



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA
TIERRA



**EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE LA
DISPONIBILIDAD HÍDRICA PARA EL
PERÍODO 2030 - 2050 EN LA CUENCA DEL RÍO
DUQUECO EN BASE AL MODELO
CLIMÁTICO IPLS - CM5A - LR, REGIÓN DEL
BIOBÍO, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geóloga

María Paz Santibáñez Gallegos

Profesora Patrocinante: MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez

Profesoras Comisión: Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo

Dra. Alejandra Patricia Stehr Gesche

Concepción, 2024

“Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia”

Proverbios 2:6

RESUMEN

El cambio climático en el territorio nacional ha provocado un aumento de temperatura y déficit de precipitaciones, lo que afecta directamente la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos. Se proyecta que esta situación empeore en los escenarios climáticos a corto y largo plazo, lo que perjudicará a la salud humana, la seguridad alimentaria e hídrica, a los sectores productivos, a los ecosistemas, entre otros.

Chile está siendo afectado por una megasequía, por lo que prever el potencial impacto del cambio climático en el futuro sobre los recursos hídricos es fundamental. Para esto nos ayudan los modelos climáticos, mediante los cuales se puede estimar la variación de agua superficial o subterránea a nivel global o local para diferentes escenarios y escalas de tiempo.

El área de estudio corresponde al cauce del río Duqueco, que es parte de la cuenca del río Biobío, en la región homónima. Comprende depósitos de origen fluvio - aluvial del Cuaternario ubicados en cauces de ríos o esteros actuales o pasados, los que constituyen una unidad de alta importancia hidrogeológica; rocas sedimentarias del Cuaternario de génesis glacio - lacustre depositadas en la depresión intermedia y la precordillera relacionadas a una unidad de media a baja importancia hidrogeológica; y rocas ígneas con aporte sedimentario del Cenozoico que están en la cordillera de los Andes, esta unidad no posee importancia hidrogeológica.

Para este estudio se trabajó con el modelo hidrológico SWAT, para lo que se requirió datos de variables espaciales, meteorológicas e hidrológicas de la cuenca del río Duqueco. Luego, se calibró y validó el modelo con datos de caudales medios mensuales de 2 estaciones fluviométricas y se re - validó con datos mensuales del nivel estático de un pozo de la DGA. Ya comprobado el desempeño del modelo, se calculó el caudal y la recarga de acuíferos media mensual de la cuenca para el periodo 2000 - 2020. Este valor fue comparado con los simulados por el modelo climático IPLS - MC5A - LR, para el periodo 2030 - 2050 en un escenario de muy altas emisiones de gases de efecto invernadero, cuyo resultado determinó una reducción del caudal del 12,79 % y de la recarga de acuíferos del 3,28 %, siendo la estación invernal y la naciente del río Duqueco los más afectados.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Ubicación y accesos.....	2
1.4. Trabajos anteriores.....	4
1.5. Agradecimientos.....	5
2. Cambio Climático.....	6
2.1. Temperatura.....	6
2.2. Precipitación.....	7
2.3. Proyecciones.....	8
2.4. Recurso Hídrico.....	10
2.4.1. Aguas Subterráneas.....	12
3. MARCO GEOMORFOLÓGICO LOCAL.....	14
4. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO.....	17
4.1. Marco Geológico Local.....	17
4.1.1. Rocas Estratificadas.....	17
4.1.1.1. Formación Cura - Mallín (OM2c)	17
4.1.1.2. Lavas de Huelehueico (Mlh)	19
4.1.1.3. Formación Trapa - Trapa (Mtt).....	20
4.1.1.4. Formación Cola de Zorro (PP13).....	21
4.1.1.5. Formación La Montaña (PIHm).....	22
4.1.1.6. Sedimentos Glacio - Lacustres Collipulli - Angol (PIHca).....	23
4.1.2. Rocas Intrusivas.....	23
4.1.2.1. Intrusivos de granodiorita - diorita (Mg)	23
4.1.3. Depósitos No Consolidados.....	23
4.1.3.1. Sedimentos de terrazas fluviales (Q1t).....	23
4.1.3.2. Depósitos fluvio - aluviales antiguos (Q1fa).....	24
4.1.3.3. Depósitos fluvio - aluviales actuales (Q1).....	24
4.2. Unidades Hidrogeológicas.....	24
5. METODOLOGÍA.....	26
5.1. Modelo SWAT.....	26
5.1.1. Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico.....	27
5.1.2. Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico.....	28
5.1.3. Datos de Entrada de la Cuenca Duqueco.....	29
5.1.3.1. DEM.....	29
5.1.3.2. Uso de suelo.....	30
5.1.3.3. Serie de suelo.....	31
5.1.3.4. Meteorología.....	32
5.1.3.5. Extracción de agua.....	33
5.2. Calibración y Validación.....	34
5.2.1. Calibración y Validación de la Cuenca Duqueco.....	37

5.2.1.1. Validación con extracción de agua subterránea.....	38
5.3. Modelo de Cambio Climático.....	39
6. RESULTADOS.....	40
6.1. Calibración y Validación.....	40
6.1.1. Re - validación.....	42
6.2. Cambio Climático en la Cuenca Duqueco.....	43
7. DISCUSIÓN.....	46
8. CONCLUSIONES.....	51
9. REFERENCIAS.....	52
ANEXOS.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación del área de estudio.....	3
1. 2. Mapa de la cuenca del río Biobío y del río Duqueco.....	4
2. 1. Cambio de temperatura global en el periodo 1850 - 2020.....	6
2. 2. Promedios de la temperatura media en Chile, respecto al promedio 1961 - 1990...	7
2. 3. Cambio en la precipitación anual sobre la tierra para el periodo 1951 - 2010.....	7
2. 4. Anomalía porcentual de precipitación total anual respecto al promedio 1961 - 1990	8
2. 5. Cambio en la temperatura media en superficie y la precipitación media global.....	9
2. 6. Representación esquemática de los impactos en diversos sectores del Chile y su relación con las proyecciones climáticas futuras.....	10
2. 7. Anomalías anuales relativas de precipitación y caudal a escala de cuenca...	11
2. 8. Tendencia de la disponibilidad de agua en un escenario de calentamiento de 2 °C.....	12
2. 9. Impacto del cambio climático en la recarga anual de agua subterránea para el 2050.....	13
3. 1. Unidades geomorfológicas de la región del Biobío.....	14
4. 1. Mapa geológico del área de estudio y alrededores.....	18
4. 2. Sistema de clasificación de acuíferos.....	24
5. 1. Representación del ciclo hidrológico en SWAT.....	28
5. 2. Mapa con la delimitación de la cuenca y subcuencas del río Duqueco.....	29
5. 3. Mapa usos de suelo.....	30
5. 4. Mapa de series de suelo.....	31
5. 5. Mapa de estaciones meteorológicas.....	32
5. 6. Mapa de extracciones de agua subterráneas y superficiales.....	33
5. 7. Mapa de estaciones fluviométricas.....	37
5. 8. Mapa pozos DGA con información mensual de nivel estático.....	39
6. 1. Caudales de la estación Villacura versus simulados para el periodo de calibración y validación.....	41
6. 2. Recarga del acuífero y el nivel estático del pozo.....	42
6. 3. Variación del caudal medio para el 2030 - 2050 por subcuenca.....	43
6. 4. Hidrograma mensual para el periodo 2030 - 2050 versus el 2000 - 2020.....	44

6.	5.	Variación de la recarga media para el 2030 - 2050 por subcuenca.....	45
6.	6.	Recarga mensual para el periodo 2030 - 2050 versus el 2000 - 2020.....	45
7.	1.	Precipitación mensual de CHIRPS versus la estación Los Ángeles.....	47
7.	2.	Caudal de la estación Cerrillos versus el simulado previo a la calibración..	47
7.	3.	Variación de caudal medio anual para el periodo 2030 - 2060.....	49
7.	4.	Variación de la recarga media para el 2030 - 2050 y extracciones de agua subterránea por subcuenca.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página	
5. 1.	Límites de desempeño de medidas de bondad de ajuste.....	36
5. 2.	Subcuencas que influyen en cada estación.....	38
6. 1.	Indicadores de bondad de ajuste para la calibración y validación.....	40

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página	
A. 1.	Propiedades físicas de cada serie de suelo.....	58
A. 2.	Propiedades hidráulicas de cada serie de suelo.....	58
A. 3.	Extracciones de acuíferos someros.....	59
A. 4.	Extracciones de acuíferos profundos.....	61
A. 5.	Extracciones superficiales.....	62
A. 6.	Parámetros ocupados para la calibración de caudal en diferentes trabajos.....	63
A. 7.	Parámetros sensibles de SWAT en la simulación de flujo de la cuenca Duqueco.....	65
A. 8.	Parámetros de SWAT modificados en la calibración.....	66
A. 9.	Variación del caudal medio para el periodo 2000 - 2020 y 2030 - 2050 por subcuenca.....	67
A. 10.	Variación del caudal medio para el periodo 2000 - 2020 y 2030 - 2050 por mes..	68
A. 11.	Variación de la recarga media para el periodo 2000 - 2020 y 2030 - 2050 por subcuenca.....	69
A. 12.	Variación de la recarga media para el periodo 2000 - 2020 y 2030 - 2050 por mes.....	70

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, relacionado a la concentración de gases de efecto invernadero, ha causado impactos significativos. Estos incluyen el incremento de la temperatura, déficit de las precipitaciones, reducción de los volúmenes de nieve y hielo, elevación del nivel del mar, y aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos (IPCC, 2021). Tales efectos, sumado al crecimiento demográfico nacional han mermado en la disponibilidad, calidad y cantidad de agua, situación que se verá exacerbada en el futuro, por lo que es fundamental prever las variaciones climáticas a través de los modelos climáticos (UNESCO, 2020).

Los Modelos Climáticos Globales (MCG) simulan con gran detalle la física, química y biología de la atmósfera, la tierra y los océanos, con la finalidad de comprender el clima en el pasado y estimar el futuro (Hauspadre, 2019). Estos modelos son coordinados por los Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), cuyos resultados se presentan con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

El IPCC (2013) en su quinto informe de evaluación (AR5), estima las emisiones futuras de Gases de Efecto Invernadero (GEI) según cuatro Vías de Concentración Representativas (RCP), designadas como RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, que indican de menores a mayores emisiones GEI respectivamente. Estos escenarios RCP fueron simulados por los diferentes MCG que componen el CMIP5.

Este trabajo se enmarca en el proyecto NSFC190002 titulado “Improving water quality to sustain watershed ecosystems and socio - economic development under climate change: a China - Chile comparative study”. Particularmente, se trabajará con un MCG que participó en el CMIP5, este es el IPLS - MC5A - LR, el que será evaluado en un escenario de muy altas emisiones GEI (RCP 8.5) para el año 2030 - 2050 en la cuenca Duqueco, en comparación con el periodo 2000 - 2020, con la finalidad de determinar las reducciones de caudal para el modelo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estimar el efecto del cambio climático sobre las variaciones de caudal medio mensual para el periodo 2030 - 2050 en la cuenca del río Duqueco, mediante el modelo hidrológico SWAT.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar una base de datos con información de variables espaciales, meteorológicas e hidrológicas de la cuenca Duqueco.
- Efectuar un modelo hidrogeológico que considere las características hidrológicas de la cuenca Duqueco.
- Determinar el efecto del cambio climático sobre el caudal de la cuenca Duqueco, según el modelo IPSL - MC5A - LR.

1.3. Ubicación y accesos

El área de estudio es el cauce del río Duqueco, este se extiende de manera transversal desde la cordillera de los Andes hasta la depresión intermedia de la región del Biobío, ubicado aproximadamente a 100 km hacia el sureste de la ciudad de Concepción, y abarca parte de las comunas de Los Ángeles, Santa Bárbara y Quilleco, entre los 37°21' - 37°39' latitud sur y 71°21' - 72°28' longitud oeste (Figura 1.1).

La principal vía de acceso al área de estudio desde la ciudad de Concepción es la ruta 146, la que se interseca con la ruta 5 sur, desde este punto aproximadamente 50 km hacia el sur se ubica el límite oeste de la subcuenca, que coincide con la ciudad de Los Ángeles (Figura 1.1).

El sistema hidrográfico de la cuenca del Biobío se subdivide en 10 subcuencas (Tapia, 2014) (Figura 1.2 a), dentro de las cuales se encuentra la subcuenca Duqueco, cuyo río homónimo nace en la vertiente poniente de la Sierra Velluda, y desemboca en el río Biobío tras un recorrido de 120 km aproximadamente.

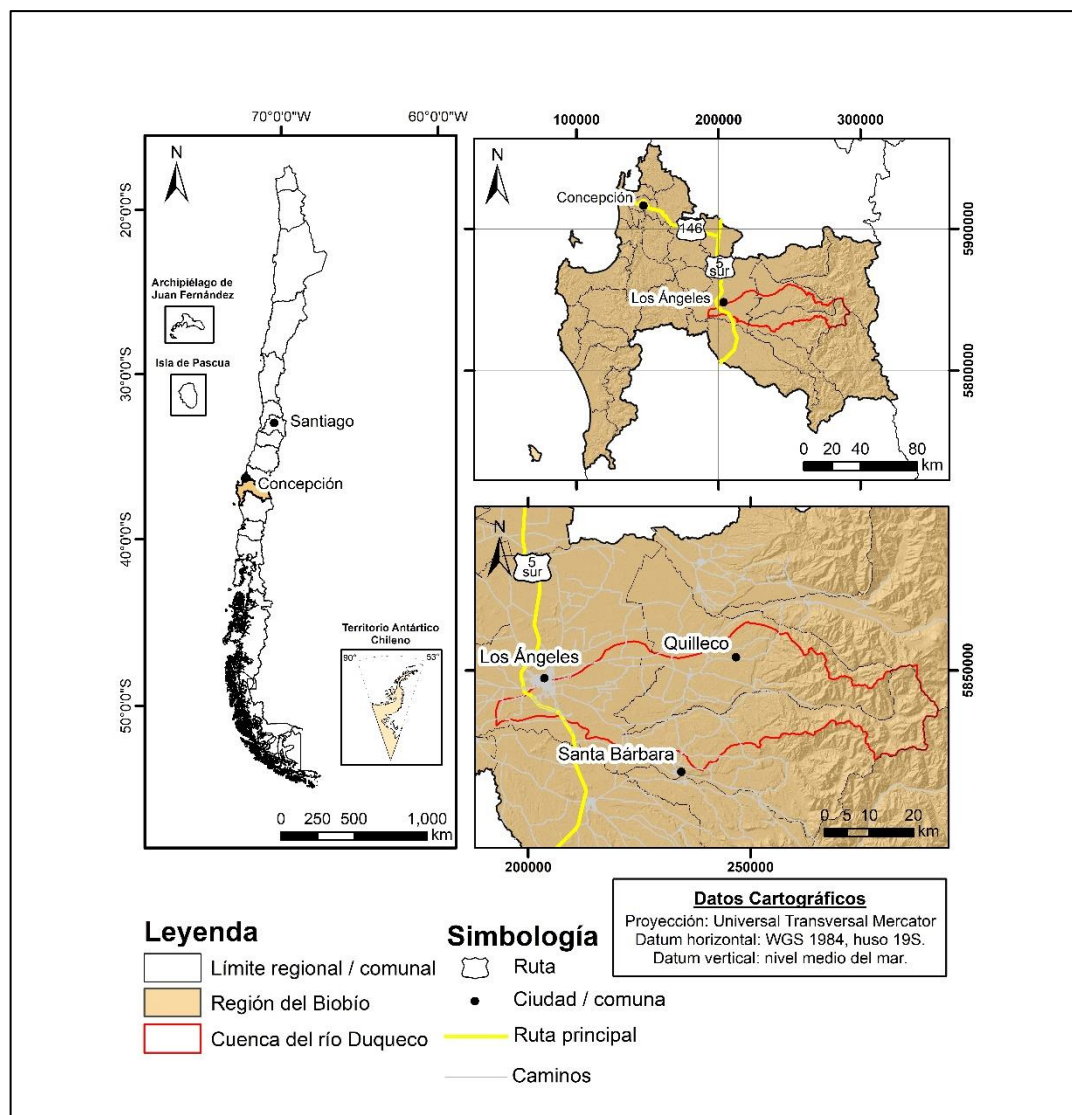


Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio. Elaboración propia.

La cuenca Duqueco tiene un área de 1.610 km^2 , la cual se divide en 5 subcuencas (Figura 1.2 b) y posee un caudal medio anual es de $64 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación fluviométrica Río Duqueco en Villacura (Mellado, 2019). Entre sus afluentes se encuentran varios ríos, como el Arilahuen y el Canicura, y esteros, como el Quilleco y el Canileo; sin embargo, el principal aporte es del río Coreo.

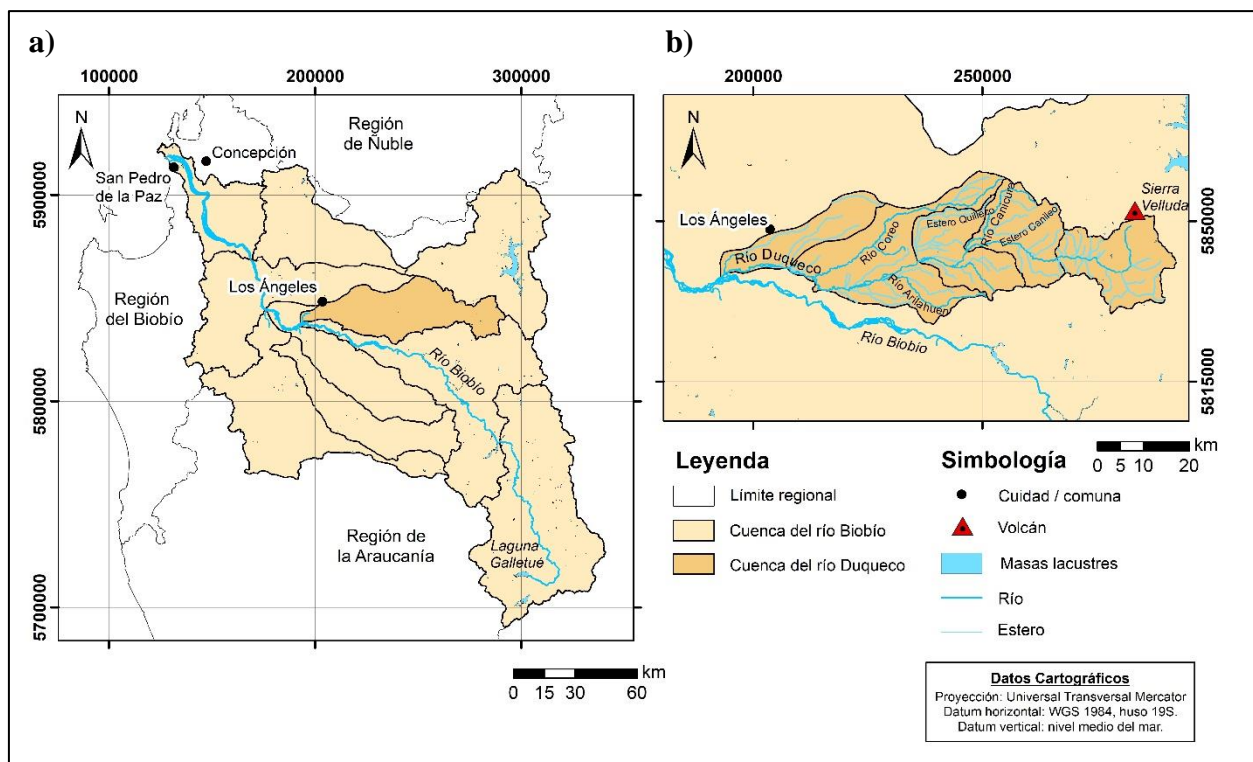


Figura 1.2. Mapa de la cuenca del río Biobío y del río Duqueco. a) Cuenca y subcuencas del río Biobío. b) Cuenca y subcuencas del río Duqueco. Elaboración propia.

1.4. Trabajos anteriores

A continuación, se señalan diversos autores cuyos trabajos de investigación son relevantes y han contribuido al entendimiento hidrológico e hidrogeológico en zonas que incluyen al área de estudio.

- El Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) (1999) realiza un estudio agrológico de las distintas regiones de Chile, entre ellas la región del Biobío, en la cual describe las series de suelos y sus propiedades fisicoquímicas.
- Aquaterra Ingenieros Ltda. (2012) efectuó un estudio de los acuíferos de la cuenca del Biobío, para el cual realizan un estudio geológico e hidrológico de la cuenca.
- Riquelme (2018) y Mellado (2019) estudian los efectos del cambio climático en la cuenca del río Duqueco para el año 2030 según diferentes escenarios de temperatura, precipitación y cambio de uso de suelo.

- La Universidad de Chile (2022) determino el efecto del cambio climático nacional según 4 modelos climáticos globales, dentro de los que está el modelo IPSL - MC5A - LR.

1.5. Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a Dios y a mi familia, a mis padres Carmen y Marcelo, mi hermano Pablo, sin quienes no hubiera sido posible nada de esto, quienes me instaron y apoyaron a salir de mi zona de confort para estudiar lejos de mi ciudad. A mi compañero de vida, Esteban por su amor, cariño y paciencia en este proceso. A mis amigos de la carrera, especialmente a Rocío que siempre estuvo preocupada que no se me olviden las entregas con llamadas que me salvaron más de un ramo, con su disposición a enseñarme y a recibirme en su casa cuando lo necesite.

También agradecer a la profesora Alejandra Stehr por permitirme realizar este trabajo con ella, quien me ayudo desde el manejo del programa hasta los últimos problemas previos a la entrega. Gracias a quienes conforman el departamento, tanto profesores como auxiliares, que me entregaron las herramientas necesarias para culminar esta etapa, yendo más allá de lo estrictamente académico, con actividades que permitieron tener una comunidad dentro de la carrera de apoyo y nunca de competencia, habilidades necesarias para el futuro. Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a las profesoras Liubow González y Verónica Oliveros, por su contribución al desarrollo de este proyecto. A Liubow González, le agradezco su excelente disposición a prestarme ayuda, y por ser quién me dio este gusto por el estudio de las aguas. A Verónica Oliveros, que a lo largo de la carrera fue un ejemplo de una profesional dedicada a la geología y es un agrado poder terminar esta etapa académica bajo su guía.

2. Cambio Climático

Desde su origen, el planeta ha estado en permanente transformación, sin embargo, el rápido cambio climático actual no tiene causa natural, sino antropogénica y se relaciona principalmente a la intensificación del efecto invernadero (Rodríguez y otros, 2009).

A continuación, se detallan los efectos del cambio climático en la actualidad y sus proyecciones.

2.1. Temperatura

Según el IPCC (2021) la temperatura de la superficie global fue alrededor de 1,1 °C mayor en 2011 - 2020 que en el periodo 1850 - 1900 (Figura 2.1), lo que se relaciona principalmente al incremento en las emisiones GEI.

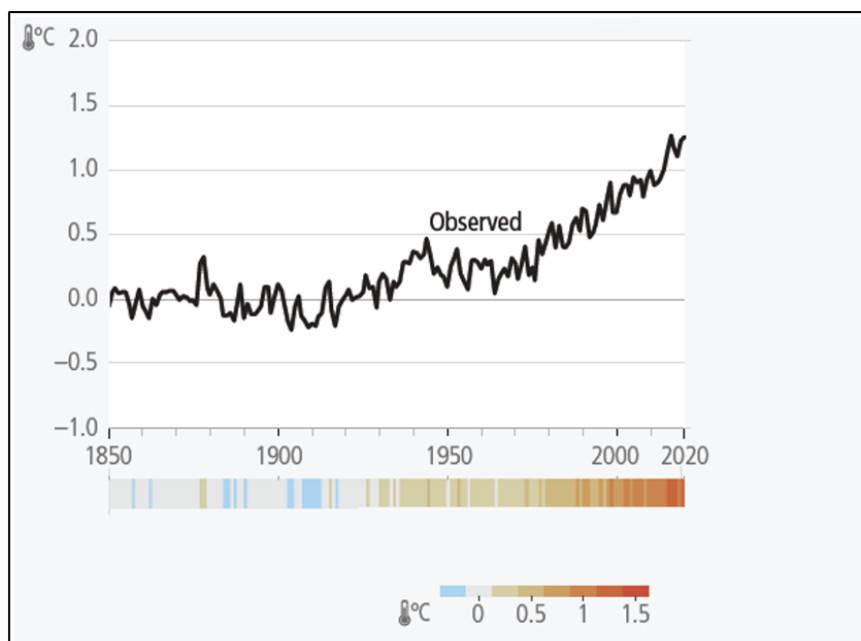


Figura 2.1. Cambio de temperatura global en el periodo 1850 - 2020.

