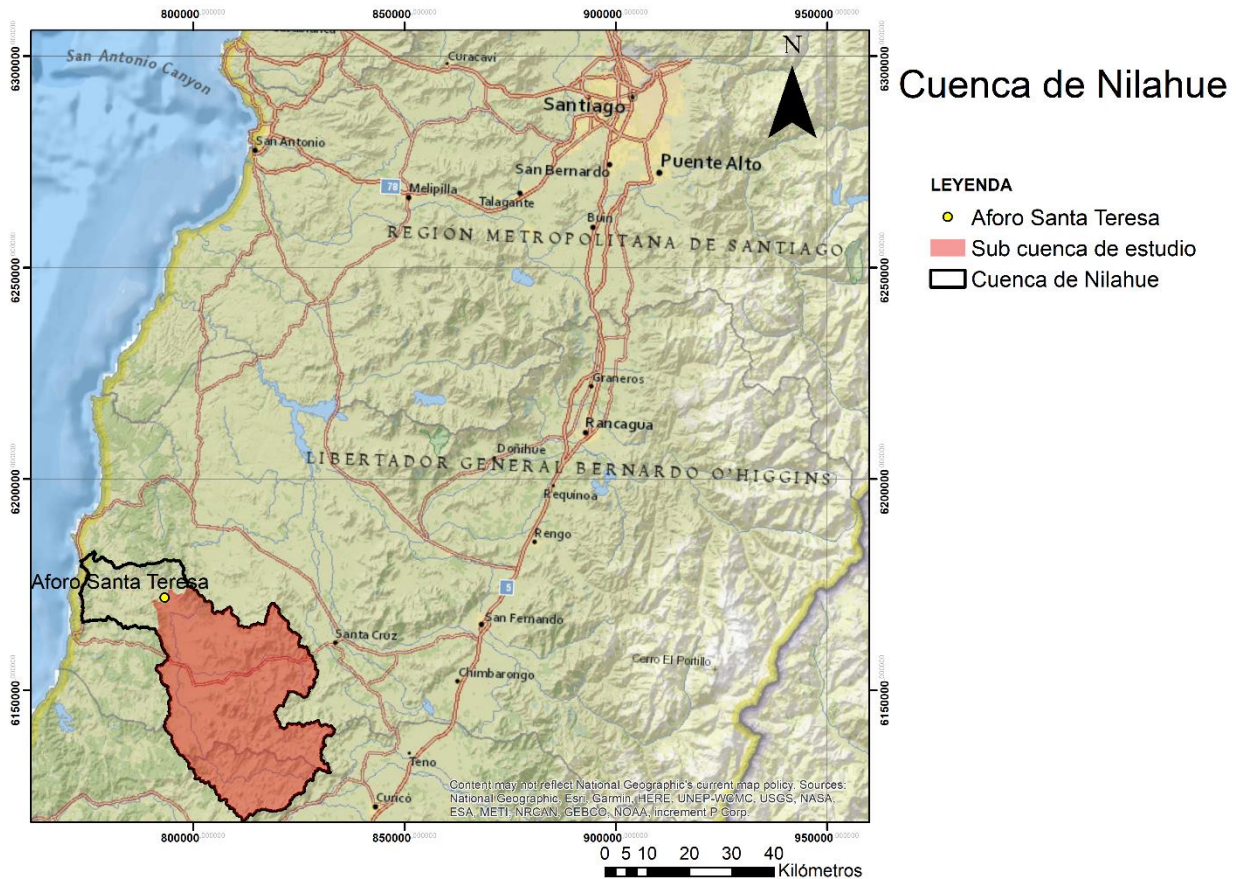


Figura 1 Ubicación de área de estudio

Se puede acceder desde la ruta 5 sur ingresando a las rutas locales I-72, I-60 e I-776. Desde el sur por la ruta J-70-I y desde la costa por Paredones por la ruta I-72.

El área de estudio se encuentra aproximadamente entre los 612400, 617400 mS y 241500, 279600mE WGS84/19S.

1.3 Descripción zona de estudio

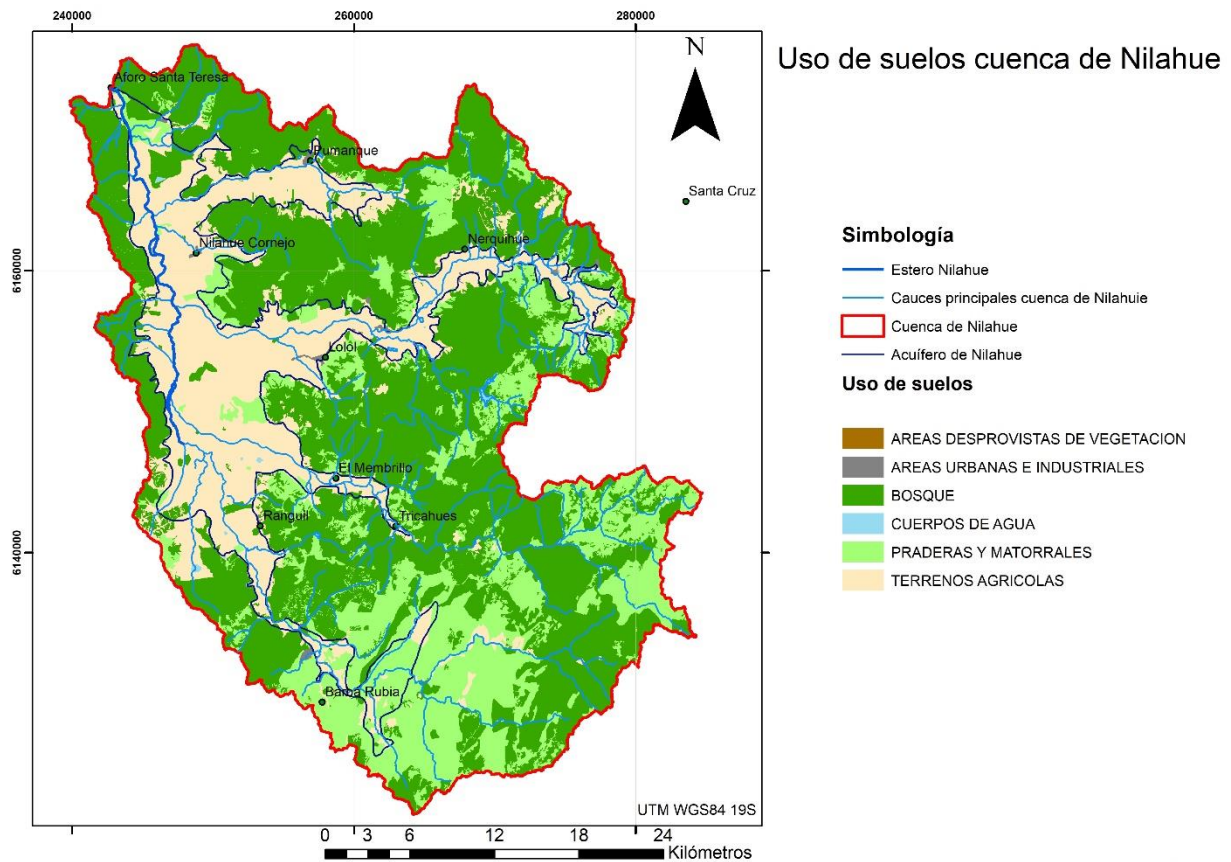
La cuenca de Nilahue consta principalmente de una serie de valles encajonados en cerros conformados principalmente por cuerpos intrusivos de la cordillera

de la costa y unidades volcánicas estratificadas. El curso de agua principal desagua la localidad de Cahuil, VI Región de O'Higgins. Para términos prácticos la subcuenca de estudio se consideró hasta el punto del aforo de Santa Teresa en el estero de Nilahue, de donde se obtuvieron datos de caudales de escorrentía superficial.

La subcuenca de estudio presenta precipitaciones promedio anuales para los últimos 30 años de 647mm con un potencial de evapotranspiración de 1310 mm/año, clasificándola por índice de aridez de 0,49 como una zona semi-árida.

Durante los meses de verano esta zona es altamente propensa a que se produzcan incendios forestales. Durante el verano de 2016-2017 gran parte de los bosques y praderas del sector oeste de la cuenca resultaron quemados a raíz de los incendios forestales (García & Ormazabal, 2008).

La cuenca de Nilahue posee una baja densidad poblacional, gran parte de su población vive en áreas rurales por excepción de algunos pueblos como Lolol, Nilahue Cornejo, Pumanque y Ranguil (Figura 2). Su principal actividad económica es la agricultura y gran parte de su población aún no tiene acceso a agua potable rural (APR) teniendo que recurrir a pozos y norias para satisfacer las necesidades hídricas personales y de sus plantaciones.



Thomas Williams D.

Figura 2 Uso de suelos cuenca de Nilahue. Elaboración propia

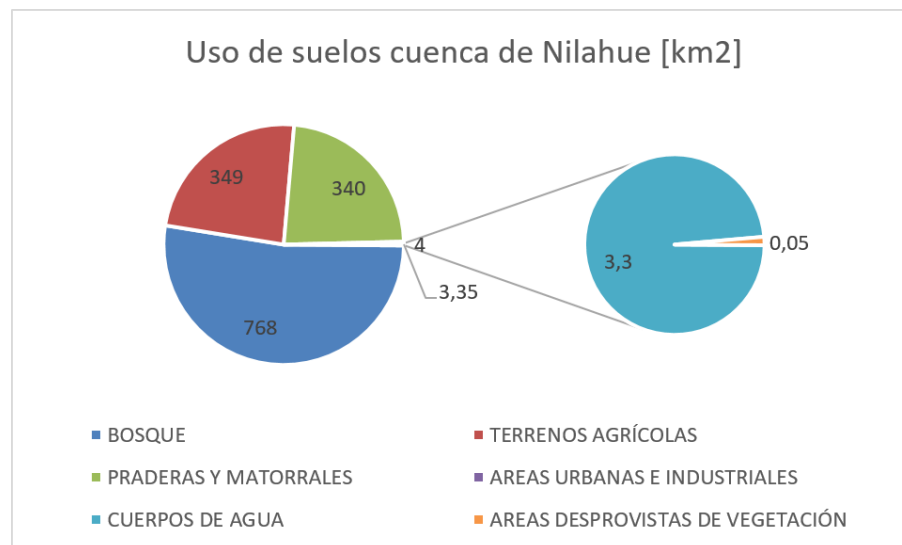


Figura 3 Distribución uso de suelos cuenca de Nilahue. Elaboración propia

En el mapa de uso de suelos se puede apreciar que gran parte de la cuenca de Nilahue (~50%) son bosques, ubicándose mayoritariamente en los cerros

y laderas de los valles. Del resto, la mitad corresponde a praderas y matorrales ubicándose en las laderas de los valles y en algunos pocos sectores de baja pendiente. La otra mitad consiste en terrenos agrícolas ubicadas netamente en la superficie de baja pendiente y relleno sedimentario de la cuenca. Cerca del 90% de la superficie sobre el acuífero detrítico de la cuenca de Nilahue es de uso agrícola.

Los bosques nativos esclerófilos de la zona se conforman mayoritariamente por Boldos (*Peumus boldus*) y Peumos (*Cryptocarya alba* Looser) (García & Ormazabal, 2008), las plantaciones forestales se conforman principalmente de *Pinus radiata* (66,1%) y *Eucalyptus globulus* (32%) (Loewe, Gysling, Gonzalez, & Cerda, 2008). La actividad agrícola local se ve representada principalmente por grandes viñas para la producción de vino, frutales y hortalizas.

Durante el siglo XIX en Chile central vio centrada su actividad económica en la agricultura de cereales, principalmente del trigo, proliferando gracias a la demanda peruana en el siglo XVIII y posteriormente por a la enorme demanda por parte de Australia y California durante la fiebre del oro del siglo XIX (Biblioteca nacional digital de Chile, 2018). La gran intensidad de cultivos llevó a un uso intensivo de los suelos de Chile central produciendo una gran alteración de estos y altas tasas de erosión, quedando evidenciado en la zona de estudio por grandes depósitos de maicillo en el valle central y cerros con gran desarrollo de suelo estéril de morfología redondeada.



Figura 4 Vista aérea por dron al sector de Nilahue Cornejo, Mayo de 2018. Foto por Sebastián Galaz Pizarro (google street view)

El principal curso de agua superficial de la cuenca es el estero de Nilahue (Figura 4) que se caracteriza por tener un flujo intermitente. Durante los meses de invierno, presentando caudales promedios mensuales en torno a los $\sim 30 \text{ m}^3/\text{s}$ y durante el verano $\sim 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$.

1.4 Marco Geológico

1.4.1 Unidades Rocosas

1.4.1.1 **Batolito de la Costa [Carbonífero-Pérmico](CPg) (Escobar, Guzmán, & Vieira, 1977)**

Dispuesto principalmente en el lado oriental de la cordillera de la costa junto con el basamento metamórfico y se encuentra fuertemente disectado. Compuesto principalmente de granodioritas, granitos, tonalitas y dioritas.

Presenta alteración superficial, desarrollando un suelo disgregable de textura arenosa (maicillo).

Esta unidad rocosa aflora en el extremo norte de la cuenca, donde el estero Nilahue desagua la cuenca de Nilahue hacia el norte y se encuentran en

contacto por falla con las unidades del basamento metamórfico. (SERNAGEOMIN, 2003)

1.4.1.2 Sedimentitas de las Cuencas Vichuquén-Tilicura y Hualañe [Triásico sup. - Jurásico med.](Tr1m, Jr1m)

En el sector de Vichuquén se describe una importante secuencia sedimentaria de origen marino y continental correspondiente al relleno de las cuencas del triásico Superior-Jurásico Inferior por sobre rocas Intrusivas y metamórficas paleozoicas. (Corvalán, 1976)

Las unidades del triásico incluyen secuencias sedimentarias marinas y transicionales: areniscas, conglomerados, limolitas y calizas. Para la unidad Jurásica se describen secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma: calizas, areniscas calcáreas, lutitas, conglomerados y areniscas con intercalaciones volcanoclásticas y lávicas; basaltos almohadillados. (SERNAGEOMIN, 2003). Estas unidades podrían asociarse a la Fm. Los Molles, Fm. Quebrada del Pobre y Fm. Cerro Calera. Descritas por Charrier et. al 2007 para el tras arco volcánico de la primera subetapa del primer ciclo andino.

Las sedimentitas del triásico-jurásico afloran en cerros de 150 metros de altura hacia los costados en el extremo sur del acuífero de Nilahue. Y se encuentran en contacto por fallas NE-SW observada con plutones Flamenco y Caldera-Pajarones. (SERNAGEOMIN, 2003)

1.4.1.3 Intrusivos graníticos Jurásicos

Durante la primera etapa del ciclo andino se generó en emplazamiento de cuerpos intrusivos en lo que hoy es la cordillera de la costa. Está dividida en 2 subetapas, la primera de edad jurásica temprana a Kimmeridgiana y la segunda, del Kimmerdisgiano al Titoniano-Albiano. (Charrier, Pinto, & Rodriguez, 2007)

En la primera subetapa se emplazaron cuerpos en alineación N-S de plutones pertenecientes a denominado Batolito de la costa. Sus características geoquímicas lo clasifican como un Plutón que ha cristalizado a partir de un magma tipo cordillerano, estrechamente relacionado a la subducción oblicua en el margen continental oeste de Gondwana. (Rodriguez, Díaz-Alvarado, & Fuentes, 2015)

EL plutonismo Jurásico se extendió hacia el sur por la cordillera de la costa hasta la latitud de Concepción (37°S). La zona central se caracterizó por la formación de batolitos tipo I, los que incluyen dioritas, tonalitas, granodioritas y granitos calcoalcalinos (Charrier, Pinto, & Rodriguez, 2007). En sectores de menor pendiente presentan intensa alteración y generación de suelo arenoso grueso tipo maicillo, el que queda cubierta por vegetación débil durante periodo invernal.

Este intrusivo se encuentra en contacto con por fallas de rumbo N-S con unidades de sedimentitas Triásicas por el sur y con intrusivos cretácicos por el extremo este de la zona de estudio. Se han mapeado fallas N-S que llegan a la parte norte de la zona de estudio y que podrían continuar por el sector sur con el contacto con sedimentitas triásicas (SERNAGEOMIN, 2003) (Charrier, Pinto, & Rodriguez, 2007). Esta rodea y alberga la mayor parte de la zona de estudio, en la incisión de esta unidad de albergan relleno no consolidado que hospeda la mayor parte del acuífero de Nilahue tal como se puede apreciar en la Figura 7. Lo anterior hace presumir un fuerte control estructural Enel emplazamiento y la erosión del Intrusivo Jurásico que da lugar a la cuenca de Nilahue y su forma dispuesta en la dirección de las estructuras locales.

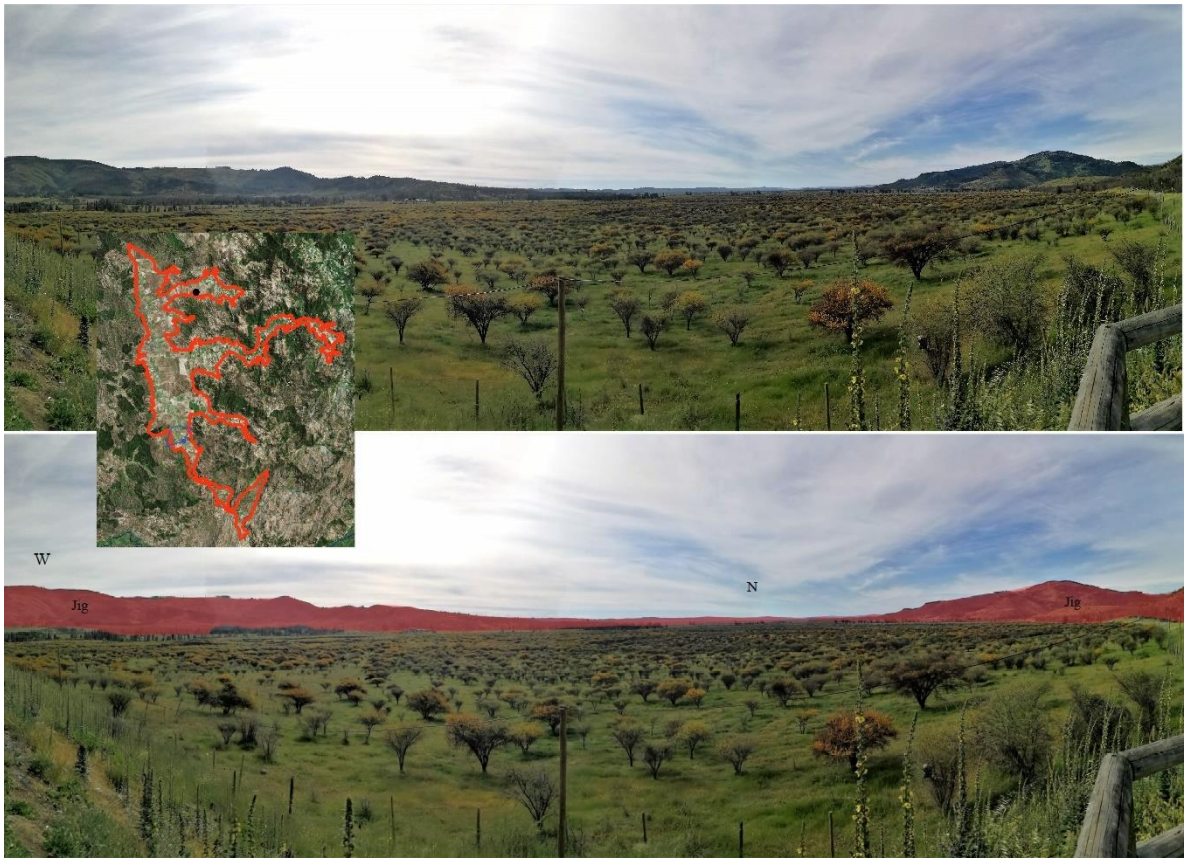


Figura 5 Vista panorámica desde el sur de la cuenca de Nilahue mostrando cuerpo intrusivo que rodea el relleno sedimentario que alberga al acuífero de Nilahue. Octubre, 2018. Captura y elaboración propias

1.4.1.4 Secuencias Volcanicas y Sedimentarias Marinas [Jurásico sup-Cretácico sup.] (J3i, Ki2m, Ki2c)

Por sobre las sedimentitas del Triásico-Jurásico se encuentran secuencias volcánicas continentales y marinas del Jurásico sup. ubicadas en la zona sur del acuífero, rodeando pequeña parte de éste en la localidad de Barba Rubia. Se caracteriza por lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales.

Sobre esta unidad se encuentran unidades similares con lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas. Estas afloran las laderas de la localidad de Nerquihue hacia los brazos este del acuífero de Nilahue.

Finalmente en la parte superior se encuentran unidades volcano-sedimentarias marinas de la formación Veta Negra y Quebrada Marqueza que se localizan en el extremo este de la localidad de Nerquihue, antes de la ciudad de Santa Cruz y que corresponden a una secuencia de lavas andesíticas y rocas epi y piroclásticas continentales, que cerca de su base presenta intercalaciones de areniscas calcáreas marinas (Aguirre & Egert, 1962). La Unidad aflora en la parte más alta de la zona de estudio donde termina la cuenca de Nilahue, observándose paquetes plegados de entre 0,5 y 2 metros de potencia estratificados con un manteo local estimado de 55° al SE de areniscas y brechas verdes y rojas.

1.4.1.5 Intrusivo granítico Cretácico

En la segunda subetapa del primer ciclo andino hubo un desplazamiento del arco magmático al este donde comienzan a aparecer una segunda cadena de intrusivos en orientación N-S intruyendo unidades de sedimentitas de la cuenca de tras-arco volcánico Jurásico considerando dioritas, monzodioritas, granodioritas y monzogranitos.

La unidad de encuentra en contacto con secuencias volcánicas y sedimentarias marinas asociadas a la formación veta negra según correlación para unidades de tras arco de la época (Charrier, Pinto, & Rodriguez, 2007). También se encuentra en contacto por falla inferida con el batolito Jurásico como se muestra en la Figura 7.

Esta unidad aflora en una pequeña parte en el sector de Tricahue al sur de la zona de estudios en uno de los brazos afluentes al sureste tal como se puede apreciar en la Figura 7.

1.4.2 Unidades no consolidadas

1.4.2.1 Abanicos aluviales inactivos y niveles aterrazados (PPI1c)[Plioceno- Pleistoceno] (SERNAGEOMIN, 2003)

1.4.2.1.1 Depósitos fluviales de valles interserranos y costeros (Qfi) (Hauser Yung, 1990)

Dentro de esta categoría se engloban los materiales arenosos de origen fluvial, que rellenan los valles principales de la cuenca de Nilahue.

El curso de agua de este valle experimenta vigorosas crecidas de invierno, asociadas a la temporada pluvial. El paulatino relleno se realiza mediante mecanismo de "lavado de laderas" a partir de relieves graníticos superficialmente meteorizados (maicillo). Incluye principalmente, arenas cuarcíferas medianas a gruesas con feldespatos y micas subordinadas que se disponen en bancos alternados con delgados lentes limo-arcillosos. A nivel superficial, estos depósitos presentan escasa compacidad y son muy permeables.

El relleno se habría desarrollado sólo a partir de momentos en que el macizo granítico que atraviesa el valle alcanzara un acentuado grado de meteorización.



Figura 6 Depósito de maicillo de superficie granítica meteorizada. Captura propia

1.4.2.1.2 Depósitos aluviales asociados cauces actuales (Qfa) (Hauser Yung, 1990)

Esta unidad incluye materiales clásticos que conforman la mayor parte de los ríos mayores y sus afluentes, enmarcados en sus activas llanuras de inundación. Los cursos normalmente presentan pobre encauzamiento en la llanura, favoreciendo las temporales, en respuesta a bruscos incrementos de caudal.

Los depósitos corresponden a gravas y arenas, con marcado predominio de estas últimas. Las gravas están constituidas predominantemente, por rodados graníticos, resistentes y muy redondeados y pulidos. Granulométricamente presentan gran uniformidad, con solo pequeñas variaciones locales, atribuibles a acciones selectivas en crecidas. Se observan superficialmente sueltas, no consolidadas y con escasa matriz y alta permeabilidad, la que, en profundidad, tiende a decrecer gradualmente. Arena y gravas bien redondeadas, que son propias de un transporte fluvial prolongado.

1.4.2.1.3 Depósitos Gravitacionales (Qg) (Hauser Yung, 1990)

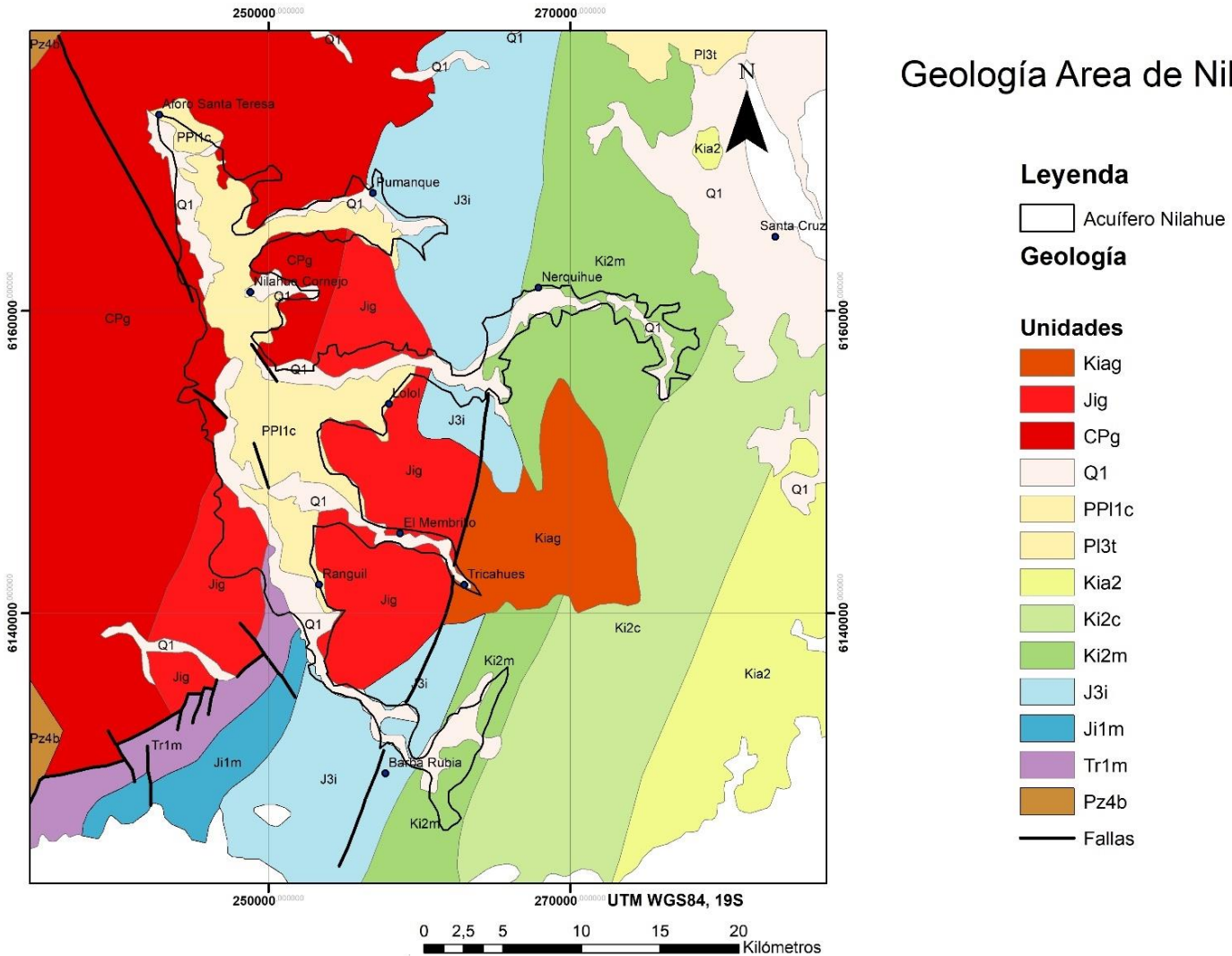
En estos depósitos se engloban los sedimentos resultantes de la fragmentación superficial de macizos rocosos que por efecto principalmente gravitacional y en parte hídrico, resultaron en remociones con deposición. El término incluye los denominados escombros de falda, coluvios, conos de deyección etc. Morfológicamente se asocia a relleno de quebradas y depósitos de alta pendiente (25°-25°).

Litológicamente, estos depósitos están constituidos por una mezcla caótica de fragmentos de variada composición y tamaño, englobados en una matriz fina limo-arcillosa.

Considerando la actividad de estos depósitos esta unidad puede separarse en: activos y estabilizados. Los activos suelen experimentar periódicas remociones bajo la forma de flujos de detritos superficial, asociados a ocasionales precipitaciones de gran intensidad (>60mm/día) y que carecen de cobertura vegetal. Los estabilizados, en cambio, han alcanzado una condición de equilibrio por paulatina reducción en la pendiente del eje hidráulico en las

quebradas y laderas que los alberga. Estableciendo una importante cobertura vegetal.

Geología Area de Nilahue



Thomas Williams D.

Figura 7 Geología área de Nilahue. Elaboración propia con base en "mapa geológico de Chile, 2003"

1.4.3 Estructuras

Los rasgos estructurales más relevantes corresponden a lineamientos observados en torno a la cordillera de la costa. Estos han ejercido, en partes, control morfológico respecto del curso de algunos ríos y esteros, de acuerdo con rumbos preferenciales $N20^{\circ}$ - $30^{\circ}W$ y $N35^{\circ}$ - $45^{\circ}E$. El flanco occidental del valle del estero de Nilahue, a través de aproximadamente 32kms, está

controlado por falla, induciendo una severa acentuación en la erosión del intrusivo granodiorítico del lugar.

En la zona, los mega lineamientos de fallas producen una significación económica concurrente con el desarrollo de atractivos yacimientos de Caolín, donde los mecanismos de falla aceleran la arcillización de granitos.

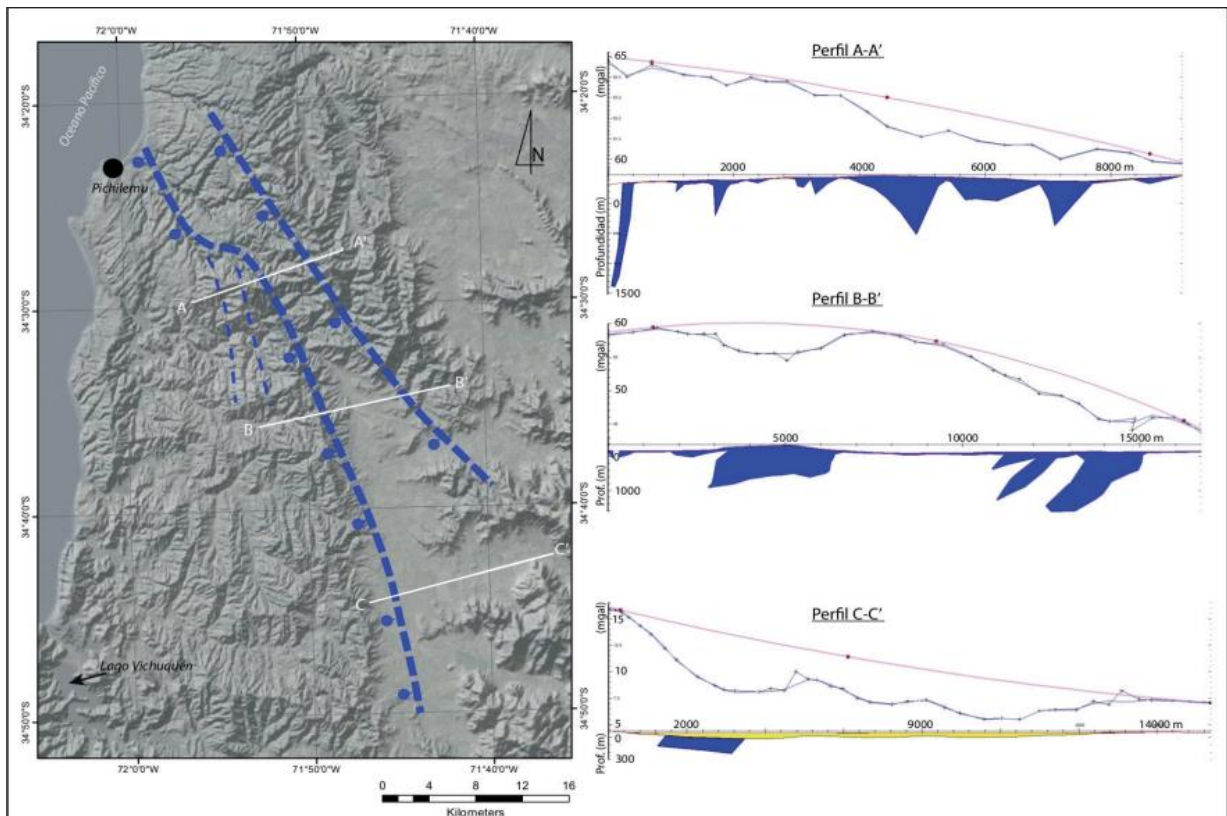


Figura 8 Imagen satelital combinada con DEM donde se indica expresión morfológica principal de la Falla Pichilemu (líneas blancas), polígonos azules se asocian a zonas de daño de la Palla Pichilemu (Lira et al., 2015)

Con base en actividad sísmica post terremoto del febrero de 2010 se ha evidenciado actividad cortical holocena en Falla Pichilemu, previamente reconocida en superficie con un lineamiento NW. Esta actividad sísmica se evidenció en actividad de movimiento normal en planos con manteos al suroeste. Con base en esto se ha determinada un plano fijo de actividad sísmica en profundidad (>20kms), mientras que la actividad somera se ha

caracterizado por zonas más dispersas en torno a un dominio de orientación principal NW (Lira et al., 2015).

A partir de esta información podría inferir una mayor actividad de fallas en superficie de las mapeadas en la actualidad para el sector de Nilahue, esto indicaría un alto grado de fracturamiento en el macizo rocoso intrusivo que rodea a la cuenca de Nilahue.

1.4.4 Geomorfología

En la Región de O´Higgins desde el punto de vista geomorfológico, se pueden distinguir 3 principales unidades morfoestructurales bien definidas, estas son: la Cordillera Principal, Depresión Intermedia y Cordillera de la Costa. Estas 3 unidades pueden distinguirse en la Figura 10.

El retro corrimiento de los knickpoints frenados por el cordón intrusivo de la cordillera de la costa y la cordillera principal, produjo captura del río principal y abandono de la red cuyo knickpoint está retenido por los cuerpos graníticos más competentes de la cordillera de la costa (Farías, 2007).

Esto generó una incisión por erosión de la cuenca de ante arco volcánico y su posterior relleno sedimentario producto del incremento de aporte sedimentario por alzamiento de la cordillera principal (Fock, 2005). Así generando las 3 principales unidades geomorfológicas presentes en Chile central.

Los cerros de mayor pendiente ($>3^\circ$) que rodean el relleno sedimentario de los 3 valles principales de la cuenca de Nilahue van desde los 200 hasta los 900 msnm de altura, mientras que el relleno sedimentario de muy baja pendiente está entre los 75 y 120 msnm.