Extraído de IPCC (2021).

Mientras que, a nivel nacional la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) (2023) estimó un aumento en la temperatura desde la década de 1981 (Figura 2.2), con un incremento significativo en la década del 2011 - 2020 de 0,68 °C, siendo la década más cálida desde 1961.

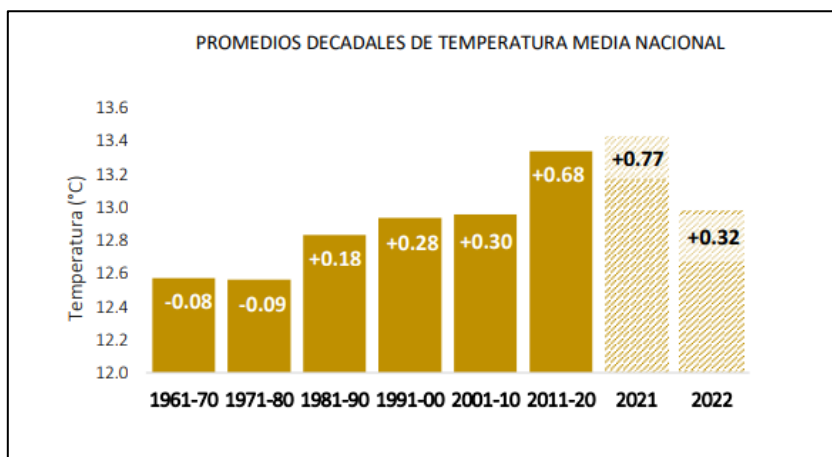


Figura 2.2. Promedios de la temperatura media en Chile, respecto al promedio 1961 - 1990. Extraído de DGAC (2023).

2.2. Precipitación

Según IPCC (2013) los cambios en la precipitación no se han distribuido de manera uniforme, esto se ilustra en la Figura 2.3 que muestra los cambios en la precipitación anual para el periodo 1951 - 2010. En esta figura se observan aumentos significativos en las precipitaciones, principalmente en el este de América del Norte, el norte de Eurasia y el noroeste de Australia, con fuertes disminuciones al sur de Asia, y en África tropical occidental y ecuatorial. Mientras que, en América del Sur se observan condiciones lluviosas en la cuenca amazónica y en el sudeste del continente, y tendencias negativas en Chile y parte de la costa occidental.

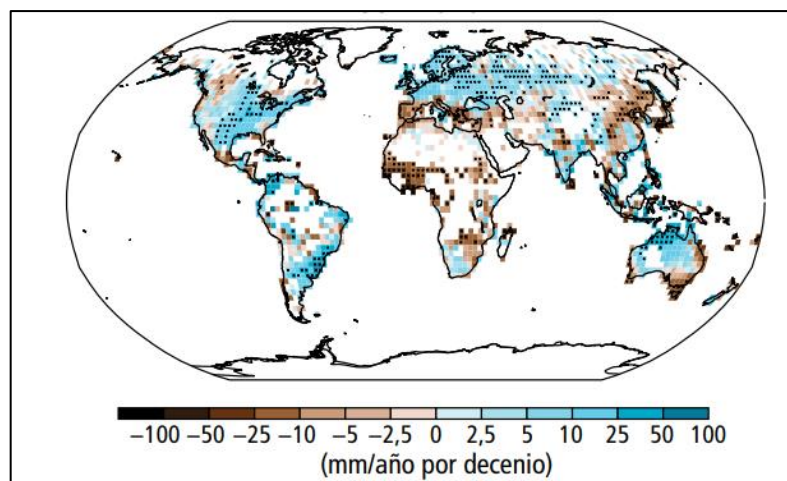


Figura 2.3. Cambio en la precipitación anual sobre la tierra para el periodo 1951 - 2010. Extraído de IPCC (2013).

La estimación del IPCC (2013) respecto al territorio nacional se condice con el estudio de DGAC (2023), el cual estableció que Chile ha estado 16 años consecutivos con precipitaciones bajo el promedio de 1961 - 1990, de los cuales, los últimos 5 años poseen déficit sobre el 20 % (Figura 2.4).

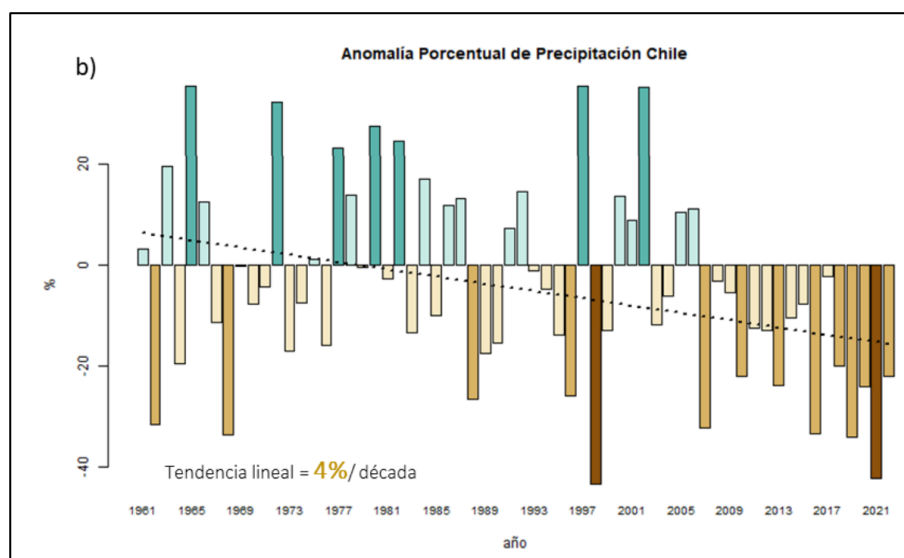


Figura 2.4. Anomalía porcentual de precipitación total anual respecto al promedio 1961 - 1990. Barras en tonos verdes representan superávit y en tonos cafés déficit. Extraído de DGAC (2023).

2.3. Proyecciones

Según IPCC (2013) es probable que el aumento de la temperatura media global en el periodo 2081 - 2100 respecto de 1986 - 2005 sea entre 0,3 - 1,7 °C en un escenario de bajas emisiones GEI debido a una mitigación estricta y entre 2,6 - 4,8 °C en un nivel muy alto de emisiones GEI (Figura 2.5 a). En estos escenarios, los cambios de precipitación no serán uniformes, probablemente mostrará un aumento de la precipitación media anual las latitudes altas, el océano Pacífico ecuatorial y en regiones húmedas de latitud media, mientras que disminuirá en regiones secas de latitud media y subtropicales (Figura 2.5 b).

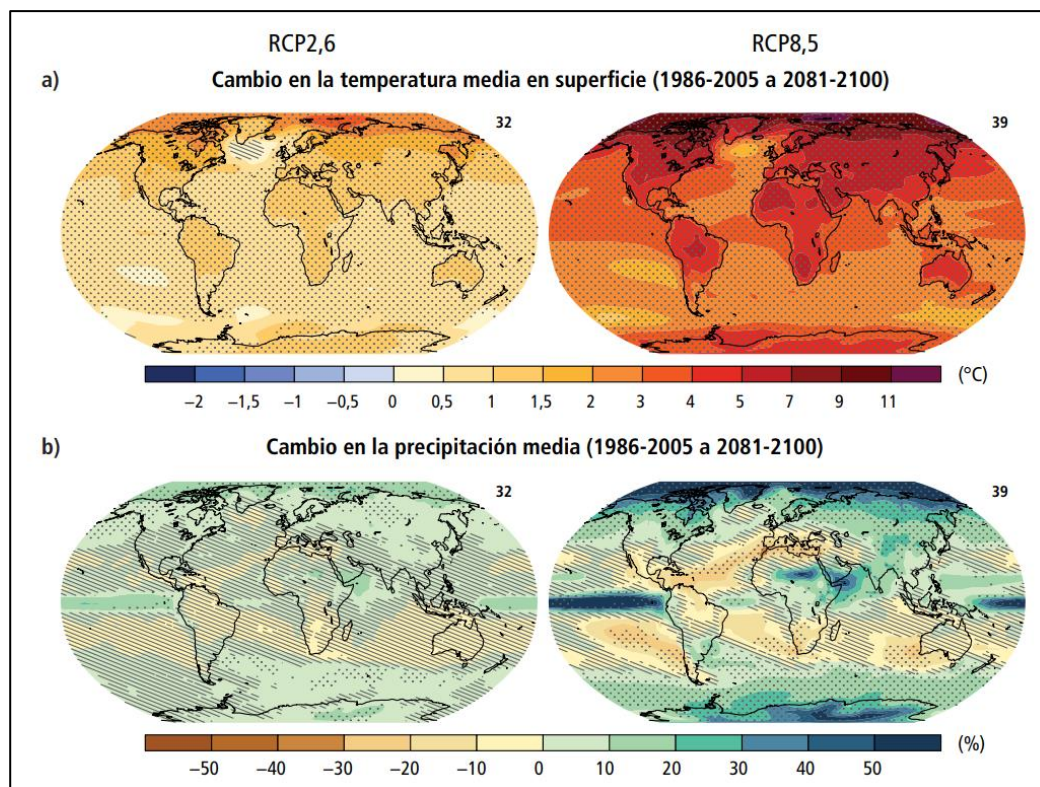


Figura 2.5. Cambio en la temperatura media en superficie y la precipitación media global. a) Cambio en la temperatura media en superficie. b) Cambio en la precipitación media. La figura es para el periodo 2081 - 2100 en relación con 1986 - 2005 en escenarios de bajas emisiones GEI (izquierda) y de muy altas de emisiones GEI (derecha). Extraído de IPCC (2013).

Las proyecciones en Chile de temperatura y lluvias, y su impacto en escenarios a corto, mediano y largo plazo en comparación con el periodo 1985 - 2005, en un escenario de altas emisiones GEI se muestra en la Figura 2.6. Se observa que en todo el país se prevé un aumento de temperatura, con un cambio largo plazo más notable en el extremo norte (3,5 - 5,0 °C) y menos pronunciado en el extremo sur (1,5 - 2,5 °C). En cuanto a la precipitación, las proyecciones varían según la latitud: en el extremo norte se proyecta una disminución que oscila entre 0 - 10 %, mientras que en el extremo sur se espera un aumento en el mismo rango, estos patrones se mantienen constantes hasta el año 2100. En cambio, desde el norte chico hasta Aysén se aprecian impactos negativos más pronunciados en las precipitaciones, lo que, sumado a aumento de la temperatura, conlleva a problemas de agua potable y aumento de sequías, lo que afecta directamente a la agricultura y la salud humana.

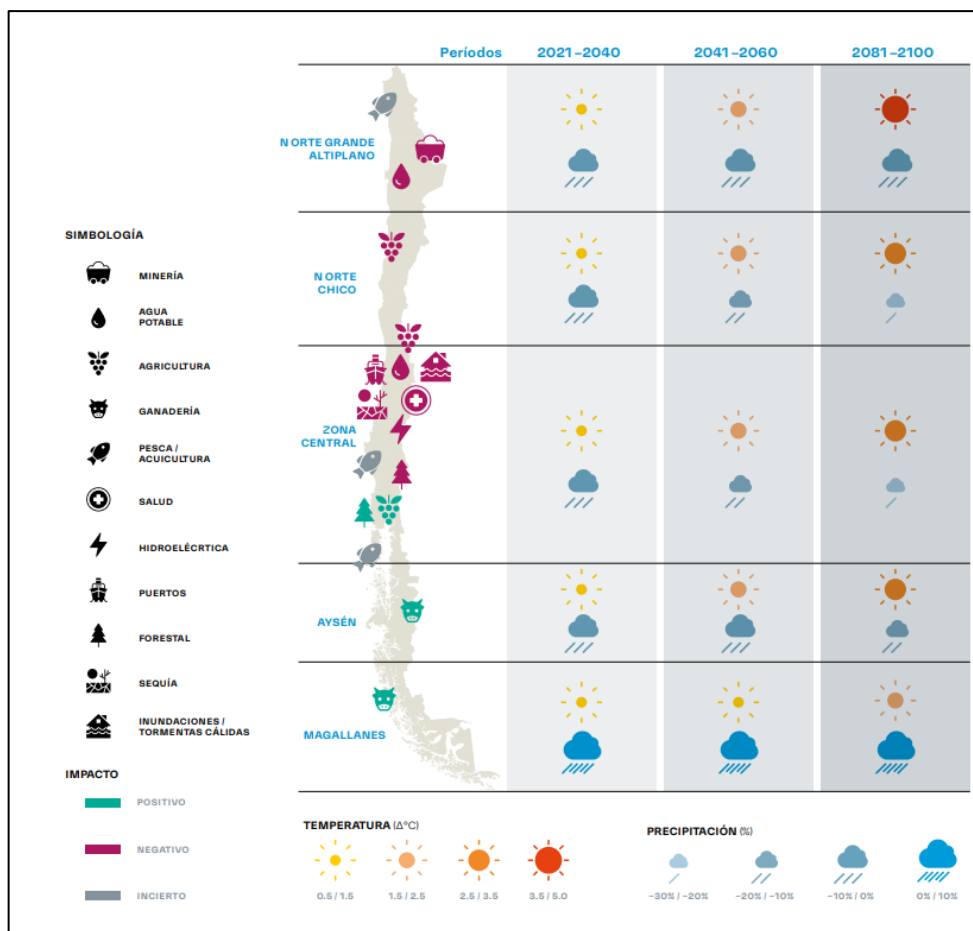


Figura 2.6. Representación esquemática de los impactos en diversos sectores de Chile y su relación con las proyecciones climáticas futuras. Extraído de Rojas y otros (2019).

2.4. Recurso Hídrico

En los últimos cien años el uso global de agua se ha incrementado seis veces y sigue creciendo a un ritmo constante de aproximadamente 1 % al año, debido al crecimiento demográfico, el desarrollo económico y al cambio de los patrones de consumo (2030 WRG, 2009 en UNESCO, 2020).

El calentamiento climático observado en las últimas décadas está asociado a cambios en las intensidades y valores extremos de precipitación, la fusión generalizada de la nieve y del hielo, el aumento de la evaporación, así como las variaciones de la humedad del suelo y la escorrentía superficial (Bates y otros, 2008).

Para Chile la disponibilidad de agua es extremadamente variable dada la diversidad latitudinal que tiene el país (Vicuña y otros, 2022), esto lo ilustra Alvarez y otros (2021) en la Figura 2.7, que muestra las anomalías anuales de precipitación y caudales en 106 cuencas hidrográficas entre los 30 - 41 °S para el periodo 1980 - 2018, donde es evidente la sequía meteorológica e hidrológica, situación que es agravada en las cuencas del centro - norte.

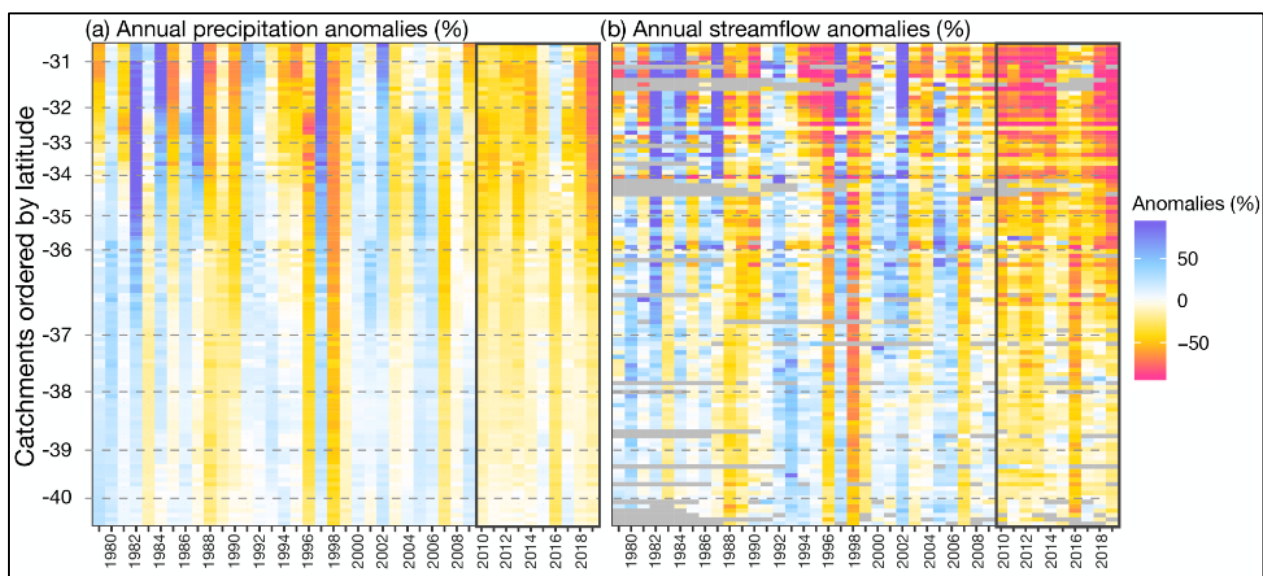


Figura 2.7. Anomalías anuales relativas de precipitación y caudal a escala de cuenca. Cada fila de los mapas de calor corresponde a una cuenca de estudio, y las cuencas están ordenadas de norte a sur para ilustrar los patrones de sequía regionales. Extraído de Alvarez y otros (2021).

Schewe y otros (2013) estiman la disponibilidad de agua global en un escenario de aumento en la temperatura global de 2 °C respecto al promedio entre 1980 - 2010 (Figura 2.8). Proyectan que los caudales aumenten en las altas latitudes septentrionales, en África oriental y en la península del subcontinente indio, y que disminuyan en varias regiones, incluido el Mediterráneo y gran parte de América del norte y del sur. Particularmente, para el territorio nacional el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (2017) proyecta una reducción significativa de los caudales medios mensuales en las cuencas entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos, mientras que, en la zona austral del país se prevé un leve aumento en los caudales.

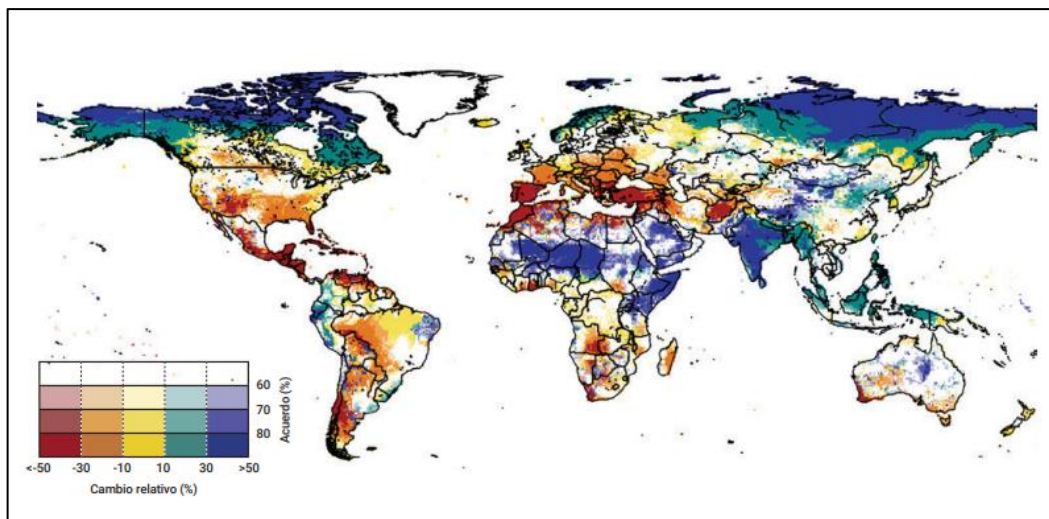


Figura 2.8. Tendencia de la disponibilidad de agua en un escenario de calentamiento de 2 °C. Extraído de Schewe y otros (2013).

2.4.1. Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas constituyen aproximadamente el 99 % de la totalidad del agua dulce en estado líquido, siendo el responsable de abastecer a casi el 50 % de la población urbana mundial (UNESCO, 2022).

Este recurso es vulnerable al cambio climático, ya que las variaciones en las precipitaciones y en la temperatura, afectan directamente en la recarga, descarga y calidad de las aguas subterráneas (Lopez y Vargas, 2020; UNESCO, 2022). Sin embargo, sigue habiendo una gran incertidumbre, por la falta de datos y la reacción lenta de los sistemas subterráneos al carácter variable de la infiltración (Bates y otros, 2008).

Según proyecciones de IPCC (Bates y otros, 2008), se estima para el 2050 en comparación con el periodo de 1961 - 1990, en un escenario de altas emisiones GEI según dos MCG (Figura 2.9), que la recarga de agua subterránea disminuiría para el 2050 en más de un 70 % en el noreste de Brasil, suroeste de África y en la franja meridional del Mar Mediterráneo. Mientras que, aumentaría en más de un 30 % en el Sahel, el Oriente próximo, el norte de China, Siberia, y el oeste de Estados Unidos.

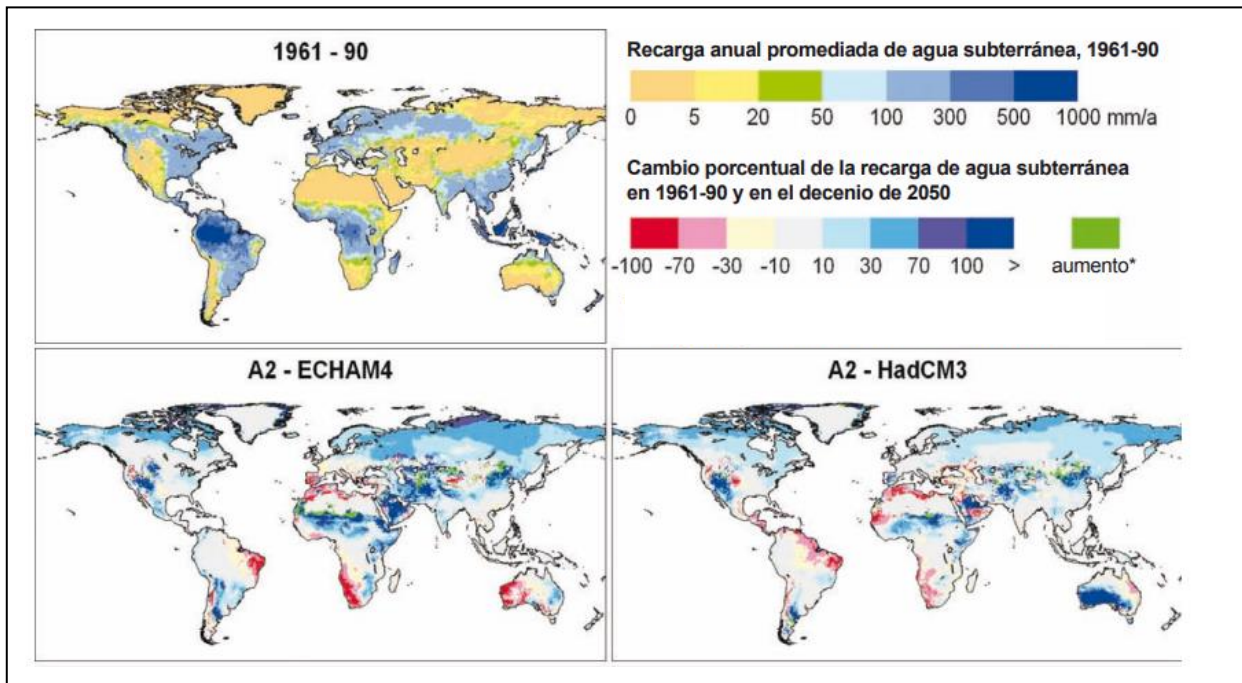


Figura 2.9. Impacto del cambio climático en la recarga anual de agua subterránea para el 2050. Extraído de Bates y otros (2008).

3. MARCO GEOMORFOLÓGICO LOCAL

Börgel (1983) divide a Chile en cinco conjuntos regionales que se distribuyen de norte a sur. Particularmente, la región del Biobío se encuentra entre dos de estos conjuntos: la III, región central de las cuencas y del llano fluvio - glacio - volcánico, y la IV, región central lacustre y del llano glacio - volcánico. Este autor también describe las 5 unidades morfológicas y adiciona un rasgo menor, que de oeste a este son: planicies litorales (marinas y/o fluvio-marinas), cordillera de la Costa, llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional, depresión intermedia, precordillera y cordillera de los Andes (Figura 3.1). De estas unidades, dos se subdividen según sus características distintivas; la depresión intermedia se separa en llano central fluvio - glacio - volcánico, y llano central con morrenas y conos; mientras que, la cordillera andina se divide en cordillera andina de retención crionival y cordillera volcánica activa.

A continuación, se describen las unidades que están dentro del área de estudio.

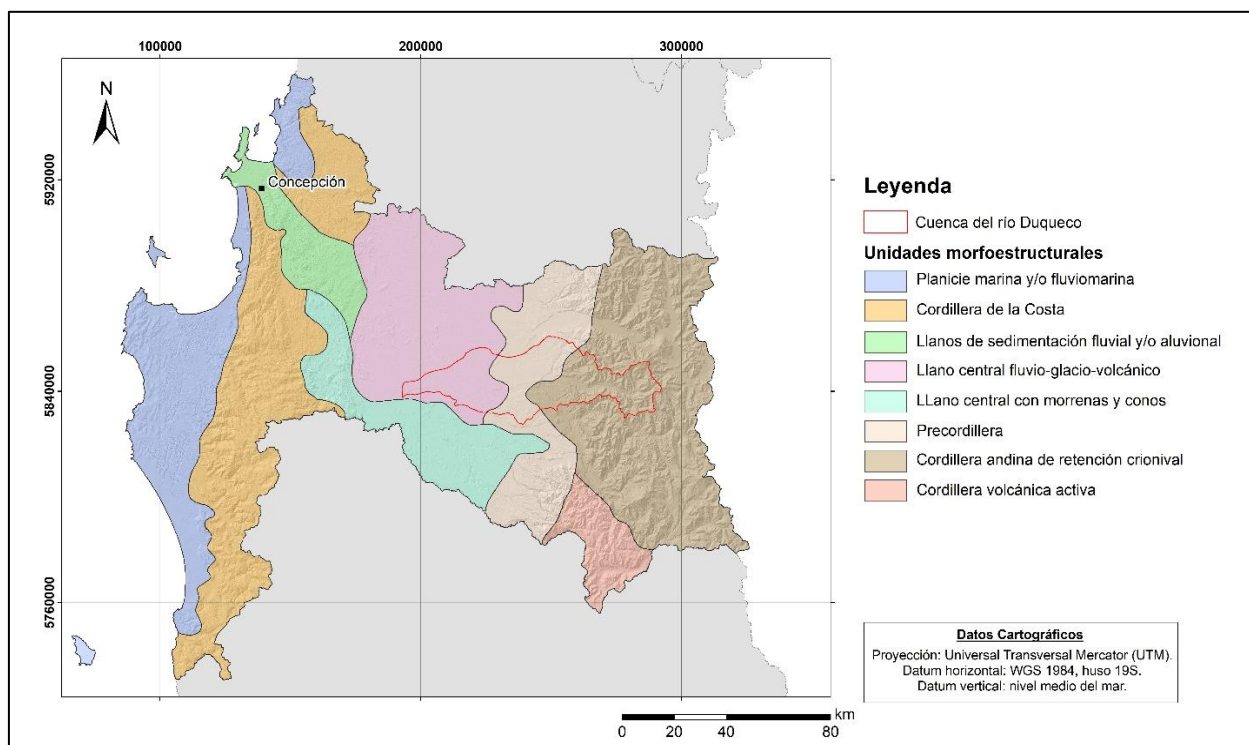


Figura 3.1. Unidades geomorfológicas de la región del Biobío. Modificado de Börgel (1983).

- **Depresión intermedia:** denominación asignada la fosa tectónica de eje N -S con altitudes medias de 125 m, comprendida entre la cordillera de la Costa y la de los Andes, cuya formación se remonta al terciario, momento que comenzó a deprimirse, el descenso fue de cientos de metros que, posteriormente serían rellenos por diversos materiales de origen glaciar, fluvial y volcánico, provenientes principalmente de los Andes por procesos de transporte de agua, avance y retroceso glacial, y la actividad volcánica (Börgel, 1983; CADE - IDEPE, 2004; Errázuriz y otros, 1998).

Börgel (1983) señala que el llano central fluvio - glacio - volcánico posee un aspecto de planicie suavemente ondulada y plana en algunos sectores, cuyo ancho máximo es el sector septentrional del río Laja con 74 km, mientras que su extensión longitudinal se estima en 360 km.

- **Precordillera:** Börgel (1983) la describe como una transición entre la depresión intermedia y la cordillera de los Andes, cuya altura fluctúa entre los 300 y 850 m s.n.m, con un largo estimado en 470 km, la cual se caracteriza por laderas abruptas, ríos encajonados, materiales arcillosos y otros muy permeables como rodados, y fuertes manifestaciones de una tectónica reciente. Desde el punto de vista morfogénico, es un complejo sistema de conos superpuestos, siendo los más antiguos de origen glacio - volcánico, luego fluvio - volcánico y los más recientes de hidrocineritas. Estos depósitos están marcados por bruscos procesos de acumulación y erosión desde la cordillera de los Andes, cuyo origen es sedimentario y está compuesto predominantemente de materiales fluvio - volcánicos, fluvio - glaciares y fluviales (Errázuriz y otros, 1998).
- **Cordillera de los Andes:** es el principal rasgo orogénico de Chile, este se localiza en el sector más oriental y se caracteriza por un relieve abrupto con rasgos de media montaña, donde la altitud promedio alcanza los 2.000 m s.n.m., con alturas mayores a los 3.200 m s.n.m, particularmente en la región del Biobío posee alturas medias de 1.700 - 1.900 m s.n.m y máximas de 3.1000 m s.n.m en el volcán Antuco (Börgel, 1983; Aquaterra Ingenieros Ltda., 2012; Errázuriz y otros, 1998).

Si bien, esta cordillera no es homogénea ni en sus materiales, ni en sus rasgos morfológicos o aspecto general, su relieve si tiene un origen común y está relacionado a la actividad tectónica y volcánica, evidenciado por estructuras tales como estratovolcanes, conos piroclásticos, coladas de lava y domos (Börgel, 1983; Errázuriz y otros, 1998).

Posee una gran variedad de cursos menores y grandes ríos (Biobío, Duqueco, Laja y Cholguán), que se prolongan hasta interceptar con la depresión intermedia; volcanes activos como el Antuco e inactivos como el Sierra Nevada; glaciares que se asocian a cumbres de los estrato - volcanes; lagunas de diversa extensión y forma, en depresiones de depósitos morrénicos, emplazadas en circos glaciares o por el tectonismo de la zona, de las cuales la más importante de la región es la Laguna la Laja (Aquaterra Ingenieros Ltda., 2012).

Börgel (1983) señala que la cordillera andina de retención crionival se caracteriza por la abundante retención de nieve y de agua al estado sólido, que se mantiene a causa del frío de altura, y por la ocupación de sus valles altos por recubrimientos glacio - volcánicos.

4. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

El contexto geológico en que se encuentran las aguas subterráneas y superficiales influyen directamente en su comportamiento, ya que el substrato incide directamente en la infiltración del agua (Marchant, 2022).

4.1. Marco Geológico Local

El marco geológico de la zona de estudio (Figura 4.1) comprende depósitos del Cuaternario de origen fluvio - aluvial, formados por erosión y transporte de sedimentos por parte del río Biobío y cursos de agua locales; rocas sedimentarias del Cuaternario de génesis glacio - lacustre, que afloran al este de la cuenca; rocas ígneas con aporte sedimentario del Cenozoico, cuyo origen es continental volcánico y se observan al oeste del área de estudio; y rocas ígneas intrusivas del Mioceno, con ejemplares tipo *Stock* que intruyen a rocas del Cenozoico.

4.1.1. Rocas Estratificadas

4.1.1.1. Formación Cura - Mallín (OM2c)

Definición, distribución y relaciones de contacto

Definida por González y Vergara (1962) según el estero homónimo, estos autores detallan de forma separada las formaciones Cura - Mallín y Malla - Malla. Posteriormente, Niemeyer y Muñoz (1983), redefinen la formación Malla - Malla como Miembro de la Formación Cura - Mallín y agregan el Miembro Río Queuco. De esta forma, la Formación Cura - Mallín se divide en dos miembros concordantes y transicionales entre sí: uno inferior, principalmente volcánico - clástico, llamado Miembro Río Queuco y otro superior, sedimentario, llamado Miembro Malla - Malla (Niemeyer y Muñoz, 1983). Esta Formación se distribuye en una franja NS, cuyas rocas componen los principales cordones montañosos (Muñoz y Niemeyer, 1984a). Respecto a sus relaciones de contacto, infrayace de forma concordante y transicional a las rocas de la Formación Trapa - Trapa y en discordancia angular a rocas de las formaciones Campanario, Cola de Zorro, y a volcanes y lavas recientes (Muñoz y Niemeyer, 1984a).

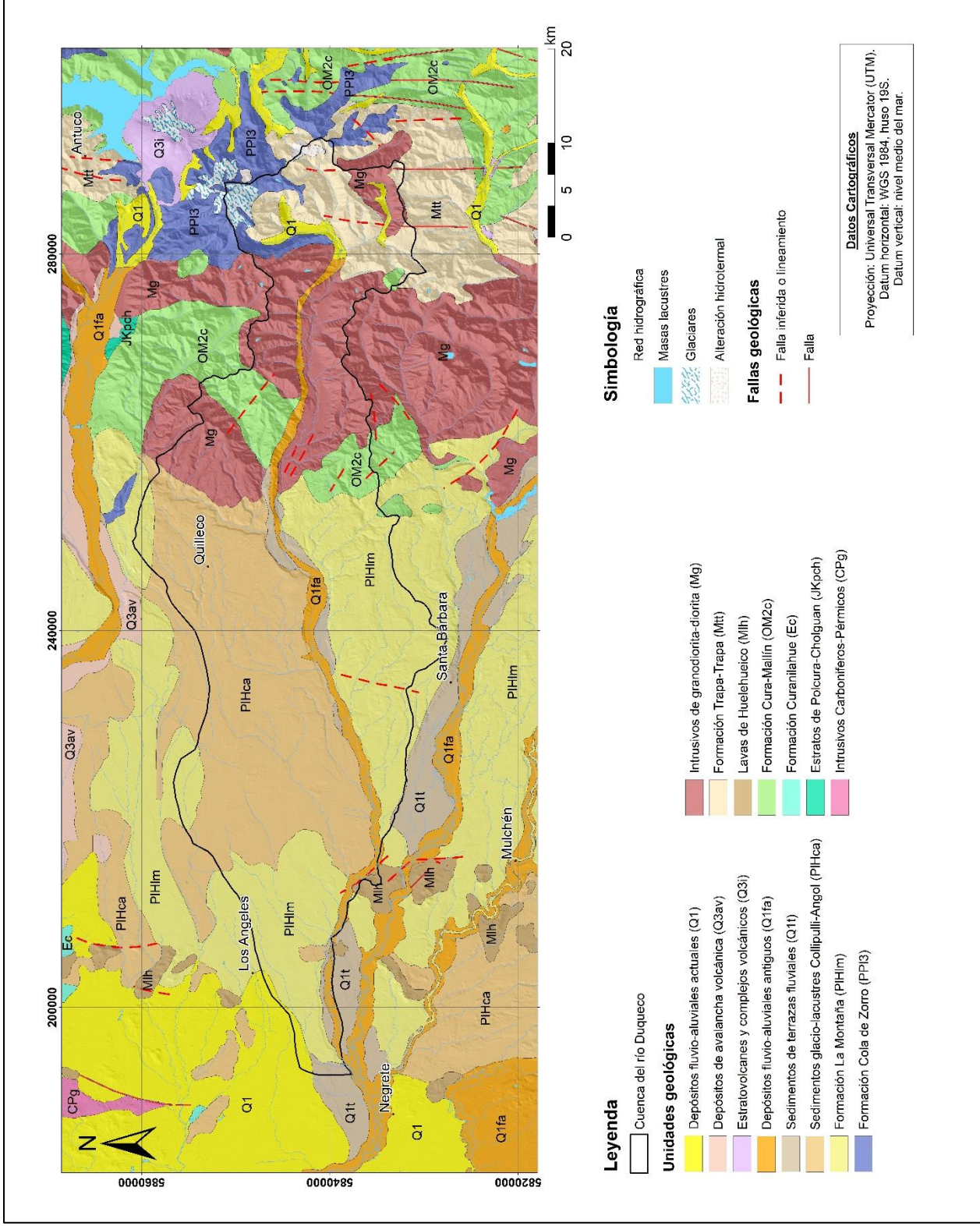


Figura 4.1. Mapa geológico del área de estudio y alrededores. Modificado de Aquaterra Ingenieros Ltda. (2012).

Litología y ambiente de depositación

El Miembro Río Queuco está constituido por tobas, brechas e intercalaciones subordinadas de areniscas, conglomerados, lutitas y coladas de lavas andesíticas (Muñoz y Niemeyer, 1984a). Mientras que, el Miembro Malla - Malla contiene areniscas, conglomerados y lutitas, con menor contenido de tobas, brechas, calizas y niveles carbonosos (Muñoz y Niemeyer, 1984a). Estas rocas están muy deformadas, plegadas y falladas, por una tectónica compresiva regional ocurrida a fines del Mioceno (Moreno y otros, 1984; Thiele y otros, 1987 en Vergara, 2020). El ambiente de depositación puede interpretarse para el Miembro Malla - Malla como depósitos de un sistema fluvio - lacustre, con la presencia de canales, ríos y lagos, en una región con volcanismo activo efusivo, representado por el Miembro Río Queuco (Rubilar y Abad, 1990).

Edad y correlaciones

Niemeyer y Muñoz (1983) asignaron una edad Eoceno - Mioceno medio, basados en antecedentes macro y micropaleontológicos previos (Rubilar y Abad, 1990). La Formación Cura -Mallín se correlaciona con las formaciones Colbún (Muñoz y Niemeyer, 1984a), Lolco (Gajardo, 1981), Farellones y Abanico (Davidson y Vicente 1973; Vergara y Drake, 1979; Thiele, 1980 en Flynn y otros, 2008). Mientras que, en Argentina se correlaciona con los Estratos del Arroyo Tábanos y los Estratos del Arroyo Carbón (Charrier y otros, 2002 en Flynn y otros, 2008).

4.1.1.2. Lavas de Huelehueico (Mlh)

Definición, distribución y relaciones de contacto

Definida por Ferraris (1981) como una secuencia de rocas volcánicas de composición básica a intermedia, que afloran en sectores aislados de la depresión intermedia, entre el río Laja y el pueblo de Collipulli. Los afloramientos corresponden a cerros islas que sobresalen de los depósitos no consolidados, por lo que no se observan sus relaciones de contacto.

Petrografía y ambiente de depositación

Ferraris (1981) señala que está compuesta por lavas andesíticas de piroxeno y andesíticas basálticas, de textura porfídica, estas rocas poseen un suave plegamiento con manteos menores a 15 ° y su potencia la estima en 200 m. Para su ambiente de depositación Vergara y Munizaga (1974 en Ferraris 1981) proponen un ambiente volcánico.

Edad

Vergara y Munizaga (1974 en Ferraris, 1981) por medio de dataciones K/Ar en roca total establecen la edad de $10,4 \pm 1,0$ Ma., respectivo al Mioceno inferior.

4.1.1.3. Formación Trapa - Trapa (Mtt)

Definición, distribución y relaciones de contacto

Definida por Niemeyer y Muñoz (1983), la cual está constituida por una secuencia de lavas andesíticas, rocas volcanoclásticas y sedimentarias continentales (Muñoz y Niemeyer, 1984a). Aflora a lo largo del río Guaiquivilo - Melado, en el estero Rodríguez, en las nacientes del río Cato, en la cordillera de La Polcura, en el cordón limítrofe entre los pasos Pichachén y Copahue, entre el cerro Trilile y la cordillera de Malla - Malla, y en las cercanías de los volcanes Tolhuaca y Lonquimay (Muñoz y Niemeyer, 1984b). Está Formación sobreyace de manera concordante y transicional a la Formación Cura - Mallín e infrayace en discordancia angular a las formaciones Cola de Zorro y Campanario (Muñoz y Niemeyer, 1984a).

Litología y ambiente de depositación

La Formación Trapa - Trapa se compone de andesitas, andesitas basálticas, dacitas calcoalcalinas, tobas, brechas y, en menor proporción, dacitas, basaltos, areniscas y conglomerados, además de filones, *sills*, cuellos volcánicos y pequeños *stocks* andesítico - basálticos (Muñoz y Niemeyer, 1984b). Estos materiales superan los 1.500 m de potencia, para los que Muñoz y Niemeyer (1984a) proponen un ambiente de depositación continental volcánico con participación fluvial.

Edad y correlaciones

Drake (1976) estimó la edad máxima de esta Formación con dataciones de K - Ar en clastos provenientes de su base, obteniendo edades de $18,2 \pm 0,8$ Ma., $14,7 \pm 0,7$ Ma. y $15,4 \pm 0,5$ Ma., respectivo al Mioceno inferior a medio. Posteriormente, Herriott (2006 en Munizaga, 2020) con dataciones de Ar/Ar determinó edades de $10,1 \pm 0,2$ Ma., $9,1 \pm 0,1$ Ma. y $8,9 \pm 0,1$ Ma., lo que le otorgaría una edad Mioceno superior. La Formación Trapa - Trapa se puede correlacionar con las formaciones Farellones, Cerro de Las Tórtolas y Lavas de Huelehueico (Muñoz y Niemeyer, 1984b); y en territorio argentino con la Formación Invernada Vieja (Zanettini y otros, 2001).

4.1.1.4. Formación Cola de Zorro (PPI3)

Definición, distribución y relaciones de contacto

Definida por González y Vergara (1962) en la quebrada homónima como una secuencia volcánica, que posee una gran distribución areal en la precordillera y cordillera de los Andes, especialmente al sur de los 36 °S (Gajardo, 1981) y constituye mesetas originadas por la acumulación de estratos subhorizontales (Muñoz y Niemeyer, 1984a). Está Formación sobreyace en discordancia angular a las formaciones Cura - Mallín (Muñoz y Niemeyer, 1984a), Río Blanco y a los Estratos de Polcura - Cholguán (Ferraris, 1981); sobreyace de forma concordante a la Formación Campanario (Muñoz y Niemeyer, 1984a); e infrayace por discordancia de erosión a morrenas y coladas de lavas asociadas a volcanismo del Cuaternario (Vergara y Muñoz, 1982).

Litología y ambiente de depositación

Está compuesta por una secuencia de andesitas, andesitas basálticas y basaltos de color gris a pardo oscuro; aglomerados de colores grises, pardos y pardo - amarillentos (Niemeyer y Muñoz, 1983); e ignimbritas grises, de composición dacítica y andesítica (IIG/MMAJ, 1979 en Gajardo, 1981). La Formación Cola de Zorro comprende rocas volcánicas, en gran proporción de naturaleza explosiva, que constituyeron secuencias horizontales que sepultaron la topografía orogénica. Estas secuencias volcánicas fueron alimentadas por sistemas de diques que se relacionan a un ciclo efusivo posterior a la inversión de la cuenca de Cura - Mallín (8 Ma.) (Folguera y otros, 2003).

Edad y correlaciones

Vergara y Muñoz (1982) mediante K - Ar determinaron la edad en un rango Plioceno - Pleistoceno, esto se corrobora con el trabajo hecho por Drake (1976), ya que obtuvo edades entre $2,45 \pm 0,07$ Ma. y $0,96 \pm 0,04$ Ma., por medio de K - Ar en 17 rocas andesíticas. Esta Formación se correlaciona con los complejos volcánicos Sierra Velluda, Callaqui, Copahue (Niemeyer y Muñoz, 1983) y Loma del Medio - Cerro Canasto, con la serie Pino - Hachado y con los Estratos de Cayulafquén (Muñoz y Niemeyer, 1984a). Mientras que, en Argentina se correlaciona con las formaciones Quebrada Honda, Cajón Negro y Curamileo (Pesce, 1981).

4.1.1.5. Formación La Montaña (PIHlm)

Definición, distribución y relaciones de contacto

Definida por Muñoz - Cristi (1960) como “Formación Morrena de la Montaña”, posteriormente Gajardo (1981) la detalla y redefine como Formación la Montaña. Comprende depósitos morrénicos y aluviales, constituidos por bancos lenticulares de arcillas y arenas finas, los que afloran en la precordillera y desde Talca al sur en la depresión intermedia. Está sobreyace en discordancia de erosión a rocas estratificadas e intrusivas mesozoicas y cenozoicas, y a la Formación Mininco. Generalmente, no están cubiertos por otras unidades, excepto por suelo y depósitos no consolidados.

Litología y ambiente de depositación

Está compuesta por depósitos débilmente compactados de conglomerados, conglomerados arenosos, areniscas, limolitas y cenizas. El tipo litológico predominante es el conglomerado oligomítico, con clastos de composición principalmente andesítica, andesítica basáltica y basáltica, y de tamaños que varían entre 5 y 20 cm de diámetro promedio (Muñoz y Niemeyer, 1984a). El origen de estos sedimentos ha sido interpretado por diversos autores, Muñoz - Cristi (1960) postula un ambiente glacial y glacio - lacustres; Marangunic y otros (1979) describe su procedencia como lahárica, con una participación fluvial; Gajardo (1981) mantiene la hipótesis de origen glacial; y para Muñoz y Niemeyer (1984a) se depositaron como conos fluvio-glaciares y aluviales de carácter torrencial, con participación fluvial (Anavalón, 2018).

Edad y correlaciones

La edad de la Formación fue asignada por Muñoz - Cristi (1960) al Cuaternario por su similitud litológica a los productos volcánicos cuaternarios de la cordillera de los Andes (Muñoz y Niemeyer, 1984a). Posteriormente, Ferraris (1981) le asigna una edad pleistocena - holocena por su relación de contacto con la Formación Cola de Zorro de edad pleistocena. Varela y Moreno (1982 en Muñoz y Niemeyer, 1984a) acotan la edad a pleistocena inferior, dado que postulan su génesis como glacial, por lo que debió ser previo a la última glaciación de la zona. Esta Formación es equivalente a los “Rodados Multicolores” definidos por Hauser (1970 en Muñoz y Niemeyer, 1984a), los que se distribuyen desde el río Maule hasta la isla de Chiloé.

4.1.1.6. Sedimentos Glacio - Lacustres Collipulli - Angol (PIHca)

Sedimentos definidos por Ferraris (1981) que afloran principalmente en el camino que une ambas localidades y que se distribuyen en la zona central y meridional de la depresión intermedia. Las relaciones de contacto no son claras y, aparentemente, se engrana con la Formación La Montaña, sobreyace a las Lavas de Huelehueico y al basamento granítico, e infrayace a los Depósitos de Arenas del Cono del Río Laja y a los suelos agrícolas de la depresión intermedia.

La secuencia está compuesta por niveles de arcillas, arenas y conglomerados, con potencias de 10 - 50 cm. Los conglomerados y areniscas están formados por clastos de andesitas y basaltos, y matriz cinerítica. La edad de esta unidad se estima como pleisto - holocena, por su probable engrane con la Formación La Montaña (Ferraris, 1981).

4.1.2. Rocas Intrusivas

4.1.2.1. Intrusivos de granodiorita - diorita (Mg)

Definido por Niemeyer y Muñoz (1983) como intrusivos tipo *stock* que intruyen a las formaciones Cura - Mallín y Trapa - Trapa e infrayacen en discordancia de erosión a las volcanitas de la Formación Cola de Zorro. Estos cuerpos plutónicos son color gris claro y su composición petrográfica corresponde a diorita, diorita cuarcífera y granodiorita (Niemeyer y Muñoz, 1983). Pesce (1981) mediante dataciones de K - Ar en granodiorita determina una edad de 15 ± 2 Ma., correspondiente al Mioceno medio - inferior.