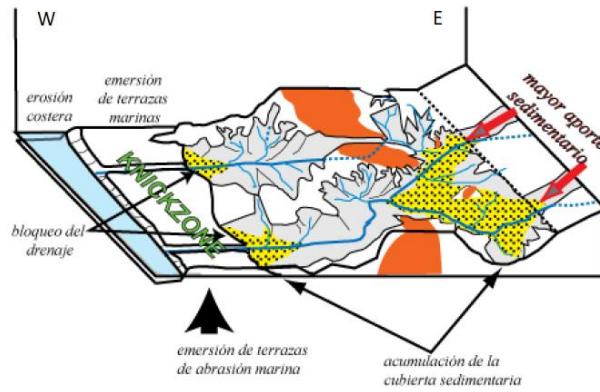


Figura 9 Formación unidades geomorfológicas Chile central. Modificado de (Farías, 2007)

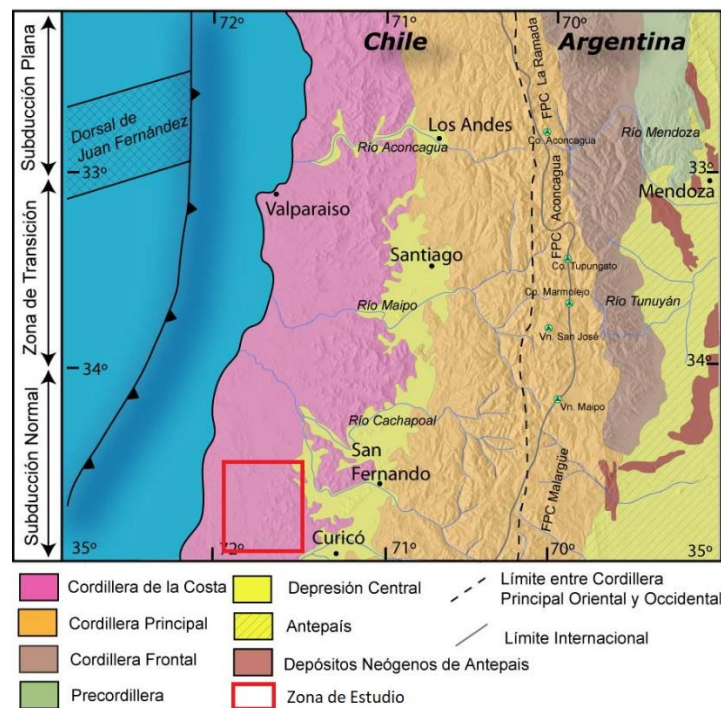


Figura 10 Principales unidades geomorfológicas Chile central. Modificado de (Fock, 2005)

La zona de estudio se encuentra inmersa en la unidad geomorfológica de la cordillera de la costa, constituida principalmente por una franja de cuerpos intrusivos y en menor medida unidades volcano-sedimentarias mesozoicas. La cuenca de Nilahue se ha desarrollado al interior de un cuerpo intrusivo granodiorítico por una erosión de éste en orientación N-S, también consta de

varios afluentes importantes como el valle de Lolol, Los Trichahues y Pumanque, que aportan las aguas al estero principal de Nilahue desde incisiones en roca con valles transversales al Nilahue con dirección de este a oeste principalmente.

1.5 Clima

La zona del Secano costero de la región de O´Higgins cae en la clasificación de Köppen para tipos de climas como Csb y Csa, clima mediterráneo tibio y caliente respectivamente. Estos climas se caracterizan por tener veranos calurosos y secos, e inviernos fríos y lluviosos ubicados entre los 30° y 45° al norte y sur del Ecuador y al lado Oeste de los continentes.

La extensión hacia el polo y la expansión del anticiclón subtropical sobre los océanos traen aire de subsuelo a la región en verano, con cielos despejados y altas temperaturas. Cuando el anticiclón se mueve hacia el ecuador en invierno, es reemplazado por ciclones frontales y con su correspondiente precipitación (Augustyn, et al., 2016). Las precipitaciones totales pueden variar entre los 200 y 1200 mm anuales, promediando 690 mm para el periodo de estudio (1986-2016) con potencial de evapotranspiración de 1310 mm anuales y un índice de aridez de 0,52, clasificando la zona como semi-árida. Si se consideran solo los años del presente siglo se tienen 647 mm anuales, cambiando la clasificación de clima a un clima mediterráneo semi-árido.

1.5.1 Precipitaciones

El régimen pluviométrico en la región central de Chile (30°S – 40°S) se caracteriza por eventos de precipitación que ocurren principalmente entre mayo y septiembre como resultado de la migración estacional hacia el norte del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental y de los sistemas de bajas presiones circumpolares y frentes asociados (Escobar & Aceituno, 1998).

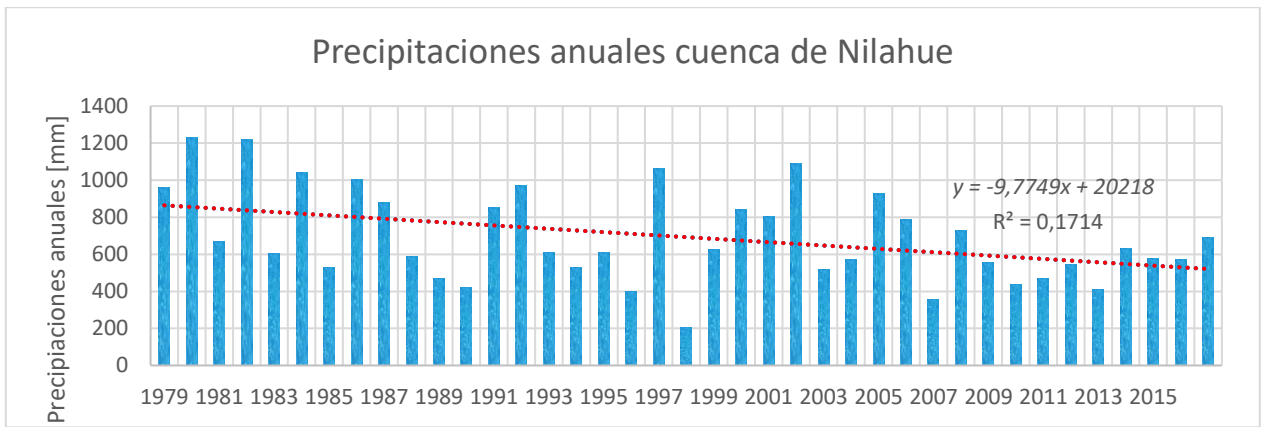


Figura 11 Registro de precipitaciones para cuenca de Nilahue en plataforma CAMELS (CR2, 2018)

A partir de datos de 1979 al 2016 del CR2 (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia), para la cuenca de Nilahue se tienen precipitaciones anuales promedio de 693 milímetros, estas concentradas en promedio entre los meses de mayo y agosto, donde se tiene un 78% de las precipitaciones anuales (DGF, 2018).

La realidad de las precipitaciones no es tan así, año a año éstas van cambiando, como también su distribución durante el año. Principalmente las lluvias tienden a concentrarse en los meses invernales, pero ciertos años, fenómenos climáticos tienden a hacer variar las precipitaciones y la distribución de estas durante el año.

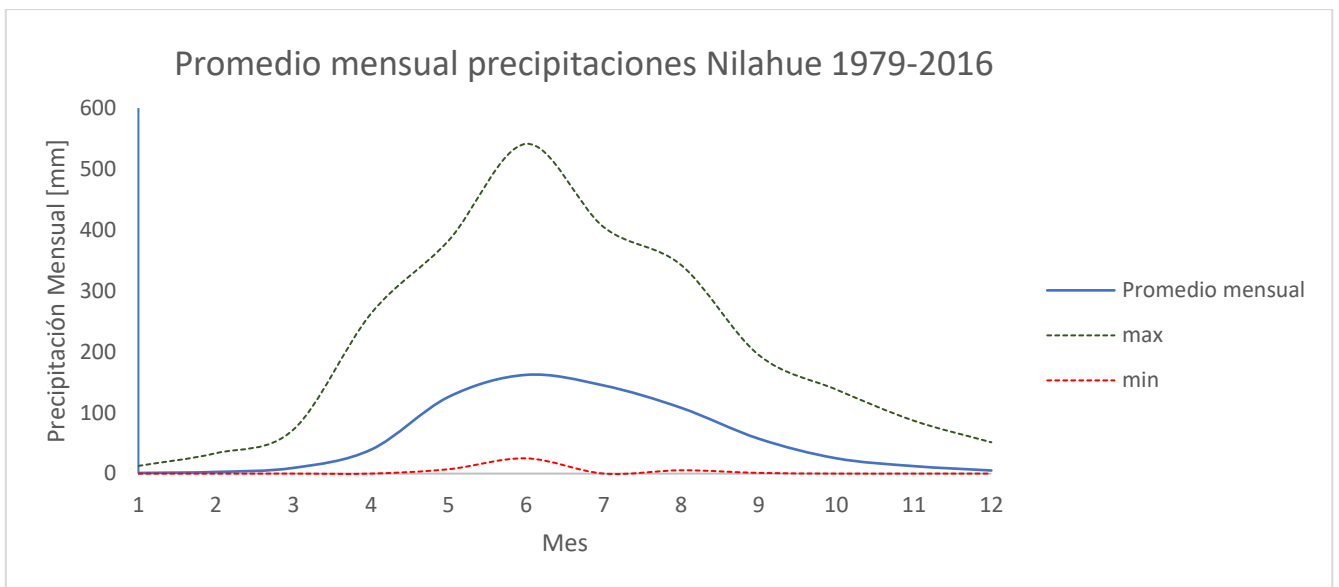


Figura 12 Promedio mensual precipitaciones Cuenca de Nilahue 1979-2016. Elaboración propia

1.5.1.1 Índice estandarizado de precipitaciones

En la cuenca de Nilahue y sus alrededores existen 3 estaciones pluviométricas, de las cuales se cuenta con un amplio registro. A partir de éstas, el CR2 ha generado información histórica de precipitaciones promedio para la cuenca de Nilahue. Dada la variabilidad de los eventos entre los diferentes años se ha tomado en cuenta la variabilidad de los fenómenos de precipitaciones, considerando Índice Estandarizado de precipitaciones (*SPI*).

Dentro de los diferentes índices para sequías meteorológicas el SPI es el más usado. Está basado en registros de precipitaciones por largos periodos de tiempo, que son ordenados en una distribución de probabilidades (Van Loon, 2015). Este luego es transformado en una distribución normal, asegurando una media de cero y una unidad de desviación estándar. Expertos que participaron en el foro de sequías de la Organización Meteorológica Mundial recomendaron que el SPI fuera utilizado por todos los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales del mundo para caracterizar las sequías meteorológicas.

El valor para SPI queda expresado como:

$$SPI = \frac{P - \bar{P}}{Desv}$$

Donde:

- SPI = valor para el Índice Estandarizado de Precipitaciones
- P = Precipitación [mm]
- \bar{P} = Promedio de precipitaciones para el grupo de datos [mm]
- *Desv* = Desviación Estándar para el grupo de datos [mm]

Tabla 1 Clasificación de humedad relativa por índice SPI modificado de Gordjin y Ward (2012)

Valor SPI	Clasificación
>2	Extremadamente Húmedo
1,5-1,99	Muy Húmedo
1,0-1,49	Húmedo Moderado
-0,99-0,99	Normal
-1,0 a -1,49	Sequía Moderada
-1,5 a -1,99	Sequía Severa
-2,0 o menos	Sequía Extrema

Se realizó el cálculo de valores de SPI para cada año, donde además se obtuvo la probabilidad de ocurrencia de una cantidad de precipitación o menor para cada uno de estos años según la distribución de probabilidades de Gumbel (Gumbel, 1958).

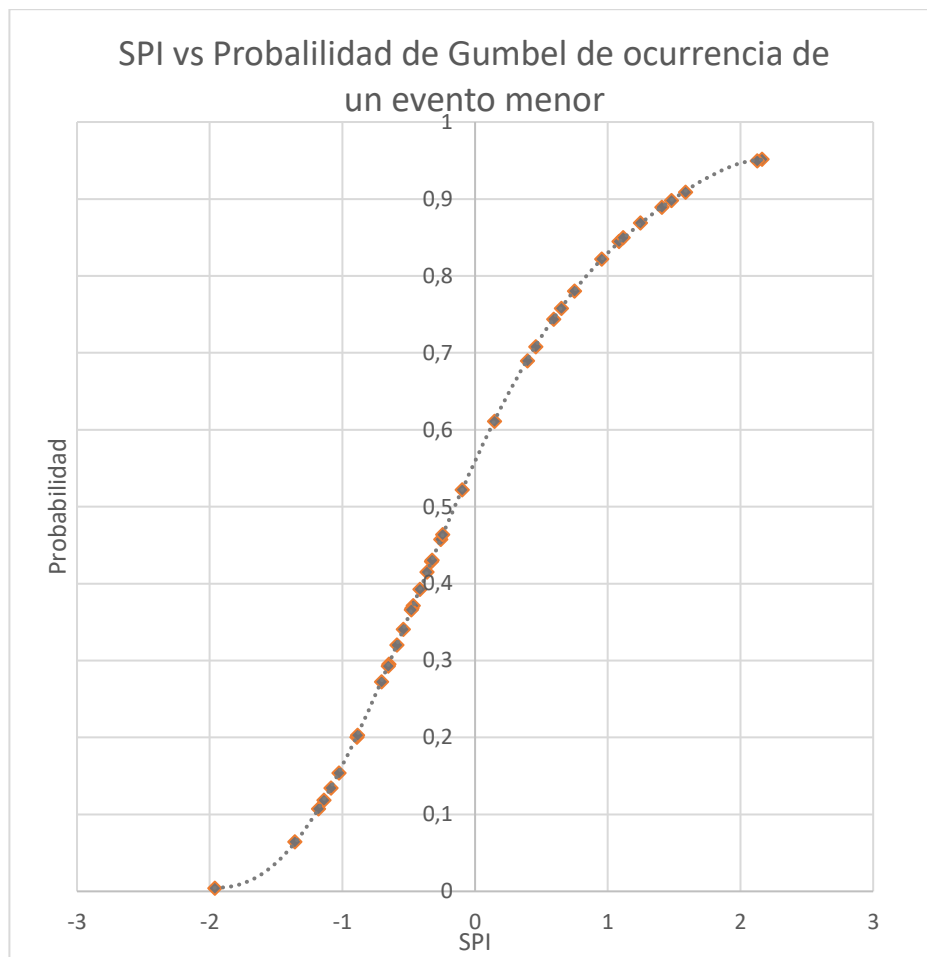


Figura 13 Valores anuales de SPI para la cuenca de Nilahue vs probabilidad de ocurrencia de un evento menor. (Elaboración Propia)

La curva generada a partir de los valores anuales de SPI coinciden con la curva tipo presentada en *Hydrological drought explained* (Figura 14 Metodología para determinar índice de precipitación estándar. para determinar el Índices de Precipitación Estándar (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002).

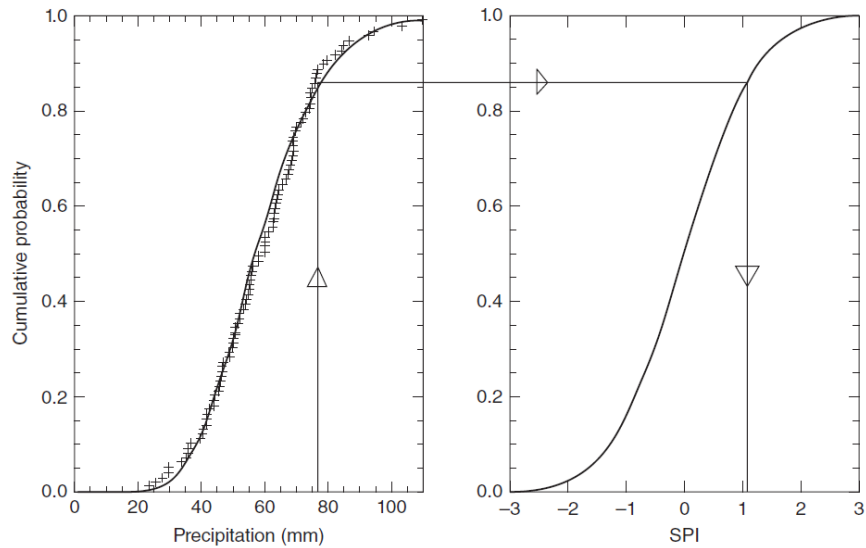


Figura 14 Metodología para determinar índice de precipitación estándar. (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002)

Tabla 2 SPI, Probabilidad de excedencia y Periodo de retorno calculados para los años de registro en cuenca de Nilahue

Año	Pp [mm]	SPI	Prob exedencia	Periodo retorno [años]
1979	962,721	1,0845	16%	6,439739
1980	1230,73	2,1607	5%	20,713433
1981	668,06	-0,099	48%	2,0917187
1982	1222,13	2,1261	5%	19,933489
1983	602,212	-0,363	58%	1,7100075
1984	1042,77	1,4059	11%	9,0581648
1985	530,797	-0,65	70%	1,4195759
1986	1002,6	1,2446	13%	7,6242038
1987	878,806	0,7475	22%	4,5562522
1988	588,888	-0,417	61%	1,6471106
1989	470,428	-0,892	80%	1,2508117
1990	421,928	-1,087	87%	1,1553813
1991	854,48	0,6498	24%	4,1333979
1992	970,571	1,116	15%	6,6560681
1993	610,39	-0,33	57%	1,7508103
1994	529,264	-0,656	71%	1,414504
1995	611,5	-0,326	57%	1,7564817
1996	398,851	-1,18	89%	1,1205054
1997	1061,28	1,4803	10%	9,8133796

Año	Pp [mm]	SPI	Prob exedencia	Periodo retorno [años]
1998	203,736	-1,963	100%	0,00430819
1999	627,768	-0,261	54%	0,45751979
2000	839,861	0,5911	26%	0,74367388
2001	806,277	0,4563	29%	0,70795962
2002	1087,55	1,5857	9%	0,90910011
2003	516,838	-0,706	73%	0,27272385
2004	574,129	-0,476	63%	0,36804037
2005	930,156	0,9537	18%	0,82210585
2006	790,523	0,393	31%	0,68990906
2007	354,027	-1,36	94%	0,06471807
2008	728,812	0,1452	39%	0,61117853
2009	557,954	-0,541	66%	0,34082633
2010	437,234	-1,026	85%	0,15404055
2011	472,023	-0,886	80%	0,20287652
2012	545,85	-0,589	68%	0,32055263
2013	408,862	-1,14	88%	0,11884151
2014	631,554	-0,245	54%	0,46370725
2015	576,318	-0,467	63%	0,37172685
2016	572,887	-0,481	63%	0,36594921

1.5.1.2 El Niño oscilación del sur

El Niño y La Niña forman parte de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), un término usado para referirse al conjunto de cambios de los patrones de temperatura de viento y mar que propician temperaturas superficiales del océano anormalmente frías o cálidas durante períodos largos que abarcan desde unos pocos meses hasta poco más de un año (Geo Enciclopedia, 2018).

Al calentarse y enfriarse la superficie del mar, regulada por los vientos superficiales en los trópicos, se regula la temperatura superficial marina (TSM). Es la TSM la que establece el clima, los patrones de lluvia y los patrones de viento que afectan a la tierra, entre mayor sea la cantidad de agua evaporada, mayores serán las precipitaciones (Geo Enciclopedia, 2018).

Por esto se decidió contrastar el ONI (Oceanic Niño Index) con la TSM en la región 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W). El ONI mensual se define como el promedio de la diferencia con respecto a la media de los meses de la temperatura superficial marina en el Ecuador, en este caso, la región 3.4. Se define el fenómeno Niño o Niña cuando ocurre al menos una anomalía de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, durante 5 consecutivos periodos de 3 meses cada uno. La intensidad de los fenómenos se puede definir Débiles (TSM 0.5-0.9), Moderadas (TSM 1-1.4), Fuertes (TSM 1.5-1.9) y Muy Fuertes (TSM ≥ 2) (National Weather Service, 2019).

Continuación se presenta una correlación entre los valores de SPI para cada año y la TSM ONI para la zona 3.4.

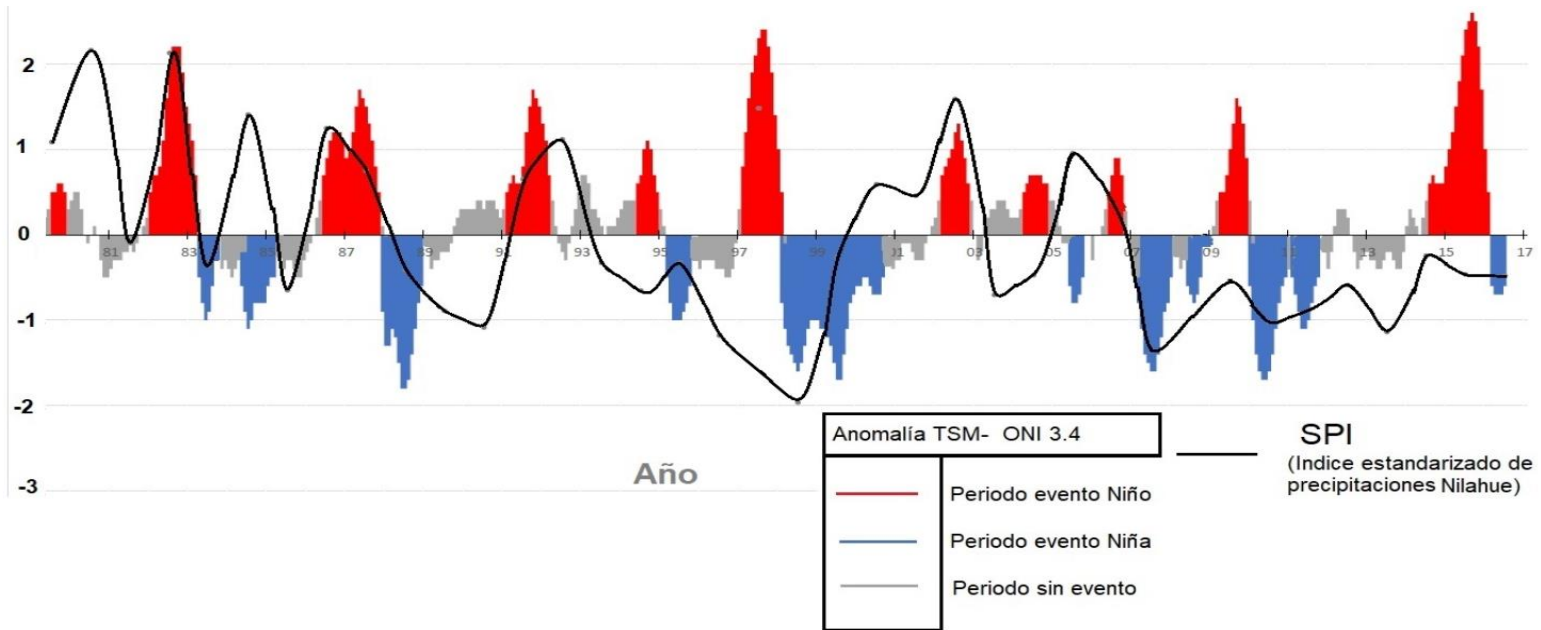


Figura 15 Comparación entre TSM ONI 3.4 y valores de SPI para cada año en la cuenca de Nilahue (Elaboración Propia)

Si bien ambas curvas no se comportan de la misma manera, se puede apreciar una correlación entre muchos de los peaks, tanto negativos como positivos de SPI y el fenómeno Niño-Niña. Existen anomalías termales positivas de la TSM para periodos lluviosos y anomalías termales negativas de la TSM para los periodos secos en la mayoría de los peaks más importantes. Adicionalmente se logra apreciar un pequeño desfase y algunas pequeñas incongruencias entre estos mismos.

Durante el periodo 2010-2016, asociado a la megasequía actual, se han mantenido valores de SPI negativos, el mayor periodo de registros negativos existente en el registro. A pesar de tener uno de los eventos Niño más grandes.

1.5.1.3 Distribución Mensual-Anual de precipitaciones históricas

Se ha observado una variación en la distribución de las precipitaciones en el tiempo. Para esto se realizó una comparación de los promedios mensuales por décadas para cada mes del año en las décadas desde 1979.

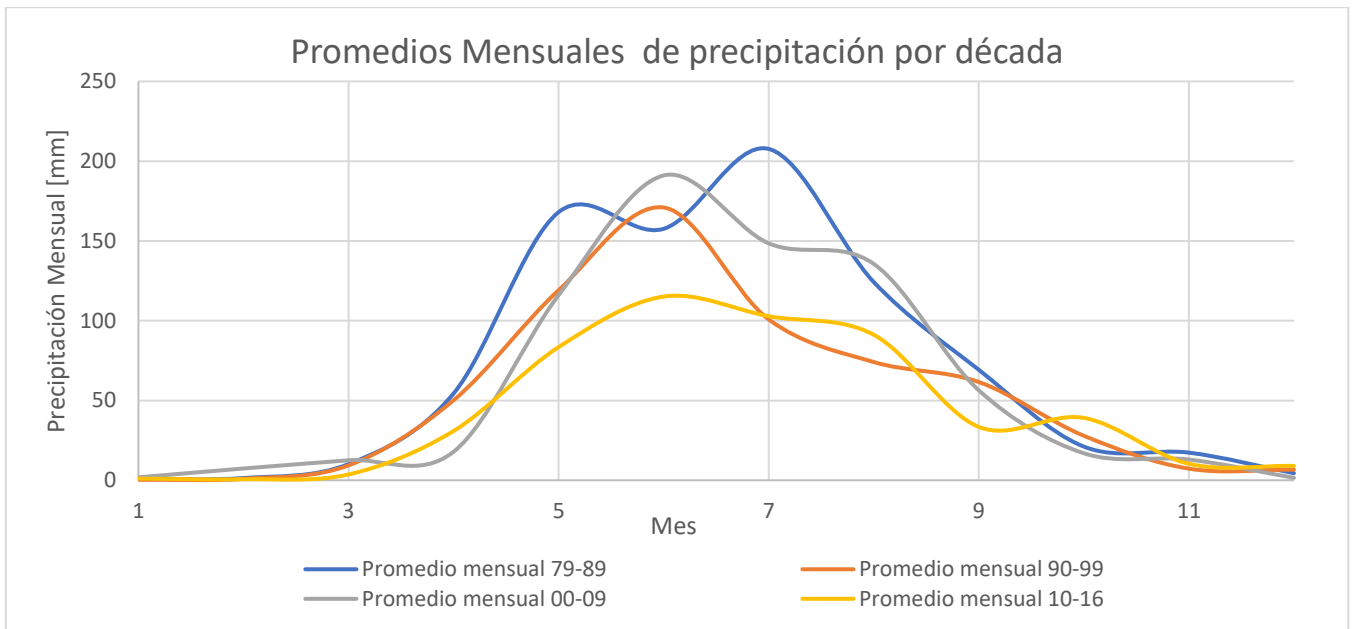


Figura 16 Distribución anual de las lluvias por décadas para la cuenca de Nilahue (Elaboración Propia)

La distribución de las lluvias durante el año tiende a concentrarse en los meses de invierno entre mayo y agosto, sin embargo, década a década los promedios mensuales van cambiando y no siempre se concentran en torno a un punto en el invierno como lo muestra el climograma con los promedios históricos. En los últimos años, y a pesar de ser más secos, el mes de octubre a presentado mayores precipitaciones que en cualquier otra década, donde también se nota una tendencia a la homogenización anual de la distribución de lluvias.

Finalmente se tomaron en cuenta los promedios anuales por década tanto para precipitaciones anuales como mensuales.

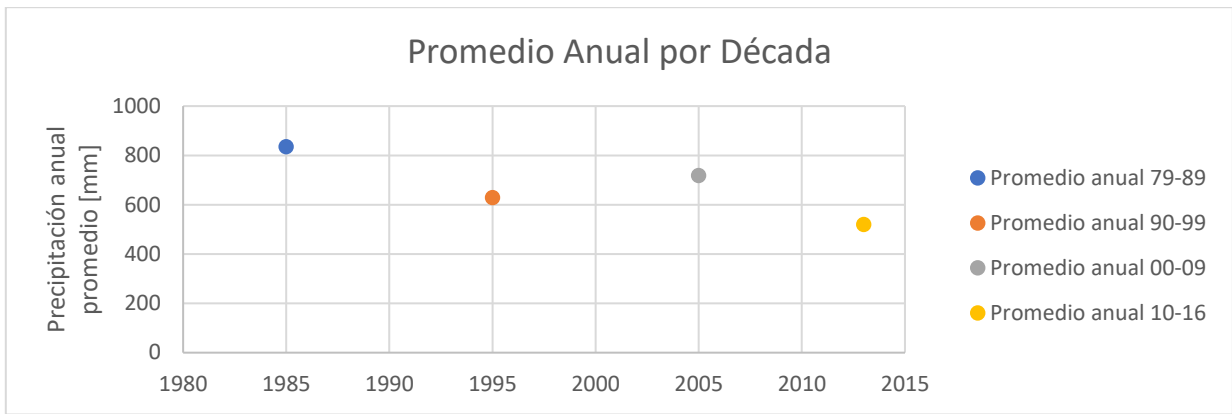


Figura 17 Promedio precipitaciones anuales por décadas para la cuenca de Nilahue (Elaboración Propia)

En los promedios de precipitación anual por década se puede observar una tendencia a la baja. Durante los años 80 se tuvo un promedio cercano a los 850 mm anuales, que disminuye hacia los noventa para aumentar levemente hacia los 2000 y finalmente disminuir considerablemente en los últimos años hacia poco más de 500 mm anuales.

1.5.2 Temperatura

Para este clima del tipo mediterráneo tibio a caliente se tienen inviernos fríos con temperaturas que no suelen bajar de los 0°C de mínima y veranos calientes con temperaturas que no suelen superar los 32° de máxima. Según registros para la estación más cercana (Curicó) con datos del CR2, se presentan temperaturas medias diarias que oscilan entre los 8°C en invierno, 23°C en verano y un promedio anual de 15°C para los últimos 60 años.

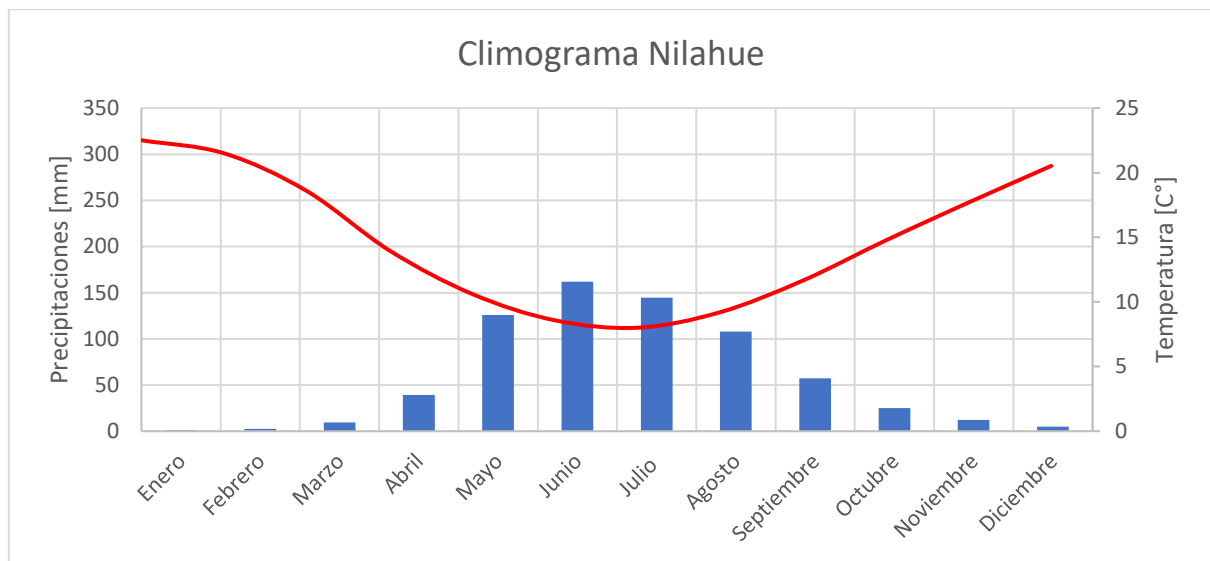


Figura 18 Climograma para Cuenca de Nilahue (Elaboración Propia)

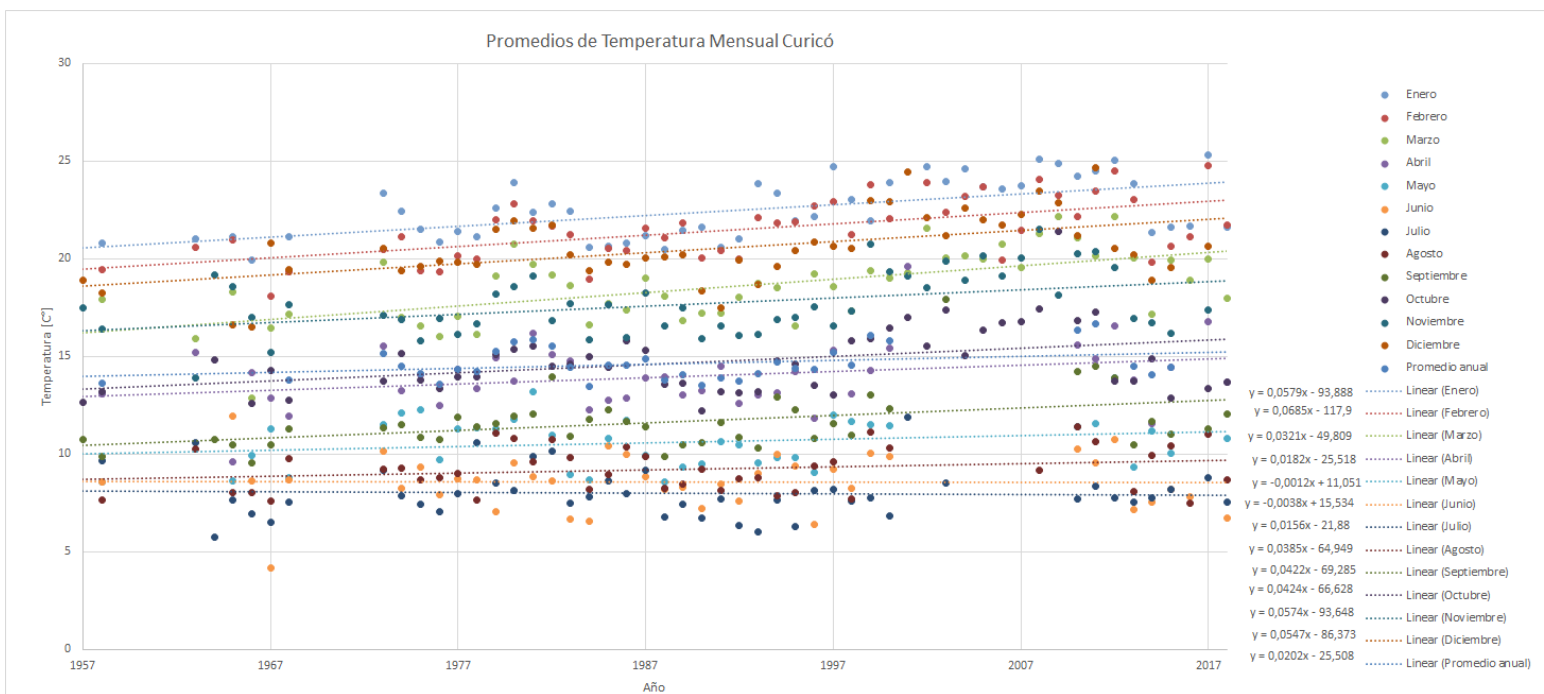


Figura 19 Promedio de temperaturas mensuales históricas estación Curicó. Elaboración propia

La estación de Curicó cuenta con amplio registro de temperaturas diarias desde los años 50. Se han obtenidos los promedios mensuales para cada año disponible y se ha observado una tendencia al alza de las temperaturas. Esta tendencia al alza en las temperaturas se ha concentrado durante los meses

más cálidos, es más, para los meses de junio y julio existe una pequeña tendencia a la disminución de las temperaturas.

Durante la megasequía de 2010-2016 se han registrado temperaturas promedio anuales $0,7^{\circ}\text{C}$ mayores que el periodo 1958-2009, para los meses de verano la diferencia fue de 1°C .

2 Metodología

2.1 Definición espacial, emplazamiento de acuífero de Nilahue

2.1.1 Topografía y basamento

Para llevar a cabo los objetivos presentados anteriormente se es necesario tener establecido con visión más clara los componentes que conforman el sistema hidrológico de la cuenca. La topografía, unidades geológicas y distribución espacial de éstas regirán el funcionamiento del sistema de aguas en la cuenca de Nilahue.

El acuífero detrítico de Nilahue queda albergado en depósitos no consolidados de la cuenca, estos quedan delimitado por el basamento rocoso en su base y lateralmente y superiormente por la superficie de estos depósitos, o sea, la topografía.

La cuenca de Nilahue presenta una topografía compleja con un valle principal rodeado de cuerpos intrusivos con una serie de valles de menor envergadura al este del valle principal. Estos valles poseen un relleno sedimentaria de baja pendiente ($<3^\circ$) en contraste con los cerros rocosos de alta pendiente. Los modelos de elevación digital disponibles para la zona, si bien poseen buena precisión superficial, presentan grandes errores en las magnitudes de las alturas absolutas asociadas a cada punto.

Es por esto que se optó por trabajar con las curvas de nivel cada 25 metros disponibles de manera gratuita para la sección de la región de O´Higgins (CIREN, 2018) en conjunto con información de las redes de drenaje del anexo del levantamiento Hidrogeológico de la DGA (DGA, 2013). Se procedió a realizar una interpolación de estos datos para obtener las superficies con las cuales se trabajó en el presente trabajo.

A partir de la información e imágenes de profundidades de basamento en el Levantamiento Hidrogeológico de la DGA (DGA, 2013) obtenida a partir de sondajes eléctricos verticales y puntos de control por sondajes. Se crearon curvas de isoniveles de basamento a partir de la imagen georreferenciada en SIG, las cuales se interpolaron para obtener un ráster de la cota del basamento que fue utilizada en el presente estudio.

2.1.2 Piezometría

Para determinar las cotas piezométricas en distintos puntos del acuífero se realizó una campaña de terreno del 24 al 26 de octubre de 2018, en donde se realizaron mediciones de niveles estáticos en norias y pozos particulares y de APR (Agua Potable Rural) para 72 puntos a los largo y ancho de la cuenca de Nilahue.

Estos datos de profundidades de niveles estáticos fueron georreferenciados en ArcGIS 10.5 y se obtuvo la cota piezométrica de cada punto para luego realizar una interpolación con las herramientas:

IDW (ponderación de distancia inversa) utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio. (ArcGIS Pro, 2018)

Natural Neighbor halla el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre ellas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor. También se conoce como interpolación de Sibson o de "robo de área". (Sibson, 1981)

Se realizó el mismo procedimiento con los datos tomados en 2013 para el Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras de la región de O´Higgins y Biobio (DGA, 2013) con el fin de generar un contraste entre los años 2013 y 2018.

Al realizar estas interpolaciones se obtuvieron líneas equipotenciales de cotas piezométricas que permitieron identificar mayoritariamente direcciones de flujo de las aguas subterráneas.

2.1.3 Régimen de aportes del acuífero a cursos superficiales

Para poder determinar el régimen de funcionamiento de los principales cursos de agua superficiales se realizaron perfiles en las zonas más representativas de cada valle, haciendo interpolaciones de las cotas piezométricas en conjunto con la superficie y el nivel del basamento.

Se determinó que si en las inmediaciones de los cursos de aguas la cota piezométrica era superior a la cota del curso superficial existía un aporte de aguas subterráneas al estero, y si este nivel de cotas piezométricas se encuentra por debajo de la cota del curso superficial, existe un aporte desde el estero al acuífero.

Para determinar las cotas piezométricas en distintos puntos del acuífero se realizó una campaña de terreno del 24 al 26 de octubre de 2018, en donde se realizaron mediciones de niveles estáticos en norias y pozos particulares y de APR para 72 puntos a lo largo y ancho de la cuenca de Nilahue.

2.2 Cuantificación de recargas y descargas del sistema cuenca.

El sistema hidrológico de la cuenca de Nilahue presenta diferentes procesos de recarga y descarga. Se han detectado diferentes procesos de recarga como

precipitaciones y aportes por interconexión desde cuencas aledañas. Así también se han detectado diferentes métodos de descarga como la evapotranspiración, descarga por cursos superficiales y uso de aguas. Por esto es fue necesario determinar la interacción entre estos procesos y comprender la interacción entre estos.

2.2.1 Recargas

2.2.1.1 Precipitaciones

Para determinar el volumen de entrada para las precipitaciones anuales y mensuales se utilizaron los datos de precipitaciones mensuales en milímetros presentados anteriormente del centro de clima y la resiliencia, CR2.

$$Vol. Ppm[m^3] = Ppm[mm] * \frac{1 [m]}{1000[mm]} * A[m^2]$$

$$Vol. Ppa[m^3] = \sum_{i=enero}^{diciembre} Ppmi$$

Donde:

Vol.Ppm: Volumen de precipitaciones mensuales

Vol.Ppa: Volumen de precipitaciones anuales

Ppm: registro de precipitaciones mensuales

A: Área de la cuenca

2.2.1.2 Interconexión con otras cuencas

A causa del aumento de la agricultura en la cuenca de Nilahue, la empresa Sociedad Convento Viejo S.A. realizó obras de canales de regadío que conectan

las aguas del embalse Convento Viejo con la cuenca de Nilahue en el valle de Lolol.

El embalse convento viejo se ubica en la cuenca del río Tinguiririca con desagüe a través del estero Chimbarongo, a unos 25 kms al este de la cuenca de Nilahue y 13 kms al este de la localidad de Chépica. Los canales que van a Nilahue son abiertos en la época de primavera-verano, desde octubre hasta abril-mayo aproximadamente para apoyar la creciente agricultura local.

Estos canales llegan a través de un túnel de 4 kilómetros inaugurado en 2016 que cruzan hasta el valle de Lolol para luego ramificarse y distribuirse para el sur hasta la localidad de Ranguil y La Puntilla, y para el norte la localidad de Pumanque (Figura 31, página 58).

A partir de datos provistos por la empresa Sociedad Convento Viejo S.A. de caudales para sus canales se determinaron los volúmenes mensuales de aporte de hacia la cuenca de Nilahue.

2.2.2 Descarga

2.2.2.1 Cálculo de desagüe por escorrentía superficial

A partir de la información obtenida de la Dirección General de Aguas de los caudales promedio mensuales para la estación de Nilahue en Santa Teresa y con el promedio mensual extendido a lo largo del mes se calculó el volumen extraído de la cuenca por escorrentía superficial para cada mes y el año a partir de las siguientes fórmulas:

$$V_{esc.M} = \left\{ (C_{pm} \left[\frac{m^3}{s} \right] * 86400 \left[\frac{s}{día} \right] * di \left[\frac{día}{mes} \right]) \right\} \left[\frac{m^3}{mes} \right]$$

$$V_{esc.A} = \left\{ \sum_{i=1}^{12} V_{esc.M} \left[\frac{m^3}{mes} \right] \left[\frac{mes}{año} \right] \right\} \left[\frac{m^3}{año} \right]$$

Donde:

- $V_{esc.A}$ = Volumen de escorrentía superficial desaguado en el periodo anual para cuenca de Nilahue
- C_{pm} = Caudal promedio mensual para la estación de Nilahue en Santa Teresa
- $V_{esc.M}$ = Volumen de escorrentía superficial desaguado en el periodo mensual para cuenca de Nilahue
- d_i = Días según mes correspondiente.

Para poder determinar el desagüe por escorrentía superficial para años tipo (extremadamente Húmedo, Normal y Sequía extrema) se realizó una correlación en Microsoft Excel para obtener una relación entre los volúmenes por precipitaciones anuales y la escorrentía superficial para así obtener los volúmenes de escorrentía para los años tipo con valores de SPI de 2, 0 y -2 respectivamente.

2.2.2.2 Cálculo de coeficientes de escorrentía

Para este cálculo se tomó en cuenta el coeficiente de escorrentía total de la cuenca de Nilahue, considerando las precipitaciones para toda el área de la cuenca de 1390 km² (DGA, 2018) y los promedios de caudales mensuales entregados por la Dirección General de Aguas para el punto de desagüe de la cuenta del estero Nilahue en Santa Teresa.

Se calculó el coeficiente de escorrentía con base en la siguiente fórmula:

$$Coef. Esc = \frac{\left\{ \left(\frac{Paa [mm/año]}{1000 \left[\frac{mm}{m} \right]} \right) [m/año] * \left(1390 [km^2] * 1000000 \left[\frac{m^2}{km^2} \right] \right) [m^2] \right\} \left[\frac{m^3}{año} \right]}{V_{esc.A} \left[\frac{m^3}{año} \right]}$$

Donde:

- Coef.Esc= Coeficiente de escorrentía anual para la cuenca de Nilahue [adimensional]
- Paa= Precipitación anual acumulada para a cuenca de Nilahue según datos de CR2
- $V_{esc.A}$ = Volumen de escorrentía superficial desaguado en el periodo anual para cuenca de Nilahue

Con base en estos resultados, para cada año se hizo una correlación en Microsoft Excel entre el coeficiente de escorrentía y las precipitaciones acumuladas. Así obteniendo una relación directa entre el coeficiente de escorrentía y las precipitaciones. Correspondiendo estos coeficientes para el cálculo de los años tipo de sequía extrema, normal y extremadamente húmedo con valores de SPI de -2, 0 y 2.

2.2.2.3 Determinación de usos de Aguas

Para determinar la cantidad de usos de aguas se consideraron 2 valores para contrastarlos entre si. El primero consta en considerar una fracción de los derechos tanto de aguas superficiales como de subterráneas otorgadas por la DGA para la cuenca de Nilahue, sumados a una estimación de extracciones de uso doméstico calculado a partir de la población local.

El segundo se calculó a partir del valor de la huella hídrica azul de la agricultura de la región de O´Higgins dada por el Reporte Huella Hídrica Chile, realizado por la fundación Chile. (Fundación Chile, 2016)

La huella hídrica azul se define como el volumen de agua subterránea y superficial consumida como resultado de la producción de un bien o servicio. El consumo se refiere al volumen de agua dulce usada, evaporada o incorporada al producto. También se refiere a aguas subterráneas o superficiales captadas que no vuelve a donde fue obtenida inicialmente. (Hoekstra, Chapagain, & Aldaya, 2011)

El valor de la huella hídrica azul de la agricultura para la región de O´Higgins se ponderó por el porcentaje de la agricultura de la región de O´Higgins que corresponde a la cuenca de Nilahue. Este porcentaje se calculó con el porcentaje del área de uso de suelo de agricultura para la región de O´Higgins partido por el total del área de uso de suelos para la región de O´Higgins.

Para esto también se consideró el porcentaje del uso de suelo de agricultura con cobertura vegetal asumiendo que los suelos agrícolas de la cuenca de Nilahue no se ocupan de igual manera que el resto de la región por estar limitados al acceso a aguas provenientes de la cordillera principal. Esto se calculó mediante NDVI en imágenes Landsat-8 para el periodo de verano, cuando la agricultura local se encuentra en su máximo.

El NDVI (Rouse, Haas, Schell, Deering, & Harían, 1974) es el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental es su sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. (Sánchez et al., 2000)

Respecto a otros índices de vegetación más complejos, el NDVI tiene las ventajas de tener una gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación. El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como, la evolución de su estado a lo largo del tiempo. La interpretación del índice debe, asimismo, considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anual, para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación con los cambios en la distribución temporal y espacial, causados por otros factores como (Gonzalga, 2014):

- El agua tiene reflectancia mayor en el infrarrojo que en el rojo, por lo tanto, valores negativos de NDVI.

- El suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos, aunque no muy elevados.
- La vegetación densa, sana y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.
- Las nubes presentan valores similares en el R e IRC, por lo que su NDVI es cercano a 0.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano (Banda 5 en Landsat8)

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo. (Banda 4 en Landsat8)

Calibrando en software ENVI 5.3, se tomaron valores de NDVI>0,6 para determinar áreas con vegetación y mediante ArcGIS 10.5 se interceptaron con áreas de uso agrícola para contrastar la cuenca de Nilahue con áreas en la depresión central de la sexta región de O´Higgins.

Con base en esto, la huella hídrica azul para la agricultura de la cuenca de Nilahue se calculó de la siguiente manera:

$$HHn = HHo * \frac{AVn}{AVro}$$

Donde:

- HHn= Huella Hídrica Azul para agricultura en la cuenca de Nilahue. [m³]
- HHo= Huella Hídrica Azul para agricultura en la región de O´Higgins. [m³]
- AVn= Área con vegetación de suelo agrícola de la cuenca de Nilahue. [km²]

- AVro= Área con vegetación de suelo agrícola de la región de O´Higgins.
[km²]

2.2.2.4 Evapotranspiración

2.2.2.4.1 Potencial de evapotranspiración (ETP)

A partir de los datos históricos de evapotranspiración para en la cuenca de Nilahue disponibles en CR2 (DGF, 2018). Los datos disponibles fueron calculados con base en la fórmula propuesta por Hargreaves y Samani (1985), el cual está basado en la temperatura superficial (Alvarez-Garreton et al., 2018). Este cálculo hizo para las cuencas de Chile en formato grillado (1x1 km), el que fue posteriormente generalizado para la cuenca de Nilahue.

A partir de estos datos se obtuvo el promedio de los valores mensuales desde el año 1986. Asignando un valor de potencial de evapotranspiración mensual en milímetros para cada mes del año.

2.2.2.4.2 Evapotranspiración real (ETR)

A partir del potencial de evapotranspiración y el registro de las precipitaciones mensuales para el periodo 1986-2016. Se obtuvo la reserva para cada mes considerando un máximo de reserva en suelo obtenido de estudio previo en cuenca de similares características.

Para los meses donde el potencial de evapotranspiración fuese mayor a las precipitaciones se consideraría que toda el agua precipitada durante el mes iba a ser evaporada. Para los meses en donde las precipitaciones superaran al potencial de evapotranspiración, el excedente iba a la reserva almacenada en suelo por humedad con un máximo determinado.

Esta humedad almacenada sería luego sumada en los meses siguientes cuando el potencial de evapotranspiración sea mayor a las precipitaciones llegando hasta el máximo del potencial y agotando el recurso del suelo.

Con esto se calculó la ETR a partir directamente de las precipitaciones y el ETP como:

$$ETR = \sum_{\text{Enero}}^{\text{Diciembre}} ETRm$$

$$ETRm = \begin{cases} \text{si } ETP < pp ; = ETP. \\ \text{si } ETP > pp ; = ETP + Var. Res \end{cases}$$

Donde:

- ETR: Evapotranspiración real anual
- ETRm: Evapotranspiración mensual
- ETP: Potencial de evapotranspiración mensual
- pp: Precipitación total mensual
- Var.Res: Variación negativa de la reserva de humedad en suelo (milímetros de agua evaporados de la reserva)

2.2.3 Balances anuales

Año a año las condiciones que modelan el ciclo hidrológico de la cuenca de Nilahue van cambiando, para poder entender el funcionamiento del acuífero de Nilahue y los sistemas que lo rodean es de suma importancia analizar cómo responde éste a cambios de las condiciones, por esto se deben integrar los resultados y analizarlos como un todo.

Para poder comprender el funcionamiento de los distintos procesos es clave abordarlos desde una escala temporal adecuada para cada uno. Si se busca entender el comportamiento a largo plazo, variaciones de condiciones

climáticas y variación interanual de distintos mecanismos de debe observar a una escala anual o incluso a nivel de décadas. Si se busca comprender la respuesta de sistema a eventos particulares o variación intra anuales, se debe escoger una escala temporal menor.

Para esto se realizaron balances hidrológicos para la cuenca de Nilahue a partir de los cálculos mensuales de los distintos parámetros hidroclimáticos.

2.3 Cuantificación de recarga difusa del acuífero de Nilahue.

Para determinar las recargas difusas del acuífero de Nilahue se consideró la infiltración profunda, más allá de la capacidad de retención de agua del suelo distribuida homogéneamente en la zona de estudio (subcuenca hasta el aforo de Santa Teresa).

La infiltración profunda corresponde a la proporción de agua en milímetros que es infiltrada más allá de la humedad del suelo y es capaz de llegar al acuífero. Esto ocurre una vez que el suelo se encuentra en su capacidad máxima de retención de agua y sigue recibiendo aportes.

A una escala mensual y a partir de las precipitaciones mensuales obtenidas, el cálculo de la evapotranspiración real y de las reservas mensuales del suelo previamente calculadas para la cuenca de Nilahue, se determinó que proporción que va directamente a una infiltración profunda.

$$Si \quad \begin{array}{l} res < r.max \\ Pp > max.-res. \end{array} \quad Inf.Prof = (max.-res.-ETP)$$

$$Si \quad \begin{array}{l} res = r.max \\ Pp > ETP \end{array} \quad Inf.Prof = Pp - ETP$$

Donde:

Inf.Prof: infiltración profunda mensual [mm]

Pp: Precipitaciones mensuales [mm]

ETP: Potencial de evapotranspiración mensual [mm]

res: Reserva de agua en suelo al principio del mes [mm]

r.max: capacidad máxima de las reservas en suelo [mm]

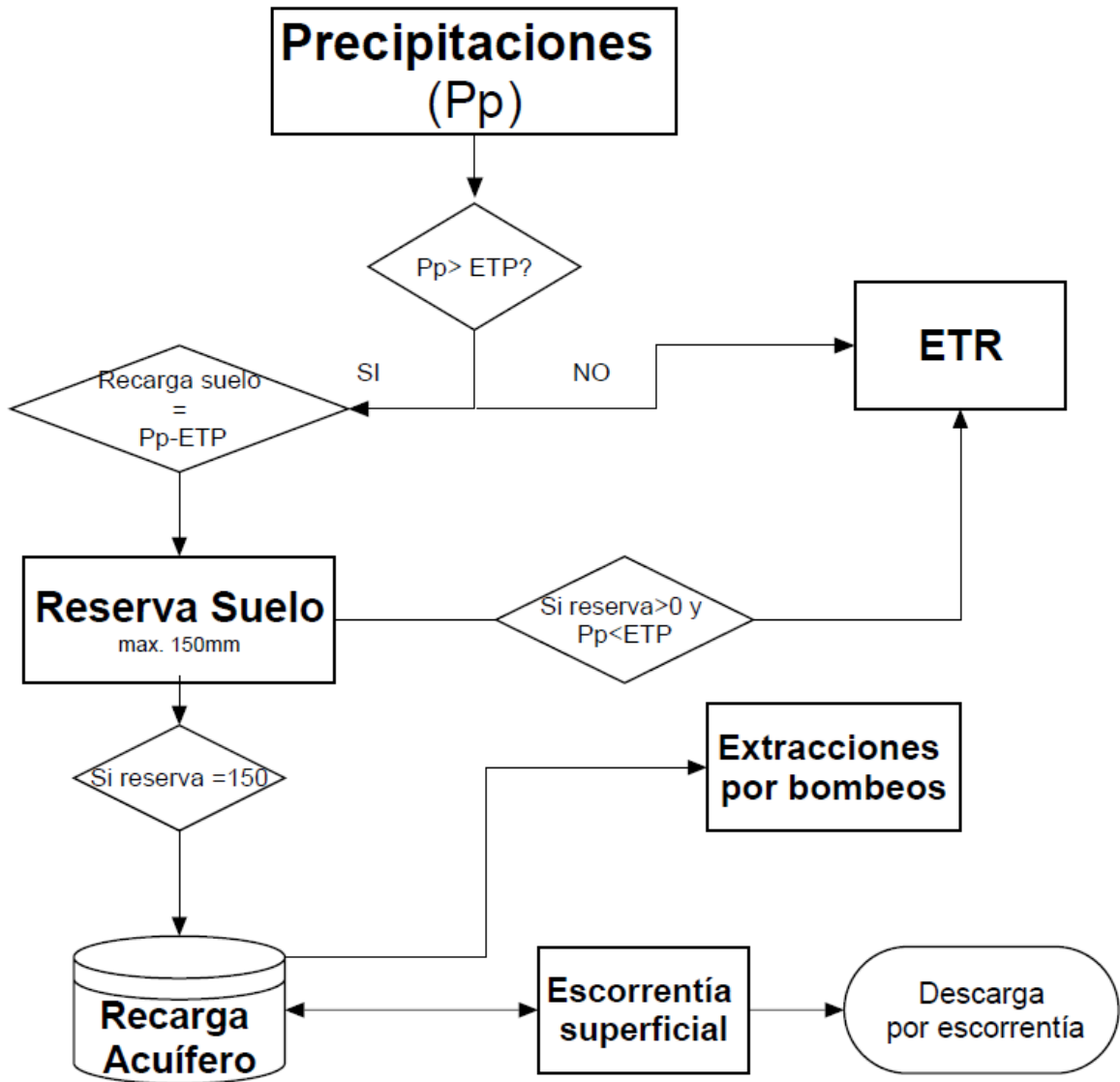


Figura 20 Diagrama resumen de flujo de aguas y cuantificaciones reconocidas en Zona de estudio. Elaboración Propia

3 Resultados y Discusiones

3.1 Definición espacial, emplazamiento del acuífero de Nilahue

3.1.1 Topografía

Las curvas de nivel para la cuenca de Nilahue se encontraban disponibles en curvas cada 25 metros directamente desde la página de la CIREN. Sin embargo, solo se encontraban disponibles las de la sexta región, por lo que se optó por trabajar sólo esta sección de la cuenca ya que esta es la mayor parte de la cuenca y en donde se encuentran todos cultivos importantes y asentamiento de personas. A continuación, se presentan las elevaciones resultantes del procesamiento de las curvas de nivel que fueron utilizados en el presente trabajo.

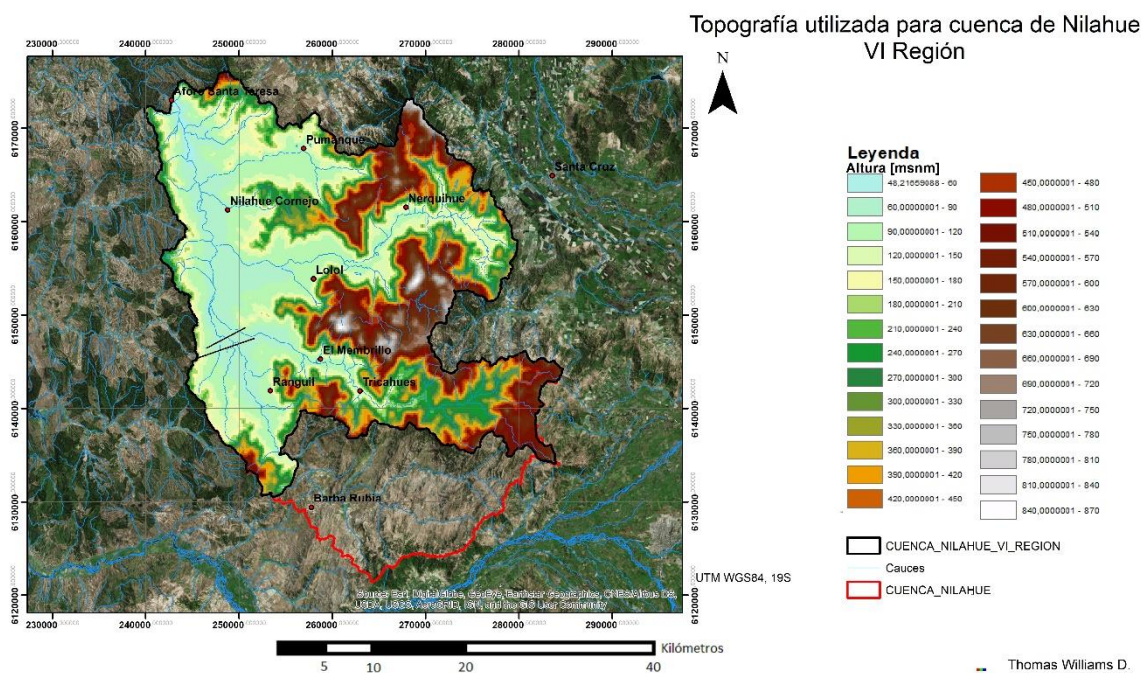


Figura 21 Mapa de topografía para la cuenca de Nilahue en la sexta región de O'Higgins. (Elaboración Propia)

3.1.2 Basamento

A continuación, se presentan niveles de basamento obtenidos a partir de información del levantamiento hidrogeológico del 2013 (DGA, 2013).

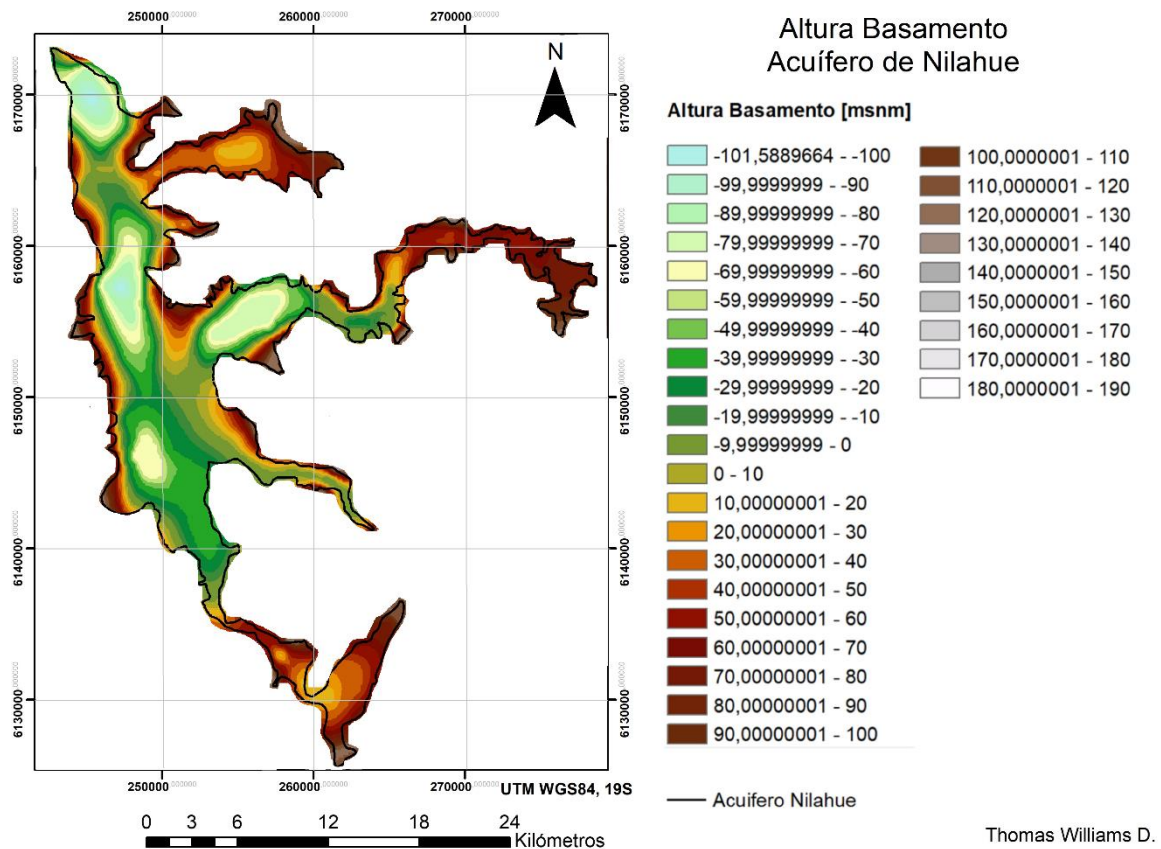
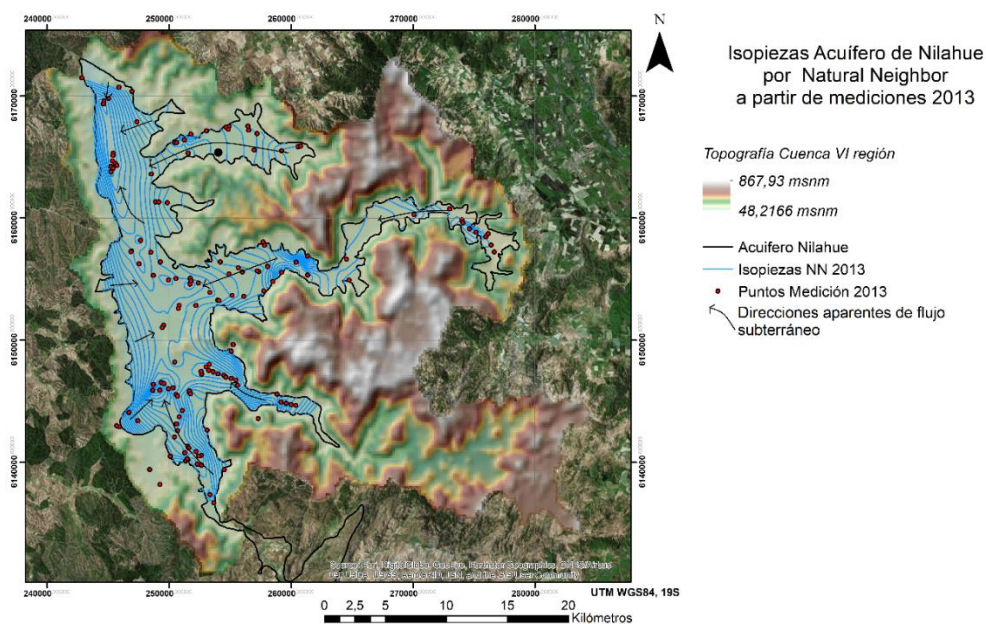


Figura 22 Cota de basamento en acuífero de Nilahue. (Elaboración Propia)

3.1.3 Piezometría

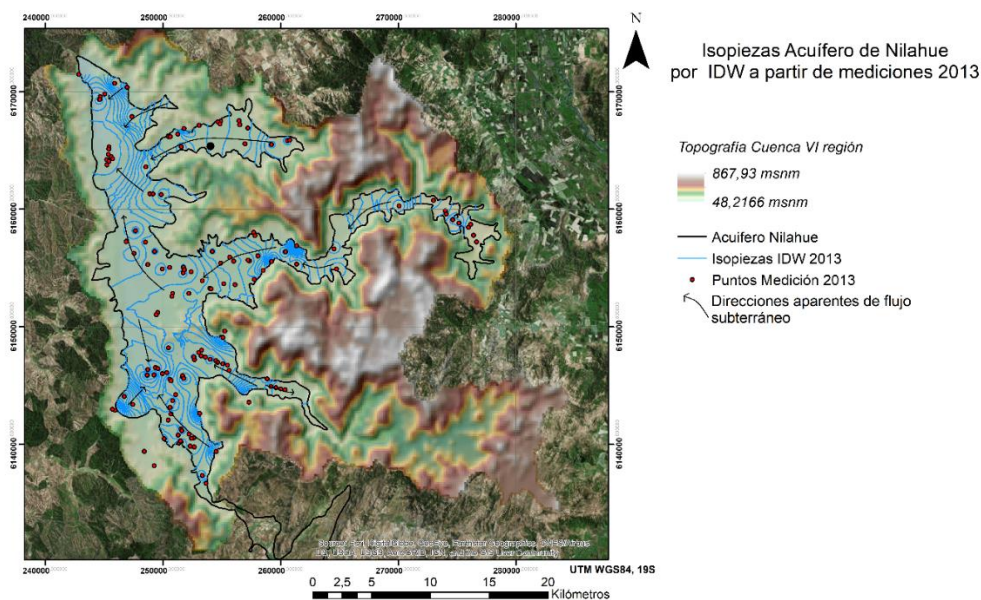
A continuación, se presentarán los resultados de las interpolaciones de las cotas piezométricas para los años 2013 y 2018. Obtenidas a partir de las metodologías presentadas anteriormente con sus respectivas direcciones aparentes de flujo subterráneo.

3.1.3.1 Isopiezas 2013:



Thomas Williams D.

Figura 23 Isopiezas calculadas a partir de Natural Neighbor con mediciones de niveles estáticos en 2013. (Elaboración Propia)



Thomas Williams D.

Ilustración 1 Isopiezas calculadas a partir de IDW con mediciones de Niveles estáticos en 2013. (Elaboración Propia)

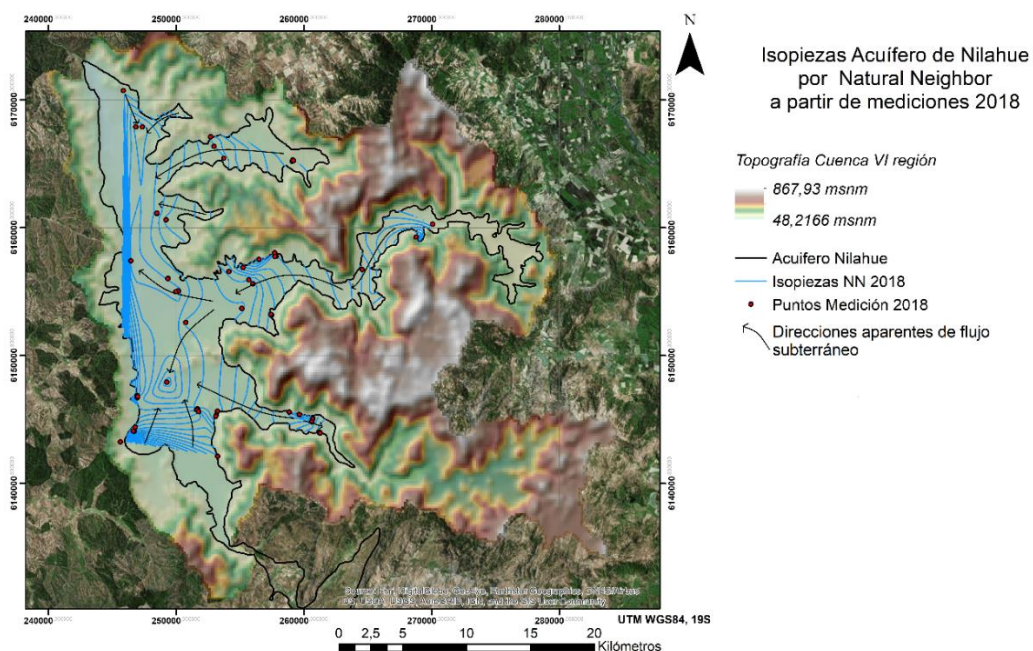
La metodología de IDW a pesar de presentar líneas más detalladas, no presenta una homogeneidad en las isopiezas que sí presenta Natural Neighbor.