4.1.3. Depósitos No Consolidados

4.1.3.1. Sedimentos de terrazas fluviales (Q1t)

Corresponde a los depósitos de gravas y arenas en niveles de terrazas, que se ubican en los ríos principales del área. Están compuestos por gravas y ripios, con clastos redondeados a subredondeados de andesitas y granitos, con fracciones variables de arenas y limos, cuyos espesores máximos alcanzan los 20 m. Estos rellenos aterrizados tienen una permeabilidad promedio de 10^{-3} cm/s (Aquaterra Ingenieros Ltda., 2012).

4.1.3.2. Depósitos fluvio - aluviales antiguos (Q1fa)

Son materiales no consolidados, representados por gravas, ripios y arenas, que constituyen el relleno de los paleocauces de los ríos y esteros. Estos rellenos poseen permeabilidades entre 5×10^{-3} y 10^{-3} cm/s (Aquaterra Ingenieros Ltda., 2012).

4.1.3.3. Depósitos fluvio - aluviales actuales (Q1)

Estos depósitos están en el cauce actual de los ríos y esteros, sin embargo, solo poseen buen desarrollo en los ríos principales. Son frecuentes en la desembocadura de un cauce menor en otro mayor y en abanicos fluviales, donde se depositan importantes espesores de arenas y gravas. Estos rellenos tienen permeabilidades entre 10^{-2} y 10^{-3} cm/s (Aquaterra Ingenieros Ltda., 2012).

4.2. Unidades Hidrogeológicas

Struckmeyer y Margat (1995) definen las unidades hidrogeológicas a partir de la combinación de información sobre el potencial del acuífero y la permeabilidad (Figura 4.2). Este método será utilizado para describir las unidades hidrogeológicas del área de estudio según su alta a nula importancia hidrogeológica, en relación con su potencial hidrogeológico.

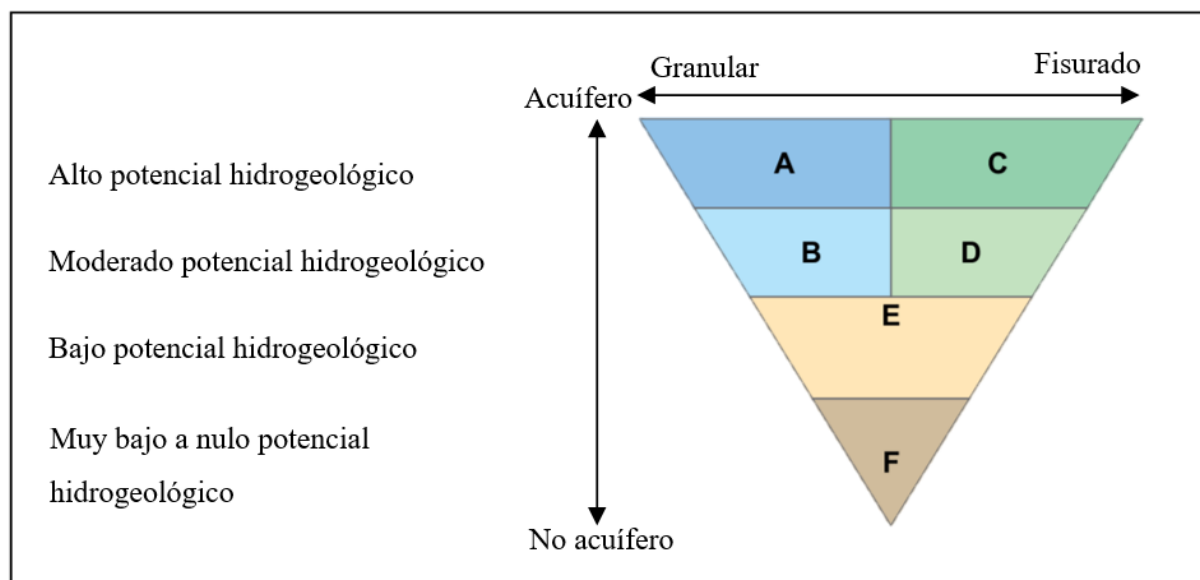


Figura 4.2. Sistema de clasificación de acuíferos. Modificado de Struckmeier y Margat (1995).

- **Unidad de alta importancia hidrogeológica:** está compuesta por los depósitos no consolidados del Cuaternario, particularmente, los sedimentos de terrazas fluviales y los depósitos fluvio - aluviales. Sus materiales están conformados principalmente por gravas y arenas, por lo que, posee buenas condiciones para almacenar y transmitir agua.
- **Unidad de media a baja importancia hidrogeológica:** esta unidad constituye la depresión intermedia y precordillera del área de estudio, la cual agrupa a sedimentos de origen glacio - lacustres. Componen esta unidad la Formación La Montaña y los Sedimentos Glacio - Lacustres Collipulli - Angol, los que litológicamente están conformados por clastos angulosos, predominantemente volcánicos, de tamaño bloque a arena en una matriz arenosa - arcillosa.
- **Acuícludos de nula importancia hidrogeológica:** incluye a rocas ígneas, las que pueden tener un aporte sedimentario, que conforman la cordillera andina de la cuenca Duqueco. Esta unidad la integran las formaciones Cola de Zorro, Trapa - Trapa y Cura - Mallín, las lavas de Huelehueico y los intrusivos de granodiorita - diorita.

5. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se divide en de 5 etapas principales:

- Preparación de las variables de entrada.
- Modelación de la cuenca del río Duqueco con SWAT.
- Calibración y validación del modelo.
- Estimar la variación del caudal medio mensual para el modelo climático IPSL - CM5A - LR.

Para este estudio se empleó el programa *ArcGIS* 10.4 y el complemento *ArcSWAT* 2012, que funciona por medio del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tools). Luego, con *SWAT - CUP Premium* (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures Premium) se calibro y validó el modelo, para posteriormente simular un escenario de muy altas emisiones GEI para el modelo climático IPSL - CM5A - LR.

5.1. Modelo SWAT

SWAT fue desarrollado a principio de los años noventa por el Dr. Jeff Arnold para el departamento de agricultura de Estados Unidos (USDA) (Neitsch y otros, 2005). Es un modelo agrohidrológico semidistribuido, que se utiliza para evaluar la calidad y cantidad del agua; la gestión de prácticas agrícolas; la gestión del agua superficial y subterránea; y la transferencia de sedimentos, nutrientes y pesticidas (Koua y otros, 2023), a través de simulaciones en diversas temporalidades (diarias, mensuales o anuales) (Rojas y otros, 2020). El programa divide una cuenca en múltiples subcuencas, que luego se subdividen en HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica), estas corresponden a áreas con misma pendiente, uso y tipo de suelo (Rojas y otros, 2020).

Según Neitsch y otros (2005), la simulación puede ser separada en dos: fase terrestre del ciclo hidrológico, que controla la carga de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas al canal principal de cada subcuenca; y fase de enrutamiento del ciclo hidrológico, que regula el movimiento de agua, sedimentos, nutrientes, entre otros, a través de canales de la cuenca hasta la desembocadura.

5.1.1. Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico simulado por SWAT está basado en la ecuación del balance hídrico:

$$(1) SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw})$$

Dónde:

SW_t : contenido final de agua en el suelo (mm H₂O).

SW_0 : contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H₂O).

t : tiempo (días).

R_{day} : precipitación en un día i (mm H₂O).

Q_{surf} : escorrentía superficial en un día i (mm H₂O).

Ea : evapotranspiración en día i (Mm H₂O).

W_{seep} : percolación o infiltración en un día i (mm H₂O).

Q_{gw} : cantidad de flujo de retorno en un día i (mm de H₂O).

Las entradas y procesos para modelar la fase terrestre del ciclo hidrológico son: clima, hidrología, crecimiento de plantas, erosión, nutrientes, pesticidas y gestión de la tierra. A continuación, se detallan las dos primeras variables, por ser las involucradas en este estudio.

- **Clima:** corresponden a datos diarios o mensuales de precipitación media, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, estos datos pueden ser observados o generados por el modelo.
- **Hidrología:** los procesos hidrológicos simulados incluyen almacenamiento en el dosel, infiltración, redistribución de agua en el perfil de suelo, escorrentía superficial, evapotranspiración, flujo subterráneo lateral, flujo de retorno, cuerpos de agua como estanques y canales (Figura 5.1).

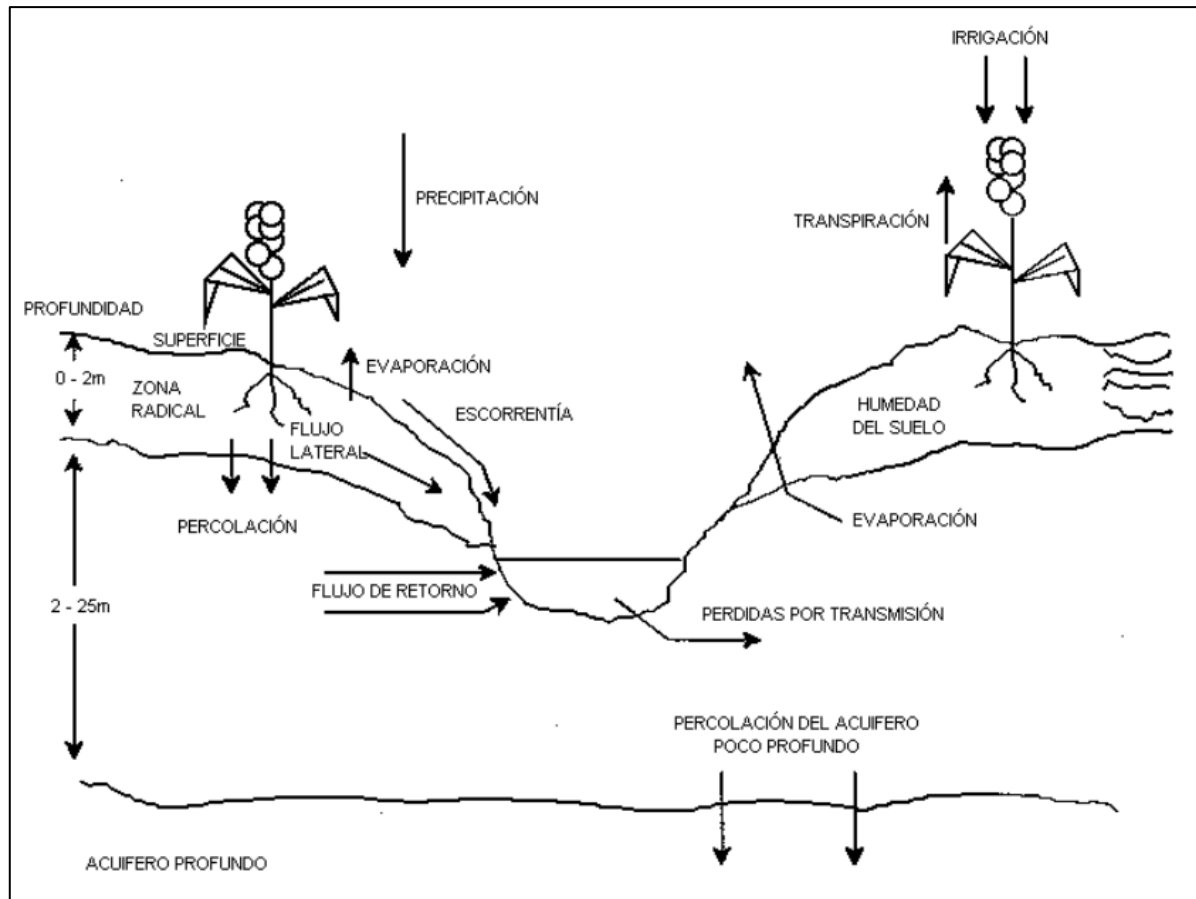


Figura 5.1. Representación del ciclo hidrológico en SWAT. Extraído de Uribe 2010.

5.1.2. Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico

El enrutamiento en el canal principal puede ser dividido en cuatro componentes: flujo, sedimento, nutrientes y sustancias químicas orgánicas. A continuación, se detalla la variable flujo, dado que es el componente que concierne a este trabajo.

- **Enrutamiento de flujo:** al fluir el agua una porción puede perderse por evaporación, transmisión o por uso antrópico. Este torrente puede ser suplementado por lluvia directamente en el canal y/o descargas de afluentes. El flujo dirigido por el canal utiliza un método variable de coeficiente de almacenamiento desarrollado por William (1969) o el método de enrutamiento de Muskingum.

5.1.3. Datos de Entrada de la Cuenca Duqueco

En este estudio, se han empleado tres categorías de variables de entrada para el modelo SWAT. Las variables espaciales, que abarcan un Modelo de Elevación Digital (DEM), el uso de suelo y las series de suelo. Las variables meteorológicas, que comprenden las temperaturas diarias máximas y mínimas, así como las precipitaciones diarias. Además, se han considerado una variable hidrológica que contiene información sobre las extracciones de agua, tanto subterráneas como superficiales. A continuación, se detallan las variables de entrada mencionadas.

5.1.3.1. DEM

Con el fin de abarcar completamente el área de estudio, en *ArcGIS* se unieron 2 DEM de ASTER, el cual posee una resolución espacial de 1 segundo de arco. Luego se ingresó el DEM unido al programa SWAT, el cual se utilizó para delimitar la cuenca Duqueco, que se observa en la Figura 5.2.

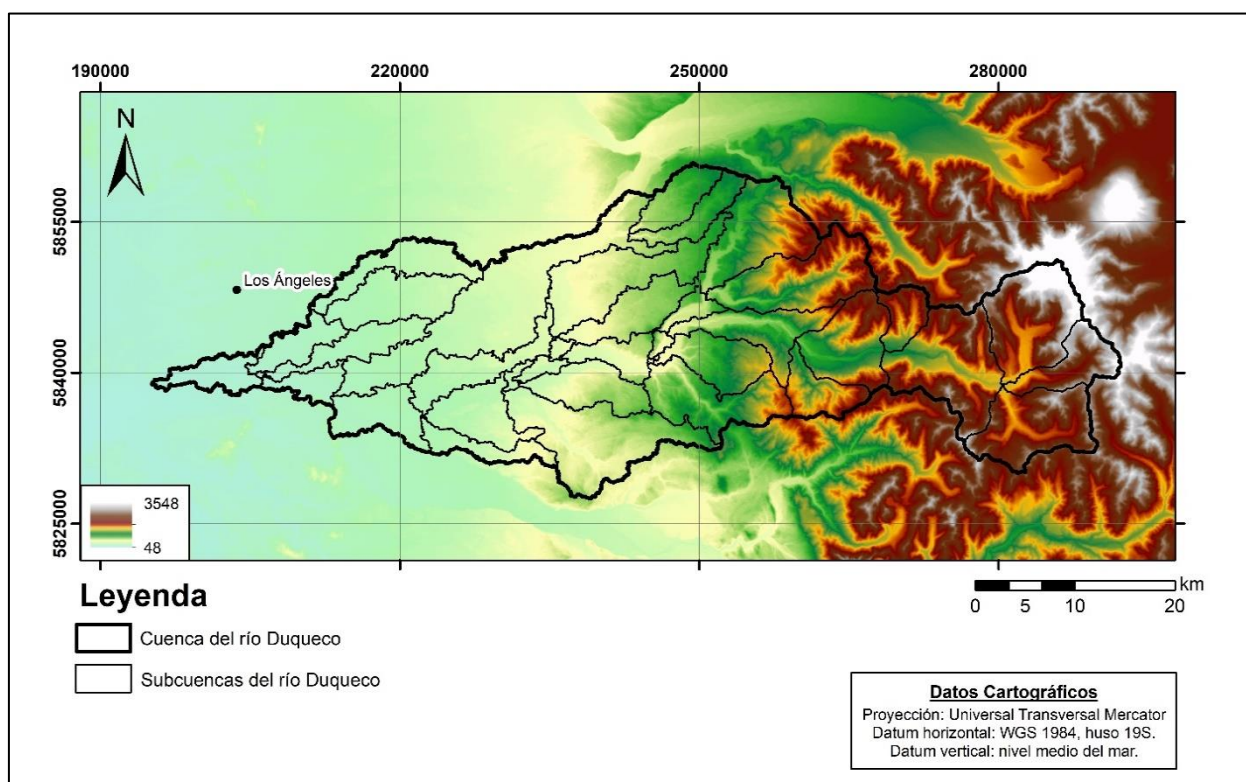


Figura 5.2. Mapa con la delimitación de la cuenca y subcuencas del río Duqueco. Elaboración propia.

5.1.3.2. Uso de suelo

El uso de suelo indica la cobertura del suelo, ya sea natural o asociada a las actividades antrópicas. Con información extraída de CONAF (2016) se realizó un mapa con los usos de suelo para la cuenca Duqueco, este se observa en la Figura 5.3. Los usos se agruparon en 11 categorías, detalladas en la leyenda del mapa, de las cuales 3 son especialmente relevantes, ya que en conjunto abarcan el 85,9 % del área de estudio. En primer lugar, plantación forestal que ocupa el 38,3 % del área, seguida por el uso de bosque nativo con un 27,6 %, y los terrenos agrícolas con un 20,0 %. Otras categorías, como praderas y matorrales comprenden un 4,1 %, áreas desprovistas de vegetación un 3,5 %, mientras que los demás de los usos en conjunto abarcan un 6,5 % del área.

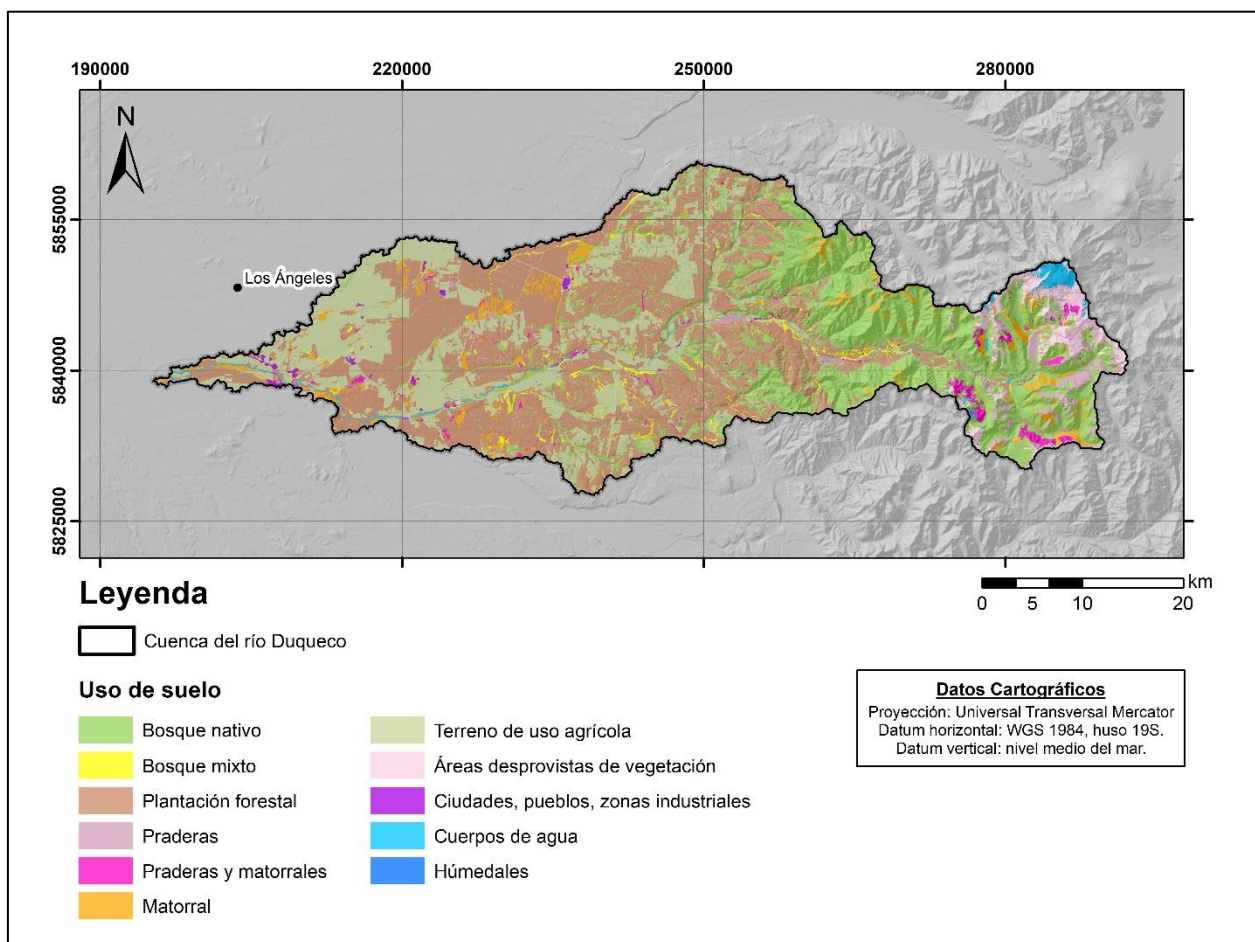


Figura 5.3. Mapa usos de suelo. Modificado de CONAF (2016). Elaboración propia.

5.1.3.3. Serie de suelo

En el área de estudio se distinguen ocho series de suelo, cuya distribución se indica en la Figura 5.4. Para el terreno no registrado se asignaron las características de la serie Antuco dada las similitudes topográficas y cercanía al área.

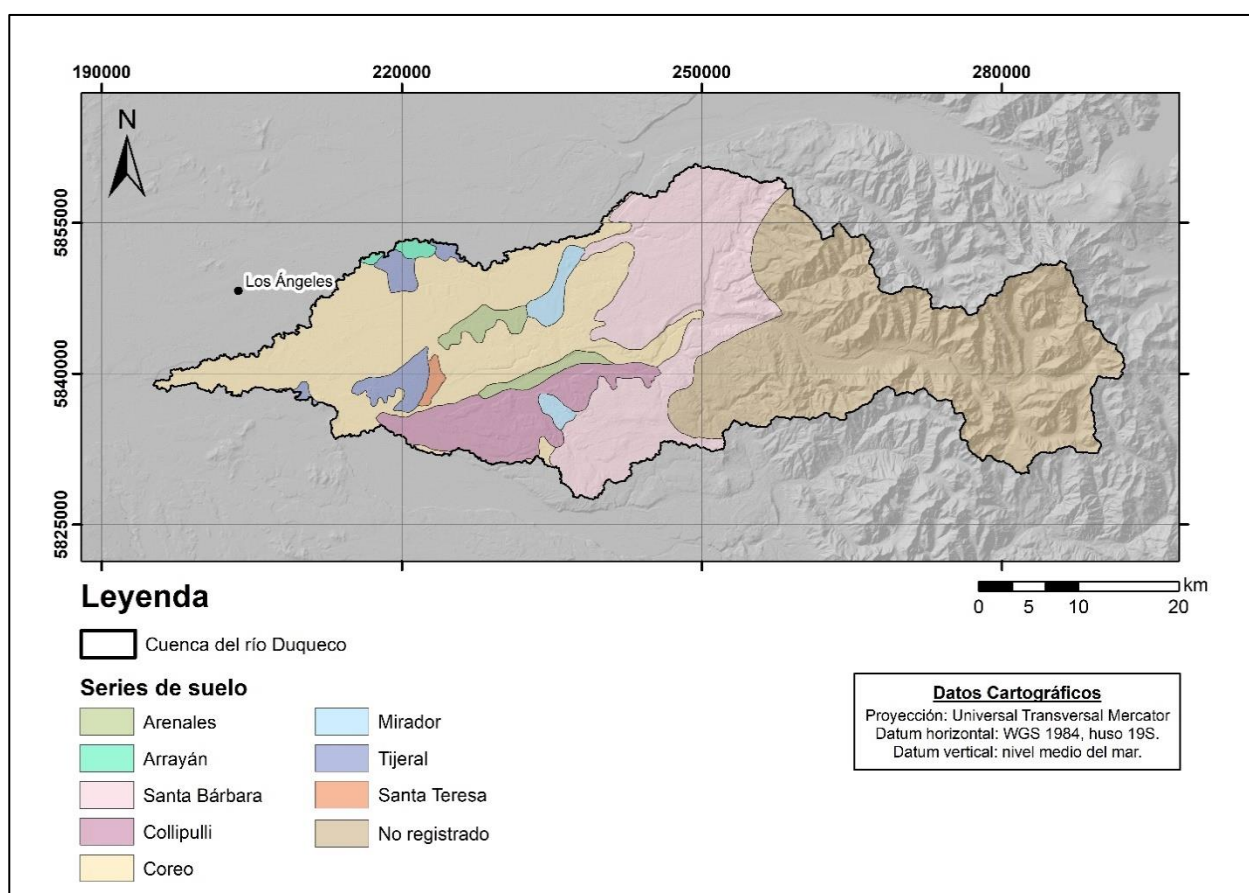


Figura 5.4. Mapa de series de suelo. Elaboración propia.