Para ambas interpolaciones se observan flujos subterráneos preferentes que indicarían una predominancia de los flujos desde los valles interiores hasta el valle principal, en donde existen 2 zonas que tienden a concentrar las aguas una en la parte norte del acuífero y una en la centro-sur. La primera zona sería al noroeste de la localidad de Ranguil y la segunda al noroeste de la localidad de Nilahue Cornejo.

Estas zonas de concentración de aguas o conos de depresión indicarían una mayor extracción de aguas del acuífero, ya sea por procesos naturales o antrópicos.

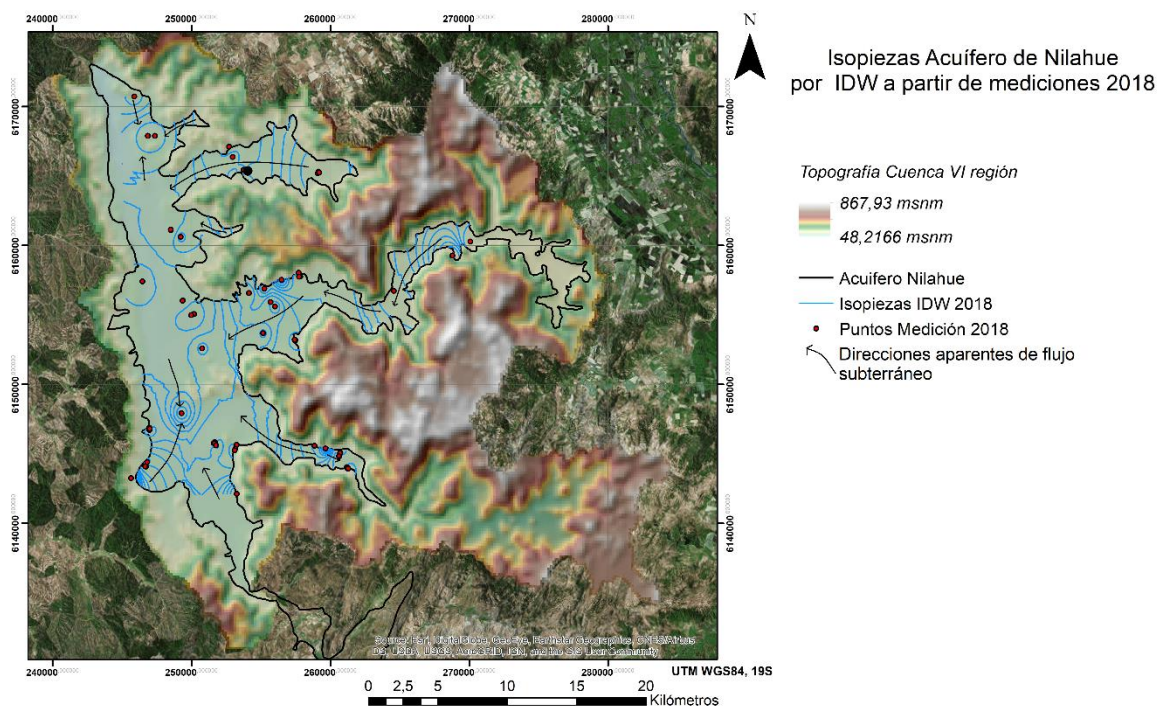
Cabe destacar que los datos del Informe del levantamiento hidrogeológico (DGA, 2013), no especifican la fecha de medición de éstos, ni si estos fueron medidos en una fecha acotada. Estas podrían verse afectadas por la variación anual de los niveles estáticos.

3.1.3.2 Isopiezas 2018:



Thomas Williams D.

Figura 24 Isopiezas calculadas a partir de Natural Neighbor con mediciones de Niveles estáticos en 2018. (Elaboración Propia)



Thomas Williams D.

Figura 25 Isopiezas calculadas a partir de IDW con mediciones de Niveles estáticos en 2018. (Elaboración Propia)

A partir de los niveles estáticos medidos en norias y pozos junto con la elevación superficial de las curvas de nivel, se pudo obtener las interpolaciones para niveles a octubre de 2018.

De ambas interpolaciones se pueden destacar importantes direcciones preferentes de flujo. Al igual que para las mediciones de 2013 se pueden apreciar flujos que van desde los valles de Pumanque, Lolol, Tricahues y Barba Negra hacia el valle principal y más amplio de la cuenca. Es aquí donde las aguas se dividen y se notan 2 conos de depresión en la zona sur y norte del valle principal.

Adicionalmente en el sector de los tricahues se puede apreciar en 3 de las interpolaciones realizadas, flujos que van hacia el oeste, en contra de la pendiente natural del relleno sedimentario. Esto podría deberse a factores antrópicos a analizar posteriormente.

3.1.4 Perfiles

A partir de la información presentada en el levantamiento hidrogeológico de la DGA a partir de sondajes y SEV. Se crearon perfiles representativos de varias zonas del acuífero, en donde se unifican los datos obtenidos de niveles estáticos medidos a octubre de 2018, topografía, nivel de basamento junto con una representación de la estimación de la granulometría en distintos sectores del acuífero detrítico.

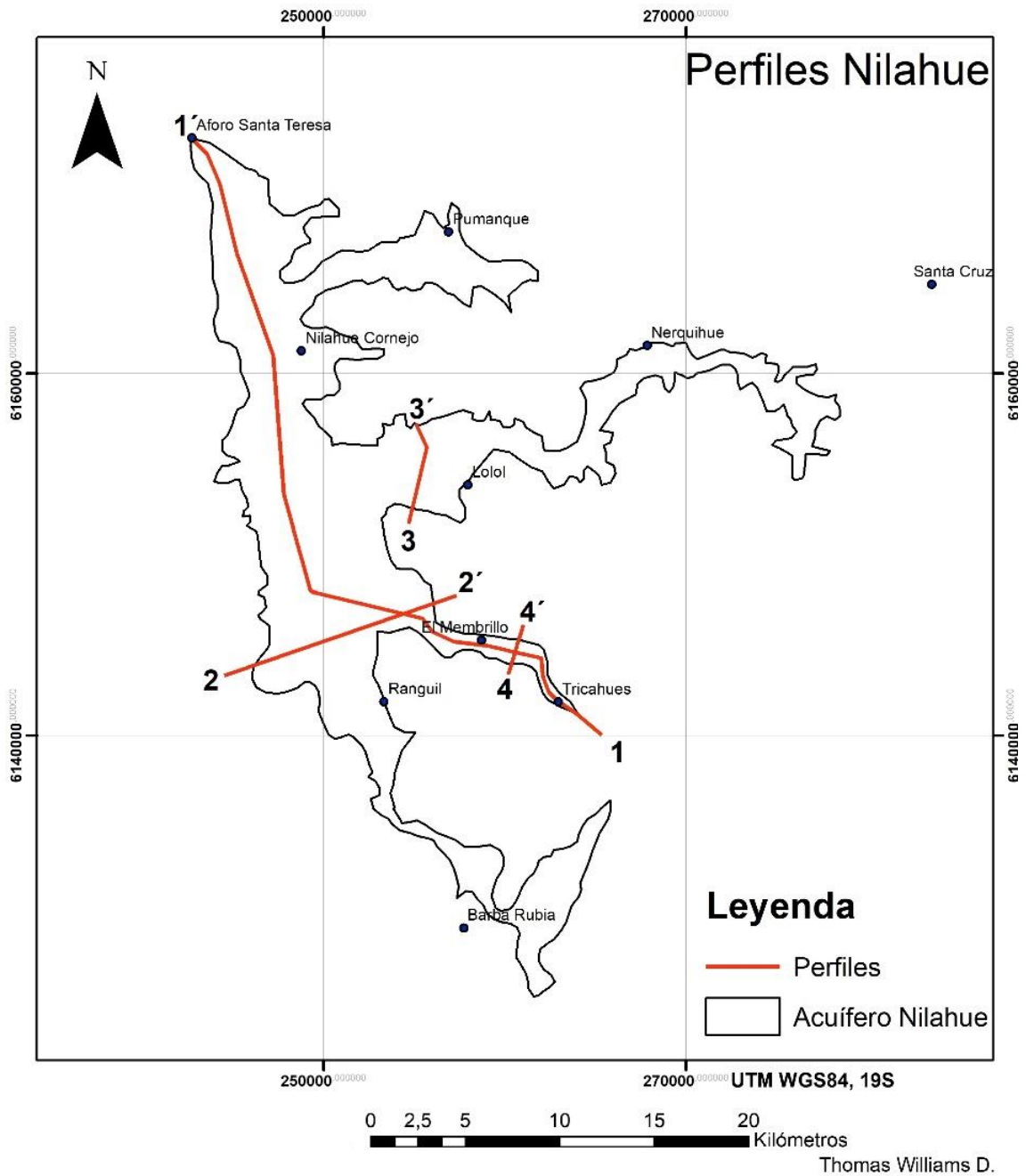


Figura 26 Trazas de perfiles seleccionados en acuífero de Nilahue (Elaboración propia)

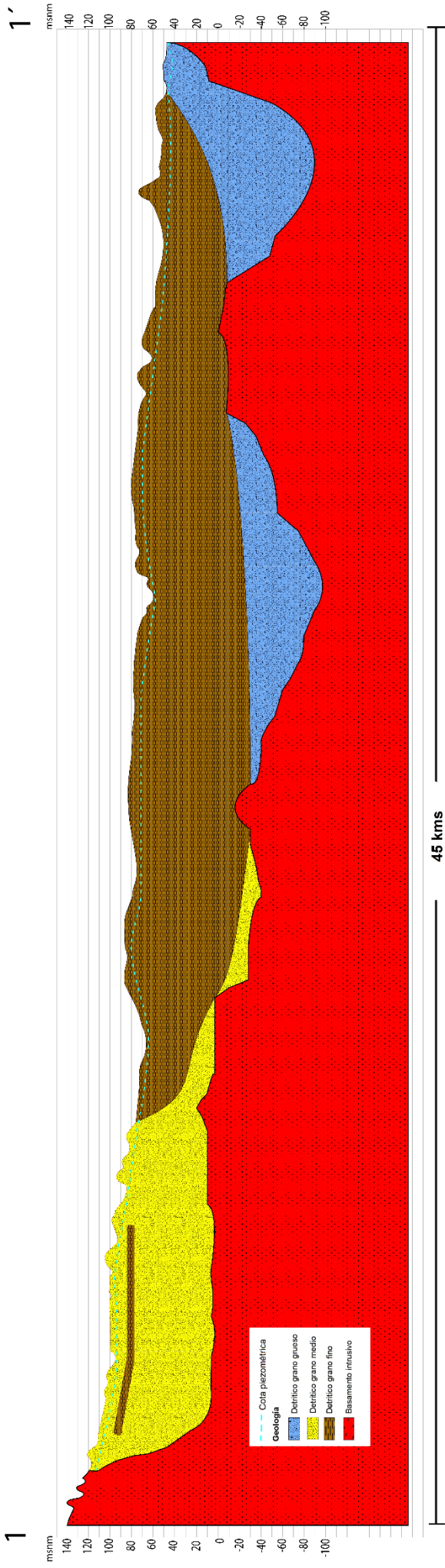


Figura 28 Perfil 1. Elaboración propia

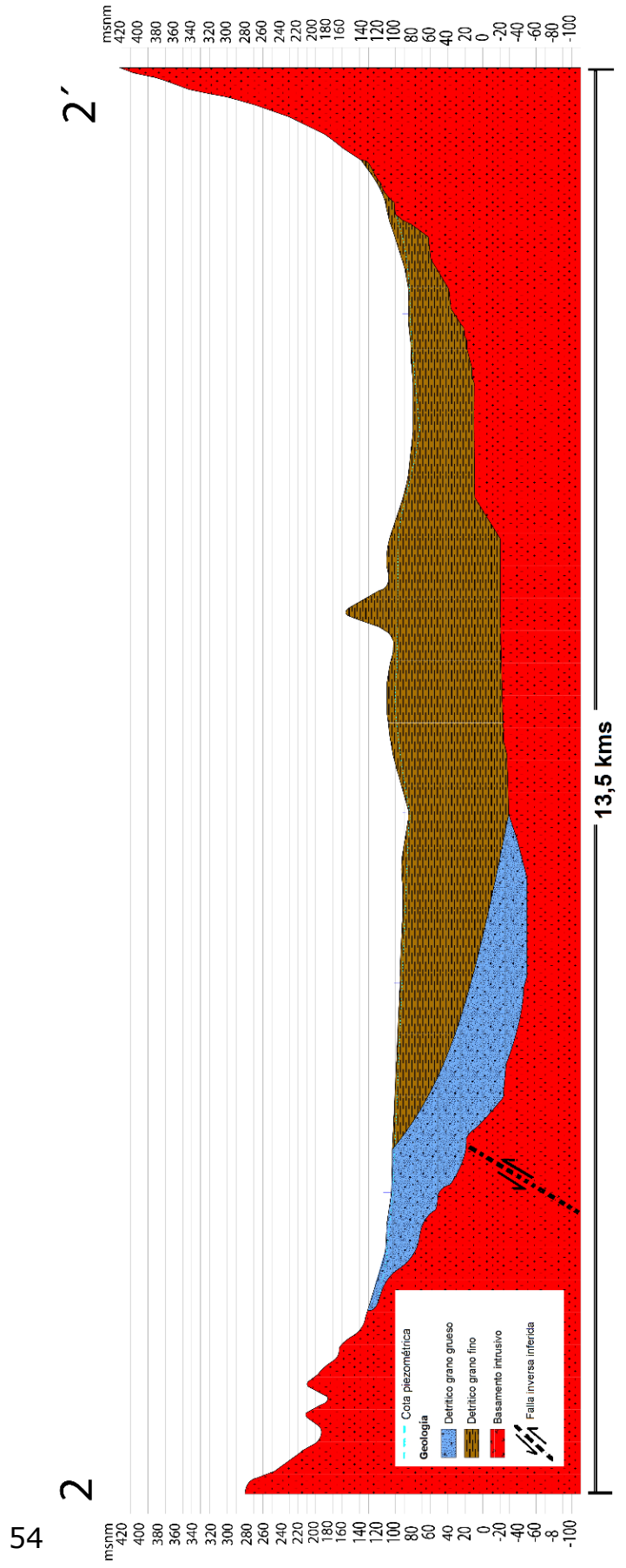


Figura 27 Perfil 2 (Elaboración propia)

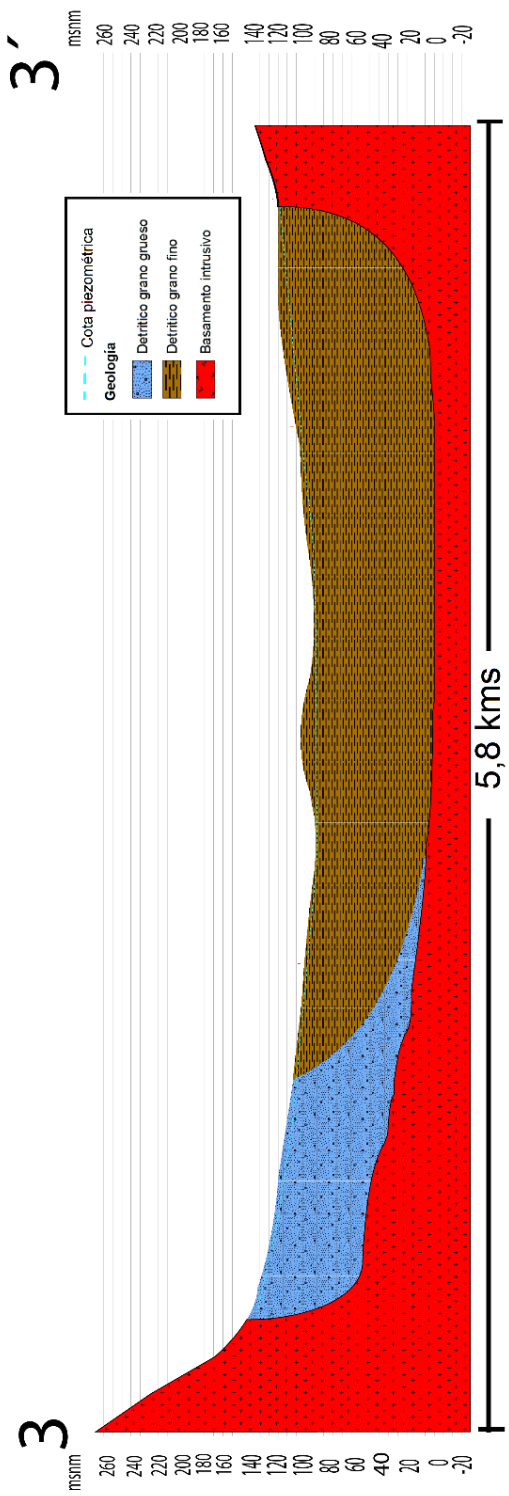


Figura 34 3 (Elaboración Propia)

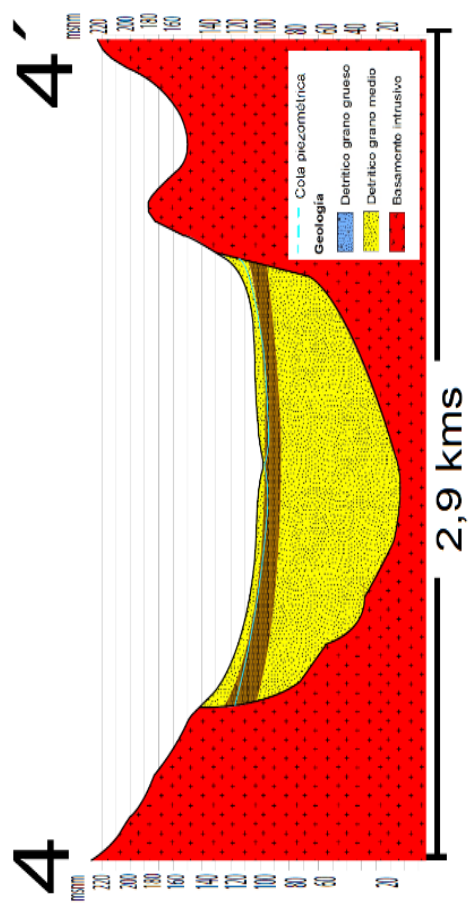


Figura 29 Perfil 4 (Elaboración propia)

3.2 Cuantificación de recargas y descargas del sistema cuenca.

El acuífero de Nilahue presenta diferentes métodos recarga y descarga dentro de los cuales se han identificado para la zona los siguientes:

Recargas,

1. **infiltraciones difusas por precipitaciones** que se concentran durante el periodo invernal.
2. **Infiltraciones a partir del escurrimiento de la red de drenaje**, que alcanzan su mayor nivel durante la época invernal dado que no existen influencias por deshielos.
3. **Interconexión con otras cuencas**. Existen una serie de canales con aguas provenientes del embalse Convento Viejo que aporta una importante cantidad de agua entre los meses de octubre y marzo para la agricultura local. Este es traído a través de túneles de 4 metros de diámetro que cruzan los cerros que dividen la cuenca de Nilahue con la depresión central. El agua es inyectada desde el interior del valle de Lolol, distribuyéndose por una gran red de canales que cuentan con revestimiento de hormigón en algunos sectores.

Descargas,

1. **Extracciones a partir de norias y pozos** construidos para satisfacer demandas de agua potable, riego y aguas de uso industrial.
2. **Aportes hacia cursos superficiales** como ríos y esteros.
3. **Evapotranspiración**. Ocurre en lugares donde la cota piezométrica se encuentra cerca de la superficie y en sectores donde exista vegetación de especies freatófitas que alcancen a captar aguas del acuífero. (Hauser Yung, 1990)

De las anteriores se han considerado las siguiente para términos de la cuantificación y balances.

3.2.1 Recargas

3.2.1.1 Precipitaciones

A partir de los datos de precipitaciones del CR2 se han obtenido las sumas de precipitaciones mensuales para el periodo 1986-2016(Anexo7.2 y Figura 33) , y de las cuales se obtuvieron también las precipitaciones anuales (Tabla 2).

3.2.1.2 Interconexión artificial con cuenca aledaña

3.2.1.2.1 Resultados

A partir de los datos provistos por la sociedad convento viejo se han medido caudales en el ingreso de la cuenca de Nilahue por el túnel de 1,2 m³/s al 10 de octubre de 2018. De mantenerse estos caudales por los meses donde hay agricultura presente (octubre-marzo) se obtiene un volumen anual aproximado de **16.000.000 m³/año**, sin embargo, los caudales corresponden a la época de inicio del periodo de agricultura, se cree que los caudales durante los meses de dic-feb son mayores ya que es el periodo de mayor necesidad de recursos hídricos, pudiendo superar los **20.000.000 m³/año**.

3.2.1.2.2 Discusiones

Durante el terreno efectuado en la cuenca de Nilahue se logró identificar canales de interconexión a través de túneles desde el sector de Santa Cruz hasta el sector de Lolol. Los canales presentes, parcialmente cubiertos de hormigón son propiedad de empresa Convento Viejo, dueños del embalse del mismo nombre que provee a las aguas de los canales en la cuenca de Nilahue desde la cuenca del río Tinguiririca.



Figura 30 Canal de interconexión de sociedad Convento Viejo. Octubre 2018. Captura propia

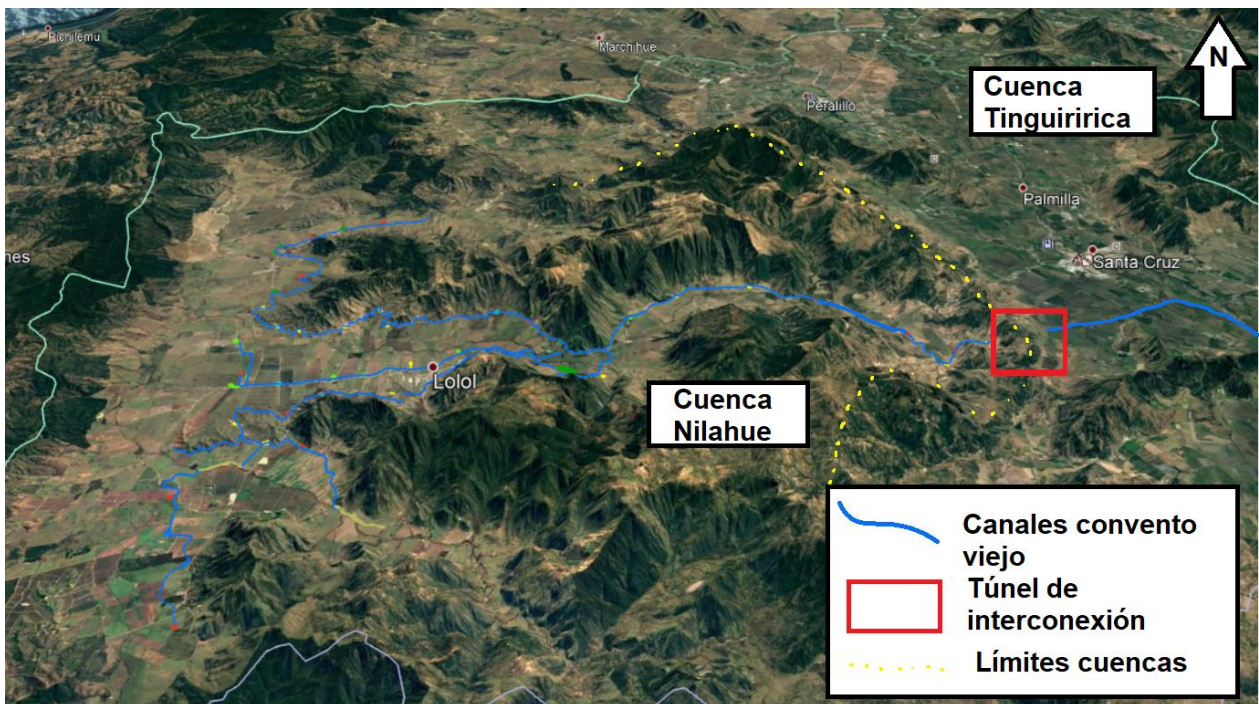


Figura 31 Ubicación de canales de interconexión Convento Viejo. Elaboración propia con base en datos entregados por Sociedad Convento Viejo

Los canales fueron inaugurados en el año 2016 con la finalidad de suplir la demanda hídrica de los agricultores locales en la cuenca de Nilahue entre los meses de octubre y marzo. Al ser canales privados las aguas de este canal son vendidas a los locales con contratos.

En entrevistas con pequeños agricultores en la zona se ha logrado identificar un aumento en las cotas piezométricas en las zonas cercanas a los canales donde aseguran que durante el funcionamiento de estos canales sus norias subieron su nivel de aguas en aproximadamente 3 metros. Esto quiere decir que los canales, pese a tener un recubrimiento de hormigón presentan pérdidas por infiltración, recargando el acuífero de Nilahue durante los meses de funcionamiento.

Al hacer un análisis histórico de los caudales base en el estero de Nilahue durante los meses de verano (diciembre-marzo), se aprecia que históricamente (1986-2018) estos nunca superaron los **0,5 m³/s** con promedios en torno a los **~0,11 m³/s**. Por otro lado, posteriormente a la inauguración de los canales en 2016 se han registrado caudales base de hasta **3,9 m³/s** con promedios de **~2,7 m³/s**, un incremento de un **2400%**.

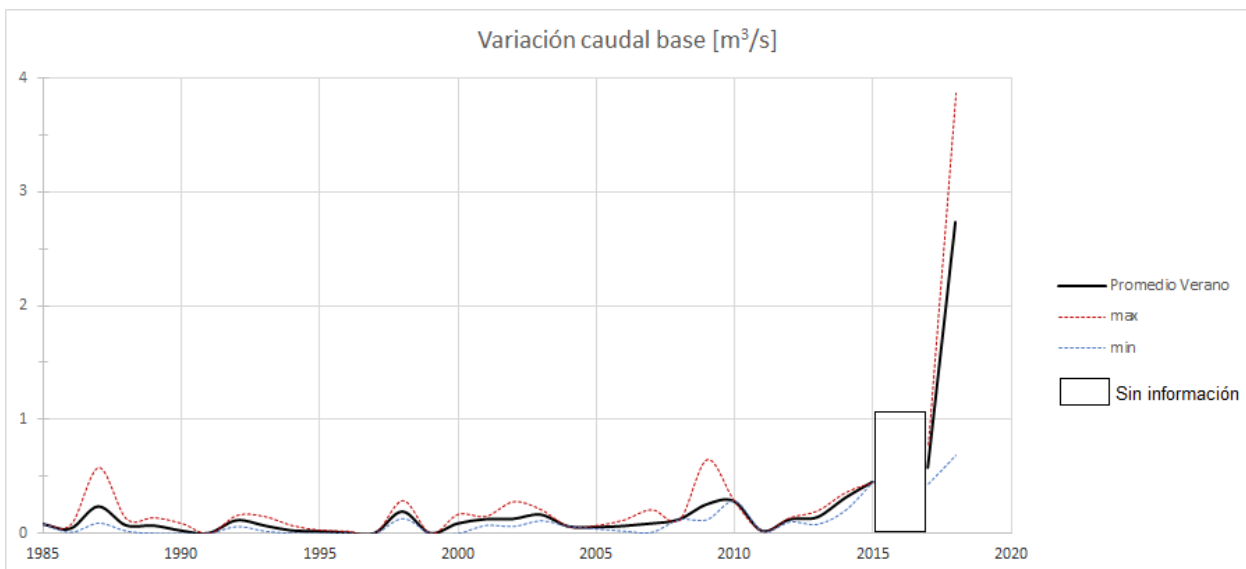


Figura 32 Caudales base, acuífero de Nilahue durante los meses de verano (dic-mar). Elaboración Propia

A partir de los cálculos realizados anteriormente que relacionan recargas con caudales, se tendrían recargas a causa del canal de aproximadamente **1,84 m³/s** durante los meses de funcionamiento del canal, equivalentes a **~24.000.000 m³/año**.

El valor estimado para la entrada en el túnel anteriormente se estimó fuese **>20.000.000 m³/año**, esta cifra sugiere que los caudales promedio durante el verano de entrada a la cuenca son bastante superiores a los calculados para el mes de octubre, ya que gran parte de estos son utilizados para riego y finalmente son evaporados.

3.2.2 Descargas

3.2.2.1 *Esorrentía superficial*

3.2.2.1.1 Resultados

Se procedió a calcular el volumen total mensual del desagüe de la cuenca a partir de los promedios de esorrentía mensuales según la fórmula expresada en metodología. Estos fueron sumados en años y se expresan a continuación en contraste con las entradas a la cuenca por precipitaciones, ambos en términos de m³/año.

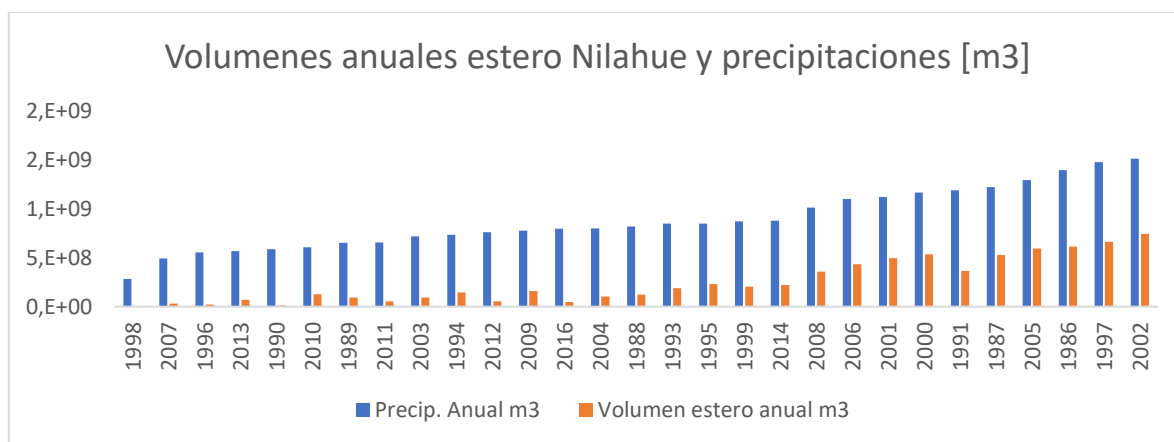


Figura 33 Volúmenes de entradas por precipitaciones junto a su respectiva salida por esorrentía superficial en cuenca de Nilahue. (Elaboración Propia)

Se logra apreciar que existe una estrecha relación entre las esorrentías anuales y el total de precipitaciones anuales. Aquellos años en donde las precipitaciones acumuladas son inferiores a 600.000.000m³ para la cuenca, existe un caudal mínimo muy inferior al resto de los años.

Para esto se realizó una relación entre el volumen de precipitación anual y salidas por escorrentía superficial al año. A continuación, se muestra una curva lineal que relaciona de buena manera estos dos valores en donde se aprecia que las precipitaciones son en promedio un 30% más grandes que las salidas por escorrentía superficial y que para precipitaciones bajo los 400 milímetros anuales prácticamente deja de haber escorrentía superficial por el año.

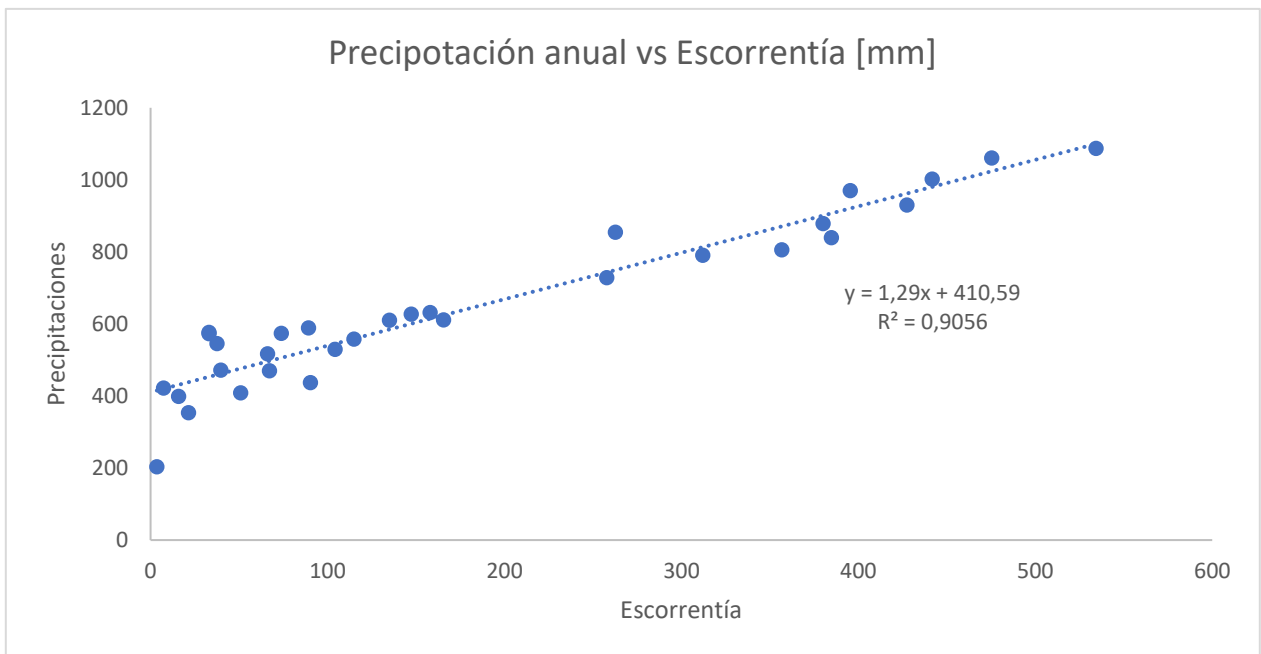


Figura 34 Relación lineal entre volumen de desagüe por escorrentía superficial anual y volumen por aporte de precipitaciones anuales para cuenca de Nilahue. (Elaboración Propia)

3.2.2.1.1.1 Coeficientes de escorrentía

Los coeficientes de escorrentía se definieron según la metodología presentada previamente, en donde se obtuvo una relación lineal con un R2 de 0,8431. Si bien no se logra obtener una curva con datos tan cercanos a esta se puede establecer una relación relativa, a medida que aumentan las precipitaciones va aumentando el coeficiente de escorrentía, nunca superando el 50%. Se puede establecer también que bajo los ~350mm de precipitaciones anuales el coeficiente de escorrentía es prácticamente nulo.

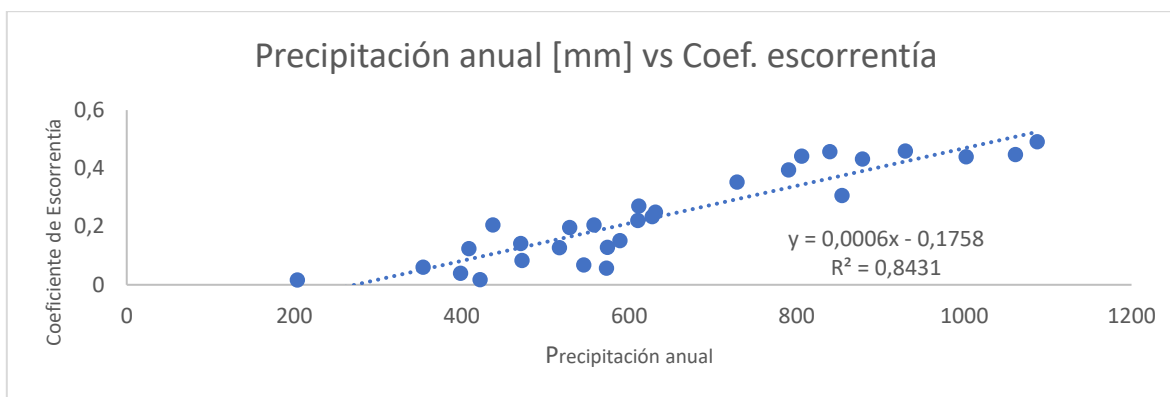


Figura 35 Relación lineal precipitación anual y coeficiente de escorrentía para cuenca de Nilahue. (Elaboración Propia)

3.2.2.1.2 Discusión

3.2.2.1.2.1 Relación río-acuífero

A partir de las curvas de isopiezas generadas con las mediciones de cotas piezométricas y la topografía con los cauces de escorrentía superficial, se ha observado cierta interacción entre el acuífero y los cursos superficiales. En algunos perfiles y sectores se ha observado que las cotas piezométricas están a un nivel más elevado en las inmediaciones de cursos superficiales, indicando un aporte del acuífero a cursos superficiales tal como se muestra en la Figura 53.

En otros sectores las cotas piezométricas se observaron por debajo del nivel de los cursos superficiales (se desconoce el estatus del curso superficial durante la medición) indicando una zona de pérdida desde flujos superficiales hacia el acuífero (de haber un flujo en esa época).

En el Levantamiento de cuencas pluviales costeras del 2013 se realizaron mediciones en el estero de Nilahue a distintas alturas para los meses de septiembre y octubre donde pudieron determinar zonas de interacción estero-acuífero según ganancia o pérdida de caudal.

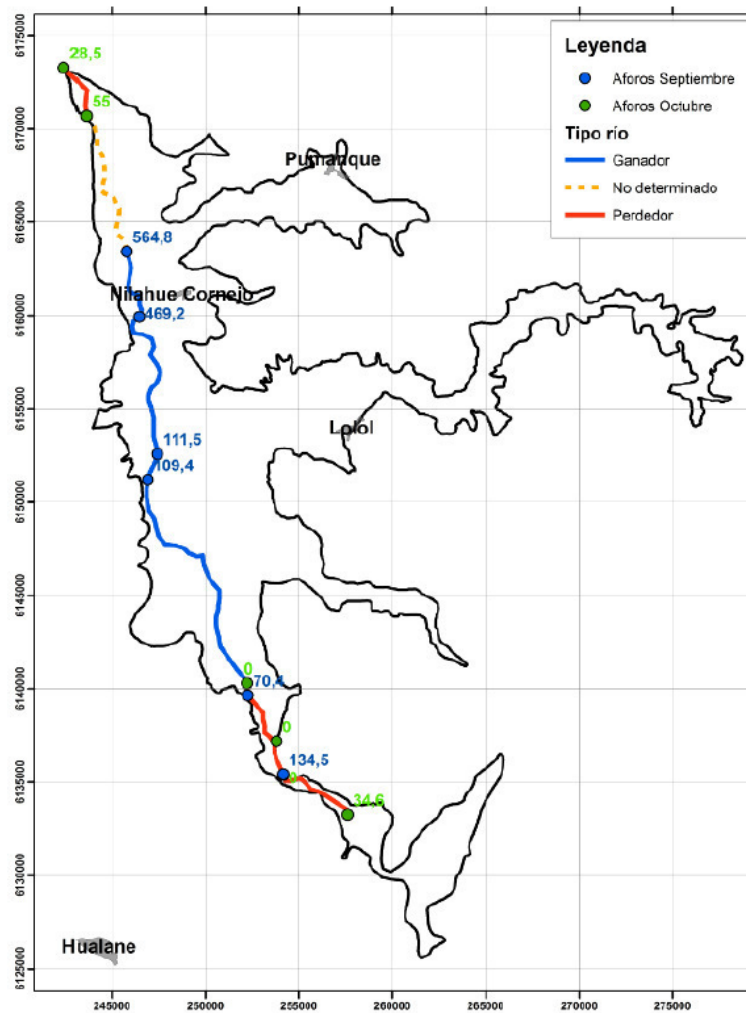


Figura 36 Relación estero de Nilahue-Acuifero (DGA, 2013)

Como se puede ver en la Figura 36, en el estudio mencionado se identificó la existencia de aportes a cursos superficiales en el sector central del acuífero y zonas de pérdida en el extremo sur y norte. Sin embargo, las mediciones en aforos para determinar esta relación se hicieron en distintas épocas del año (septiembre y octubre), por lo que no son comparables entre sí, el régimen de aportes o pérdidas se puede determinar sólo para algunas partes del acuífero y ciertas épocas del año.

Las cotas piezométricas varían a lo largo del año y según las condiciones climáticas del año en particular, al ser estas las que regulan la situación de aportes a cursos superficiales no se puede caracterizar una zona como zona

de pérdida o ganancia. Se debiese hacer un estudio acabado con aforos a lo largo de todo el estero para cada época del año para caracterizar de mejor manera el comportamiento de éste en la actualidad durante las épocas del año con el escenario de extracciones actuales y aportes de cuencas aledañas.

3.2.2.2 Uso de Aguas subterráneas

3.2.2.2.1 Resultados

A continuación, se presentarán los 2 métodos utilizados para la determinación del uso de aguas en la cuenca de Nilahue:

3.2.2.2.1.1 Derechos de aguas

Con base en los registros de inscripciones de derechos de aguas para la región de O´Higgins de la DGA. Se realizó un filtro para los que se encontraban en la cuenca de Nilahue a fecha 20 de enero de 2019, donde se obtuvieron un total de 374 derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas y 77 derechos de aguas superficiales, donde se totalizan un total de 6271 l/s promedio anuales concedidos.

Tabla 3 Registros de derechos de agua otorgados en cuenca de Nilahue

Derechos de Agua	l/s	m3/año
Superficial	3996	1,26018E+11
Subterránea	2275	71744400000
Total	6271	1,97762E+11

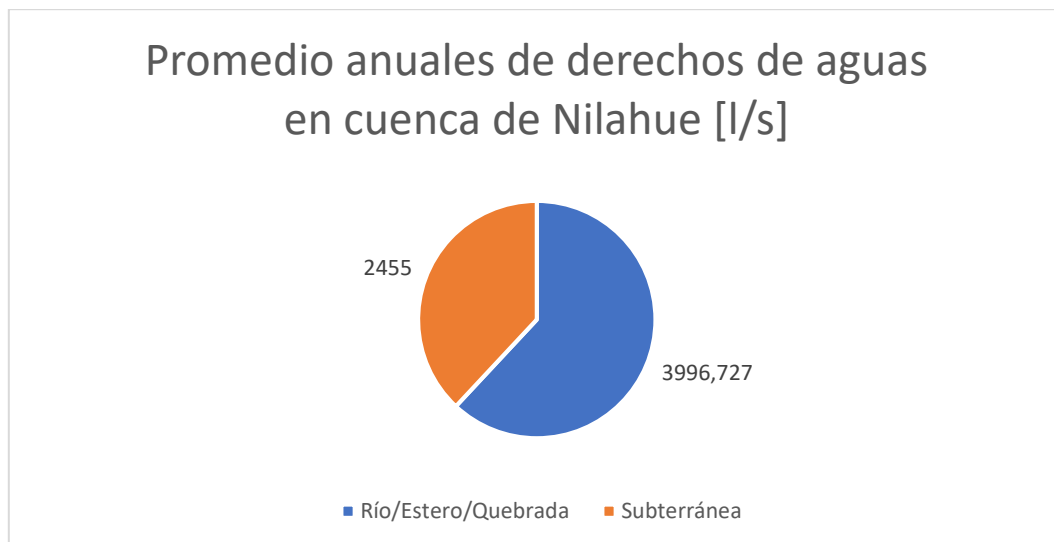


Figura 37 Promedio anuales de derechos de aguas en cuenca de Nilahue (Elaboración propia)

Se puede observar que la mayor cantidad de derechos de agua son de aguas subterráneas, sin embargo, los de aguas superficiales son por mayor cantidad.

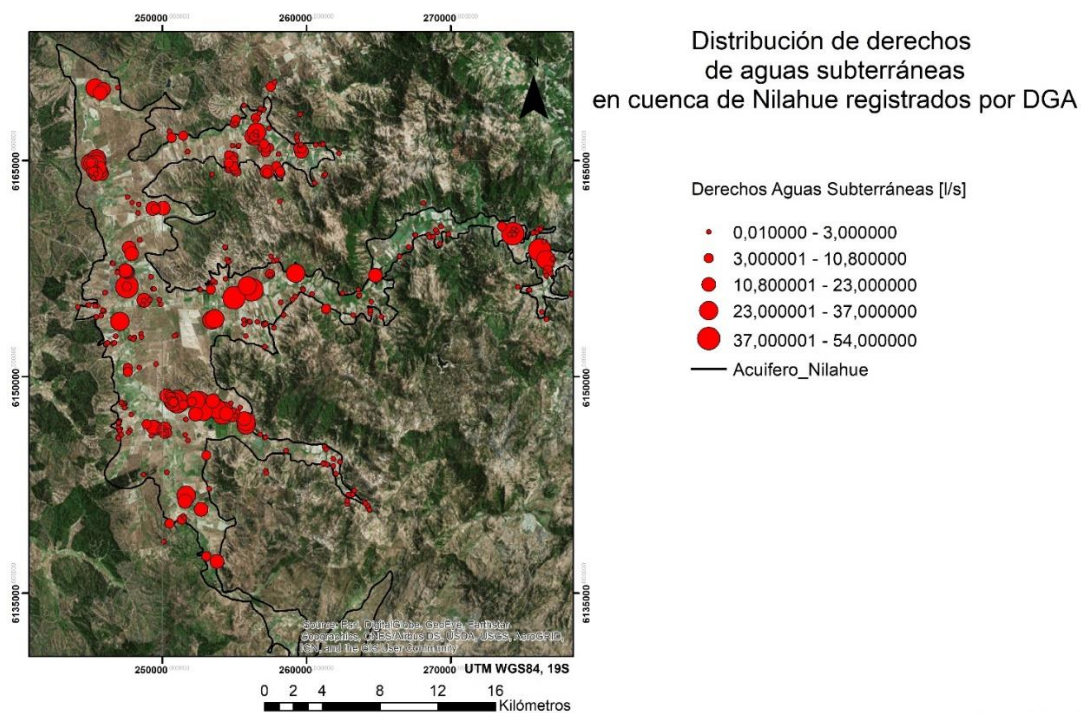
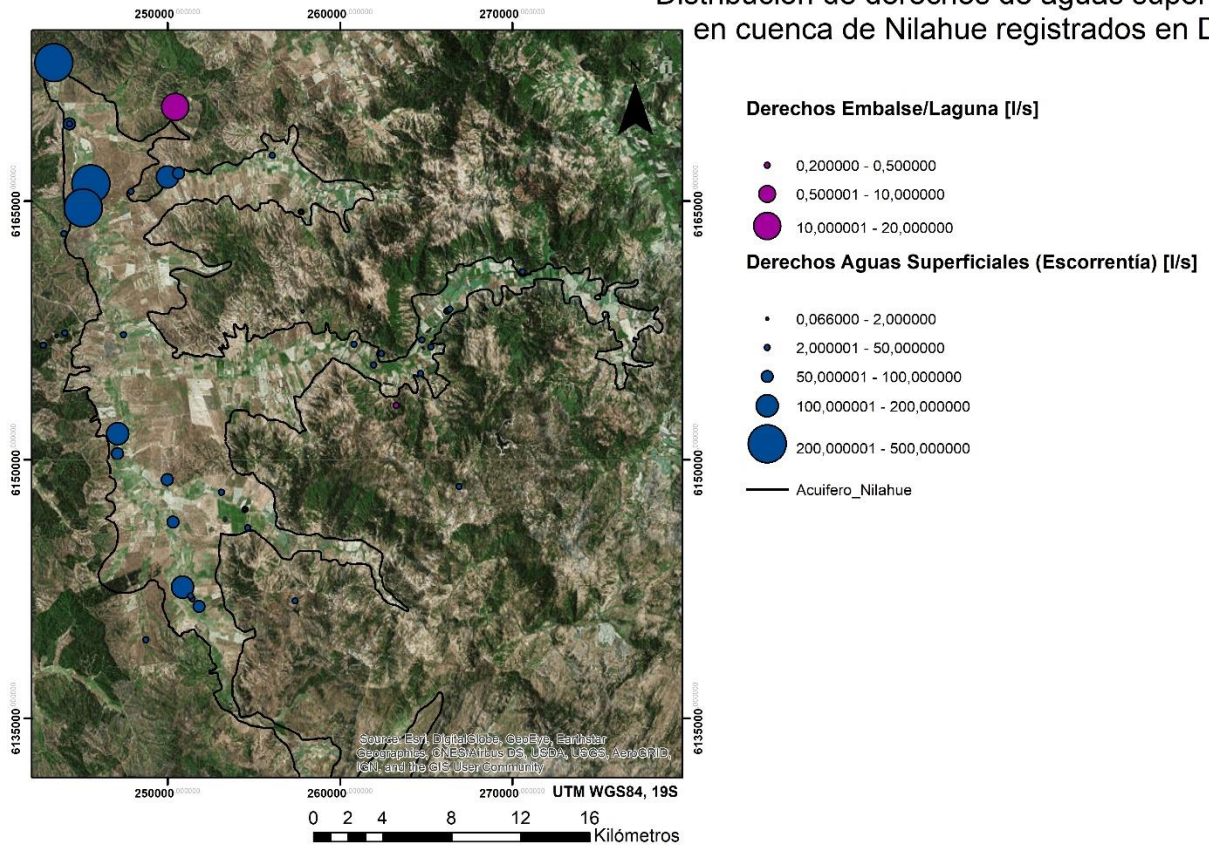


Figura 38 Distribución de derechos de aguas subterráneas en cuenca de Nilahue registrados por DGA. (Elaboración Propia)

Distribución de derechos de aguas superficiales en cuenca de Nilahue registrados en DGA



Thomas Williams D.

Figura 39 Distribución de derechos de aguas superficiales en cuenca de Nilahue registrados por DGA. (Elaboración Propia)

Se puede observar en los mapas anteriores que los derechos de agua subterránea se encuentran más homogéneamente distribuidos en cúmulos principalmente en toda la cuenca y los derechos de aguas superficiales se desarrollan principalmente a lo largo del estero Nilahue.

3.2.2.2.1.2 Huella hídrica

Para el cálculo de uso de aguas para la cuenca de Nilahue a través de la HHA declarada por agricultura de la región de O´Higgins se le asignó una demanda de 25 m³/s, equivalentes a 788.400.000 m³/año. (Fundación Chile, 2016)

Tabla 4 Huella hídrica azul para la zona centro-centro sur de Chile por sectores. Modificado de (Fundación Chile, 2016)

Huella Hídrica Macrozona	Huella Hídrica Azul (m3/s)				
	V región	VI Región	VII Región	RM	Total Macrozona
Doméstico	0,7	0,4	0,4	2,9	4,4
Silvoagropecuario	12,2	25	28,2	3,2	68,6
Minería	0,5	2,5	0	0,4	3,4
Industrial	0	0,1	1	0	1,1
Energía	0	0	0	0	0
Total	13,5	27,9	29,6	6,6	77,6

Seleccionando las zonas con NDVI > 0,118 indicando presencia vegetal e interceptándolas con las zonas agrícolas de la región de O´Higgins se obtuvo un área **236.935,79 ha** de vegetación en zonas con agricultura de la región de O´Higgins, de las cuales, **12.657,43 ha (5,3%)** se encuentran en la cuenca de Nilahue.

A partir de los datos presentados la fórmula mencionada con anterioridad en metodología, se calculó la HHA para la agricultura de la cuenca de Nilahue como:

$$HHA \text{ agricultura Nil.} = 788.400.000 \left[\frac{m^3}{año} \right] * \frac{12.657,43 [ha]}{236.935,79 [ha]} = \mathbf{42.117.393 [m^3/año]}$$

Los otros factores por considerar para la huella hídrica azul en la cuenca de Nilahue no se consideraron ya que no hay presencia de minería en la cuenca y el sector industrial y doméstico presentan valores a escalas insignificantes debido a la baja población de la zona.

3.2.2.2.2 Discusiones

3.2.2.2.2.1 Cuantificación de extracciones

Los derechos de agua otorgados para la cuenca de Nilahue presentan variabilidad según la época del año. Para gran parte de éstos se les es asignado mayores caudales durante la época de invierno, cuando no son muy necesarios ya que el auge de los cultivos en la zona y sus mayores necesidades hídricas ocurren durante los meses de primavera y verano.

Durante el terreno en la zona se pudo evidenciar que gran parte de los pozos y norias de agricultores locales consultados carecían de derechos otorgados y que muchos de aquellos que se encontraban con los derechos otorgados no eran utilizados o utilizados de manera parcial. Sumado a que no existe una fiscalización acerca de los verdaderos caudales de extracción, nada garantiza que los derechos otorgados sean realmente las extracciones que se realizan en el acuífero.



Figura 41 Diferencias de extracciones entre un gran agricultor de la industria vitivinícola (izq.) y un pequeño agricultor de arándanos (der). Elaboración propia

De los derechos de agua superficiales, muchos de éstos se encuentran asociados al estero de Nilahue, sin embargo, los caudales de este no alcanzan a igualar los derechos otorgados la mayoría del año por lo que los derechos de aguas superficiales tampoco son representativos de las verdaderas extracciones de éste.

Los derechos de agua subterránea han aumentado considerablemente desde el 2001, donde se tenían aproximadamente ~ 100 l/s otorgados al día de hoy donde se tienen ~ 2300 l/s.

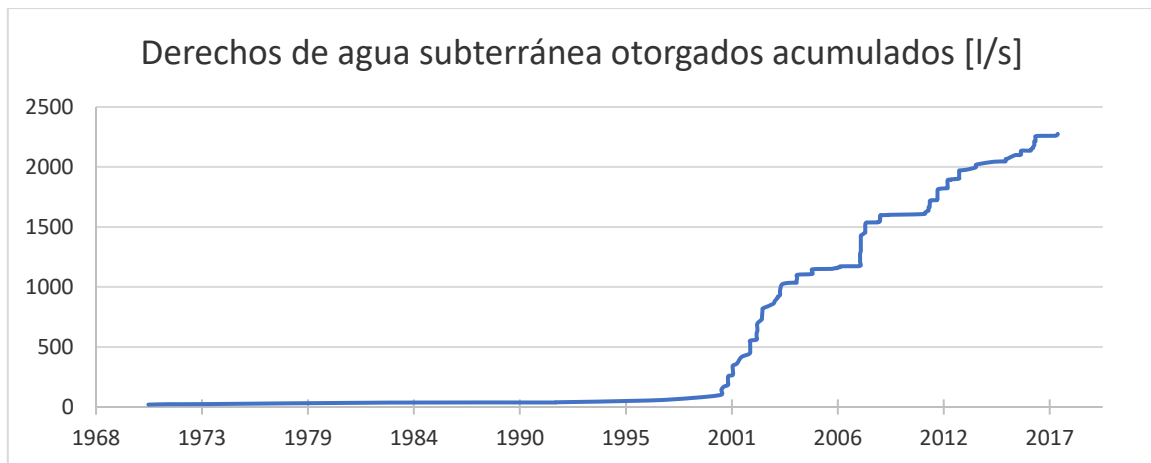


Figura 42 Derechos de agua subterránea otorgados acumulados por año. Elaboración propia con base en reportes digitales DGA.

Debido a la baja representatividad del valor real de extracciones dado por los derechos otorgados se han determinado las extracciones por medio de la ponderación de la huella hídrica azul en la cuenca de Nilahue. Esta se determinó mediante la información presentada en el Reporte Huella Hídrica en Chile: sectores prioritarios de la cuenca del Río Rapel (2016). En éste, para la estimación de la huella hídrica por cultivo se utilizó la metodología de Garrido, et al. (2010), en ella, la evapotranspiración de referencia (ETP) del lugar dónde se está desarrollando el cultivo es multiplicado por el coeficiente de cultivo y la superficie del cultivo en cuestión para obtener la huella hídrica.

A partir del análisis de uso de suelos y NDVI en meses de cultivo para la cuenca de Nilahue y la región de O´Higgins se pudo ver que la cuenca presenta una gran cantidad de suelo agrícola, sin embargo, una baja parte de esta presenta altos índice de NDVI, mostrando un bajo desarrollo de los suelos de cultivo comparado con el resto de la región.

En el estudio previo en la cuenca realizada por la DGA en 2013 se estiman a través de encuestas que las extracciones son del orden de los 22 millones de metros cúbicos anuales (DGA, 2013), diferentes a los cerca de 42 millones de metros cúbicos anuales estimados a través de la huella hídrica. Esta diferencia se puede dar por un sesgo en las encuestas, estas sólo fueron hechas a personas con sus pozos inscritos, sin embargo, en la realidad no es así, como se pudo observar en terreno, la mayoría de los pozos y norias corresponden a particulares sin una debida inscripción de sus pozos

3.2.2.2.2 Consecuencias directas de extracciones

Como se ha mencionado anteriormente, las extracciones se concentran durante los meses secos de verano. Los bombeos junto a la gran actividad agrícola de la zona, principalmente de viñas, ha llevado a grandes extracciones concentradas en la zona sur y norte del valle principal de Nilahue, representadas por los grandes derechos de agua subterránea otorgados para

la cuenca (Figura 42). Estas se ven relacionadas por dos zonas de depresión de cotas piezométricas calculadas tanto para 2013 como para 2018(3.1.3. Piezometría).

Adicionalmente durante terreno en la zona muchos residentes dueños de pozos y norias afirmaron que durante la época de enero-febrero sus pozos se secaban o bajaban mucho sus niveles, no así aquellos que se encuentran en las inmediaciones de los canales de Convento Viejo.

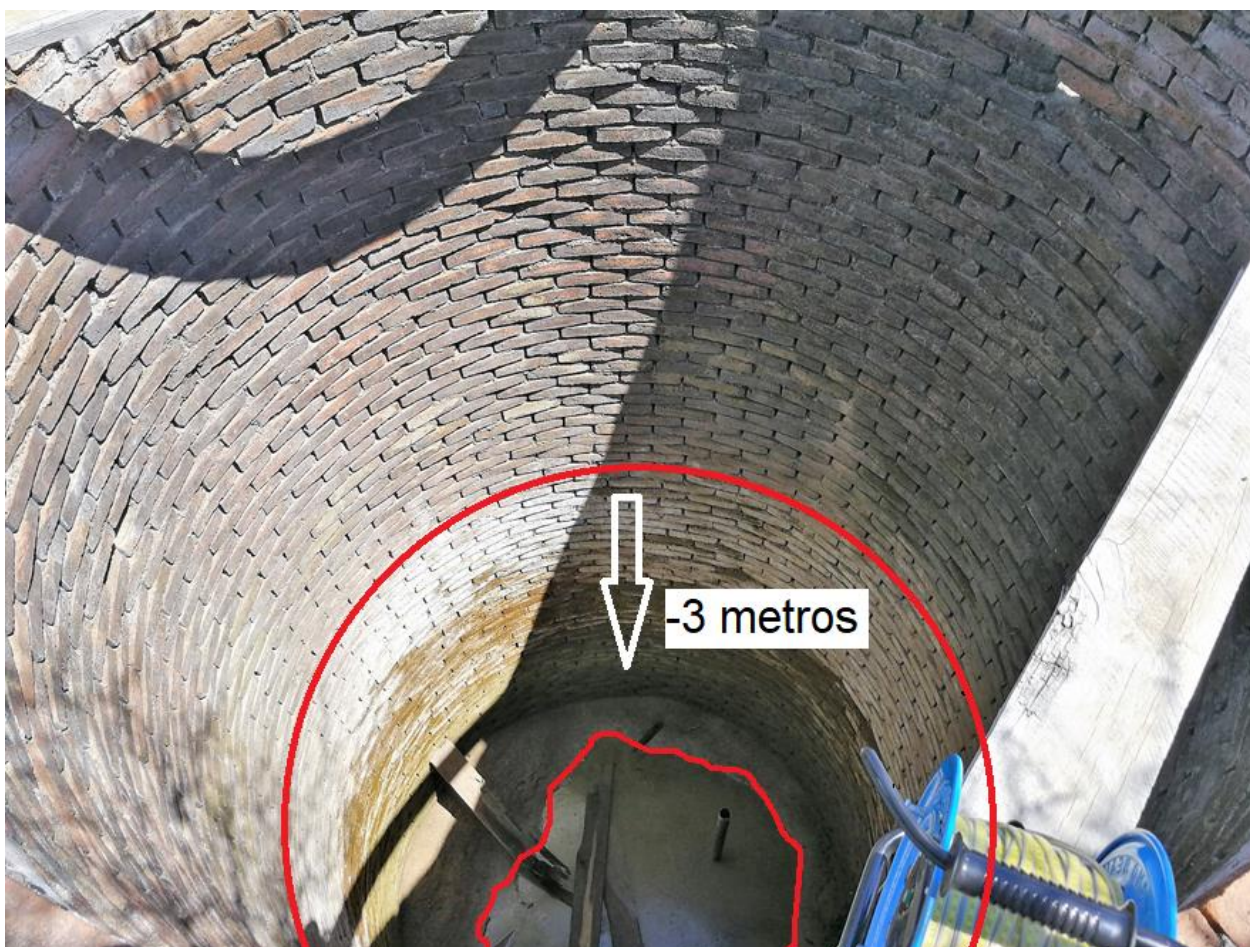


Figura 43 Noria seca durante periodo octubre de 2018 cercana a grandes lugares de extracciones en el sector de Pumanque

Es evidente que las grandes extracciones de aguas subterráneas han afectado a los pequeños agricultores, que debido a la baja profundidad de sus pozos se han visto desprovistos de agua durante la época de altos bombeos.

3.2.2.3 **Evapotranspiración**

3.2.2.3.1 Potencial de Evapotranspiración (ETP)

El potencial de evapotranspiración es la capacidad en milímetros que tiene para evaporar agua un determinado lugar si tuviese la cantidad de agua disponible. Este depende de varios factores, como la temperatura, horas de luz, tipo de suelo, viento, entre otros. El CR2 cuenta con una plataforma digital con datos disponibles de potencial de evapotranspiración para las cuencas de Chile calculadas históricamente.

Los datos de potencial de evapotranspiración promedio mensuales presentan una variabilidad interanual prácticamente nula, pero una variabilidad intra anual importante.

A partir de los datos de potencial de evapotranspiración del CR2 se obtuvieron los siguientes resultados para los promedios mensuales de potencial de evapotranspiración.

Tabla 5 Potencial de evapotranspiración mensual en cuenca de Nilahue (Elaboración propia)

MES	Potencial de Evapotranspiración [mm/mes]
ene	200,2686842
feb	162,7978947
mar	136,4713158
abr	82,96026316
may	49,78578947
jun	34,575
jul	39,14605263
ago	56,12236842
sept	81,87315789
oct	120,3347368

nov	155,3202632
dic	190,7081579

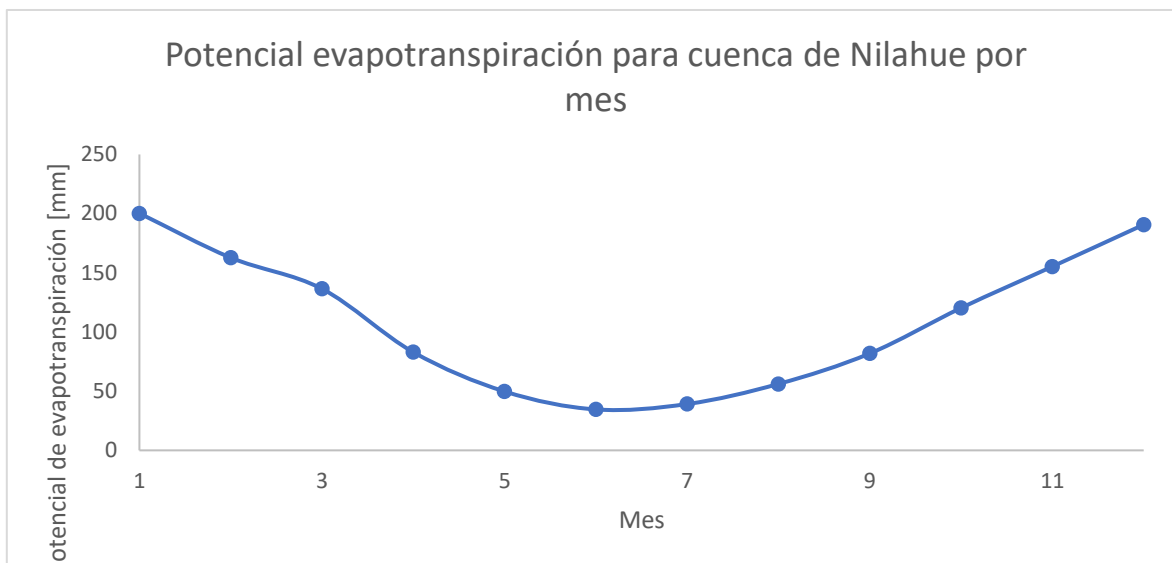


Ilustración 2 Potencial de evapotranspiración por mes para cuenca de Nilahue a partir del promedio de datos de CR2. (Elaboración Propia)

3.2.2.3.2 Evapotranspiración Real (ETR)

Para una cuenca similar del secano costero del norte de la región del Bío-Bío se han realizado análisis físico-hídricos, determinando reservas máximas de suelo de 150mm (Uribe, Arumí, González, & Salgado, 2003).

Considerando un comportamiento similar a la cuenca antes mencionada, a partir de una reserva máxima de suelo de 150mm se obtuvieron los valores para la evapotranspiración real mes a mes para cada mes en el periodo 1986-2016 (Anexo7.2).

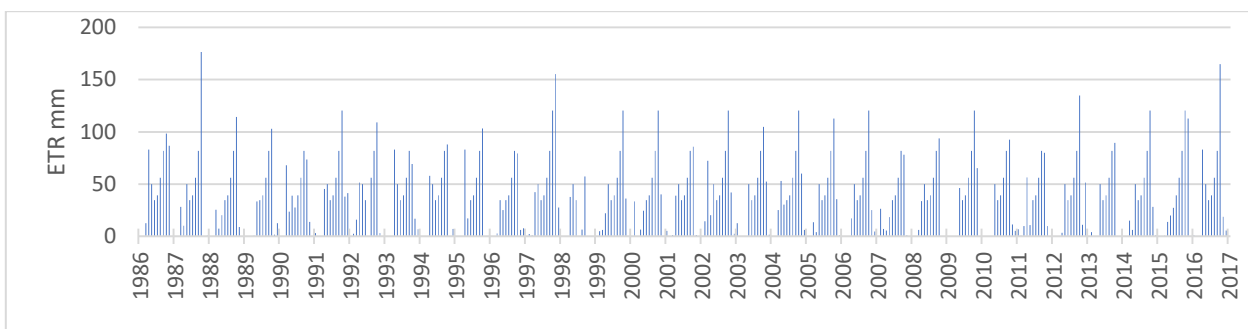


Figura 44 Evapotranspiración mensual 1986-2016. Elaboración propia

Se observa en los resultados que para la mayoría de los años existe un peak de evapotranspiración hacia finales del invierno, entre los meses de septiembre y octubre, cuando las temperaturas comienzan a subir y sube la ETP. Evaporando principalmente las reservas acumuladas en el suelo durante los meses de invierno.

3.2.3 Balances anuales estimados para cuenca de Nilahue

3.2.3.1 Resultados

Considerando los valores calculados para los distintos ítems de entrada y salida se realizó un balance preliminar con los elementos considerados para la cuenca de Nilahue para los años desde 1986 a 2016. Considerando las entradas al sistema como las precipitaciones y las salidas como la evapotranspiración, escorrentía superficial y las extracciones humanas.

Para las extracciones se consideró finalmente la huella hídrica azul actual para el año 2016, para el resto de los años se consideró la ponderación de la huella hídrica por el porcentaje del total de los permisos otorgados a la fecha.

Tabla 6 Balances anuales cuenca de Nilahue 1986-2016. Elaboración propia (*dato rellenado con valor estimado)

Año	Pp [mm]	Escorrentía [mm]	ETR [mm]	Uso de aguas[mm]	Balance [mm]
1986	1003	442	542	7	11
1987	879	380	550	7	-58
1988	589	89	493	7	-1
2002	1088	534	533	7	13
2003	517	66	433	11	7
2004	574	74	506	12	-18

1989	470	67	461	7	-65
1990	422	7	422	7	-15
1991	854	263	509	7	75
1992	971	396	443	7	125
1993	610	135	437	7	31
1994	529	104	415	7	3
1995	611	166	415	7	24
1996	399	16	367	7	9
1997	1061	475	610	7	-31
1998	204	4	186	7	7
1999	628	147	451	7	22
2000	840	385	436	7	11
2001	806	357	394	7	48

2005	930	427	428	14	61
2006	791	312	429	16	34
2007	354	22	348	19	-34
2008	729	258	395	19	57
2009	558	115	444	19	-20
2010	437	90	371	19	-43
2011	472	40	385	21	27
2012	546	38	462	23	23
2013	409	51	355	24	-21
2014	632	158	432	25	17
2015	576	*33	472	25	46
2016	573	33	534	26	-20

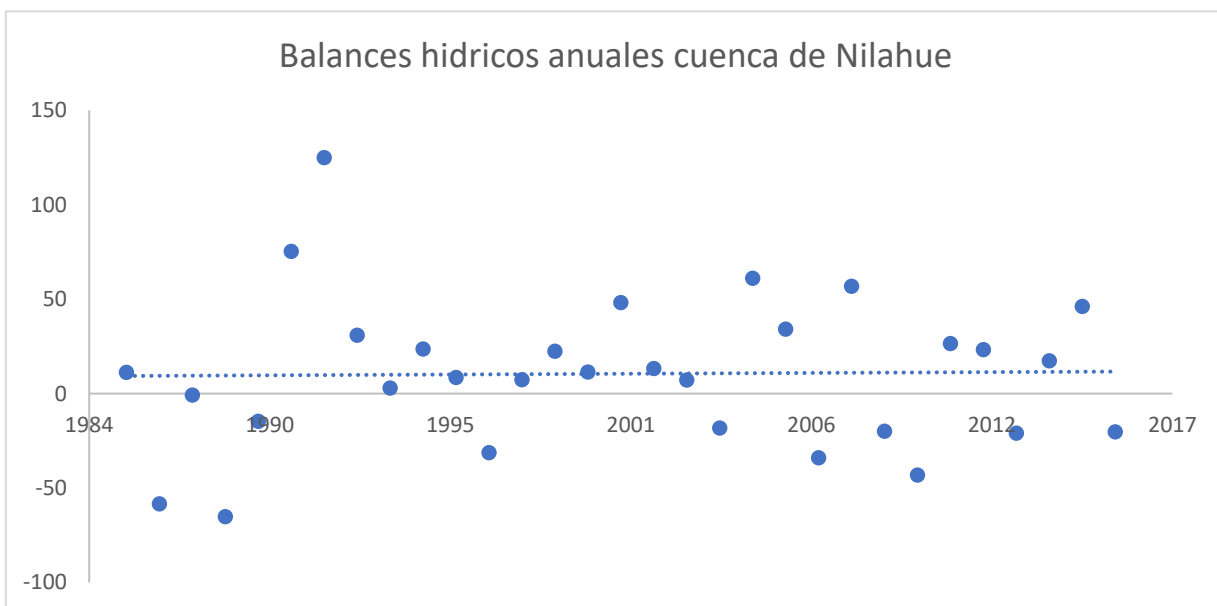


Figura 45 Balances hídricos cuenca de Nilahue

3.2.3.2 Discusiones

Los balances anuales en el periodo 1986-2016, muestran en su mayoría registros positivos en la cuenca de Nilahue. Y si se considera un balance acumulado desde el año 1986 a 2016 se observa una clara tendencia al alza del balance.