El programa SWAT requiere información para cada serie y en específico para cada capa, de sus propiedades físicas e hidráulicas. Los datos extraídos directamente de CIREN (1999) son número de capas, profundidad, textura y el contenido de carbono, estas propiedades físicas se detallan en el Anexo A.1. A partir de la granulometría se calcularon las propiedades hidráulicas (Anexo A.2), que corresponden al grupo hidrológico, la conductividad hidráulica saturada (mm/hr), el agua disponible (mm H₂O/mm suelo) y la densidad aparente (g/cm³).

5.1.3.4. Meteorología

Para la temperatura extrema diaria se utilizó el registro de la estación meteorológica Quilaco para el periodo 1982 - 2022, ya que corresponde a la estación con mayor registro cercana al área de estudio. Dado que se requiere registros completos para mayor precisión del modelo, la información faltante de la estación se rellenó ocupando el método de regresión lineal con las estaciones: Río Huequecura aguas arriba de embalse Angostura, María Dolores y El Vergel (Figura 5.5). Los datos de cada estación fueron recopilados del registro del explorador climático CR2 (<https://explorador.cr2.cl/>).

La precipitación diaria para el periodo 1982 - 2022 no fue posible obtenerla de estaciones locales debido a la incompletitud de los registros, por lo que se utilizó la base de datos de precipitación de CHIRPS (Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data) que incorpora imágenes satelitales de resolución de $0,05^\circ$ con datos de estaciones *in situ* para crear series temporales de precipitaciones cuadriculadas. Para este estudio se trabajó con la librería CHIRPS incluida en RStudio versión 2023.06.2+561.

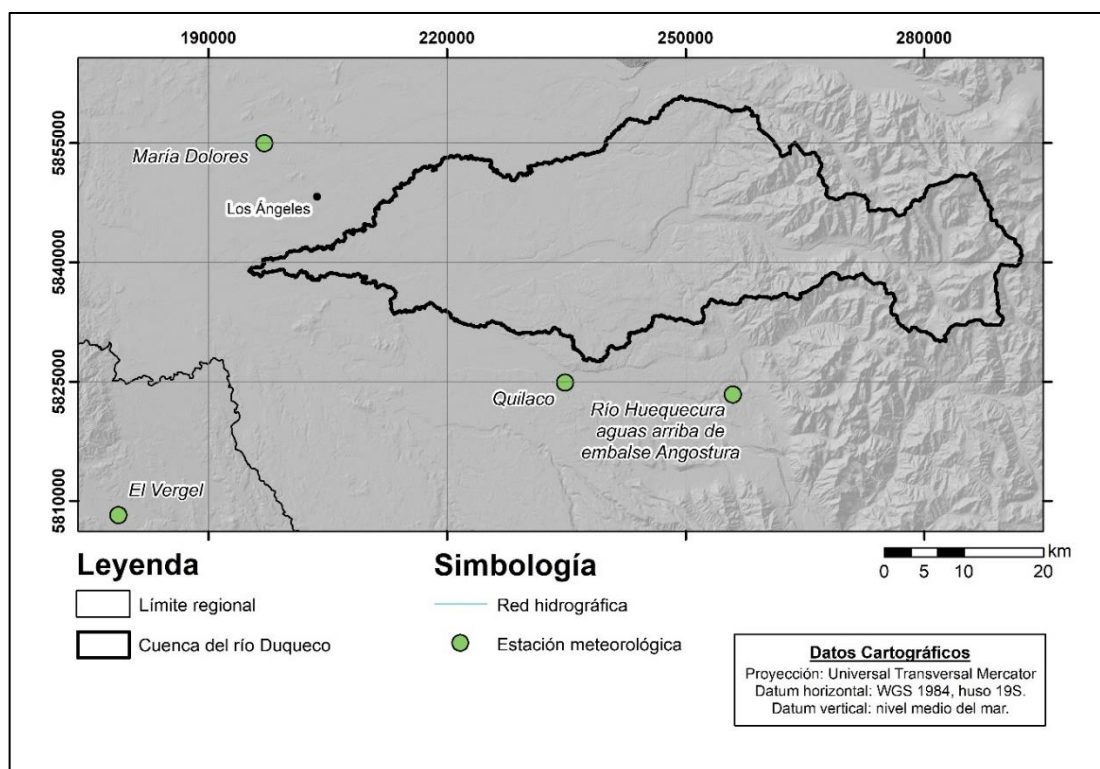


Figura 5.5. Mapa de estaciones meteorológicas. Elaboración propia.

El modelo también requiere datos de velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar, sin embargo, dichas variables fueron modeladas por el mismo programa.

5.1.3.5. Extracción de agua

En la Figura 5.6 se detallan las extracciones de agua subterránea en acuíferos someros (≤ 25 m), acuíferos profundos (> 25 m) y extracciones superficiales de ríos, esteros o vertientes. Los códigos de cada extracción con sus respectivos caudales y usos se extrajeron de la DGA (<https://dga.mop.gob.cl/>). Cabe destacar que no se consideró el agua extraída para riego dentro de la misma cuenca, ya que no es agua que se elimine del sistema.

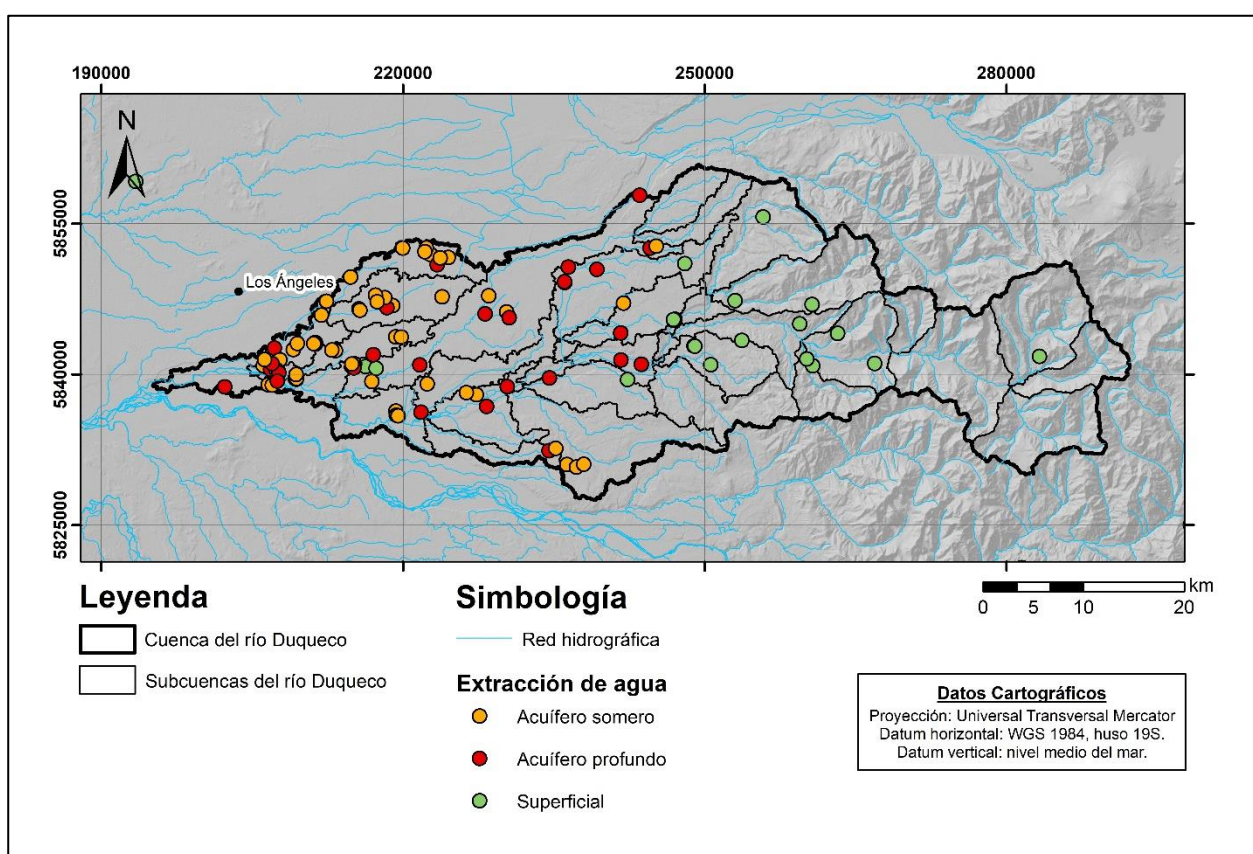


Figura 5.6. Mapa de extracciones de agua subterráneas y superficiales. Elaboración propia.

Para identificar las captaciones en el área de estudio se procedió a descargar el Excel con derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA para la región del Biobío, cuyo material posee más de 9.000 extracciones de agua.

Luego, se filtraron los resultados para identificar los derechos que estuvieran en la provincia del Biobío; que fueran consecutivos; que su uso sea diferente a riego; y según su naturaleza, ya sea subterránea, o superficial y corriente, según corresponda. Estas captaciones filtradas se ingresaron a *ArcGIS*, con el fin de seleccionar las que estaban dentro del área de estudio, las cuales se homologaron al mismo sistema cartográfico (WGS 1984).

Para las extracciones superficiales, se sumaron los caudales por subcuenca. Mientras que, para los derechos subterráneos se buscó el informe técnico correspondiente a cada captación en el registro de la DGA. De esta manera, se determinó la profundidad de cada una y se pudo asignar a un acuífero, ya sea somero o profundo, según corresponda. Se tuvieron las siguientes consideraciones: para extracciones clasificadas como punteras, si no se obtuvo información de la profundidad en su respectivo informe, se consideró como acuífero somero y las extracciones que tanto en el Excel entregado por la DGA como en los informes técnicos no se encontró su uso de agua, se consideró un uso diferente a riego. Finalmente, se sumaron los caudales de las extracciones por subcuenca según la profundidad del acuífero. En el Anexo A.3 y A.4 se observan los registros para acuíferos someros y profundos respectivamente, y en el Anexo A.5 las extracciones superficiales.

5.2. Calibración y Validación

Del modelo pueden surgir incertidumbres por errores de medición o del propio programa, por tanto, se debe probar su correlación entre los datos observados y los resultados simulados estadística y gráficamente (Koua y otros, 2023). Arnold y otros (2012) sugieren que, para la calibración y validación se debe determinar los parámetros más sensibles para el proceso predominante del componente de interés, donde el usuario determina que variables ajustar, ya sea por bibliografía o por un análisis de sensibilidad. Luego, se debe calibrar el modelo, donde se reducen las incertidumbres de la simulación, comparando datos observados con los datos simulados. Finalmente, se valida el modelo al demostrar que se cumple con la precisión requerida para el estudio, para ello se ejecuta el modelo con parámetros determinados en la calibración y se compara la simulación con datos observados que no fueron ocupados durante la calibración. Para este trabajo se utilizó el programa SWAT - CUP Premium mediante el algoritmo SPE (Swat Parameter Estimator), que permite realizar análisis de sensibilidad, calibración y validación de forma automática.

Moriasi y otros (2007) detallan los indicadores de bondad de ajuste, los ocupados para este trabajo son:

- **Coefficiente de determinación (R²):** describe la variabilidad de los datos explicada por el modelo de regresión, varía de 0 a 1, donde los valores más altos indican menor variación del error, a menudo se acepta un valor superior a 0,5.
- **Coefficiente de eficiencia de Nash - Sutcliffe (NSE):** determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos. Indica que tan bien los datos observados versus simulados se ajustan a la línea 1:1. Sus valores oscilan entre $-\infty$ y 1, siendo 1 el valor óptimo; los valores entre 0 y 1 son aceptables; y los menores a 0 no son aceptables.

$$(2) NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - Y_{i\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - Y_{\text{medio}})^2} \right]$$

Dónde:

$Y_{i\text{obs}}$: observación i - esima para el componente evaluado.

$Y_{i\text{sim}}$: i - esima simulación para el componente evaluado.

Y_{medio} : media de datos observados.

n : número total de observaciones.

- **Porcentaje bias (PBIAS):** mide el porcentaje de sesgo, esto se refiere a la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o pequeños que los datos observados. El valor óptimo es de 0; los valores de baja magnitud indican una simulación precisa del modelo; un valor positivo muestra una subestimación del modelo; y un valor negativo indica una sobrestimación del sesgo del modelo.

$$(3) PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - Y_{i\text{sim}}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}})} \right]$$

Dónde:

$Y_{i\text{ obs}}$: observación i - esima para el componente evaluado.

$Y_{i\text{ sim}}$: i - esima simulación para el componente evaluado.

n : número total de observaciones.

- **Desviación estándar del error cuadrático medio (RSR)**: el error cuadrático medio (RMSE) calcula la raíz cuadrada del error promedio al cuadrado entre los valores observados y los simulados. El parámetro estadístico RSR estandariza RMSE al utilizar la desviación estándar de las observaciones, su valor optimo es 0.

$$(4) \text{ RSR} = \frac{\text{RMSE}}{\text{STDEV}_{\text{obs}}} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ obs}} - Y_{i\text{ sim}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ obs}} - Y_{\text{ medio}})^2}} \right]$$

Dónde:

RMSE : error cuadrático medio.

$\text{STDEV}_{\text{obs}}$: desviación estándar de los datos observados.

$Y_{i\text{ obs}}$: observación i - esima para el componente evaluado.

$Y_{i\text{ sim}}$: i - esima simulación para el componente evaluado.

$Y_{\text{ medio}}$: media de datos observados.

n : número total de observaciones.

A modo de resumen se observa la Tabla 5.1, que señala los límites de los desempeños para los indicadores de bondad de ajuste.

Tabla 5.1. Límites de desempeño de medidas de bondad de ajuste. Modificado de Moriasi y otros (2007).

Desempeño	R^2	RSR	NSE	PBIAS
Muy bueno	$R^2 > 0,8$	$0 < \text{RSR} \leq 0,5$	$0,75 < \text{NSE} \leq 1$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bueno	$0,7 < R^2 \leq 0,8$	$0,5 < \text{RSR} \leq 0,6$	$0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$	$\pm 10 < \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfactorio	$0,6 < R^2 \leq 0,7$	$0,6 < \text{RSR} \leq 0,7$	$0,5 < \text{NSE} \leq 0,65$	$\pm 15 < \text{PBIAS} < \pm 25$
Insatisfactorio	$R^2 \leq 0,6$	$\text{RSR} > 0,7$	$\text{NSE} \leq 0,5$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

5.2.1. Calibración y Validación de la Cuenca Duqueco

Se calibrará y validará el modelo estadística y gráficamente con datos de caudales, ya que se tiene registro de estaciones fluviométricas hasta el año 2021, al tener como periodo de calentamiento 2 años, la calibración será de 1984 - 2002 y la validación de 2003 - 2021. Para calibrar y validar la simulación se ocuparán las estaciones fluviométricas Río Duqueco en Cerrillos y Río Duqueco en Villacura, desde ahora para fines prácticos llamadas como estación Cerrillos y Villacura respectivamente. La estación Cerrillos coincide con la desembocadura de la subcuenca N° 20, mientras que la estación Villacura con la desembocadura de la subcuenca N° 22 (Figura 5.7).

Los datos de caudales de cada estación se extrajeron de CR2 (<https://explorador.cr2.cl/>) y de la DGA (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>).

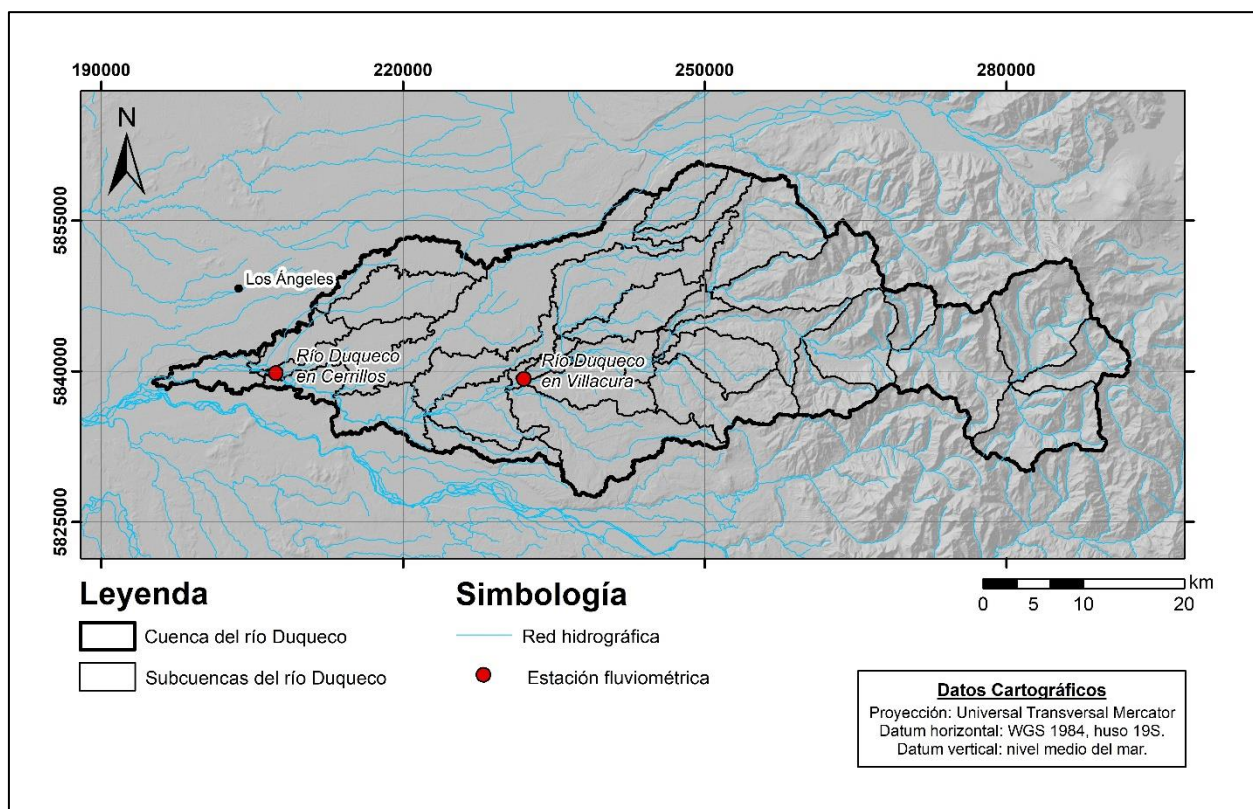


Figura 5.7. Mapa de estaciones fluviométricas. Elaboración propia.

A partir de bibliografía se recopilaron parámetros ocupados por diversos autores en la calibración de caudales, los que se precisan en el Anexo A.6.

Luego, estos parámetros fueron sometidos a un análisis de sensibilidad en SWAT - CUP, lo que resultó con la elección de los 18 parámetros más sensibles en la calibración de la cuenca Duqueco, estos se muestran en la Anexo A.7 con su respectiva descripción.

Se deben realizar 2 calibraciones, la primera con la estación aguas arriba, que corresponde a la estación Villacura y posteriormente la estación Cerrillos. Para calibrar el modelo se modificarán parámetros en las subcuencas que tienen influencia sobre cada estación fluviométrica, de esta manera se determinó las subcuencas que aportan caudal a ambas estaciones en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Subcuencas que influyen en cada estación.

Estación	Cerrillos	Villacura
Subcuencas	1, 2, 20, 21, 23, 29, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 41	3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 33, 40

En cada calibración se deben ingresar los 18 parámetros detallados en la Anexo A.7, seguido de 600 simulaciones. A través de esta serie de simulaciones SWAT - CUP acotará el rango inicial de cada variable. Con los rangos acotados, se llevarán a cabo nuevamente 600 simulaciones, lo que permitirá determinar finalmente los valores a modificar para cada parámetro.

5.2.1.1. Validación con extracción de agua subterránea

El archivo de salida de SWAT incluye datos que conciernen al agua subterránea, de esta manera se puede calibrar y validar el sistema con datos de almacenamiento, recarga o percolación de acuíferos someros o profundos. Sin embargo, la cuenca del río Duqueco no posee este tipo de información, solo se puede tener cierta estimación con el único pozo de la DGA que está en el área de estudio, el pozo Quilleco en estadio municipal, situado en la subcuenca N° 9 (Figura 5.8).

El pozo Quilleco en estadio municipal solo tiene información mensual para el periodo 2015 - 2021 de mediciones en el nivel estático, cuyos datos son tomados sin periodicidad. Dicho esto, solo se podrá realizar una validación *grosso modo* comparando gráficamente las variaciones en el nivel estático observadas en el pozo de la DGA, con la recarga de acuíferos por HRU simulada por el programa.

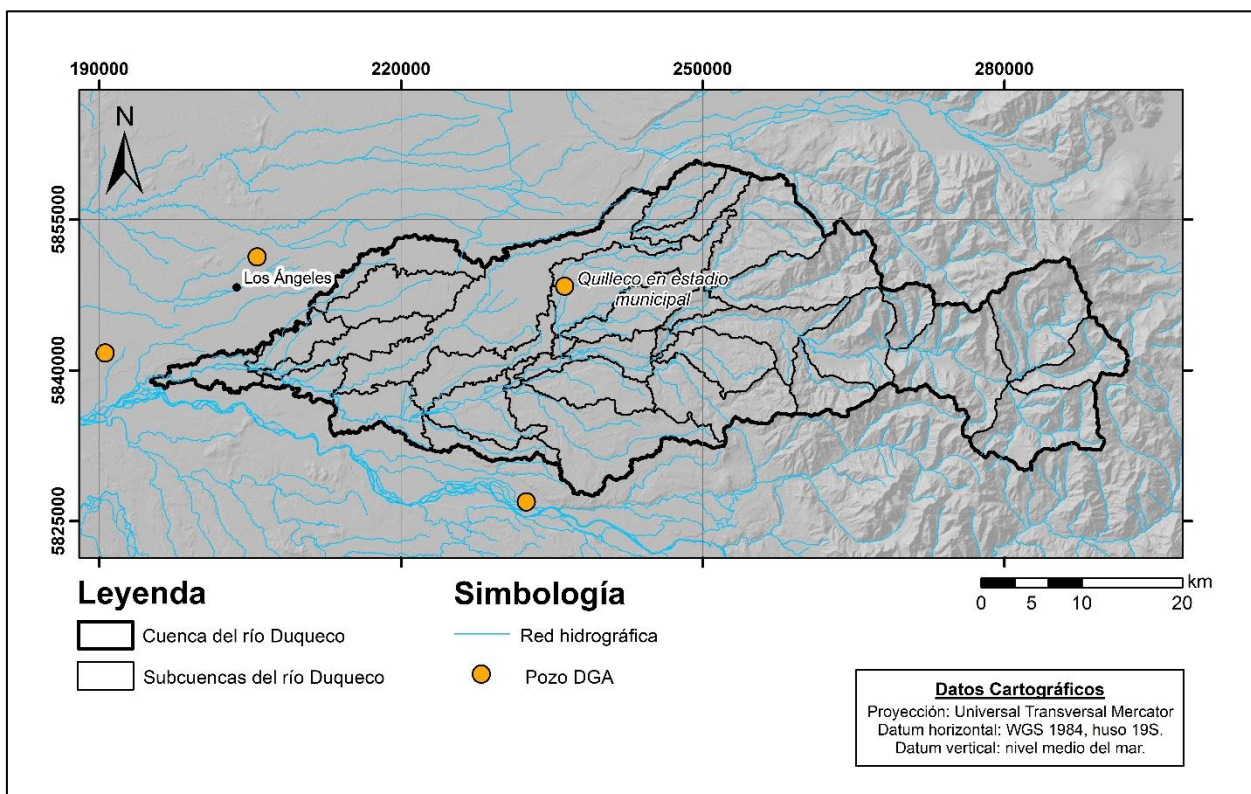


Figura 5.8. Mapa pozos DGA con información mensual de nivel estático. Elaboración propia.