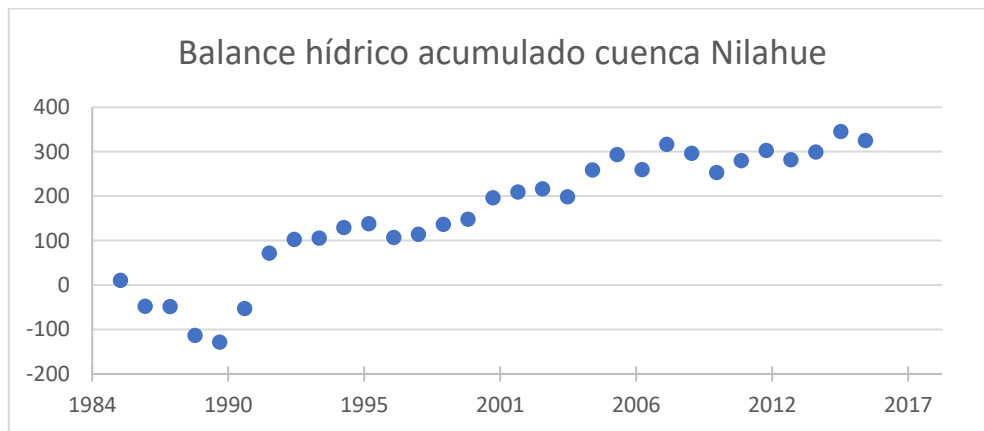


Figura 46 Balances hidrológicos acumulados para cuenca de Nilahue 1986-2016. Elaboración propia

Tomando en consideración que los caudales base se han mantenido a un nivel relativamente constante para este periodo (Figura 32), se podría decir que el acuífero no ha sido el que ha almacenado estos más 300 milímetros extra desde el año 1986 (debido a que no existe otra forma de almacenar tal cantidad de agua), es decir que existe un diferencial de agua cada año que se va de la cuenca por otro lugar.

La primera posibilidad sería decir que las extracciones son y han sido en realidad mucho mayores de lo calculado para la cuenca de Nilahue. La segunda es que existen salidas naturales de la cuenca por los costados del acuífero a través de las fracturas en cuerpos rocosos junto con un flujo subterráneo e hiporréico no contabilizado en la zona de Santa Teresa.

La hipótesis de que exista un acuífero en medio fracturado en los bordes del acuífero detrítico se ve relacionado también con que existan salidas subterráneas a través de estas mismas fracturas en ciertas épocas del año.

3.3 Recargas difusas y resultados integrados de factores hidroclimáticos.

El sistema hidrológico de la cuenca de Nilahue cuenta con diversos factores que pueden generar cambios a distintas escalas temporales, por lo que no basta con analizar los datos en una escala temporal. Un análisis y comparativa de datos a nivel anual nos entrega información de la variación interanual de los distintos factores que modelan el comportamiento de las aguas de la cuenca. Un análisis mensual entregará información de la variación intra-anual, o sea, como varían estos distintos factores y sus implicancias durante el transcurso del año. Si se trabaja a nivel diario se podrá ver por ejemplo las implicancias directas de un evento determinado.

Es complejo determinar a qué escala se debe trabajar, ya que ciertos índices o factores trabajan mejor a distintas escalas. Se cuenta con información para todos los parámetros a nivel mensual para un periodo de tiempo de 30 años, lo aceptable para poder hacer un análisis tanto a nivel mensual como anual. Es por esto por lo que se ha decidido trabajar a estas 2 escalas.

Al integrar los distintos factores se podrá realizar una comparativa entre estos y realizar correlaciones de distintos eventos anuales y/o mensuales que sean de interés. Entregando información acerca del comportamiento del sistema frente a éstos y posibles factores antrópicos que lo perturben.

3.3.1.1 Escala mensual

3.3.1.1.1 Resultados

A continuación, se presenta una comparativa de los resultados obtenidos para las precipitaciones, evapotranspiración, infiltración profunda y escorrentía superficial para cada año en el periodo 1986-2016 en metros cúbicos y

milímetros mensuales para la cuenca de Nilahue. Los datos se presentan en el Anexo7.2.

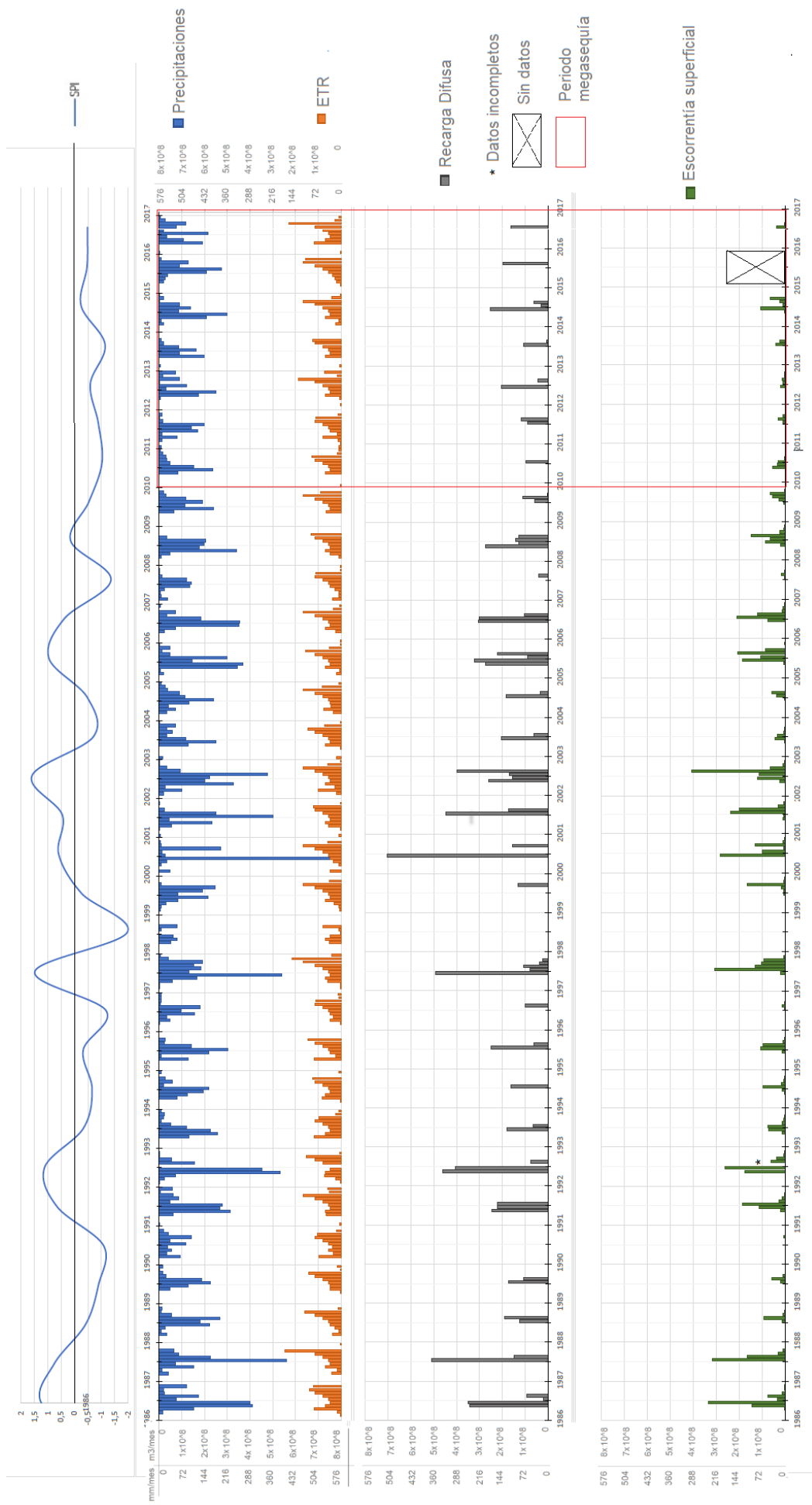


Figura 47 Resumen integrado de volúmenes mensuales para PP, ETR, Inf. prof, Esc. Superficial (escala vertical igualada para los parámetros) Elaboración propia

En el análisis mensual se puede apreciar las distribuciones y el comportamiento del agua año a año. Para la evapotranspiración se observa un comportamiento relativamente constante, siendo regulado principalmente por la época del año (temperatura ambiental) y en segundo lugar por la disponibilidad de agua. Esta alcanza su peak al empezar la primavera y comienzan a subir las temperaturas en condiciones de un suelo cargado en humedad acumulada durante los meses de invierno.

En la Figura 47 se observa que las crecidas mensuales en los cursos de agua superficiales se ven relacionadas fuertemente a la infiltración profunda, y estas últimas a grandes intensidades de precipitación en meses determinados.

A continuación, se presentan concentraciones y porcentajes relativos de los principales iones registrados por la DGA entre los años 2000 y 2006 en aguas del aforo de Nilahue en Santa Teresa. A partir del 2007 se deja de tener un registro del ion HCO_3 . (DGA, 2018)

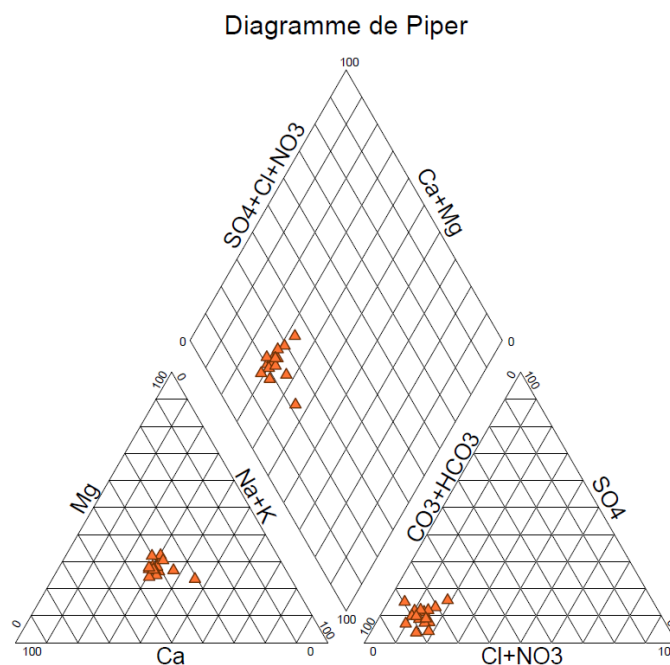


Figura 48 Diagrama de Piper en relación porcentual de Miliequivalentes de los principales iones presentes en las muestras del aforo de Estero Nilahue en Santa Teresa. Elaboración propia con base en los datos de (DGA, 2018)

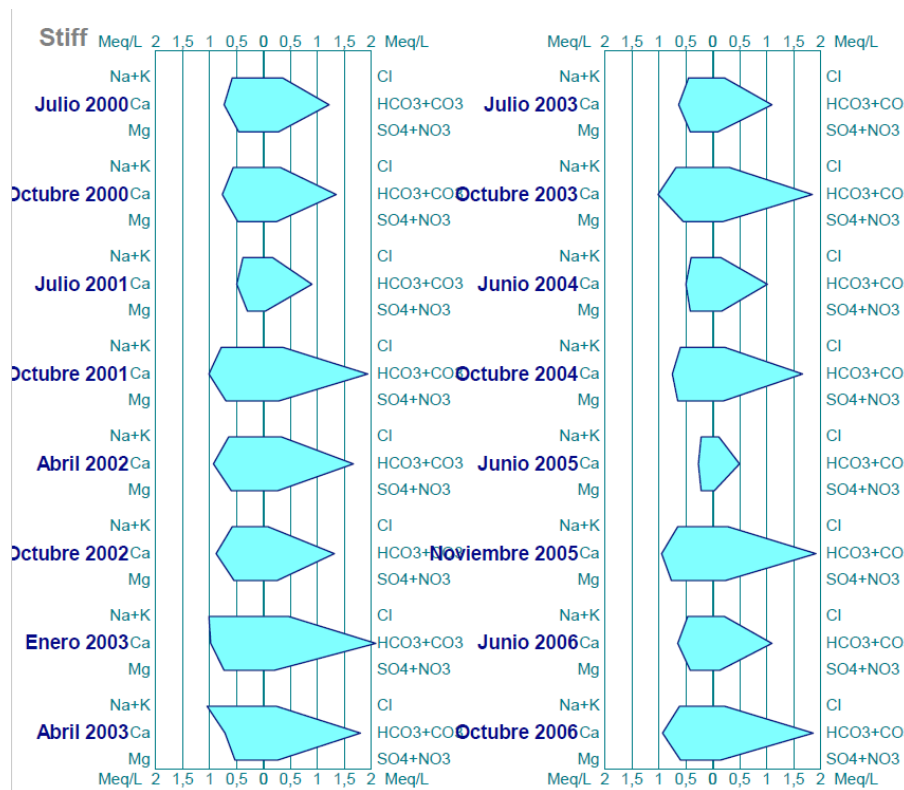


Figura 49 Diagramas de Stiff para distintos periodos y meses en muestras de agua del aforo de Estero Nilahue en Santa Teresa. Elaboración propia con base en los datos de (DGA, 2018)

Se puede apreciar que la relación entre iones no cambia de manera significativa de año a año ni presenta una variación entre los meses del año. Sin embargo, la cantidad total de los iones presentes en las muestras disminuye hacia los meses más lluviosos y tiende a aumentar en los meses secos.

3.3.1.1.2 Discusiones

Se ha observado a partir de los resultados mensuales de recargas, que estos poseen una estrecha relación con las precipitaciones, yendo desde los 0mm mensuales hasta los 507mm/mes en junio de 2000. Estas ocurren sólo para meses con precipitaciones sobre los 54 mm/mes y principalmente durante los meses de mayo y agosto, donde han ocurrido un 97% del volumen recargado en el periodo 1986-2016 (Figura 50).

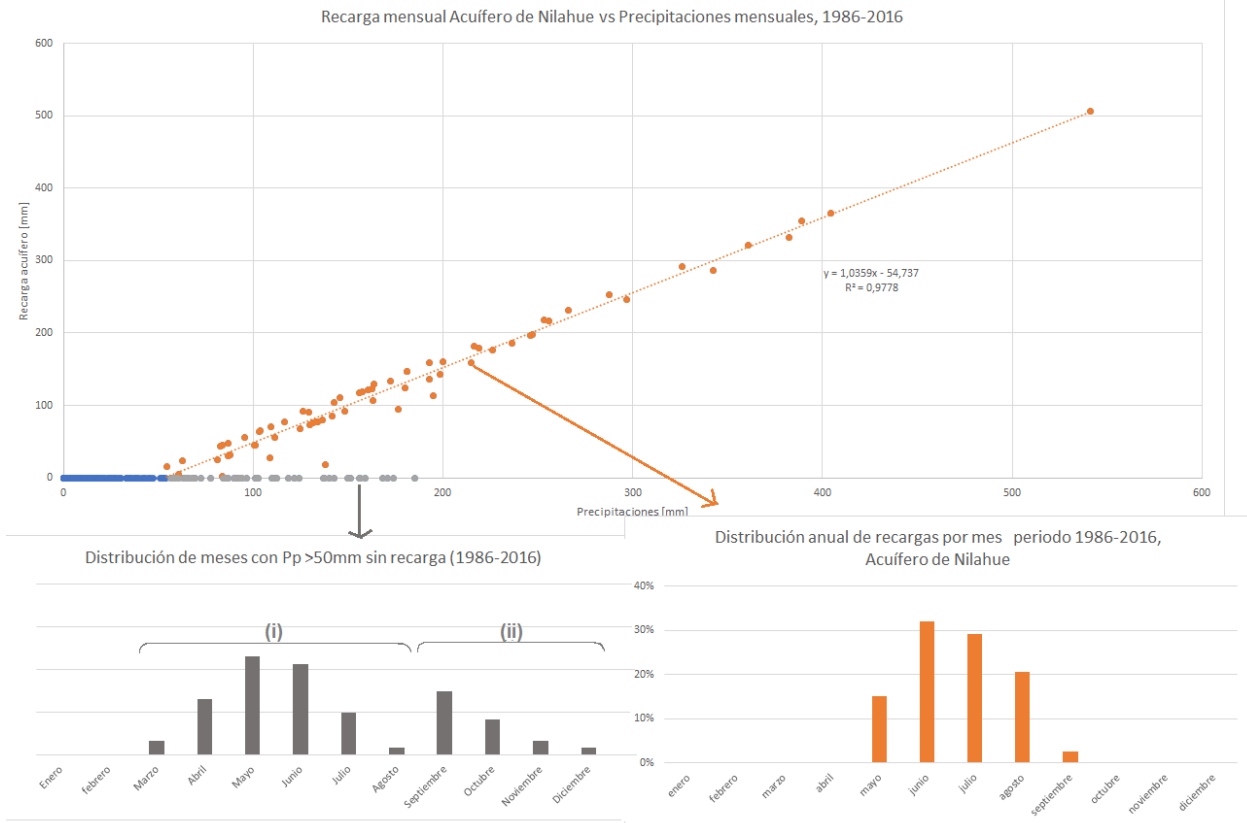


Figura 50 Relación mensual recargas con precipitaciones y distribución anual de recargas, Acuífero de Nilahue 1986-2016

De la figura anterior se observa una relación lineal entre las precipitaciones y la recarga del acuífero, determinada por la ecuación: $Recarga = 1,035 Pp - 54,73$. De esto se infiere que una vez que el suelo alcanza la humedad necesaria para recargar, todo el excedente sobre los 54 mm es llevado al acuífero.

Como se puede apreciar en la figura anterior, existen meses con más de 54mm de precipitaciones que no presentan recarga. En la distribución mensual de estos meses en Figura 50, se puede apreciar una distribución heterogénea de estos meses. Se observa una distribución mayoritaria(i) en torno al mes de mayo (72%) y minoritariamente(ii) una distribución decreciente desde el mes de septiembre (28%). En el detalle por mes para estos cálculos (Anexo7.2) se puede observar que esto ocurre en primer lugar(i) porque el evento mayor a 54 mm de lluvia ocurre en meses en donde el suelo se encontraba previamente

seco a causa de falta de lluvias en los meses anteriores y en segundo lugar (ii), que las precipitaciones son evaporadas en su totalidad debido al comienzo de la primavera y su alza en el potencial de evapotranspiración generado por un incremento de las temperaturas.

De lo anterior se entiende de que, para que en un mes haya una recarga difusa del acuífero se deben: (1) tener precipitaciones mensuales sobre 54 mm, (2) que el suelo se encuentre con humedad previa de ser cercana a 54 mm y (3) que, si es en meses de primavera, que las precipitaciones superen el ETP respectivo.

A diferencia del análisis del análisis anual, ni el coeficiente de escorrentía mensual ni la escorrentía superficial presentan una relación directa con las precipitaciones (Figura 51 y Figura 52).

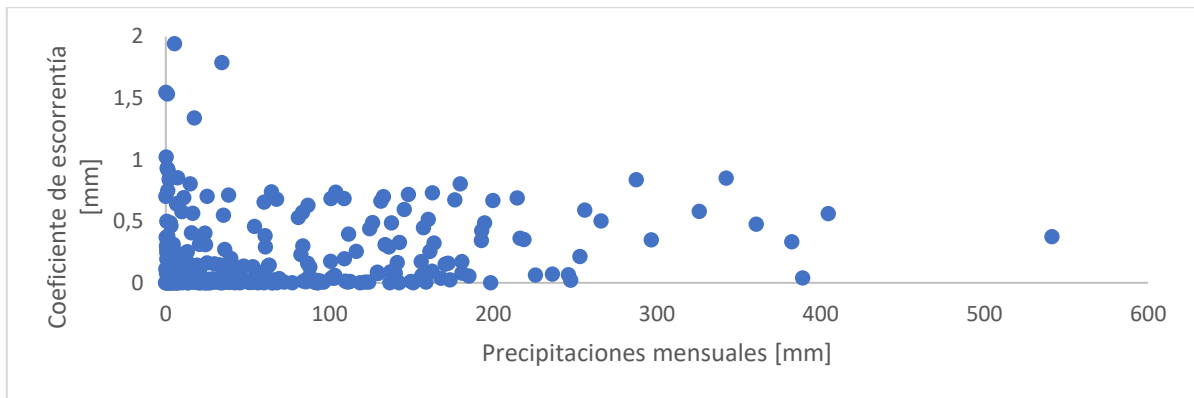


Figura 51 Precipitaciones vs coeficiente de escorrentía mensual, cuenca de Nilahue. Elaboración propia

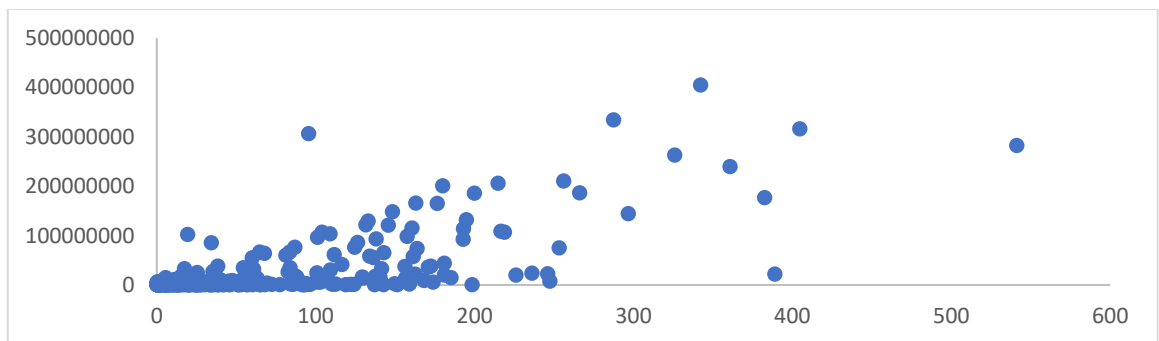


Figura 52 Precipitaciones vs escorrentía mensual, cuenca de Nilahue. Elaboración propia

La no relación entre estos factores indica que lo precipitado durante un mes no escurre superficialmente durante el mismo mes, dejando un tiempo de retardo para su salida hacia cursos superficiales, siendo el acuífero el que actúa como retenedor de las aguas a través de una recarga difusa para luego realizar un aporte desde el acuífero hacia cursos superficiales por rebalse.

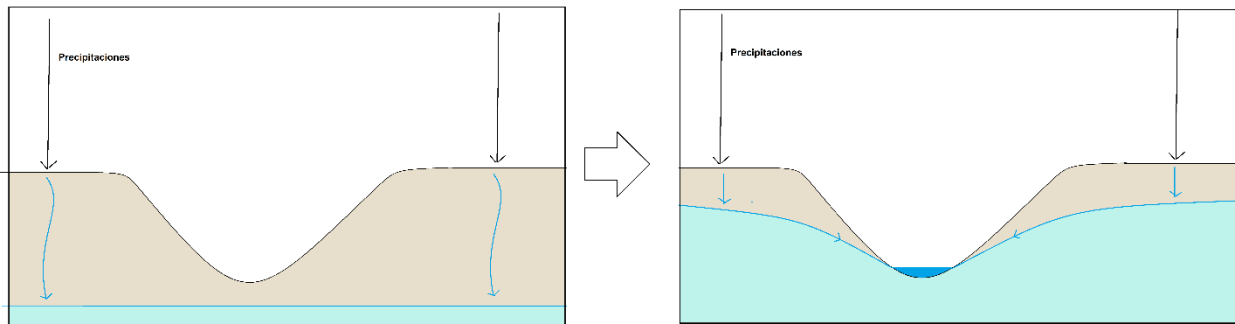


Figura 53 Ilustración de proceso de recarga difusa más aporte a cursos superficiales. Elaboración propia

Lo anterior se ve reflejado también en la química de aguas en el estero de Nilahue, donde se presentan aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas producto de la interacción con sedimento de rocas intrusivas. En los diagramas de Stiff (Figura 49) se observa que las proporciones de iones disueltos se mantiene de manera constante, no así su cantidad total, que aumenta en periodos de primavera y verano. En la Figura 54 se puede observar que la cantidad de iones en el agua va disminuyendo a medida aumenta el caudal, esto sugiere un mayor tiempo interacción sedimento/roca-agua para periodos más secos, ya que el agua presente mayoritariamente del caudal base, fue aportado desde el acuífero a cursos superficiales con un mayor tiempo de retardo, o sea, agua con mayor tiempo de residencia.

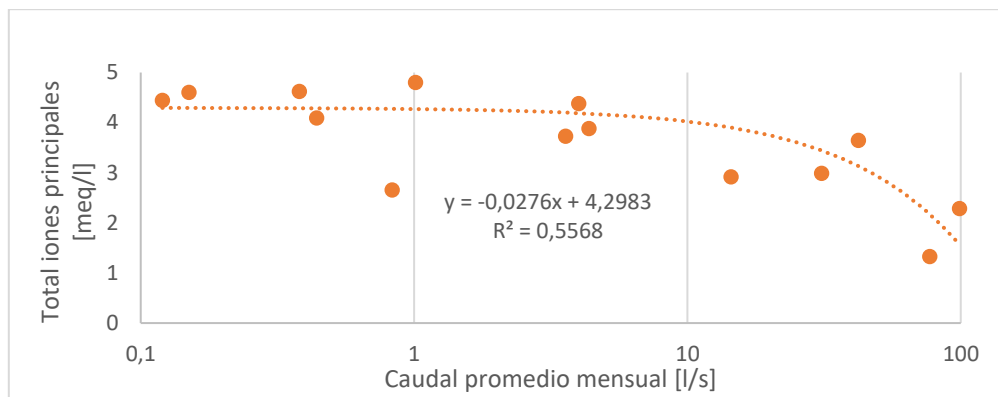


Figura 54 Caudal promedio mensual vs Total iones principales, estero de Nilahue en Santa Teresa. Elaboración propia

En las líneas de cotas piezométricas y los perfiles generados en el acuífero de Nilahue se pueden observar aportes laterales al acuífero desde las laderas rocosas del intrusivo de la cordillera de la costa (mayor cota piezométrica hacia los costados del valle). Durante los meses de invierno el aporte mayoritario al acuífero granular albergado en los sedimentos no consolidados de la cuenca de Nilahue se ve mayoritariamente modelado por los aportes por recarga difusa proveniente de las lluvias.

Los intrusivos de la cordillera de la costa se caracterizan por poseer estructuras principalmente de carácter NW-SE, tal como se mencionó con anterioridad, se presume una mayor cantidad de fallas no mapeadas en superficie respaldado en la alta sismicidad cortical de la zona (Figura 8). Esto último sugiere un alto fracturamiento del macizo rocoso, permitiendo la formación de un acuífero en medio fracturado en los bordes del acuífero granular de Nilahue. La presencia de pozos domésticos observados durante terreno fuera de los límites establecidos del acuífero afirma esta idea (Figura 23).

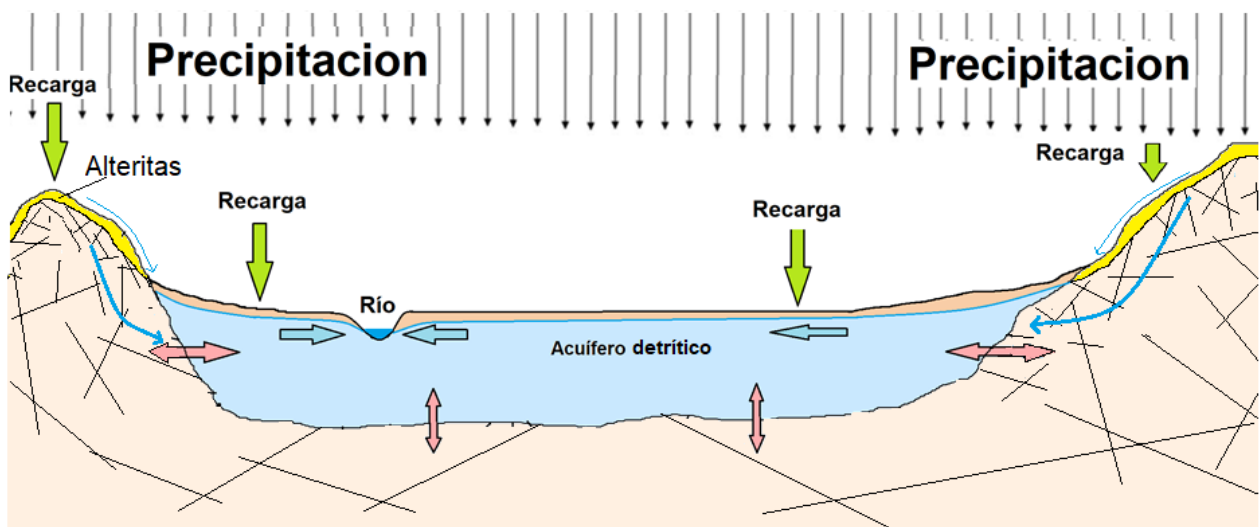


Figura 55 Ilustración de modelo conceptual de interacción entre aguas superficiales, subterráneas y acuífero granular con fracturado. (Elaboración propia)

En las líneas de cotas piezométricas y los perfiles generados a en el acuífero de Nilahue se pueden observar aportes laterales al acuífero desde las laderas rocosas del intrusivo de la cordillera de la costa (mayor cota piezométrica hacia los costados del valle). Durante los meses de invierno el aporte mayoritario al acuífero granular albergado en los sedimentos no consolidados de la cuenca de Nilahue se ve mayoritariamente modelado por los aportes por recarga difusa proveniente de las lluvias. Sin embargo, podría existir una recarga lateral desde las laderas tal como se explica en el modelo de interacción entre acuífero granular y fracturado presentado en la Figura 55, donde el agua recargada en las laderas del acuífero aporta subyacente y lateralmente al acuífero granular.

3.3.1.2 Escala anual

3.3.1.2.1 Resultados

A continuación, se presenta una comparativa de los resultados obtenidos para las precipitaciones, evapotranspiración, infiltración profunda y escorrentía superficial para cada año en el periodo 1986-2016 en metros cúbicos anuales para la cuenca de Nilahue. Los datos se presentan en el Anexo7.2

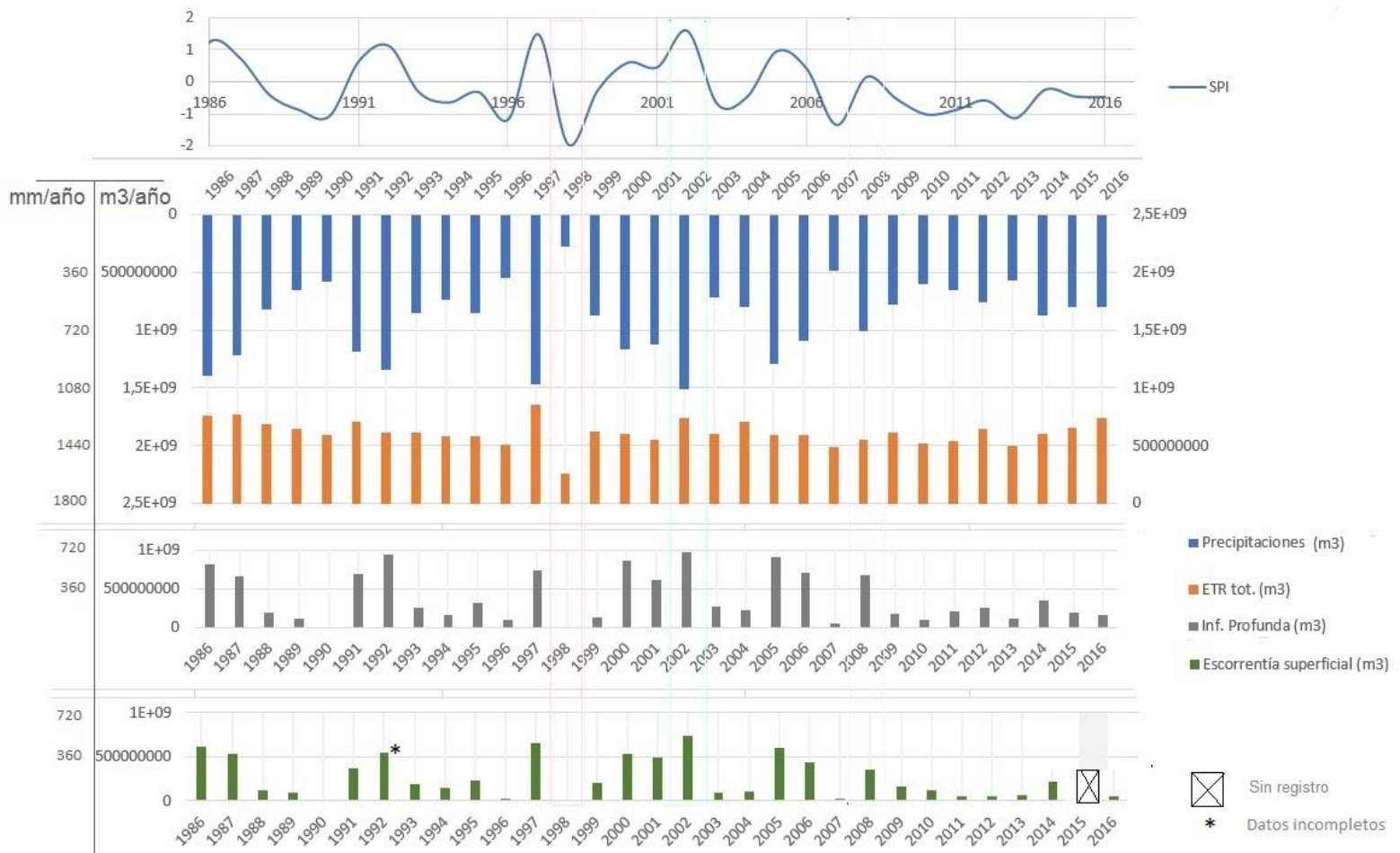


Figura 56 Resumen integrado de volúmenes anuales para PP, ETR, Inf. prof, Esc. Superficial (escala vertical igualada para los parámetros) Elaboración propia

En los resultados se puede ver una correlación directa entre todos los factores presentados. La ETR no presenta grandes cambios año a año como lo hacen la infiltración profunda y la escorrentía superficial, estas dos últimas se aprecian totalmente ligadas una de la otra.

Durante los años 1998 y 1990 se tienen casi nulo registro de escorrentía superficial y los cálculos no arrojan que hubiese infiltración profunda.

3.3.1.2.2 Discusiones

A la escala anual se ha observado una alta variabilidad para las recargas difusas anuales del acuífero, presentando promedios anuales para el periodo 1986-2016 277 ± 224 mm. Existen años en donde las recargas son nulas, como

en 1998 y 1990, y años donde llegan a recargar 705mm como en 2002. Esta alta variabilidad de 224 mm de desviación estándar sugiere una alta sensibilidad de la recarga a las precipitaciones.

Los datos sugieren que la recarga difusa del acuífero ocurre cuando las precipitaciones anuales superan los 360mm/año, descritos bajo la relación: $\text{Recarga} = 0,96 * P_p - 343,5$, $R^2: 0,88$.