5.3. Modelo de Cambio Climático

Para este estudio se comparará el caudal estimado para la cuenca en el modelo calibrado y validado con datos locales de la cuenca Duqueco para el periodo 2000 - 2020, con el caudal simulado según los datos del IPSL - CM5A - LR para el periodo 2030 - 2050 en un escenario de muy altas emisiones GEI (RCP 8.5), únicamente cambiando la temperatura y precipitación por los datos entregados por el modelo. De esta manera, se mantuvo sin cambios el uso y el tipo de suelo, además no se consideró la incorporación de nuevas captaciones de agua, ni modificaciones en la red hidrográfica.

El modelo IPSL - CM5A - LR fue desarrollado por el Instituto Pierre Simon Laplace (IPSL), el cual reúne a 9 laboratorios de Francia, estos son: CERE, GEOS, ATMOS, LERMA, LISA, LMD, LSCE y METIS. En general, este modelo simula la atmósfera, la superficie terrestre, el hielo marino, el ciclo del carbono e incluye el efecto de los aerosoles (Gent y otros, 2011; Dufresne y otros, 2013).

6. RESULTADOS

6.1. Calibración y Validación

Tras realizar una serie de simulaciones en SWAT - CUP para cada estación, se obtuvieron los valores a modificar para cada parámetro, los que se detallan en el Anexo A.8. Estos valores reemplazaron a los modelados en primera instancia por SWAT. Hecho esto, se procedió a calcular los resultados de la calibración y validación, según los indicadores de bondad de ajuste para las estaciones Villacura y Cerrillos, los que se observan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Indicadores de bondad de ajuste para la calibración y validación.

Estación		R ²	NSE	PBIAS	RSR
Villacura	Calibración	0,85	0,97	18,40	0,45
		Muy bueno	Muy bueno	Satisfactorio	Muy bueno
	Validación	0,76	0,97	22,73	0,52
		Bueno	Muy bueno	Satisfactorio	Bueno
Cerrillos	Calibración	0,84	0,88	10,73	0,44
		Muy bueno	Muy bueno	Bueno	Muy bueno
	Validación	0,77	0,84	8,35	0,48
		Bueno	Muy bueno	Muy bueno	Muy bueno

Según este análisis estadístico, los indicadores R², NSE y RSR obtienen desempeños “muy buenos” y “buenos” para ambas estaciones ya sea en la calibración y/o validación del modelo. Esta situación se mantiene para el PBIAS de la estación Cerrillos, sin embargo, en la estación Villacura se muestran resultados “satisfactorios”, siendo el peor ajuste del modelo.

El análisis gráfico consta de una calibración y validación del modelo de carácter visual, para ello se observa en la Figura 6.1 el caudal medio mensual simulado versus el medido en las respectivas estaciones. Se aprecia para ambas estaciones que el modelo subestima los *peaks* de los caudales, mientras que, modela correctamente los caudales medios. Para los caudales bajos, el modelo los simula correctamente para la estación Villacura y los sobrestima levemente para la estación Cerrillos.

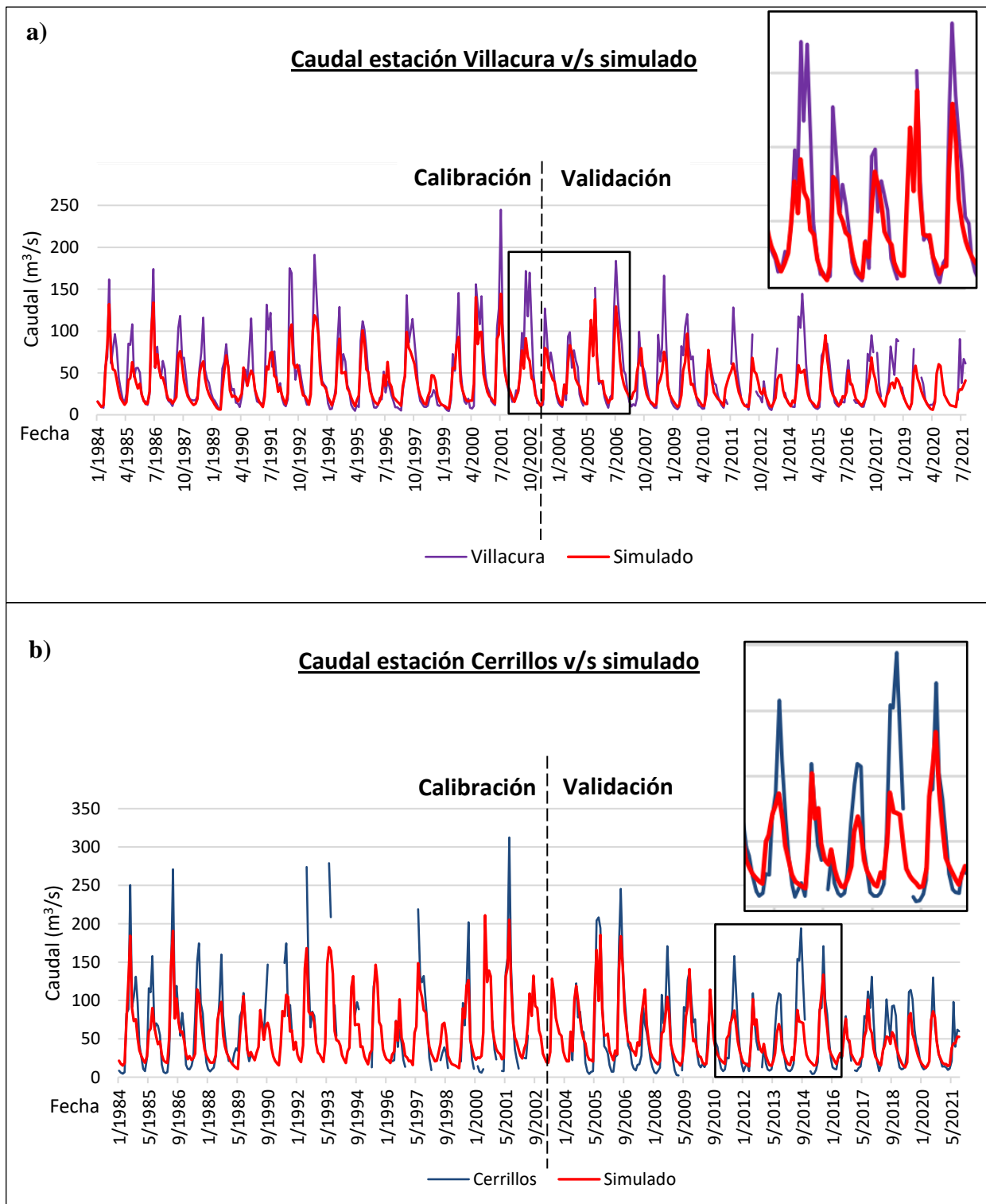


Figura 6.1. Caudales de la estación Villacura y Cerrillos versus los simulados para la calibración y validación. a) Caudal estación Villacura versus simulado. b) Caudal estación Cerrillos versus simulado. Elaboración propia.

6.1.1. Re - validación

Se validará el modelo comparando el nivel estático medido en el pozo Quilleco en estadio municipal con la recarga de acuíferos simulada por SWAT para su correspondiente HRU (Figura 6.2). Si bien hay pocos datos en la medición de nivel estático para observar tendencias significativas, parece haber cierta relación general entre los datos, donde a mayor recarga disminuye el nivel estático y viceversa.

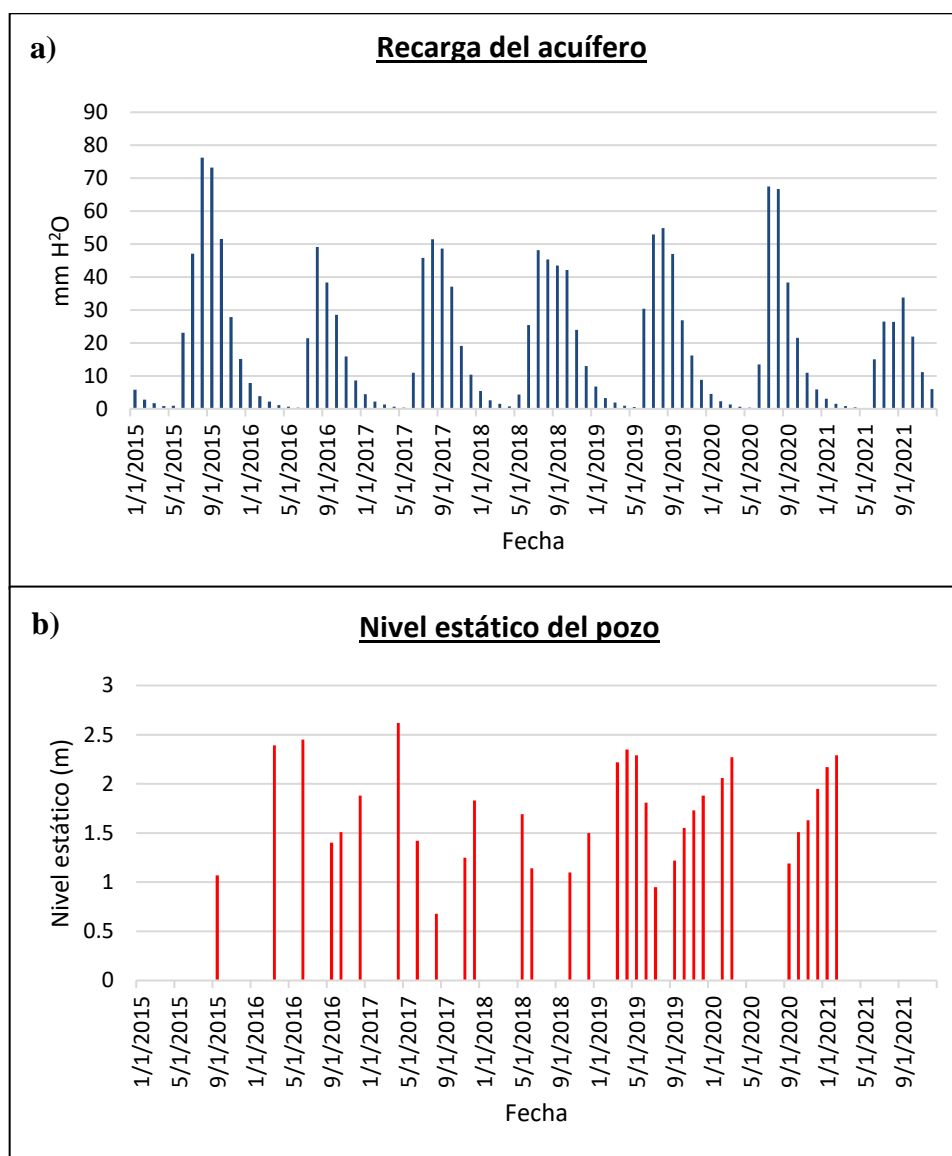


Figura 6.2. Recarga del acuífero y el nivel estático del pozo. a) Recarga simulada en mm H₂O. b) Nivel estático medido en el pozo Quilleco en estadio municipal. Elaboración propia.

6.2. Cambio Climático en la Cuenca Duqueco

El modelo IPSL - CM5A - LR simulado para el periodo 2030 - 2050 en un escenario RCP 8.5, muestra reducciones del caudal medio mensual de $16,13 \text{ m}^3/\text{s}$ a $14,07 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que equivale a un 12,79 %. A nivel de subcuenca, se observa en la Figura 6.3 y en el Anexo A.9 en general disminuciones de caudal, salvo por 4 subcuencas. Particularmente, el cauce del río Duqueco muestra reducciones de caudal, las que varían entre un 10 - 35 %. En tanto, en la naciente del río Coreo se obtiene el mayor aumento de caudal, que corresponde a un 14 %, situación que a lo largo de su cauce cambia a un leve descenso entre el 0 - 10 %.

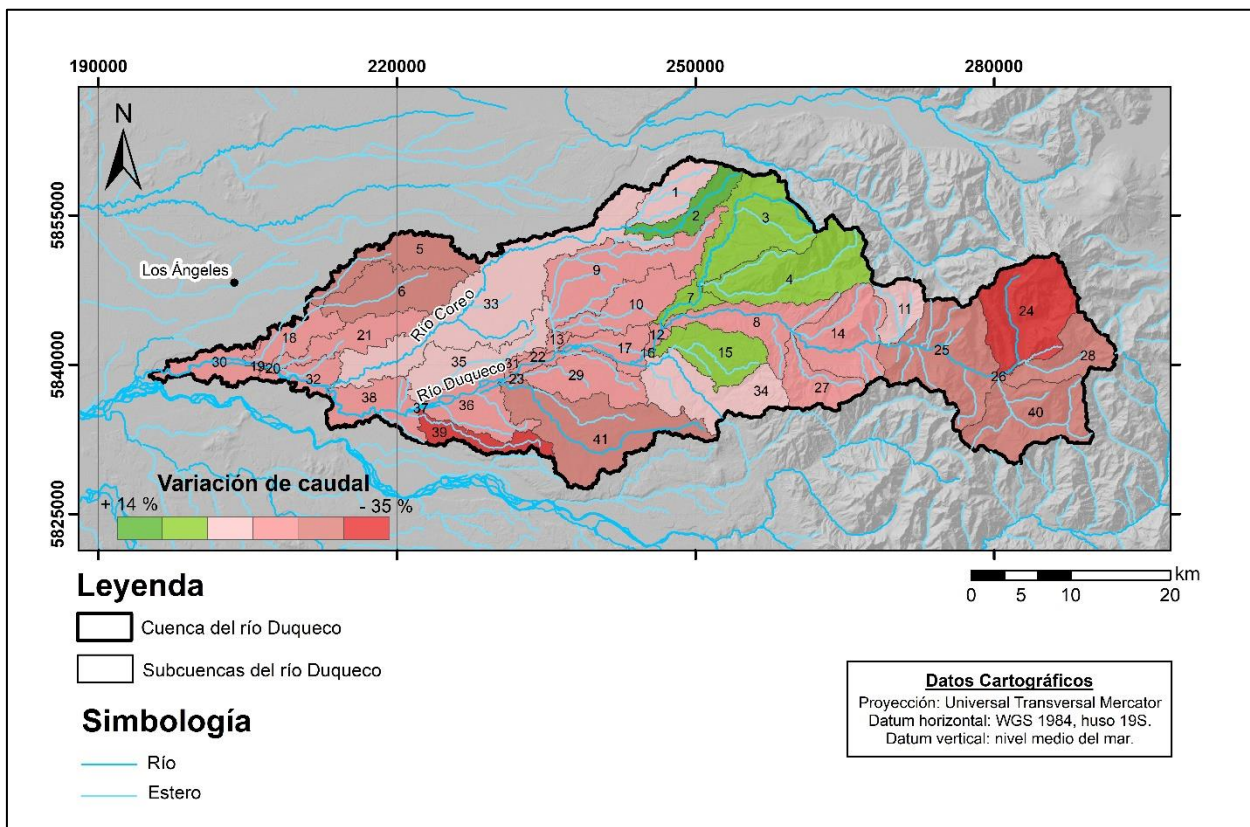


Figura 6.3. Variación del caudal medio para el 2030 - 2050 por subcuenca. Elaboración propia.

En cuanto al efecto del cambio climático por mes, se observa en la Figura 6.4 y en el Anexo A.10 en general reducciones del caudal, a excepción de 2 meses. Los meses más afectados son entre julio y septiembre, relacionados a invierno, en tanto los meses que corresponden a primavera y verano poseen menores disminuciones. Mientras que, entre mayo y junio hay un aumento de los caudales medios, meses que conciernen al otoño.

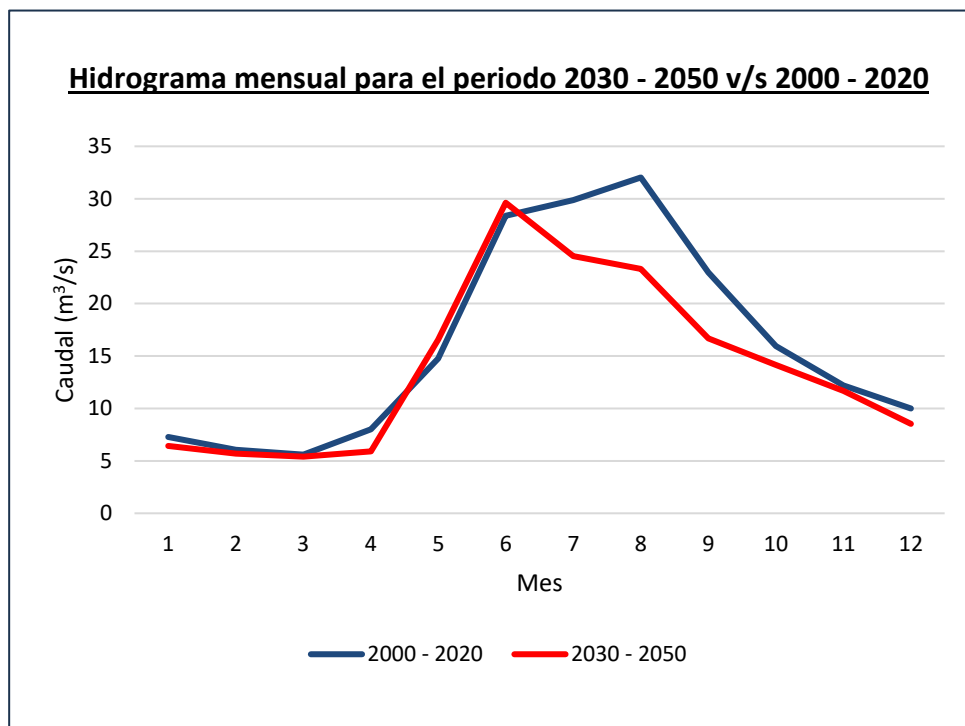


Figura 6.4. Hidrograma mensual para el periodo 2030 - 2050 versus el 2000 - 2020.

Elaboración propia.

La recarga media mensual de agua subterránea para el periodo 2030 - 2050 disminuyó de 27,30 mm H₂O a 26,40 mm H₂O, lo que corresponde a 3,28 %. Mientras que, por subcuenca se observa en la Figura 6.5 y en el Anexo A.11 en general disminuciones de mayor magnitud de caudal en el extremo este y oeste de la cuenca, mientras que su parte media posee aumentos de recarga con leves disminuciones.

En la Figura 6.6 y en el Anexo A.12 se observa la recarga media por mes, donde los meses afectados son enero, abril, julio, agosto, septiembre y diciembre, siendo invierno la estación con mayor déficit. Mientras que, los meses con aumento de recarga son febrero, marzo, mayo, junio, octubre y noviembre.

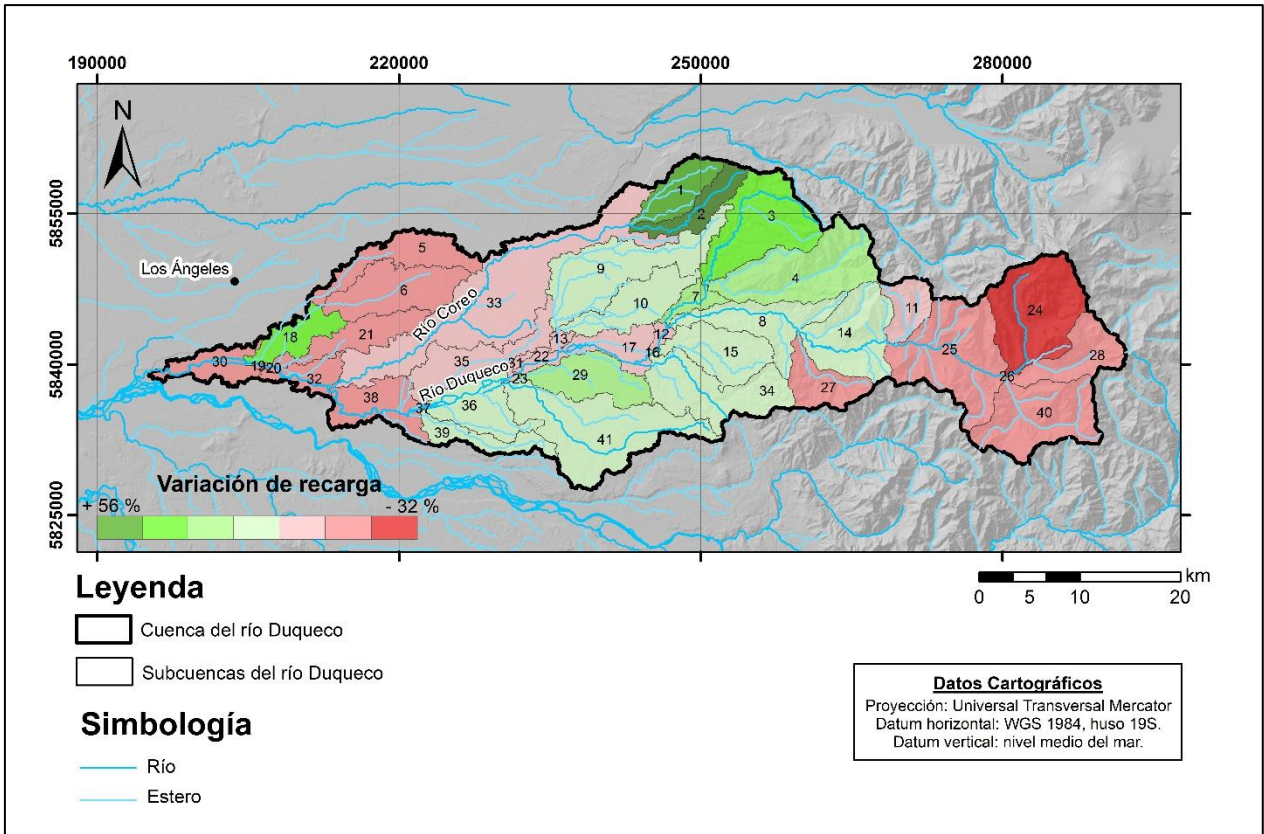


Figura 6.5. Variación de la recarga media para el 2030 - 2050 por subcuenca. Elaboración propia.

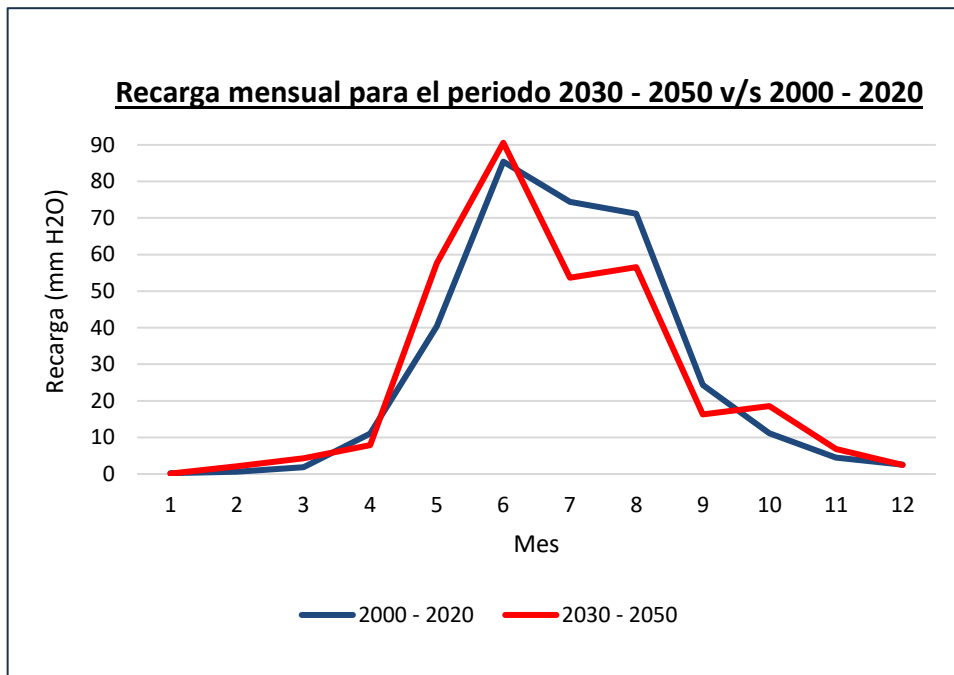


Figura 6.6. Recarga mensual para el periodo 2030 - 2050 versus el 2000 - 2020.