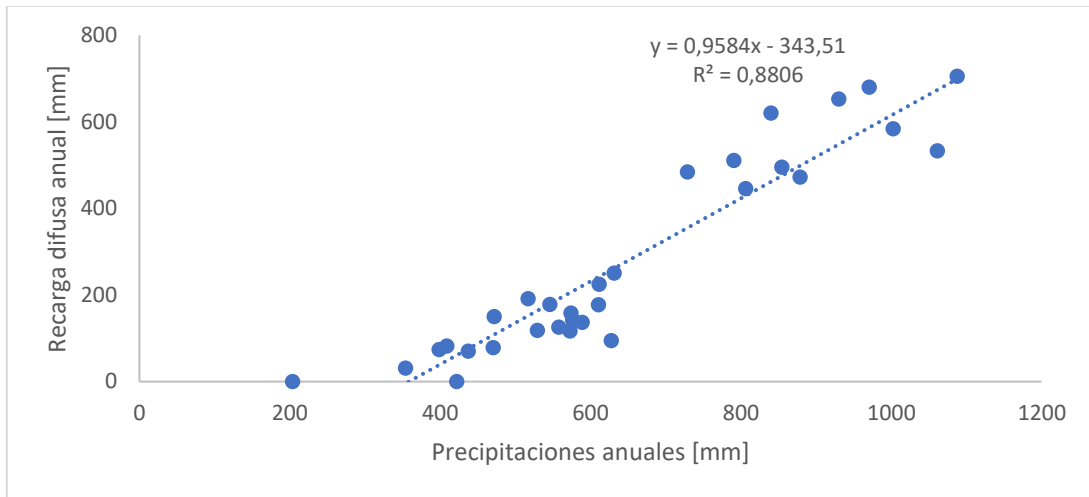


Figura 57 Recarga difusa vs precipitaciones, Acuífero de Nilahue. Elaboración propia

De los datos se intuye de manera general que para que haya recarga difusa del acuífero deben haber por lo menos 360mm anuales, a partir de esto gran parte de las precipitaciones ($\sim 95\%$) se irá a la recarga del acuífero.

A partir de los coeficientes de escorrentía anuales se puede observar que este es nulo para precipitaciones $< 300\text{mm/año}$. En la Figura 58 se observa que el coeficiente incrementa hasta llegar a los $\sim 0,45$ para luego mantenerse relativamente constante.

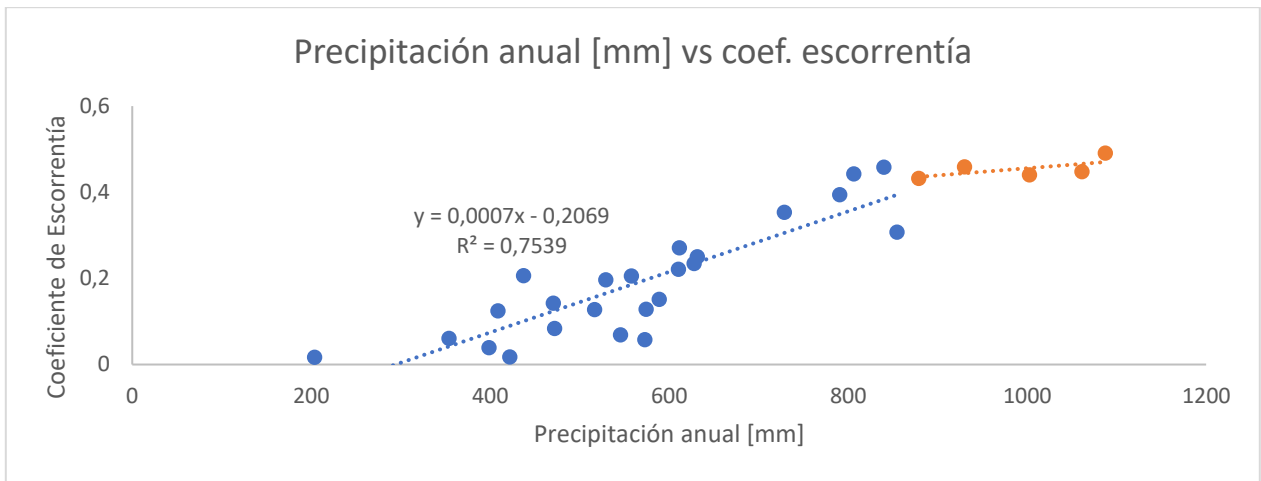


Figura 58 Precipitaciones anuales vs Coeficiente de escorrentía. Elaboración propia

Análisis similares se han realizado con anterioridad en la cordillera principal en la cuarta región de Coquimbo. En la cuenca del Río Turbio se obtuvieron coeficientes de escorrentía anuales decrecientes para las precipitaciones que luego se mantienen constantes. Esto indicaría importantes aportes del acuífero a cursos superficiales durante años secos favorecidos por recargas directas y escurrimiento desde deshielos (Jourde et al., 2011).

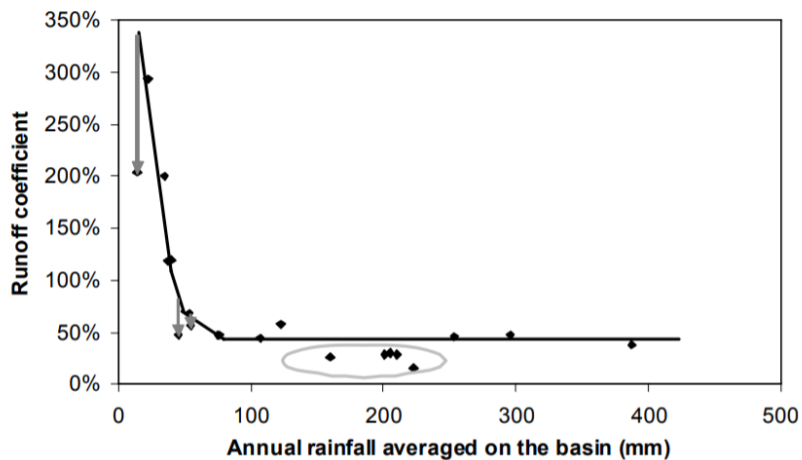


Figura 59 Precipitaciones vs Coeficiente de escorrentía anuales en cuenca de Río Turbio. (Jourde et al., 2011)

A diferencia del caso de la cuenca del Río Turbio, en la cuenca de Nilahue prácticamente no existen descargas por cursos superficiales en años secos.

Esto podría deberse a que los cursos superficiales dependen netamente del aporte del acuífero y estos sólo presentan recarga difusa a partir de las precipitaciones.

3.4 Impactos del Cambio Climático, Sequía 2010-actual

Durante el evento de megasequía actual, comprendido entre 2010-2016 del periodo de estudio, la disminución de un 28% (con respecto al total de los registros desde 1979) de las precipitaciones produjo: (i) una drástica disminución de la frecuencia de eventos de recarga difusa en el acuífero de Nilahue (Figura 47) y (ii) una disminución de la totalidad de recargas a una tasa de 141 ± 57 mm/año, un 55% menores que el periodo 1986-2009.

Eso se ve reflejado también en una disminución de los caudales del estero de Nilahue durante 2010-2016, donde han disminuido alrededor de un 71% los caudales con respecto al periodo 1986-2009.

Tabla 7 Disminución de parámetros hidroclimáticos durante megasequía. Elaboración propia

Disminución durante megasequía 2010-2016 con respecto a periodo 1986-2009	
Precipitaciones	-24%
Recargas	-55%
Escorrentía	-71%

Las sequías de uno o dos años son un fenómeno recurrente en el clima de Chile central, pero el periodo 2010-2016 destaca como el de mayor duración y extensión territorial desde mediados del siglo pasado ((CR2), 2015).

Desde el año 2010 el territorio comprendido entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía ha experimentado un déficit de un 30%. La cuenca de Nilahue en particular ha sufrido un déficit de 28%. La definida megasequía no presenta precedente en el último milenio ((CR2), 2015) .

Tal como se pudo apreciar en la Figura 15, parte importante de las variaciones interanuales de las precipitaciones en Chile central y más específicamente en la cuenca de Nilahue, son modeladas por El Niño – oscilación del Sur (ENOS).

Sin embargo, esto no ha ocurrido durante la última década, estos años se han caracterizado por condiciones neutras en el pacífico ecuatorial (TSM), sin observarse enfriamientos significativos del pacífico tropical, salvo el evento de la Niña en 2010. En 2015 y 2016 el evento del Niño no fue capaz de revertir la situación en Chile central, presentando un SPI negativo para la cuenca de Nilahue durante todo este periodo.

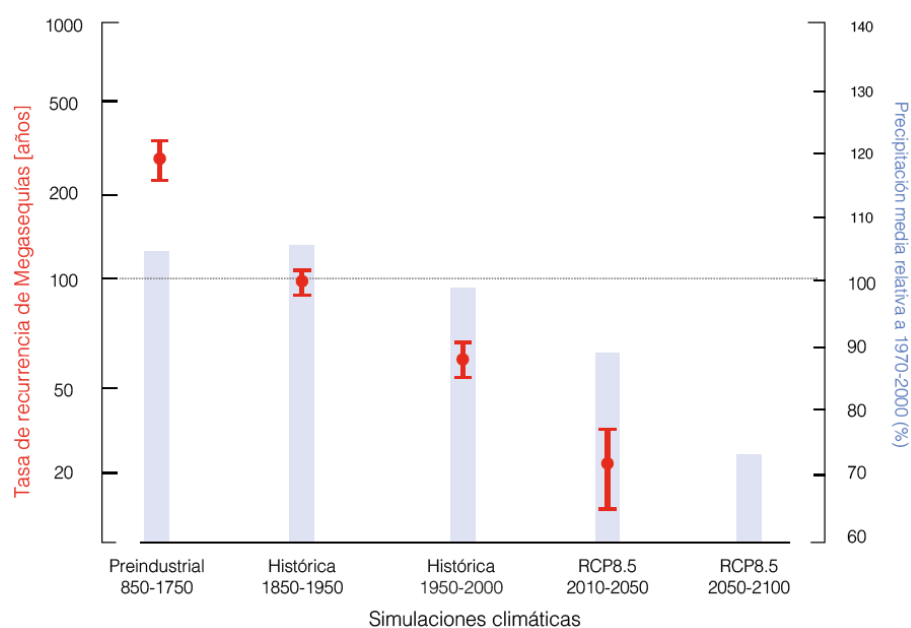


Figura 60 Período de recurrencia en años (escala a la izquierda) de una sequía (>30% de déficit de precipitación en Chile central) de tres o más años de duración, empleando siete modelos climáticos que simulan climas pasados, presentes y futuros. El período de recurrencia se calculó para cada modelo. Los círculos rojos indican el promedio y las líneas verticales la desviación estándar entre modelos. ((CR2), 2015)

El informe a la Nación de La Megasequía 2010-2015 del Centro del Clima y la Resiliencia CR2 establece que cerca de un cuarto del déficit de las precipitaciones durante la megasequía es atribuible al cambio climático antrópico. Según un escenario RCP8.5 (pesimista) se predice que para el periodo 2010-2050 habrá una disminución de cerca de un 10% de las

precipitaciones con una reducción de 70 a 20 años del periodo de retorno de eventos de megasequías.

4 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se puede indicar que los factores hidroclimáticos y más específicamente las precipitaciones son el factor más relevante en las recargas difusas y disponibilidad de agua en el acuífero de Nilahue, donde a una escala anual sólo se producen para años con sobre 360mm de lluvias o para meses con sobre 53mm de precipitaciones.

Los balances anuales realizados y los niveles estáticos medidos en terreno indican la existencia de un acuífero en medio fracturado que alberga al acuífero detrítico de la cuenca de Nilahue, pudiendo representar un factor importante tanto en las recargas como descargas presentes en el acuífero, no pudiendo considerarse como un sistema de bordes impermeables.

El bajo registro de extracciones del acuífero de Nilahue, la poca representatividad de los derechos de agua y la gran cantidad de bombeos fuera de norma han llevado a una situación donde se desconoce el escenario y necesidades hídricas de la zona donde las grandes extracciones de alta profundidad afectan de manera directa la disponibilidad de recursos hídricos en pequeños agricultores y pobladores durante las épocas de verano.

La megasequía 2010-2016 ha llevado a una disminución de un 55% de las recargas en el acuífero de Nilahue. Pronósticos de cambio climático indican que para el periodo 2010-2050 habrá una mayor frecuencia para estos tipos de eventos en Chile centro-sur. Esto significaría una fuerte disminución en las recargas difusas que junto al alza en la demanda hídrica en Chile centro-sur, llevaría a un fuerte riesgo de agotamiento de los recursos hídricos subterráneos.

5 Recomendaciones

Se sugiere un estudio más acabado en la cuenca de Nilahue que incluya mediciones de escorrentía con distintos aforos a lo largo del estero de Nilahue durante todos los meses del año, junto con mediciones periódicas de niveles estáticos durante el transcurso del año para evaluar la evolución del acuífero de Nilahue y su interacción durante el año con los procesos de escorrentía superficial. También debiese incluir análisis con trazadores en distintos puntos de la cuenca para aguas subterráneas y superficiales para determinar procedencia de aguas, flujo de estas y tipos de interacciones con acuíferos en medios fracturados.

Se podría escalar la metodología presente en este trabajo para evaluar la situación en cuencas de similares características en otras zonas del país y para comparar influencias de parámetros hidroclimáticos en distintas zonas del país.

6 Bibliografía

Geo Enciclopedia. (20 de 12 de 2018). *Geo Enciclopedia*. Obtenido de www.geoenciclopedia.com/el-nino-y-la-nina/

(CR2), C. D. (2015). *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. Santiago, Chile: CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA (CR2).

Aguirre, L., & Egert, E. (1962). Las formaciones manganíferas de la región Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. *Revista Minerales (76)*, 25-37.

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., N., G. M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A. P., . . . Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 5817-5846.

ArcGIS Pro. (7 de Enero de 2018). *pro.arcgis*. Obtenido de Sitio ArcGIS pro: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/comparing-interpolation-methods.htm>

Augustyn, Bauer, Duignan, Eldridge, Gregersen, Luebering, . . . Zelazko. (2016, marzo 28). *Mediterranean climate*. Retrieved from Encyclopædia Britannica: <https://www.britannica.com/science/Mediterranean-climate>

Biblioteca nacional digital de Chile. (2018). *Exportación de trigo*. Memoria Chilena.

Charrier, R., Pinto, L., & Rodriguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En *The Geology of Chile* (págs. 21-114). Londres: The geological Society.

- Chesnaux, R., Rafini, S., & Elliott, A.-P. (2012). A numerical investigation to illustrate the consequences of hydraulic connections between granular and fractured-rock aquifers. *Hydrogeology Journal*, 1669-1680.
- CIREN. (10 de 12 de 2018). *Centro de Información de recursos naturales, Ministerio de Agricultura*. Obtenido de Sitio de CIREN: <https://www.ciren.cl/productos/curvas-de-nivel>
- Corvalán, J. (1976). *El Titoniano y Jurásico de Vichuquén_Tilicuray Hualañ, Provincia de CuricóImplicaciones Paleogeológicas*. Santiago, Chile: Congreso Geológico Chileno, N°1 .
- DGA. (2013). *Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la región del libertador General Bernardo O´Higgins y región de Bío-Bío*. Dirección General de Aguas. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Publicas.
- DGA. (2018, Diciembre 20). *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea*. Retrieved from Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>
- DGF, D. d. (Octubre de 2018). Obtenido de CR2- Center for Climate and Resilience Research: <http://www.cr2.cl/>
- Escobar, F., & Aceituno, P. (1998). Influencia del Fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector andino de Chile central durante el invierno. *Bull. Inst. fr. études andines*, 753-759.
- Escobar, F., Guzmán, R., & Vieira, C. (1977). Avance geológicos de las hojas Rancagua-Curcú, Talca-Linares y Concepción-Chillán. *Instituto de Investigaciones Geológicas*.

- Farías, M. (2007). *Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile central durante el Neógeno*, Phd Thesis. Santiago, Chile.
- Fock, A. (2005). *CRONOLOGÍA Y TECTÓNICA DE LA EXHUMACIÓN EN EL NEÓGENO DE LOS ANDES DE CHILE CENTRAL ENTRE LOS 33° Y LOS 34°S, TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS MENCIÓN GEOLOGÍA*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Fundación Chile. (2016). *Reporte Huella Hídrica en Chile, Sectores prioritarios de la Cuenca del río Rapel. Informe Final*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- García, N., & Ormazabal, C. (2008). *Árboles Nativos de Chile*. Santiago, Chile: Enersis S.A. .
- GARRIDO, A., LLAMAS, R., VARELA-ORTEGA, C., NOVO, P., & RODRÍGUEZ-CASADO, R. (2010). *Water footprint and virtual water trade in Spain*. Londres: Springer.
- Gonzalga, C. (2 de January de 2014). "Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador". Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/34487/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Gordijn, P., & Ward, D. (2012). The effects of fire on woody plant encroachment are exacerbated by succession of trees of decreased palatability. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 411–422.

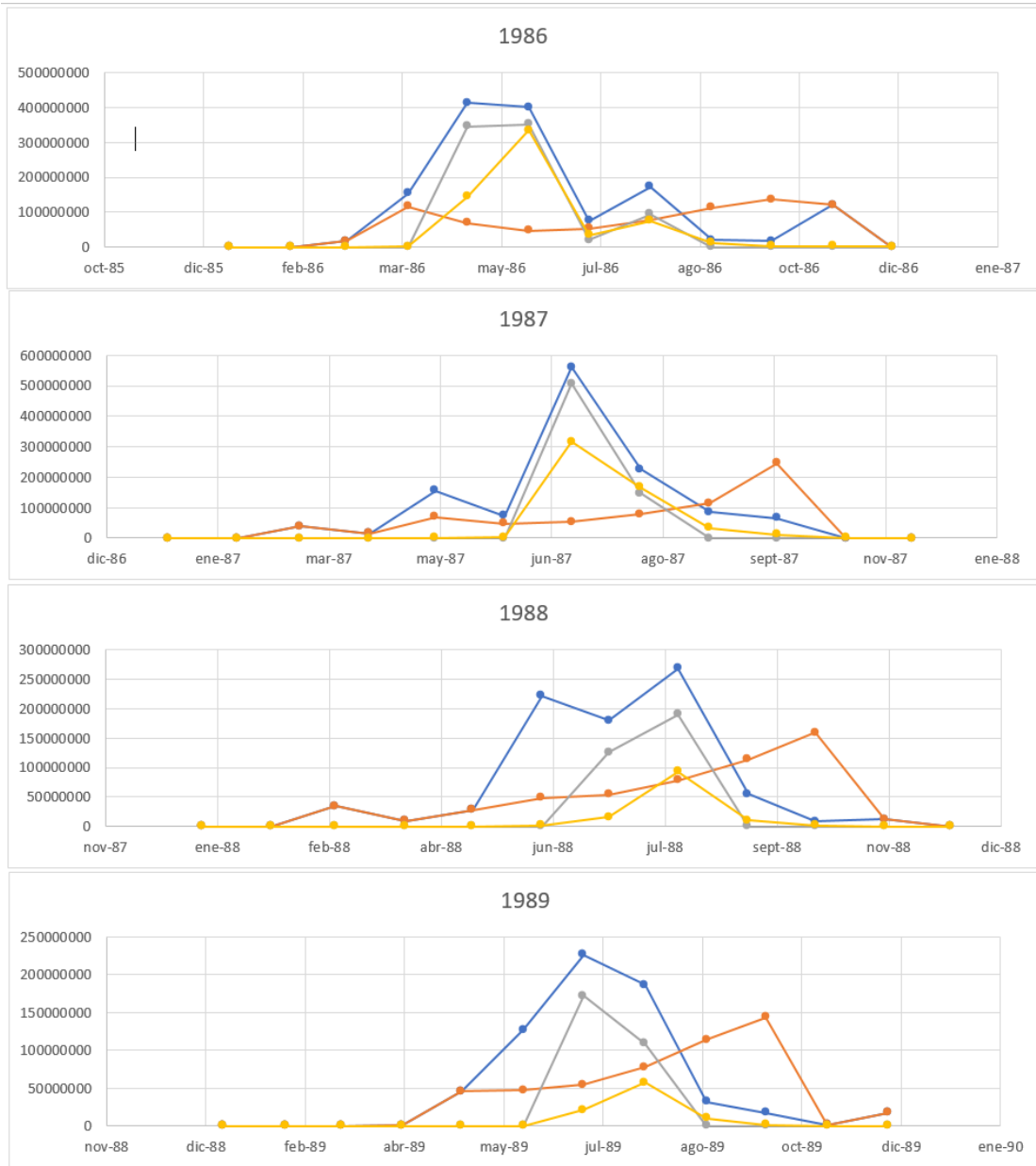
- Gumbel, E. (1958). *Statistics of Extremes*. Nueva York: Columbia University Press.
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 96-99.
- Hauser Yung, A. (1990). *Carta hidrogeológica de Chile escala 1:250.000, Hoja Rancagua, VI Región*. Servicio nacional de geología minería.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., & Aldaya, M. a. (2011). The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. *Earthscan, Londres, Reino Unido*.
- Ibáñez, J. J. (5 de Julio de 2006). El Agua en el Suelo 4: Textura del Suelo y Propiedades Hídricas. Obtenido de <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/07/05/33887>
- Jourde, H., Rochette, R., Blanc, M. B., Ruelland, D., Freixas, G., & Oyarzun, R. (2011). . Relative contribution of groundwater and surface water fluxes in response to climate variability over a mountainous catchment in the Chilean Andes. *Cold regions hydrology in a changing climate.*, 180-188.
- Lee, A. (25 de Junio de 2010). Chile ranks fifth globally in wine exports and eighth in production. *Santiago Times*.
- Lira, E., Sielfeld, G., Bosch, A., Castellón, R., Cumming, D., Figueroa, R., . . . Yañez, G. (2015). reactivación de fallas de larga vida transversales al orógeno andino. perspectivas desde la Falla Pichilemu. *XIV Congreso Geológico Chileno*, 382-385.
- Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. (2002). A drought climatology for Europe. *Int J Climatol*, 22, 1571-1592.

- Loewe, V., Gysling, J., Gonzalez, M., & Cerda, I. (2008). *Línea Base de Información del Sector Forestal de las Regiones de O'Higgins y del Maule*.
- Moreno, T., & Gibbons, W. (. (2007). *The geology of Chile*. Geological society of London.
- National Weather Service. (8 de Enero de 2019). Obtenido de Climate Prediction Center:
http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Rodriguez, N., Díaz-Alvarado, J., & Fuentes, P. (2015). Texturas granulíticas en los granitoides del área norte del plutón Flamenco, Batolito de la Costa, norte de Chile. Auto-granulitización durante el proceso de ensamblaje del complejo intrusivo. *XIV Congreso Geológico Chileno*.
- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H., & Harían, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement andretrogadation (greenwave effect) of natural vegetation*. Greenbelt, USA: NASA/GSFCT.
- Sánchez, E., Torres, M., Palacios, A., Aguilar, M., Pino, S., & Granado, L. (2000). *2000. Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignación de Modelos de Combustible para la Estimación del Riesgo de Incendios en Andalucía. Tecnologías Geográficas para el desarrollo Sostenible* . Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá.
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile, Versión Digital*. Santiago, Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, scale 1: 1,000,000. Santiago.

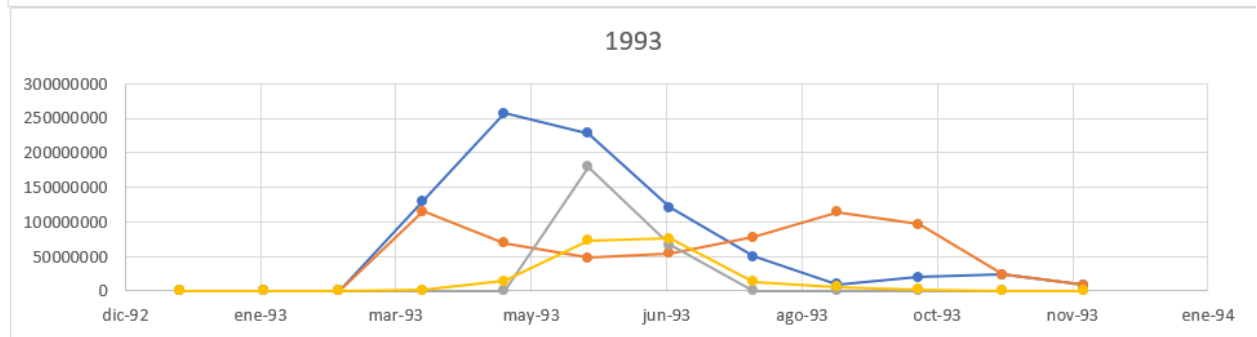
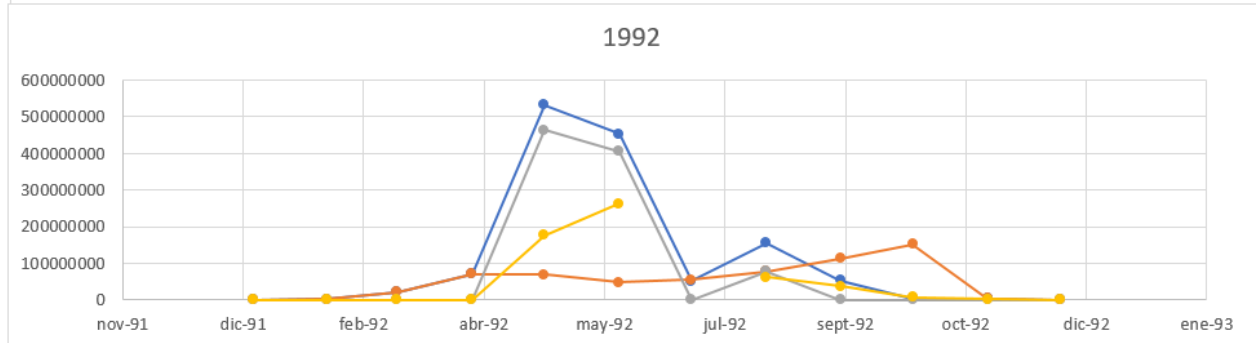
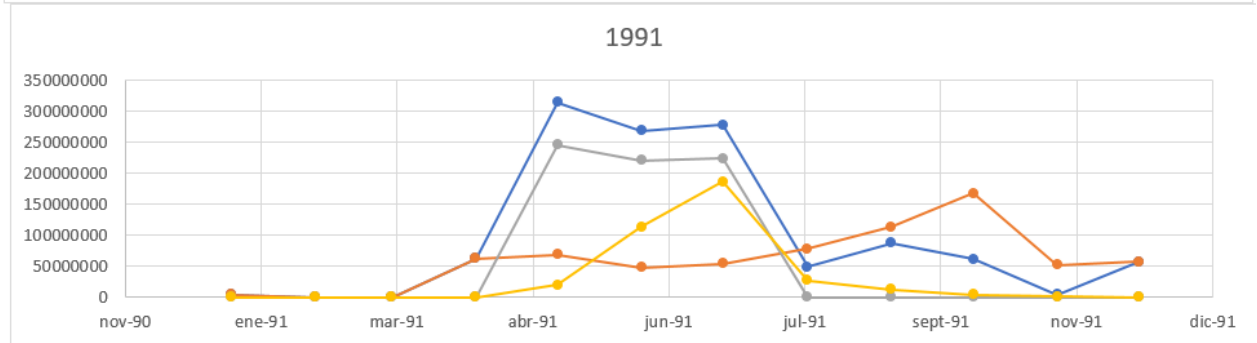
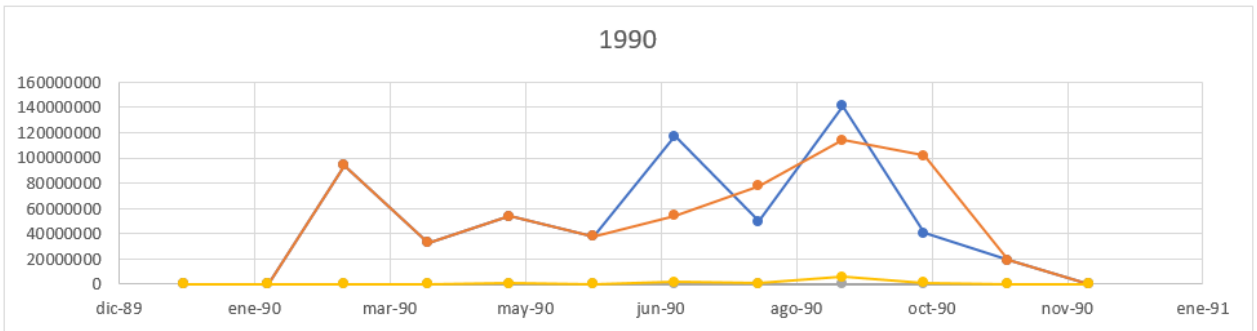
- Sibson, R. (1981). A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. In V. Barnett, *Interpreting Multivariate Data*, John Wiley & Sons (pp. 21-36). Nueva York.
- Uribe, H., Arumí, J. L., González, L., & Salgado, L. (2003, Septiembre). Balances hidrológicos para estimar recarga de acuíferos en el Secano interior, Chile. *Ingeniería hidráulica en mexico*, vol. XVIII, 17-28.
- Van Loon, A. F. (2 de Julio de 2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2, 359-392. doi:10.1002/wat2.1085

7 Anexos

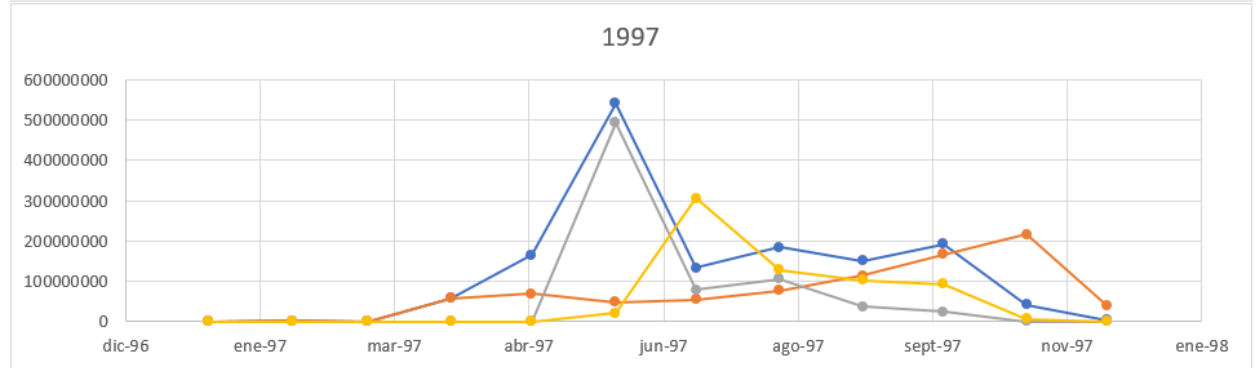
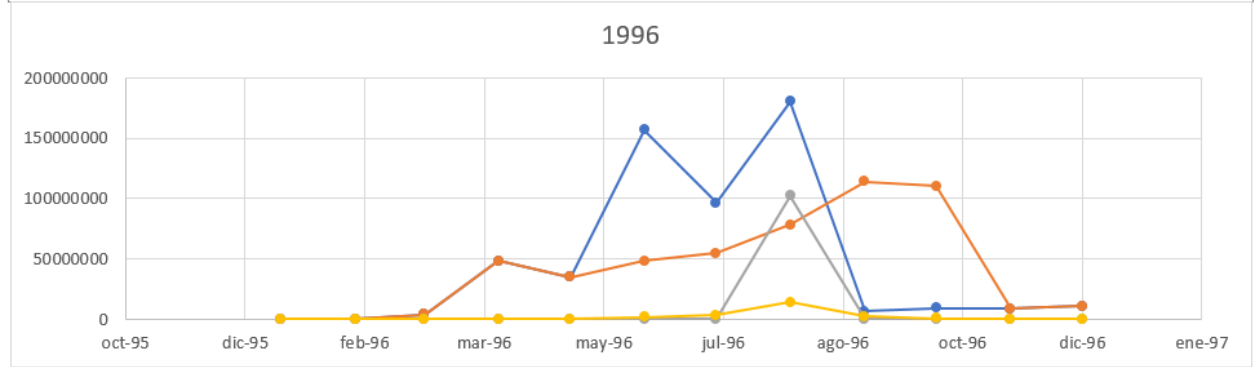
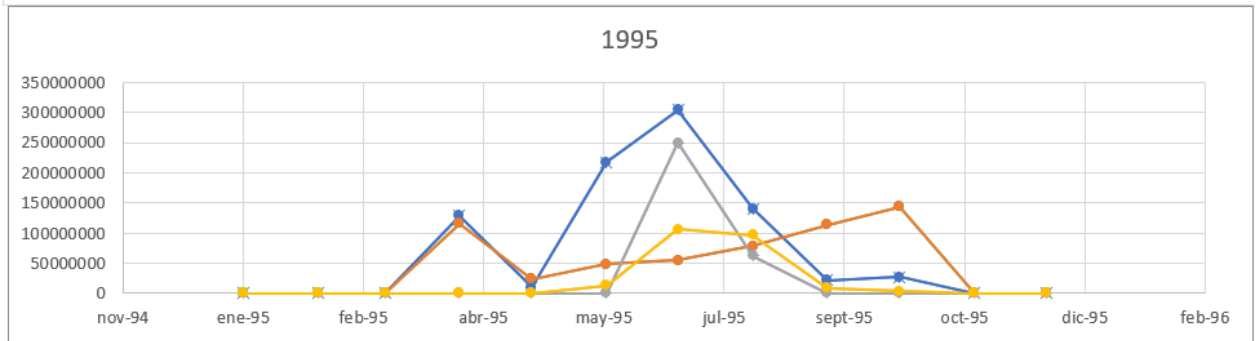
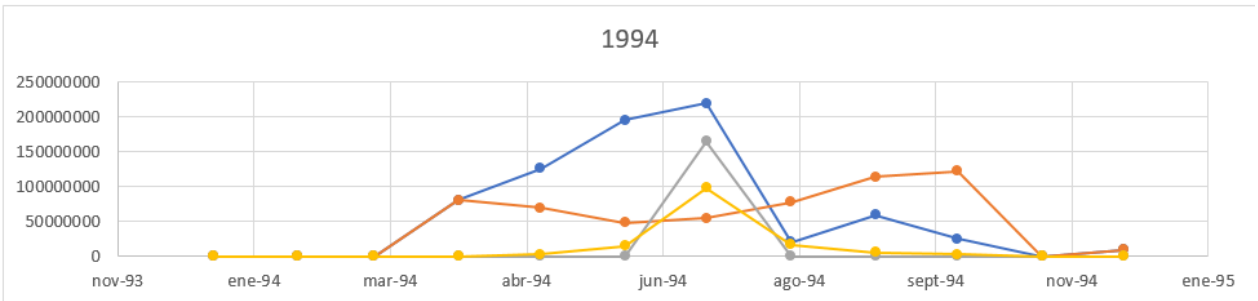
7.1 Gráficos valores mensuales Pp, ETR, Inf. Prof, Esc. Sup para cuenca de Nilahue



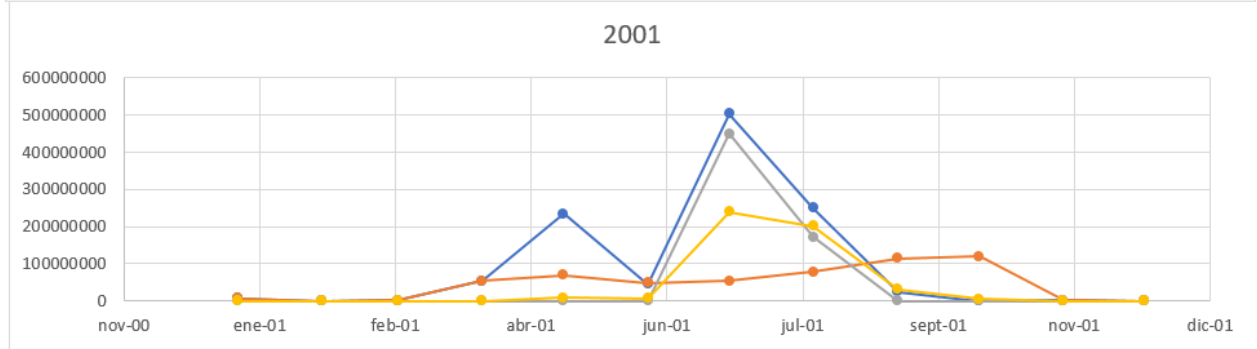
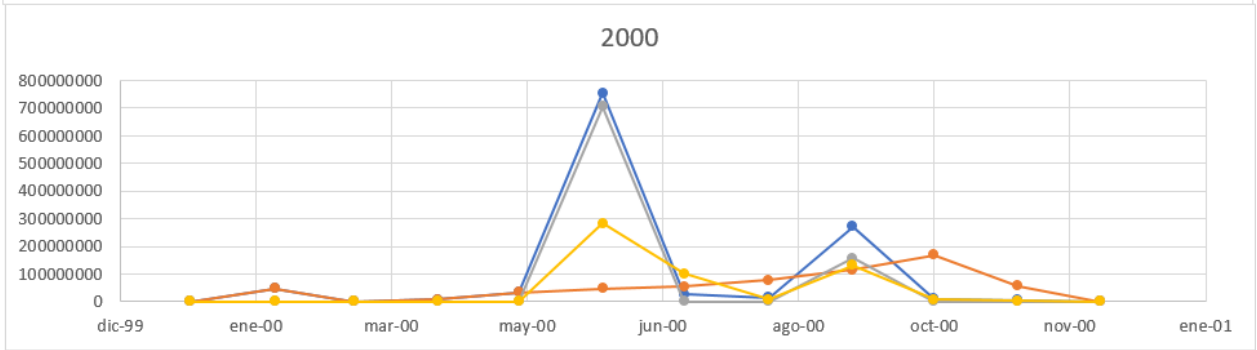
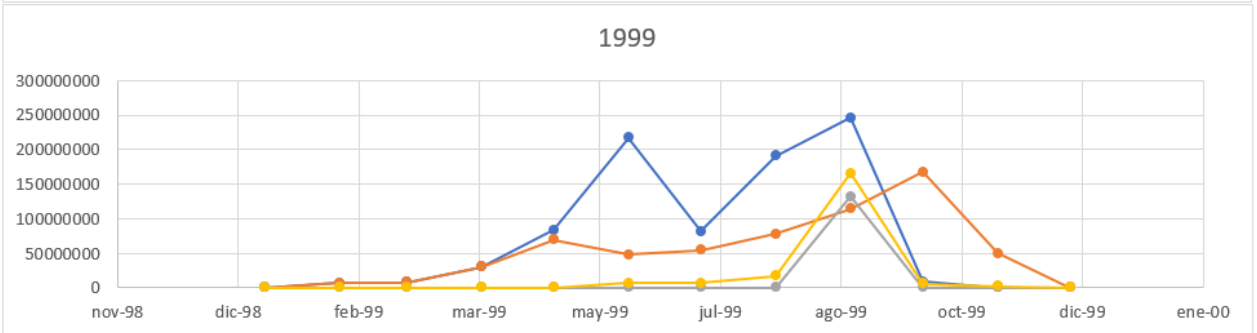
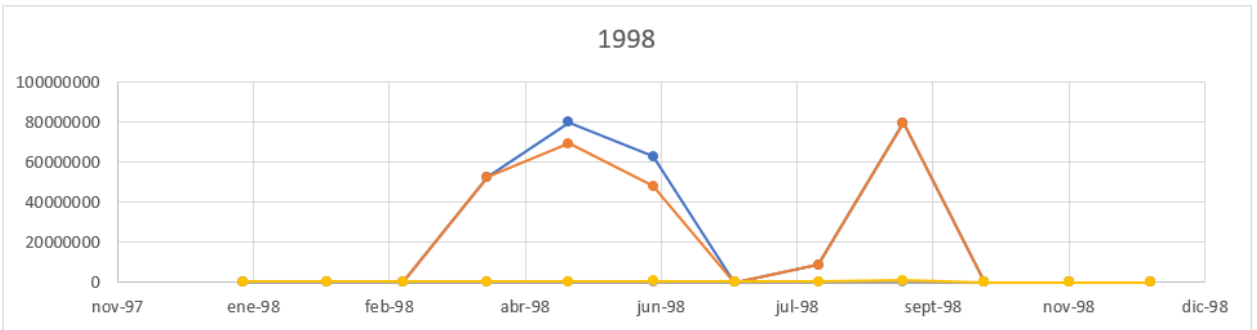
- Precipitaciones (m3)
- ETR total (m3)
- Infiltración Profunda (m3)
- Vol. Escorrentía (m3)



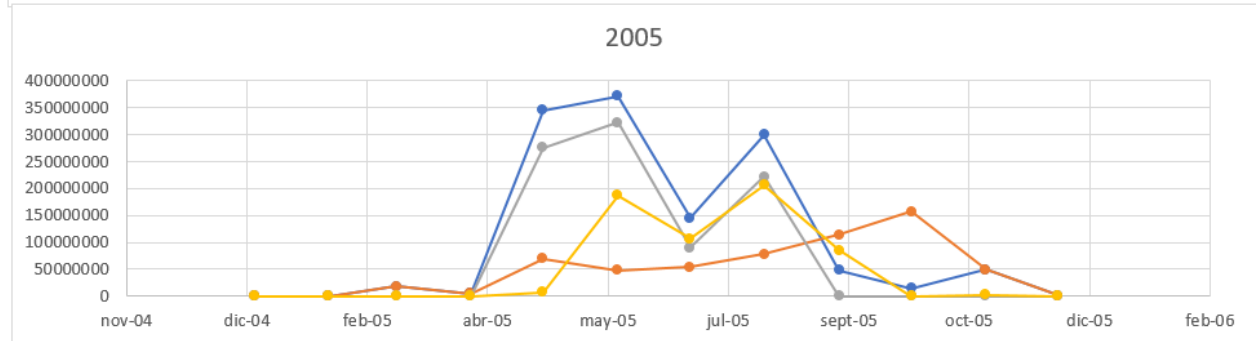
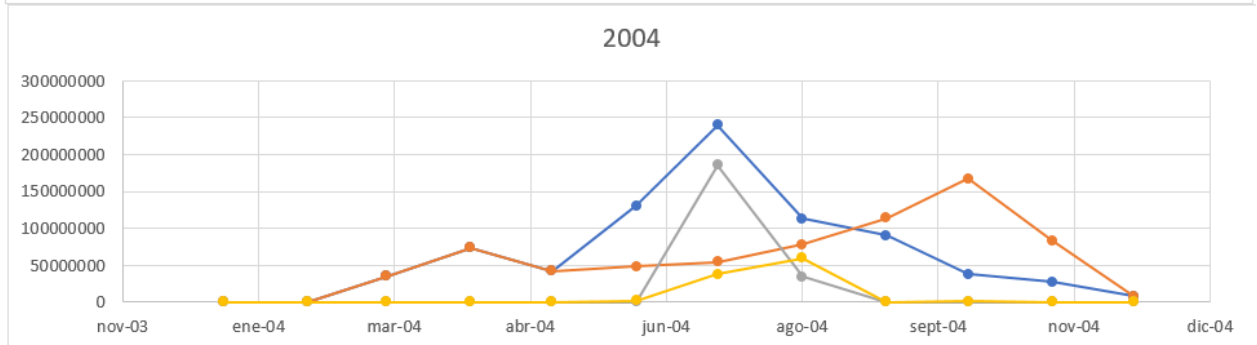
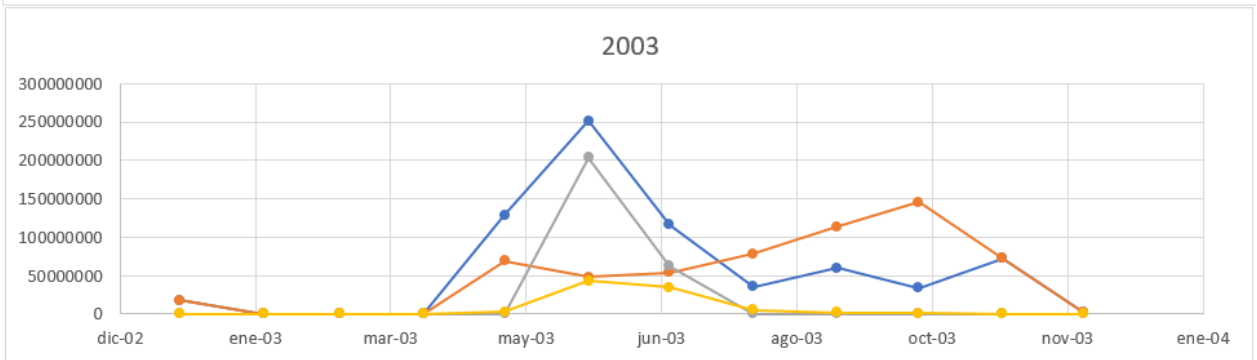
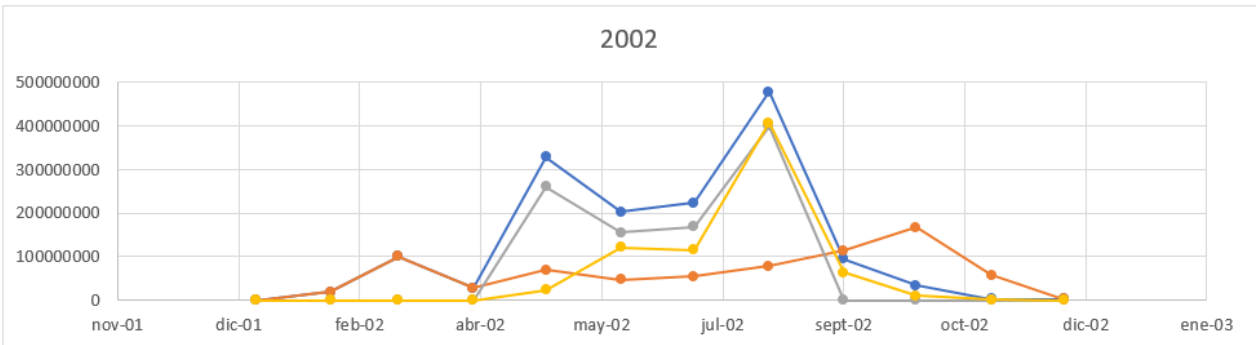
- Precipitaciones (m3)
- ETR total (m3)
- Infiltración Profunda (m3)
- Vol. Escorrentía (m3)



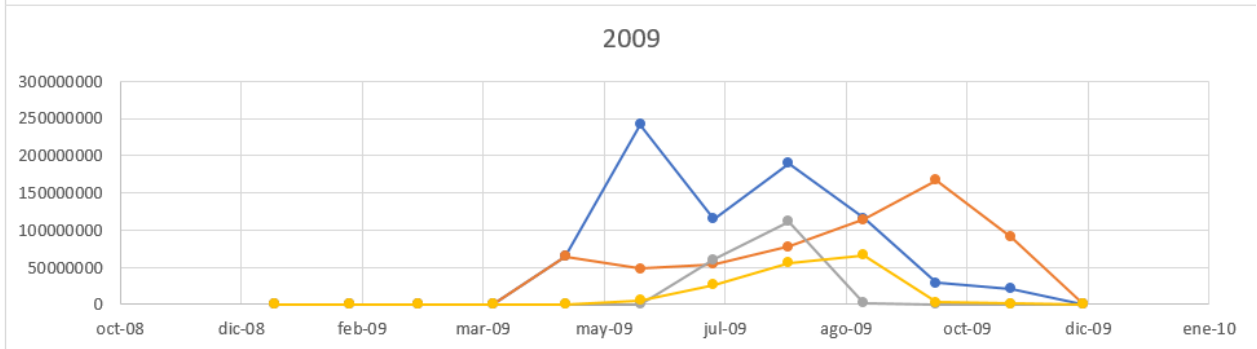
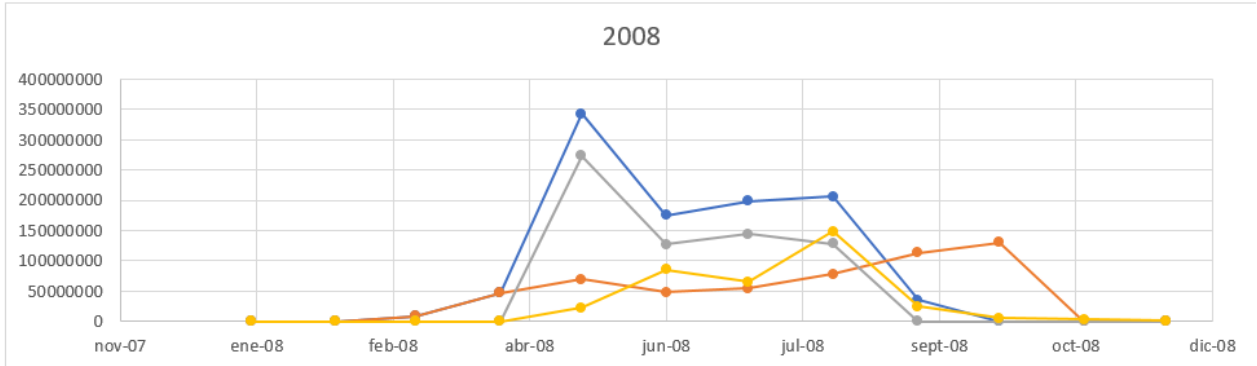
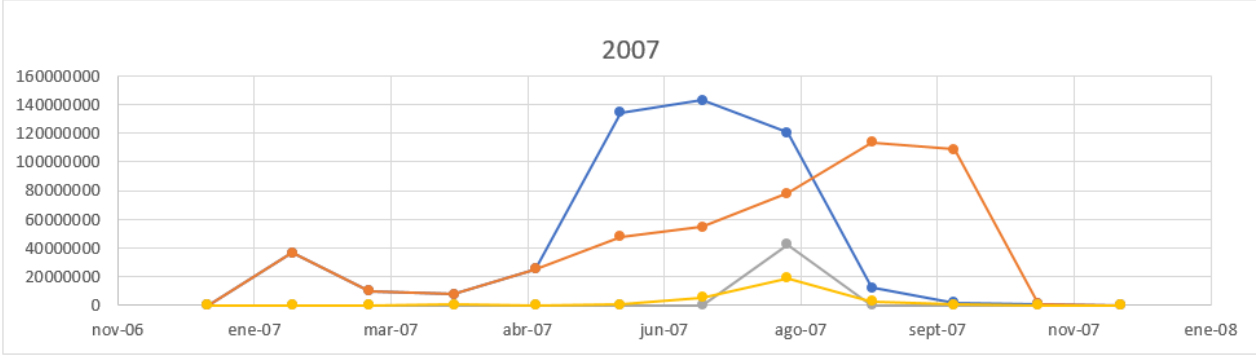
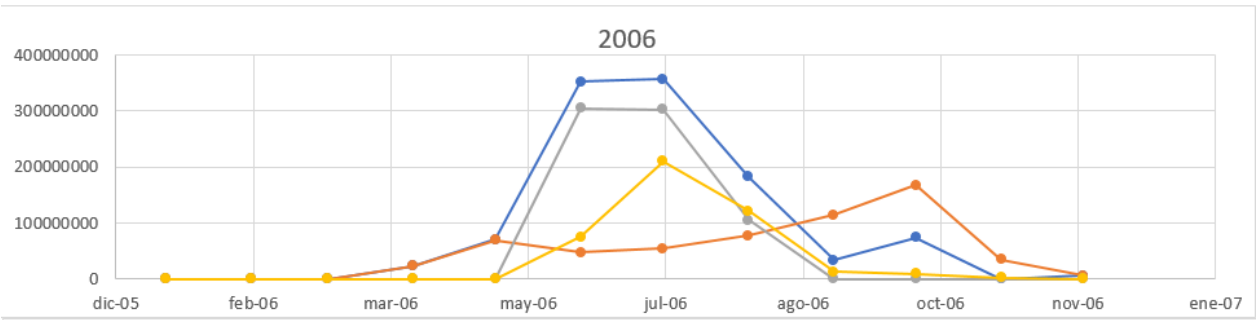
- Precipitaciones (m3)
- ETR total (m3)
- Infiltración Profunda (m3)
- Vol. Escorrentía (m3)



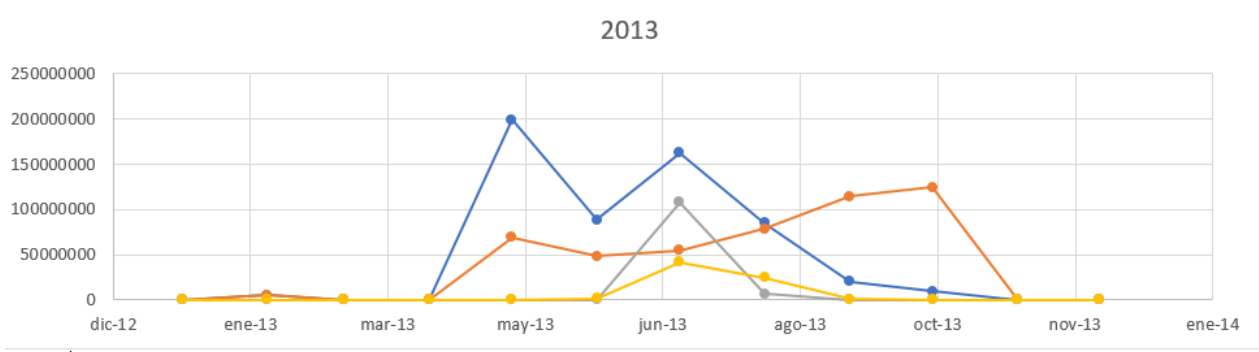
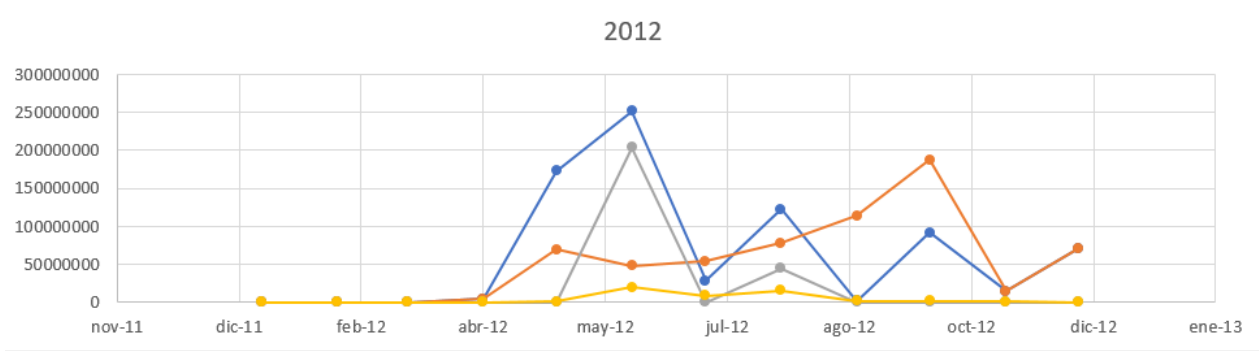
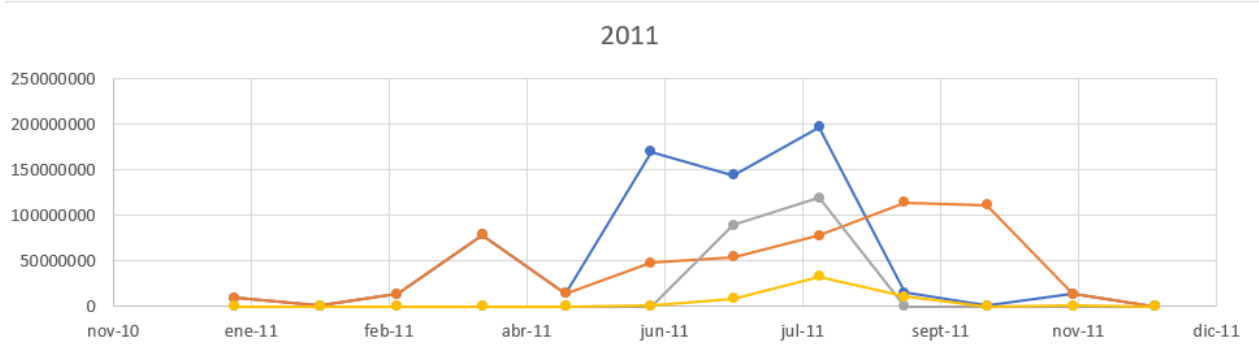
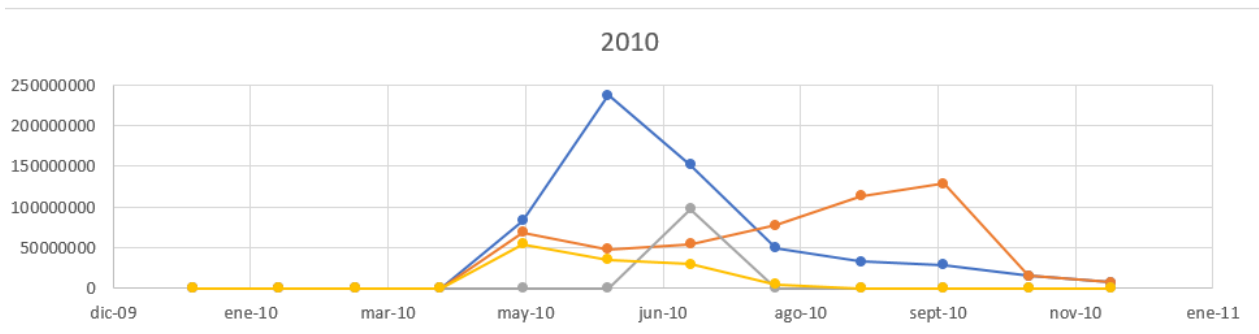
- Precipitaciones (m3)
- ETR total (m3)
- Infiltración Profunda (m3)
- Vol. Escorrentía (m3)



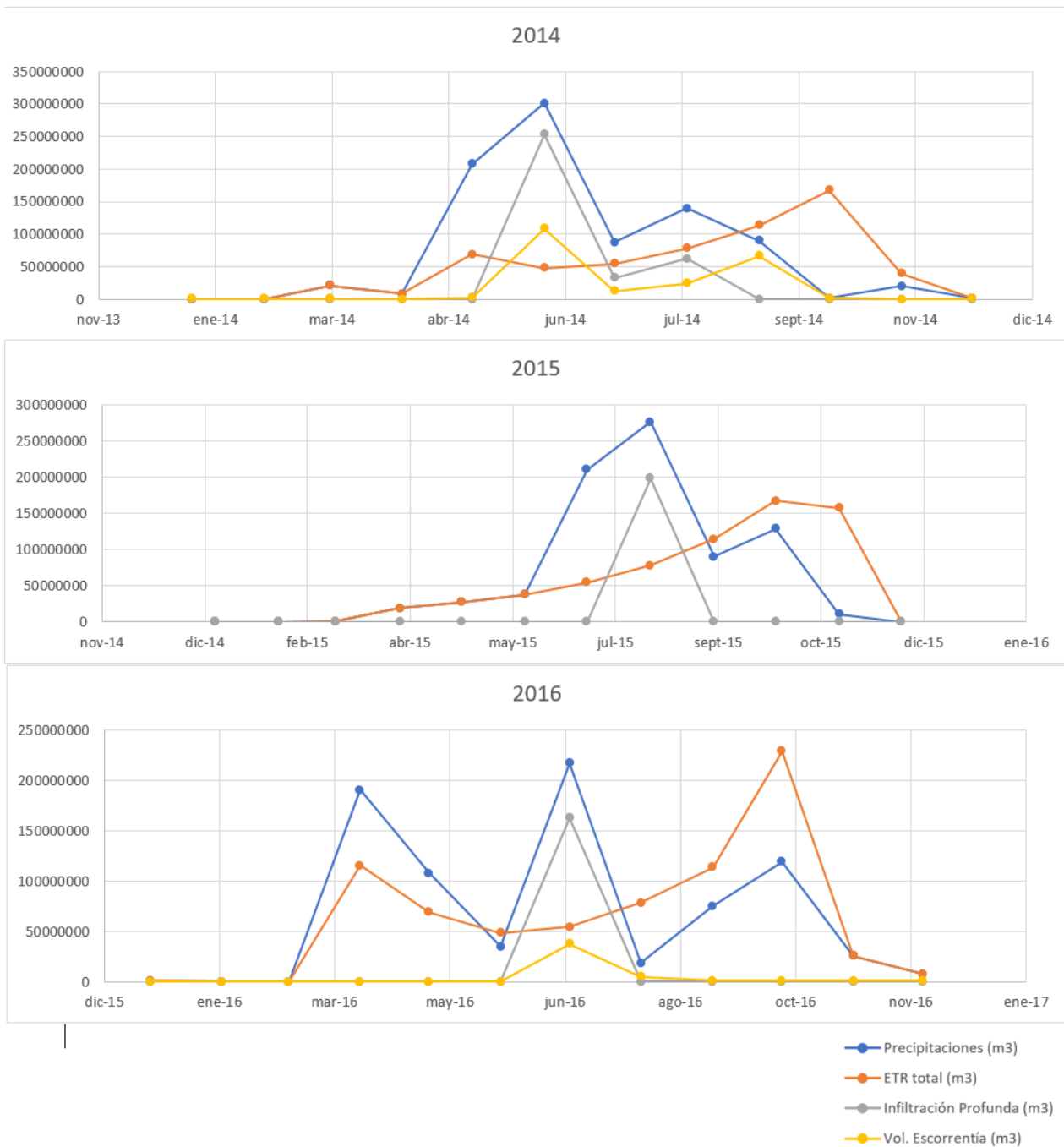
- Precipitaciones (m3)
- ETR total (m3)
- Infiltración Profunda (m3)
- Vol. Escorrentía (m3)



- Precipitaciones (m3)
- ETR total (m3)
- Infiltración Profunda (m3)
- Vol. Escorrentía (m3)



- Precipitaciones (m3)
- ETR total (m3)
- Infiltración Profunda (m3)
- Vol. Escorrentía (m3)



7.2 Cálculos y valores de parámetros históricos cuenca de Nilahue

	ene-86	feb-86	mar-86	abr-86	may-86	jun-86	jul-86	ago-86	sept-86	oct-86	nov-86	dic-86	
Precipitaciones (m3)	0	215858,8	17515774	152648761	4,12E+08	4E+08	75495653	1,73E+08	22871997	19104077	1,21E+08	0	1393611129
precipitaciones (mm)	0	0,155294	12,60131	109,81952	296,6512	287,4835	54,31355	124,5816	16,45471	13,74397	86,79571	0	1002,60038
Vol. Esc (m3)	96768	24192	72576	2128896	1,44E+08	3,34E+08	34667136	76398336	12918528	3096576	4402944	1403136	613992960

ETP (mm)	200,2687	162,7979	136,4713	82,96026	49,78579	34,575	39,14605	56,12237	81,87316	120,3347	155,3203	190,7082	1310,363684
Reserva (150mm)	0	0	0	0	99,961	150	150	150	132,8118	13,84743	0	0	696,6202099
Variación de la reserva (mm)	0	0	0	0	99,961	50,039	0	0	-17,1882	-118,964	-13,8474	0	0
ETR prec. (mm)	0	0	14,91812	5,934869	49,78579	34,575	39,14605	56,12237	64,68494	1,370391	14,18738	0,841689	281,5666012
ETR tot. (mm)	0	0	14,91812	5,934869	49,78579	34,575	39,14605	56,12237	81,87316	120,3347	28,03482	0,841689	431,5666012
ETR tot. (m3)	0	0	20736138	8249448	69202078	48059133	54412880	78009902	1,14E+08	1,67E+08	38968300	1169945	599876110,3
Infiltración Prof. (mm)	0	0	0	0	0	181,9109	23,54456	44,5708	0	0	0	0	250,0262514
Inf. Prof. (m3)	0	0	0	0	0	2,53E+08	32726853	61953261	0	0	0	0	347535640,4

	ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15	jul-15	ago-15	sept-15	oct-15	nov-15	dic-15	Total Anual
Precipitaciones (m3)	0	0	882783,8	19055199	27653729	37898020	2,1E+08	2,76E+08	90331959	1,29E+08	10523126	0	801079892,8
precipitaciones (mm)	0	0	0,635098	13,70881	19,89482	27,26483	151,2384	198,49	64,98718	92,52815	7,570613	0	576,3178775
Vol. Esc (m3)	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	0
ETP (mm)	200,2687	162,7979	136,4713	82,96026	49,78579	34,575	39,14605	56,12237	81,87316	120,3347	155,3203	190,7082	1310,363684
Reserva (150mm)	0	0	0	0	0	0	112,0923	150	133,114	105,3074	0	0	500,5137807
Variación de la reserva (mm)	0	0	0	0	0	0	112,0923	37,90768	-16,886	-27,8066	-105,307	0	0
ETR prec. (mm)	0	0	0,635098	13,70881	19,89482	27,26483	39,14605	56,12237	64,98718	92,52815	7,570613	0	321,8579224
ETR tot. (mm)	0	0	0,635098	13,70881	19,89482	27,26483	39,14605	56,12237	81,87316	120,3347	112,8781	0	471,8579224
ETR tot. (m3)	0	0	882783,8	19055199	27653729	37898020	54412880	78009902	1,14E+08	1,67E+08	1,57E+08	0	655880910
Infiltración Prof. (mm)	0	0	0	0	0	0	0	142,3676	0	0	0	0	142,3676351
Inf. Prof. (m3)	0	0	0	0	0	0	0	1,98E+08	0	0	0	0	197890529,4

	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sept-16	oct-16	nov-16	dic-16	Total Anual
Precipitaciones (m3)	1176027	0	0	1,9E+08	1,08E+08	34763515	2,17E+08	18319736	74871711	1,19E+08	25781920	7391656	796311000,9
precipitaciones (mm)	0,846065	0	0	136,9333	77,39075	25,00978	156,1015	13,1797	53,86467	85,69531	18,54819	5,317751	572,8870116
Vol. Esc (m3)	0	0	0	0	0	0	37352448	4620672	1088640	1088640	870912	1040256	46061568
ETP (mm)	200,2687	162,7979	136,4713	82,96026	49,78579	34,575	39,14605	56,12237	81,87316	120,3347	155,3203	190,7082	1310,363684
Reserva (150mm)	0	0	0	53,97302	81,57799	72,01277	150	107,0573	79,04884	0	0	0	543,6699495
Variación de la reserva (mm)	0	0	0	53,97302	27,60497	-9,56522	77,98723	-42,9427	-28,0085	-79,0488	0	0	0
ETR prec. (mm)	0,846065	0	0	82,96026	49,78579	25,00978	39,14605	13,1797	53,86467	85,69531	18,54819	5,317751	374,3535771
ETR tot. (mm)	0,846065	0	0	82,96026	49,78579	34,575	39,14605	56,12237	81,87316	164,7442	18,54819	5,317751	533,9187932
ETR tot. (m3)	1176027	0	0	1,15E+08	69202078	48059133	54412880	78009902	1,14E+08	2,29E+08	25781920	7391656	742145309,6
Infiltración Prof. (mm)	0	0	0	0	0	0	116,9554	0	0	0	0	0	116,9554487
Inf. Prof. (m3)	0	0	0	0	0	0	1,63E+08	0	0	0	0	0	162567676,6

7.3 Promedios de temperaturas mensuales calculados para estación Curicó

Mes	1957	1958	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1973	1974
Enero		20,79355	21,04444		21,15	19,95		21,11818	23,35	22,44516

Marzo	16,57742	19,23333	18,5871	17,32258	19,41034	19,0069	19,29231	21,54	20,06667	20,15
Abril	14,23	11,84	15,32667	13,09	14,28	15,43103	19,63333			
Mayo	9,806452	9,090323	11,97742	11,68065	11,51034	11,46774				
Junio	9,386667	6,410345	9,22069	8,256667	10,04286	9,865517				
Julio	6,306452	8,154839	8,193548	7,6	7,783333	6,86	11,9		8,5	
Agosto	8,016129	9,416129	9,63	7,723333	11,125	10,32903				
Septiembre	12,27333	10,8	11,58621	10,96333	13,04	12,30333			17,9	
Octubre	14,61613	13,54	13,00968	15,80645	15,936	16,45806	16,975	15,54118	17,35882	15,04118
Noviembre	16,99333	17,55	16,55667	17,34667	20,725	19,34444	19,136	18,51852	19,904	18,904
Diciembre	20,39677	20,84643	20,65333	20,54194	22,96667	22,9	24,45161	22,12	21,20357	22,575
# de meses con datos	12	12	12	12	12	12	6	6	8	6
Promedio anual	14,36925	14,31414	15,19491	14,55243	16,04962	15,82792				

Mes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Enero	23,66452	23,56957	23,76129	25,08065	24,86333	24,22333	24,51613	25,01935	23,85806	21,36129
Febrero	23,68077	19,94286	21,43704	24,03704	23,25	22,14231	23,44643	24,48621	23,03333	19,85
Marzo	19,99167	20,7625	19,55714	21,27083	22,18182	21,09032	20,13871	22,16774	20,06071	17,16
Abril						15,56667	14,88667	16,54667	13,81852	11,58
Mayo						11,40968	11,5871	13,91613	9,314286	11,19333
Junio						10,24333	9,576667	10,77333	7,155172	7,55
Julio						7,735484	8,380645	7,777778	7,558065	7,766667
Agosto				9,2		11,3871	10,62581		8,093548	9,941935
Septiembre						14,22857	14,47667	13,9087	10,48276	11,68333
Octubre	16,34091	16,72667	16,8	17,44375	21,4	16,82903	17,24839	13,73667	13,74839	14,90645
Noviembre	20,144	19,092	20,06429	21,51852	18,14375	20,27	20,37667	19,56296	16,92667	16,74667
Diciembre	22,0129	21,72258	22,26207	23,44194	22,84839	21,16129	24,63871	20,53548	20,22581	18,88387
# de meses con datos	6	6	6	7	6	12	12	11	12	12
Promedio anual						16,35726	16,65821		14,52294	14,05196

Mes	2015	2016	2017	2018	Promedio mens. Hist
Enero	21,62903	21,65161	25,33333	21,61935	21,40733371
Febrero	20,63214	21,13448	24,7625	21,71786	20,00075912
Marzo	19,92903	18,91364	20	17,96129	16,93021301
Abril	14,44333		16,8	13,68	13,20617857
Mayo	10,06452			10,80323	10,11581765
Junio	8,206667	7,8		6,716667	8,63557672
Julio	8,180645		8,8	7,519355	7,967196096
Agosto	10,40323	7,5	11,05	8,693548	8,733043466
Septiembre	11,04138		11,30667	12,07586	10,67516489
Octubre	12,86774		13,35806	13,68065	13,64402498
Noviembre	16,17667		17,38333		16,94291578
Diciembre	19,56071		20,65161		18,80404191
# de meses con datos	12	5	10	10	
Promedio anual	14,42792				13,92185549