Elaboración propia.

7. DISCUSIÓN

En el análisis estadístico del caudal modelado, el indicador R^2 muestra que el modelo se ajusta bien con la variabilidad de los datos observados; el NSE, señala que las predicciones del modelo coinciden muy bien con los datos observados, de esta manera, el modelo es confiable; el RSR insinúa que se ajusta de buena manera el modelo a los datos observados en términos de la dispersión de los errores cuadráticos medios; mientras que, el PBIAS muestra valores positivos, los que se relacionan a una subestimación del caudal, situación que se agrava en el modelo de la estación Villacura, no obstante, continúa siendo aceptable. En general el modelo posee un buen rendimiento tanto en el ajuste de los datos como en la reducción de los errores, sin embargo, está subestimando los caudales.

En el análisis gráfico de los caudales medios mensuales se observó que el modelo subestima los *peaks*, esto se condice con el análisis estadístico, donde se determinó que el modelo está subestimando los caudales en ambas estaciones. Esto puede estar relacionado a la fuente de información de las precipitaciones diarias. Riquelme (2018) comparo la precipitación mensual de CHIRPS versus la registrada en la estación meteorológica Los Ángeles (Figura 7.1) y a través de este análisis determino que CHIRPS subestima los *peaks* de precipitación. Ya que la precipitación afecta directamente la escorrentía superficial, una subestimación de los *peaks* de precipitación ocasionará una subestimación en los *peaks* de los caudales. Sin embargo, Méndez (2016) y Zambrano y otros (2017), estudian el comportamiento de CHIRPS en Chile y determinan que es recomendable su uso dado su largo registro de datos (1981 - presente), baja latencia y su alta resolución espacial.

También se observó en el análisis gráfico que el modelo sobrestima levemente los caudales bajos para la estación Cerrillos. Si bien, Méndez (2016) determinó que CHIRPS en las temporadas cálidas (asociadas a caudales bajos) subestima la precipitación en altitudes medias, para este caso, el error proviene de la calibración realizada. Ya que, SWAT - CUP con la finalidad de compensar la subestimación de los caudales altos, ajustó los parámetros para que esta diferencia sea menor, lo que ocasiono la subestimación de los caudales bajos. Esto se observa en la Figura 7.2 que muestra el caudal medio mensual de la estación Cerillos versus el simulado previo a la calibración del modelo, donde por el contrario a la Figura 6.1 existe una leve subestimación de los caudales bajos.

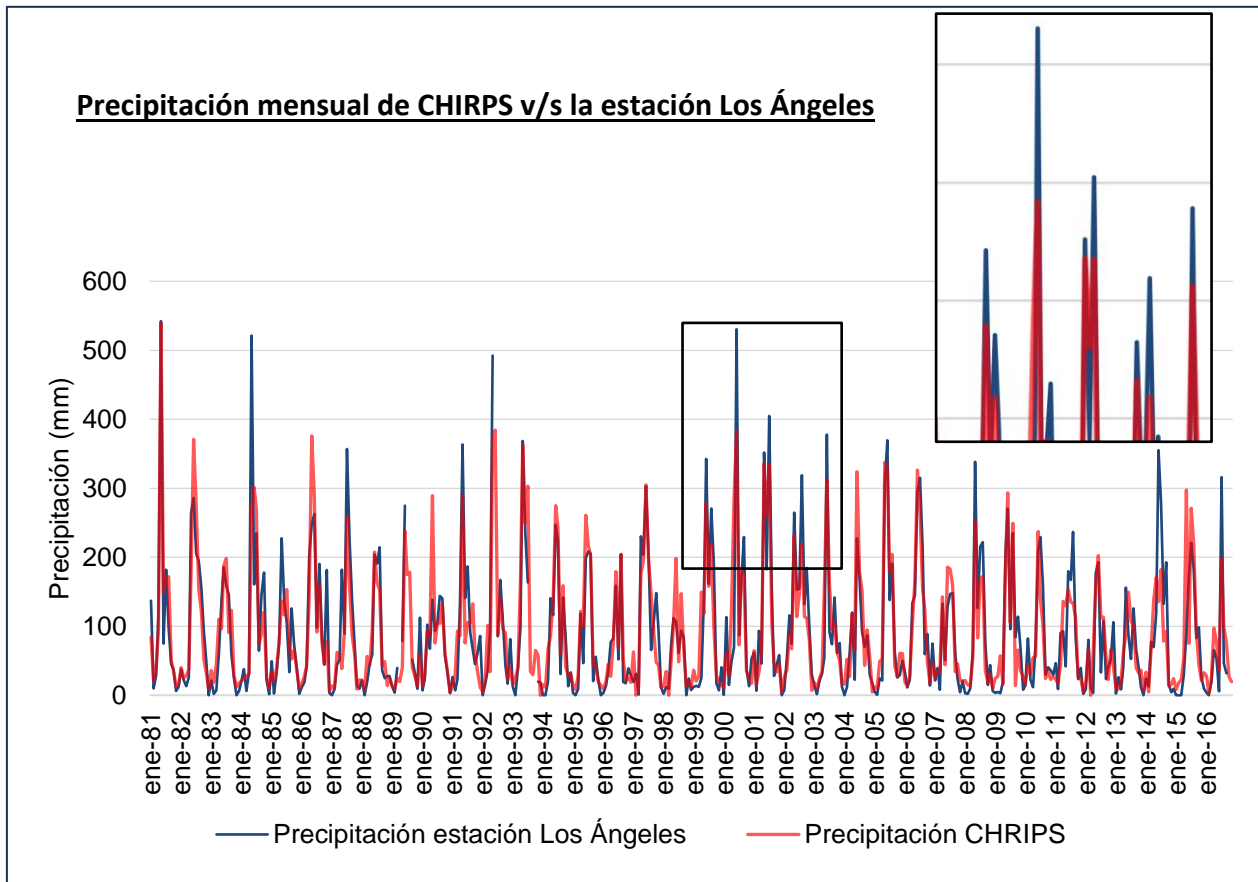


Figura 7.1. Precipitación mensual de CHIRPS versus la estación Los Ángeles. Modificado de Riquelme (2018).

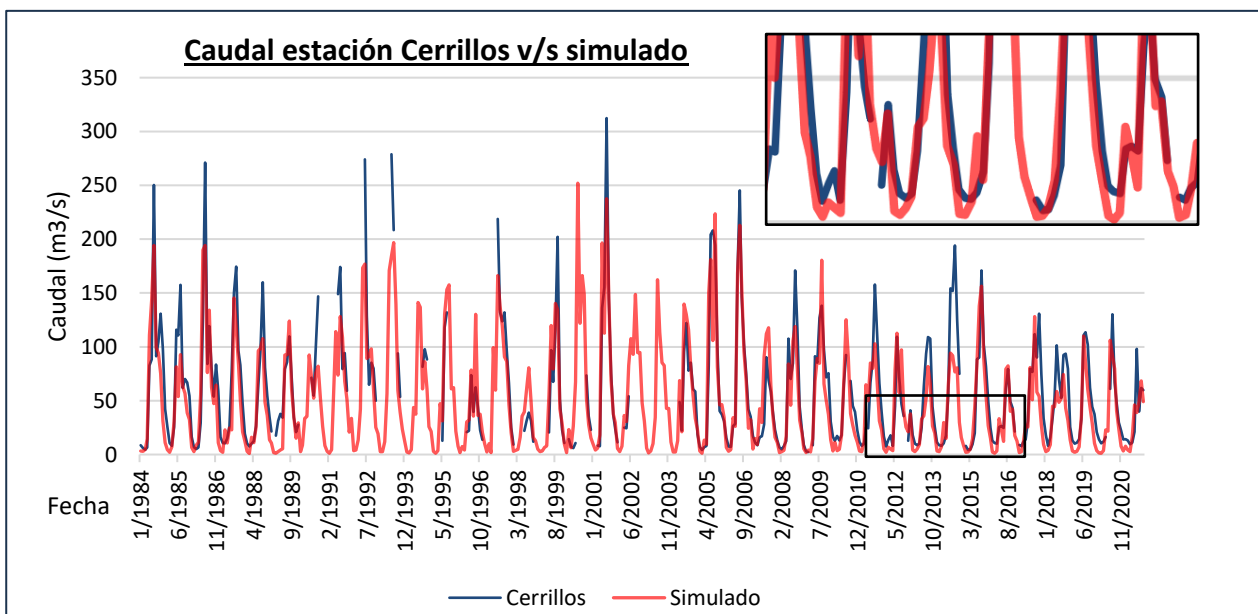


Figura 7.2. Caudal de la estación Cerrillos versus el simulado previo a la calibración. Elaboración propia.

La re - validación realizada comparando la recarga del acuífero con la medición del nivel estático del pozo Quilleco en estadio municipal indica que ambas variables son inversamente proporcionales entre sí, lo que es válido, ya que, al aumentar la recarga del acuífero, habrá más agua en este, lo que conllevará a una disminución del nivel estático y viceversa. Sin embargo, el resultado no es contundente debido a la falta de información, al no contar con datos observados de almacenamiento, recarga o percolación de acuíferos en el área de estudio.

Cabe destacar que la modelación de los caudales también puede verse afectada por la falta de información en cuanto a las series de suelo en la cuenca. En la Figura 5.3 se observó que sobre el 38 % del área de estudio corresponde a suelo no registrado, si bien se le asignó las características de la serie Antuco, es necesario un mayor detalle, ya que es una extensa área con diferente topografía (Figura 5.1) y substrato (Figura 3.2). Esta área al tener mejor detalle cambiaría las propiedades del suelo, lo que podría generar datos más certeros de los caudales.

La Universidad de Chile (2022) evaluó 4 MCG para el periodo 2030 - 2060 en un escenario RCP 8.5 para el territorio nacional, particularmente su resultado de la variación de caudal anual para el modelo IPSL - CM5A - LR se muestra en la Figura 7.3. Se observa que para el área de estudio estiman una reducción de caudal entre 10 - 20 %, lo que se condice con el 12,79 % calculado en este trabajo. Es preciso señalar que los modelos climáticos no corresponden a una representación perfecta del clima, por lo que se deben comparar diversos modelos que incluyan los mismos escenarios climáticos para disminuir la incertidumbre.

De acuerdo con la variabilidad espacial del caudal medio mensual en la cuenca, se evidenció que el porcentaje de reducción del caudal en los 2 cursos de agua principales está determinado por la situación en el nacimiento de cada río. De esta manera, la subcuenca asociada al origen del río Duqueco es la más afectada por el cambio climático con una reducción del 35 %, esto afecta en toda la trayectoria del río, ya que al continuar su recorrido en la cordillera de los Andes muestra una reducción entre el 20 - 30 %, y entre la precordillera y depresión intermedia las disminuciones oscilan entre el 10 y 20 %.

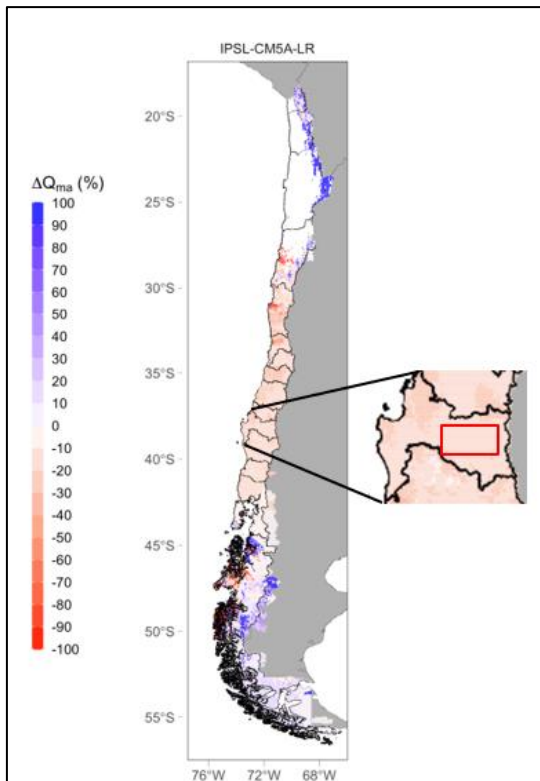


Figura 7.3. Variación de caudal medio anual para el periodo 2030 - 2060. Modificado de Universidad de Chile (2022).

Mientras que, el río Coreo su nacimiento muestra un 14 % de aumento de caudal, lo que repercute en todo su cauce, provocando solo leves disminuciones en el rango del 0 al 10 %. Con respecto a la variabilidad de la recarga media mensual, nuevamente la subcuenca más afectada es la asociada a la naciente del río Duqueco, con un 32,46 %, en tanto la subcuenca con mayor recarga corresponde al origen del río Coreo con un 56,66 %. Sin embargo, esto no repercute en sus cauces, sino que lo que determina la cantidad de la recarga es el recorrido este - oeste de la cuenca. Hacia el este la reducción de la recarga puede relacionarse a la unidad hidrogeológica, la que corresponde a acucludos, en tanto, para la parte oeste de la cuenca se puede asociar a las extracciones de agua subterráneas, que se observan en la Figura 7.4. Esto, se condice con lo expuesto por UNESCO (2022), “Aunque la variabilidad climática y el cambio climático pueden jugar un papel importante, la mayoría de los casos de agotamiento de las reservas de agua subterránea se deben a la extracción intensiva” (p. 2).

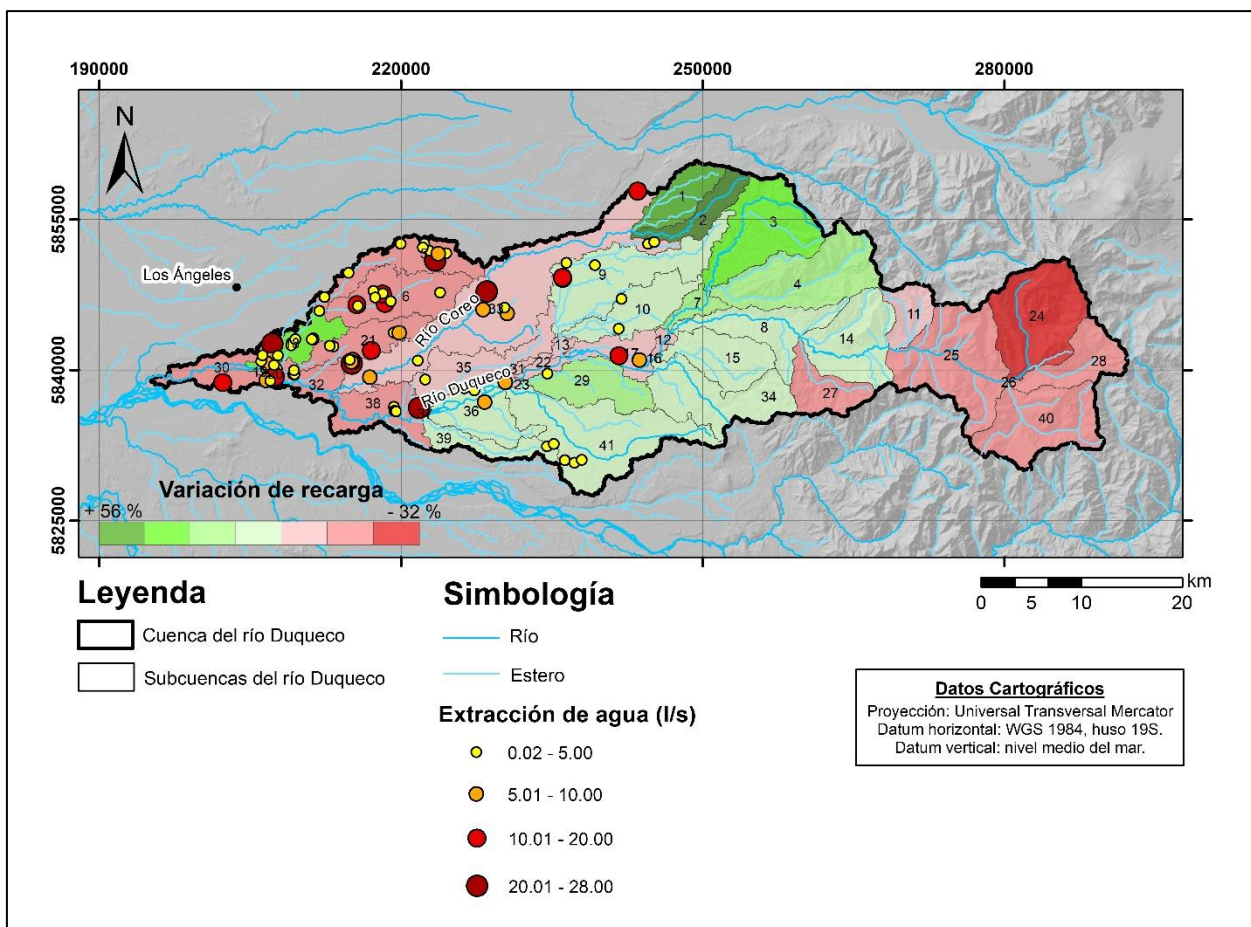


Figura 7.4. Variación de la recarga media para el 2030 - 2050 y extracciones de agua subterránea por subcuenca. Elaboración propia.

La variabilidad media mensual del caudal y la recarga de acuíferos muestra mayor déficit en invierno, con reducciones de hasta el 27,37 % y 33,32 % respectivamente, dado que estos componentes están relacionados con la precipitación, es esperable que en los meses de julio a septiembre llueva menos, mientras que, los meses de mayo y junio poseen aumentos de caudal y de recarga, de esta manera otoño sería la estación menos afectada.

8. CONCLUSIONES

- Se calibró y validó el modelo hidrológico SWAT para la cuenca Duqueco obteniendo en general desempeños “buenos” a “muy buenos”, lo que indica que el modelo posee buen rendimiento, por lo que se puede aplicar para la simulación de caudales futuros. Sin embargo, hay que tener en consideración que el modelo subestimaré los *peaks* de los caudales, debido a la fuente de información de la precipitación diaria, CHIRPS.
- El modelo climático global IPSL - CM5A - LR proyecta reducciones de caudal medio mensual del 12,79% para el periodo 2030 - 2050 en un escenario de muy altas emisiones GEI (RCP 8.5). En de esta simulación, el río Duqueco es el curso de agua más afectado, mientras que el río Coreo experimentaría una menor reducción y particularmente en su nacimiento el mayor aumento en la cuenca. En tanto, la recarga media mensual disminuiría en un 3,28 %, siendo las partes este y oeste de la cuenca las con mayor déficit, mientras que para la parte media se predice aumentos en la recarga. Además, se observó que invierno sería la estación con mayor disminución de caudal y recarga, en cambio otoño mostró aumentos.

9. REFERENCIAS

- AKHTAR, F.; BORGEMEISTER, C.; TISCHBEIN, B. Y AWAN, U. K. 2022. Metrics assessment and streamflow modeling under changing climate in a data - scarce heterogeneous region: a case study of the Kabul River Basin. *Water*. Vol. 14, (11).
- ALVAREZ, C.; BOISIER, J.; GARREAUD, R.; SEIBERT, J. Y VIS, M. 2021. Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 25, (1): 429 - 446.
- ANAVALÓN, A. 2018. Evolución tectonosedimentaria de los depósitos plio-pleistocenos del valle central de Chile, entre los 36° 50' S y 38° 50' S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 133 pp., Concepción.
- AQUATERRA INGENIEROS LTDA. 2012. Estudio hidrogeológico cuenca Biobío. Dirección General de Aguas: 161 pp.
- ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; GRIENSVEN, A. V.; LIEW, M. V.; KANNAN, N. Y JHA, M. K. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*. Vol. 55, (4): 1491 - 1508.
- BATES, B.; KUNDZEWICZ, Z.; WU, S. Y PALUTIKOF, J. 2008. El Cambio Climático y el Agua. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: 224 pp. Ginebra.
- BÖRGEL, R. 1983. Geografía de Chile, Tomo II: geomorfología. Instituto Geográfico Militar: 182 pp. Santiago.
- CADE - IDEPE. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cuerpos de agua según objetivos de calidad, cuenca del río Biobío. Dirección General de Aguas: 185 pp.
- CASTELLANOS, G.; LÓPEZ, A.; PÉREZ, J. Y SENENT, J. 2023. Disaggregated monthly SWAT+ model versus daily SWAT+ model for estimating environmental flows in Peninsular Spain. *Journal of Hydrology*. Vol. 623.
- CIREN. 1999. Estudio agrológico VIII región. Centro de Información de Recursos Naturales: 555 pp. Santiago.
- COLLIER, M. A.; JEFFREY, S. J.; ROTSTAYN, L. D.; WONG, K. K.; DRAVITZKI, S. M.; MOSENER, C.; HAMALAINEN, C.; SYKTUS, J. I.; SUPPIAH, R.; ANTONY, J.; ZEIN, A. E. Y ATIF, M. 2011. The CSIRO-Mk3. 6.0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication. International congress on modelling and simulation - MODSIM: 2691 - 2697.

- DGAC. 2023. Reporte anual de la evolución del clima en Chile. Dirección General de Aeronáutica Civil: 52 pp.
- DRAKE, R. E. 1976. Chronology of cenozoic igneous and tectonic events in the central Chilean Andes - latitudes 35°30' to 36° S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 1, (3): 265 - 284.
- DUFRESNE, J. L.; FOUJOLS, M. A.; DENVIL, S.; CAUBEL, A.; MARTI, O.; AUMONT, O.; BALKANSKI, Y.; BEKKI, S.; BELLENGER, H.; BENSILHA, R.; BONY, S.; BOPP, L.; BRACONNOT, P.; BROCKMANN, P.; CADULE, P.; CHERUY, F.; CODRON, F.; COZIC, A.; CUGNET, D.; NOBLET, N.; ... VUICHARD, N. 2013. Climate change projections using the IPSL - CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate dynamics*. Vol. 40: 2123 - 2165.
- ERRÁZURIZ, A. M.; CERECEDA, P.; GONZÁLES, J. I.; GONZÁLES, M.; HENRÍQUEZ, M. Y RIOSECO, R. 1998. Manual de geografía de Chile. Andrés Bello. Santiago.
- FERRARIS, F. 1981. Mapas geológicos preliminares de Chile: hoja Los Ángeles - Angol. Instituto de Investigaciones Geológicas. Mapas Geológicos Preliminares N° 5: 30 pp. Santiago.
- FLYNN, J. J.; CHARRIER, R.; CROFT, D. A.; GANS, P. B.; HERRIOTT, T. M.; WERTHEIM, J. A.; Y WYSS, A. R. 2008. Chronologic implications of new Miocene mammals from the Cura - Mallín and Trapa - Trapa formations, Laguna del Laja area, south central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 26, (4): 412 - 423.
- FOLGUERA, A.; RAMOS, V. A. Y MELNICK, D. 2003. Recurrencia en el desarrollo de cuencas de intraarco. cordillera Neuquina (37° 30' - 38° S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. 58, (1): 3 - 19.
- GAJARDO, A. 1981. Hoja de Concepción - Chillan, región del Biobío. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG). Mapas Geológicos Preliminares N° 4: 36 pp. Santiago.
- GARREAUD, R. 2011. Cambio Climático: bases físicas e impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro*. INIA Chile. N° 93: 13 - 19.
- GENT, P.; DANABASOGLU, G.; DONNER, L.; HOLLAND, M.; HUNKE, E.; JAYNE, S.; LAWRENCE, D.; NEALE, R.; RASCH, P.; VERTENSTEIN, M.; WORLEY, P.; YANG, Z. Y ZHANG, M. 2011. The community climate system model version 4. *Journal of Climate*. Vol. 24: 4.973 - 4.991.
- GONZÁLEZ, O. Y VERGARA, M. 1962. Reconocimiento geológico de la cordillera de los Andes entre los paralelos 35° y 38° latitud sur. Universidad de Chile, Instituto de Geología: 116 pp. Santiago.
- HAUSPADRE, 2019. *CMIP6: la próxima generación de modelos climáticos explicados*. CarbonBrief. <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained/>

- IPCC. 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 222 pp.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 2.409 pp.
- JUNQUEIRA, R.; VIOLA, M. R.; AMORIM, J.; WONGCHUIG, S. C.; MELLO, C.; VIEIRA - FILHO, M. Y COELHO, G. 2022. Hydrological Retrospective and Historical Drought Analysis in a Brazilian Savanna Basin. *Water*. Vol. 14, (14).
- KOUA, T. J.; JEONG, J.; ALEMAYEHU, T. A.; DHANESH, Y. Y SRINIVASAN, R. 2023. Spatial distribution of nutrient loads based on mineral fertilizers applied to crops: case study of the Lobo basin in Côte d'Ivoire (west Africa). *Applied Sciences*. Vol. 13, (16).
- LOPEZ, E. Y VARGAS, E. 2020. La gobernanza del agua subterránea y la seguridad hídrica en España. Fundación de Estudios de Economía Aplicada: 26 pp.
- MANISHA, K. C.; DHAKAL, N. R.; ARYAL, I. Y MARAHATTA, S. 2023. Application of SWAT hydrological model to simulate flow of Seti-Gandaki Basin. *Jalawaayu*. Vol. 3. (1): 43 - 62.
- MARANGUNIC. C.; MORENO H. Y VARELA, J. 1979. Observaciones sobre los depósitos de relleno de la depresión longitudinal de Chile entre los ríos Tinguiririca y Maule. Congreso Geológico Chileno N° 2. Actas 3: 129 - 139. Arica.
- MARCHANT, E. M. 2002. Análisis y gestión de las aguas subterráneas de la comuna de Cabrero en el marco de la megasequía y déficit hídrico, región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 296 pp., Concepción.
- MELLADO, M. A. 2019. Análisis de la disponibilidad hídrica para la cuenca del río Duqueco considerando escenarios de cambio climático y una expansión de las plantaciones forestales hacia el año 2030. Memoria para optar al Título de Ingeniero Ambiental. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Ambientales (Inédito): 111 pp., Concepción.
- MÉNDEZ, R. A. 2016. Productos de precipitación satelital de alta resolución espacial y temporal en zonas de topografía compleja. Tesis para optar a Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería (Inédito): 111 pp., Santiago.
- MMA. 2017. Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017 - 2022. Ministerio del Medio Ambiente: 250 pp.

- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. v.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D. Y VEITH, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. Vol. 50, (3): 885 - 900.
- MUNIZAGA, F. N. 2020. Los peces óseos (Actinopterygii: Teleostei) del Mioceno de la Formación Cura - Mallín, en la zona de Lonquimay (38° 27' S; 71° 22' W, provincia de Malleco) y sus implicaciones paleoambientales. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 118 pp., Concepción.
- MUÑOZ - CRISTI, J. 1960. Contribución al conocimiento geológico de la cordillera de la Costa de la zona central. *Minerales*. Vol. 15 (69): 28 - 47. Santiago.
- MUÑOZ, J. Y NIEMEYER, H. 1984a. Hoja laguna del Maule, regiones del Maule y del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile N° 64: 99 pp. Santiago.
- MUÑOZ, J. Y NIEMEYER, H. 1984b. Petrología de la Formación Trapa - Trapa y consideraciones acerca del volcanismo Mioceno entre los 36° y 39° Lat. S (Cordillera Principal). *Revista Geológica de Chile*. Vol. 23: 53 - 67.
- NEITSCH, S.; ARNOLD, J.; KINIRY, J. Y WILLIAMS, J. 2005. Soil and water assessment tools theoretical documentation. Agricultural research service: 415 pp. Texas.
- NIEMEYER, H. 1980. Hoyas hidrográficas de Chile: octava región. Dirección General de Aguas: 41 pp.
- NIEMEYER, H Y MUÑOZ, J. 1983. Hoja laguna de la Laja, región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile N° 57: 52 pp.
- PANCHANATHAN, A.; TORABI, A. Y OUSSALAH, M. 2023. A multi - criteria approach for improving streamflow prediction in a rapidly urbanizing data scarce catchment. *International Journal of River Basin Management*.
- PARRA, M. A. 2015. Evolución de la calidad química del agua superficial registrada en el río Biobío. Proyecto de Título para optar a Ingeniero Civil. Universidad del Biobío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Inédito): 82 pp., Concepción.
- PESCE, A. 1981. Estratigrafía de las nacientes del río Neuquén y Nahuever, provincia del Neuquén. Congreso Geológico Argentino N° 8. Actas 3: 439 - 455.
- RANJAN, R. Y MISHRA, A. 2022. Examining model performances and parameter uncertainty for streamflow and suspended sediment regime simulation: comparison of three calibration methods. *Journal of Hydrology*. Vol. 612.
- RIQUELME, K. A. 2018. Evaluación del efecto del cambio climático en los caudales futuros de la cuenca del río Duqueco. Memoria para optar al Título de Ingeniero Ambiental. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Ambientales (Inédito): 83 pp., Concepción.

- RODRÍGUEZ, M.; MANCE, H.; BARRERA, X. Y GARCÍA, C. 2009. Cambio climático: lo que está en juego. Universidad de los Andes: 109 pp.
- ROJAS, M.; ALDUNCE, P.; FARÍAS, L.; GONZÁLEZ, H.; MARQUET, P.; MUÑOZ, J.; PALMA-BEHNKE, R.; STEHR, A. Y VICUÑA, S. 2019. Evidencia científica y cambio climático en Chile: resumen para tomadores de decisiones. Comité Científico COP25, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación: 94 pp. Santiago.
- ROJAS, I. S.; CORONADO, M. A.; ROSSETTI, S. R.; Y BELTRÁN, F. A. 2020. Contaminación por nitratos y fosfatos provenientes de la actividad agrícola en la cuenca baja del río Mayo en el estado de Sonora, México. *Terra Latinoamericana*. Vol. 38, (2): 247 - 256.
- RUBILAR, A.; ABAD, E. 1990. *Percichthys Sylvaniae* sp. nov. del terciario de los Andes sur - centrales de Chile (Pisces, Perciformes, Percichthyidae). *Revista Geológica de Chile*. Vol. 17, (2): 197 - 204.
- SCHEWE, J.; HEINKE, J.; GERTEN, D.; HADDELAND, I.; ARNELL, N. W.; CLARK, D. B.; DANKERS, R.; EISNER, S.; FEKETE, B.; COLÓN, F.; GOSLING, S.; KIM, H.; LIU, X.; MASAKI, Y.; PORTMANN, F.; SATOH, Y.; STACKE, T.; TANG, Q.; WADA, Y.; ... KABAT, P. 2013. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 111, (9): 3.245 - 3.250.
- UNESCO. 2020. Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: agua y cambio climático. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: 16 pp.
- UNESCO. 2022. Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2022: aguas subterráneas hacer visible el recurso invisible, resumen ejecutivo. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: 12 pp.
- UNIVERSIDAD DE CHILE. 2022. homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile. Ministerio de Obras Públicas. S. I. T 524: 170 pp.
- UNIVERSITE PARIS - SACLAY. (s.f). *Instituto Pierre - Simon - Laplace (IPSL)*. <https://www.universite-paris-saclay.fr/en/laboratories/institut-pierre-simon-laplace-ipsl>
- URIBE, N. 2010. Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT 2005. Soil and Water Assessment Tool: 47 pp
- VERGARA, E. F. 2020. Análisis de susceptibilidad de remociones en masa en el área del embalse Ralco, comuna del Alto Biobío, región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 114 pp., Concepción.

- VERGARA, M. Y MUÑOZ, J. 1982. La formación Cola de Zorro en la alta cordillera andina chilena (36° S - 39° S), sus características petrográficas y petrológicas: una revisión. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 17: 31 - 46. Santiago.
- VERMA, S. K.; PRASAD, A. D. Y VERMA, M. K. 2022. An assessment of ongoing developments in water resources management incorporating SWAT model: overview and perspectives. *Nature Environment and Pollution Technology*. Vol. 21, (4): 1963 - 1970.
- VICUÑA, S.; DANIELE, L.; FARIÁS, L.; GONZÁLEZ, H.; MARQUET, P. A.; PALMA-BEHNKE, R.; STEHR, A.; URQUIZA, A.; WAGEMANN, E.; ARENAS-HERRERA, M. J.; BÓRQUEZ, R.; CORNEJO-PONCE, L.; DELGADO, V.; ETCHEBERRY, G.; FRAGKOU, M. C.; FUSTER, R.; GELCICH, S.; MELO, O.; MONSALVE, T.; ... WINCKLER, P. 2022. Desalinización: oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile. Comité Asesor Ministerial Científico sobre Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación: 189 pp.
- WARUSAVITHARANA, E.; MAHANAMA, P.; CANNATA, M.; RATNAYAKE, R.; SUDANTHA, B. Y STRIGARO, D. 2022. Evaluating the potential of an open sensor network to support reservoir pre-release decision making. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*. Vol. 50, (3): 577 - 587.
- WORLEY, P. H.; VERTENSTEIN, M. Y CRAIG, A. P. 2011. Community Climate System Model. *Encyclopedia of Parallel Computing*: 342 - 351
- ZAMBRANO, M.; NAUDITT, A.; BIRKEL, C.; VERBIST, K. Y RIBBE, L. 2017. Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 21, (2): 1295 - 1320.
- ZANETTINI, J.; SANTAMARÍA, G. Y LEANZA, H. 2001. Hoja geológica 3772 - II: las Ovejas, provincia de Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino: 66 pp. Buenos Aires.

ANEXOS

Anexo A.1. Propiedades físicas de cada serie de suelo.

Serie	N° de capas	Textura	Profundidad (mm)	Granulometría (%)			Carbono (%)
				Arena	Limo	Arcilla	
Arenales	6	Arenosa	1.500	98,78	1,21	0,01	0,22
Arrayán	6	Franco limosa	1.400	10,88	75,02	14,10	4,27
Santa Bárbara	7	Franco limosa	1.450	10,74	78,07	11,19	2,26
Collipulli	5	Franco arcillo limosa	1.500	16,39	29,59	54,02	1,36
Coreo	5	Arenosa	1.080	96,46	3,30	0,24	0,71
Mirador	4	Franco arcillosa	750	18,35	32,45	49,20	0,90
Tijeral	6	Franca	1.380	26,39	53,66	19,95	2,35
Santa Teresa	6	Areno francosa	1.500	97,60	2,13	0,27	0,31
No registrado	4	Franco arenosa	750	91,05	8,31	0,64	0,84

Anexo A.2. Propiedades hidráulicas de cada serie de suelo.

Serie	Grupo hidrológico	Densidad aparente (g/cm ³)	Agua disponible (mm H ₂ O/mm suelo)	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)
Arenales	A	2,64	0,05	21,53
Arrayán	A	1,41	0,20	25,52
Santa Bárbara	C	1,44	0,20	30,27
Collipulli	D	1,22	0,14	2,13
Coreo	A	2,41	0,06	64,79
Mirador	D	1,24	0,14	2,33
Tijeral	B	1,40	0,16	14,74
Santa Teresa	A	2,50	0,05	45,92
No registrado	A	2,15	0,07	101,07

Anexo A.3. Extracciones de acuíferos someros.

Código	Caudal (l/s)	Profundidad del pozo (m)	Subcuenca	Norte	Este	Huso
ND-0802-6453	5,00	3,7	2	5852737	245214	19H
ND-0802-3276	2,80	6	5	5852640	753617	18H
ND-0802-3277	2,00	6	5	5853340	753227	18H
ND-0802-6843	2,00	12	5	5850942	745517	18H
ND-0802-2516	1,30	6	5	5853468	750882	18H
ND-0802-3584	4,05	Puntera	5	5852266	755333	18H
ND-0802-3207	8,15	Puntera	5	5852257	754538	18H
ND-0802-3207	8,10	Puntera	5	5852271	754541	18H
ND-0802-2217	1,00	15	5	5848676	742984	18H
ND-0802-1995	0,10	Puntera	5	5852196	222180	19H
ND-0802-3558	11,50	Puntera	6	5848615	748745	18H
ND-0802-3899	2,00	Puntera	6	5847845	749527	18H
ND-0802-3049	0,05	Puntera	6	5848671	748790	18H
ND-0802-5599	2,00	5,6	6	5848972	747879	18H
ND-0802-1237	0,96	20	6	5848383	754467	18H
ND-0802-1533	0,10	Puntera	6	5847217	217443	19H
ND-0802-2309	0,80	Puntera	6	5846359	215721	19H
ND-0802-2146	0,52	3	10	5847074	241945	19H
ND-0802-3792	3,00	7	18	5847340	742372	18H
ND-0802-3121	5,80	16	18	5842504	736766	18H
ND-0802-635	1,30	7	18	5842703	736301	18H
ND-0802-6499	0,80	9,2	18	5843167	737970	18H
ND-0802-5665	5,00	4,8	18	5842243	737535	18H
ND-0802-1031	0,14	9	18	5843281	736457	18H
ND-0802-1534	0,30	10	18	5844656	741607	18H
ND-0802-1695	0,15	8	18	5844513	741615	18H
ND-0802-2672	0,08	6	18	5844099	739370	18H
ND-0802-2454	2,03	Puntera	18	5843035	211146	19H
ND-0802-2535	0,10	Puntera	18	5843063	209503	19H
ND-0802-978	2,60	6	19	5844711	749625	18H
ND-0802-1328	0,14	7,5	19	5843727	743553	18H
ND-0802-2487	0,75	6	19	5843804	743198	18H

ND-0802-4254	6,25	Puntera	19	5844648	750170	18H
ND-0802-6022	5,20	5,3	32	5840768	736668	18H
ND-0802-2648	0,08	12	32	5840699	737056	18H
ND-0802-860	0,04	12	32	5841133	739491	18H
ND-0802-861	0,04	12	32	5841206	739379	18H
ND-0802-862	0,04	6	32	5841205	739502	18H
ND-0802-3466	3,80	8	32	5841615	739481	18H
ND-0802-644	10,00	9	33	5842280	745361	18H
ND-0802-644	10,00	9	33	5842278	745360	18H
ND-0802-644	8,50	8	33	5842043	745333	18H
ND-0802-644	10,00	8	33	5842064	745235	18H
ND-0802-793	5,50	Puntera	33	5840430	746957	18H
ND-0802-6899	2,50	6	33	5842287	745081	18H
ND-0802-6576	1,00	3,85	33	5846481	760773	18H
ND-0802-6587	28,00	Puntera	33	5848209	759106	18H
ND-0802-6926	3,00	9	35	5839835	752437	18H
ND-0802-1654	0,10	Puntera	36	5837968	227310	19H
ND-0802-2514	1,50	5	36	5838172	226314	19H
ND-0802-2943	0,23	3	38	5837329	749169	18H
ND-0802-2945	0,20	3	38	5836931	749173	18H
ND-0802-2946	0,02	3	38	5836853	749337	18H
ND-0802-2960	3,50	Puntera	41	5831018	236320	19H
ND-0802-2556	0,54	4	41	5830770	237268	19H
ND-0802-2961	0,49	Puntera	41	5832626	235213	19H
ND-0802-3062	1,24	Puntera	41	5831034	237976	19H

Anexo A.4. Extracciones de acuíferos profundos.

Código	Caudal (l/s)	Profundidad del pozo (m)	Subcuenca	Norte	Este	Huso
ND-0802-6820	21,00	46	5	5851620	754197	18H
ND-0802-4985	15,00	40	5	5840842	732335	18H
ND-0802-6504	18,30	50	6	5847654	748941	18H
ND-0802-5585	15,00	40	6	5847710	746131	18H
ND-0802-5187	9,10	30	8	5842833	737180	18H
ND-0802-5877	2,90	51	9	5850438	239306	19H
ND-0802-942	4,00	90	9	5850659	236465	19H
ND-0802-393	14,00	74	9	5849128	236093	19H
ND-0802-395	13,00	60	9	5849200	236073	19H
ND-0802-5890	3,65	72	10	5844110	241673	19H
ND-0802-5756	10,00	62	17	5840996	243724	19H
ND-0802-5891	20,00	60	17	5841422	241693	19H
ND-0802-6864	22,50	38	18	5844364	737502	18H
ND-0802-6252	8,00	24	18	5842267	736987	18H
ND-0802-5682	15,00	44,6	19	5843087	747281	18H
ND-0802-5362	3,70	40	19	5841876	737792	18H
ND-0802-541	15,30	24	21	5841066	737589	18H
ND-0802-5752	5,00	44	29	5839670	764610	18H
ND-0802-6898	24,00	54	33	5841886	745256	18H
ND-0802-6525	5,50	30	33	5846434	758642	18H
ND-0802-6429	8,50	81	33	5845885	760990	18H
ND-0802-4493	4,40	68	33	5841768	751817	18H
ND-0802-6655	1,00	80	33	5852556	244586	19H
ND-0802-810	15,00	30	33	5857801	243552	19H
ND-0802-6428	8,00	41	36	5839057	760381	18H
ND-0802-5751	6,50	44	36	5837226	758186	18H
ND-0802-4010	22,00	41	38	5837078	751662	18H
ND-0802-5747	2,50	50	39	5832445	764105	18H

Anexo A.5. Extracciones superficiales.

Código	Caudal (l/s)	Subcuenca	Norte	Este	Huso
ND-0802-473	39,10	33	5841736	746014	18H
ND-0802-473	28,90	33	5841507	746215	18H
ND-0802-473	100,00	33	5841270	747244	18H
NR-0802-1470	15,00	8	5845011	259476	19H
ND-0802-4930	2,60	7	5845484	247071	19H
ND-0802-4931	0,40	7	5845346	246944	19H
ND-0802-4932	4,70	7	5845426	246922	19H
NR-0802-685	26,00	3	5855565	255820	19H
NR-0802-737	0,50	4	5846876	260701	19H
ND-0802-3137	3,00	15	5842750	248940	19H
ND-0802-3137	15,00	15	5842730	249020	19H
NR-0802-567	2,00	4	5847256	253023	19H
NR-0802-266	150,00	14	5844000	263230	19H
NR-0802-523	30,00	9	5850930	248025	19H
NR-0802-800030	30,00	24	5841700	283300	19H
ND-0802-57	38,25	15	5840880	250610	19H
NR-0802-387	400	14	5840776	260762	19H
NR-0802-387	40	27	5841457	260167	19H
NR-0802-388	70	14	5841012	266916	19H
NR-0802-390	80	8	5843300	253700	19H
NR-0802-448	2	17	5839404	242328	19H

Anexo A.6. Parámetros ocupados para la calibración de caudal en diferentes trabajos.

Archivo	Parámetro	Trabajos
SOL	SOL_K	Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Verma y otros (2022); Ranjan y Mishra (2022); Warusavitharana y otros (2022)
	SOL_AWC	Akhtar y otros (2022); Castellanos y otros (2023); Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022); Warusavitharana y otros (2022)
	SOL_Z	Manisha y otros (2023)
	SOL_BD	Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022); Warusavitharana y otros (2022)
GW	ALPHA_BF	Castellanos y otros (2023); Junqueira y otros (2022); Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022); Warusavitharana y otros (2022)
	GW_DELAY	Junqueira y otros (2022); Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022); Warusavitharana y otros (2022)
	GW_REVAP	Castellanos y otros (2023); Junqueira y otros (2022); Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022); Warusavitharana y otros (2022)
	GWQMN	Junqueira y otros (2022); Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Warusavitharana y otros (2022)
	RCHRG_DP	Junqueira y otros (2022); Panchanathana y otros (2023); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022)
	REVAPMN	Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023)
	GW_SPYLD	Verma y otros (2022)
MGT	CN2	Akhtar y otros (2022); Castellanos y otros (2023); Junqueira y otros (2022); Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022); Warusavitharana y otros (2022)
SUB	CH_K1	Junqueira y otros (2022); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022)
RTE	CH_N2	Junqueira y otros (2022); Ranjan y Mishra (2022); Warusavitharana y otros (2022)
	CH_K2	Junqueira y otros (2022); Panchanathana y otros (2023); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022); Warusavitharana y otros (2022)
	OV_N	Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023)
	ESCO	Akhtar y otros (2022); Castellanos y otros (2023); Panchanathana y otros

HRU		(2023); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022); Warusavitharana y otros (2022)
	EPCO	Castellanos y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Ranjan y Mishra (2022); Verma y otros (2022)
	SLSUBBSN	Junqueira y otros (2022); Panchanathana y otros (2023); Verma y otros (2022)
	HRU_SLP	Panchanathana y otros (2023); Verma y otros (2022)
	CANMX	Castellanos y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Verma y otros (2022)
BSN	SFTMP	Akhtar y otros (2022); Manisha y otros (2023)
	SMFMN	Akhtar y otros (2022); Manisha y otros (2023)
	SURLAG	Manisha y otros (2023); Panchanathana y otros (2023); Verma y otros (2022); Warusavitharana y otros (2022)
	SMTMP	Akhtar y otros (2022); Manisha y otros (2023)
	SMFMX	Akhtar y otros (2022); Manisha y otros (2023)
	TIMP	Akhtar y otros (2022); Manisha y otros (2023)

Anexo A.7. Parámetros sensibles de SWAT en la simulación de flujo de la cuenca Duqueco.

Parámetro	Descripción	Método
SOL_K.sol	Conductividad hidráulica saturada	Porcentaje
SOL_AWC.sol	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo	Porcentaje
ALPHA_BF.gw	Coefficiente de recesión del flujo de base	Reemplazo
GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo del agua subterránea	Reemplazo
GW_REVAP.gw	Capacidad de mover agua desde un acuífero superficial	Reemplazo
GWQMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo necesaria para que se produzca el flujo de retorno	Reemplazo
RCHRG_DP.gw	Fracción de percolación de acuíferos profundos	Reemplazo
CN2.mgt	Curva número	Porcentaje
CH_N2.rte	Valor "n" de Manning para el canal principal	Reemplazo
CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal principal	Reemplazo
OV_N.hru	Valor "n" de Manning para flujo terrestre	Reemplazo
ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo	Reemplazo
EPCO.hru	Factor de compensación por absorción de la planta	Reemplazo
SLSUBBSN.hru	Longitud media de pendiente	Reemplazo
HRU_SLP.hru	Inclinación media de la pendiente	Porcentaje
SFTMP.bsn	Temperatura de caída de nieve	Reemplazo
SMFMN.bsn	Tasa mínima de derretimiento de la nieve durante el año	Reemplazo
SURLAG.bsn	Tiempo de retraso de escorrentía superficial	Reemplazo

Anexo A.8. Parámetros de SWAT modificados en la calibración.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Villacura	Cerrillos
SOL_K.sol	-0,25	0,15	-0,0298	0,0703
SOL_AWC.sol	-0,25	0,25	-0,1263	0,1688
ALPHA_BF.gw	0,01	1,00	0,0878	0,0996
GW_DELAY.gw	1,00	500,00	47,2725	255,0742
GW_REVAP.gw	0,02	0,20	0,0166	0,0328
GWQMN.gw	0,01	5000,00	3018,9167	1337,5073
RCHRG_DP.gw	0,01	1,00	0,9738	0,9777
CN2.mgt	-0,25	0,15	0,0650	0,1497
CH_N2.rte	-0,01	0,30	0,0224	0,0326
CH_K2.rte	0,01	500,00	219,6287	54,5922
OV_N.hru	0,01	1,00	0,3243	0,9398
ESCO.hru	0,01	1,00	0,9973	0,9398
EPCO.hru	0,01	1,00	0,7288	0,8853
SLSUBBSN.hru	-0,50	1,00	-0,0513	0,0488
HRU_SLP.hru	-0,05	0,05	0,0356	0,0148
SFTMP.bsn	-5,00	5,00	1,62	
SMFMN.bsn	0,01	10,00	8,22	
SURLAG.bsn	0,05	24,00	4,13	

Anexo A.9. Variación del caudal medio para el periodo 2000 - 2020 y 2030 - 2050 por subcuenca.

Subcuenca	2000 - 2020	2030 - 2050	Variación (%)	Subcuenca	2000 - 2020	2030 - 2050	Variación (%)
1	0,80	0,79	-1,23	22	36,70	32,61	-11,14
2	0,73	0,83	14,09	23	36,70	32,61	-11,15
3	2,37	2,58	8,83	24	4,79	3,11	-34,97
4	3,01	3,20	6,32	25	15,56	11,91	-23,45
5	0,97	0,72	-25,36	26	6,39	5,03	-21,33
6	1,33	1,04	-21,86	27	1,42	1,25	-12,30
7	5,76	6,16	7,06	28	2,23	1,76	-21,06
8	22,18	18,30	-17,48	29	1,32	1,08	-18,30
9	2,40	2,15	-10,62	30	55,25	48,34	-12,51
10	1,25	1,12	-10,68	31	38,13	33,78	-11,40
11	0,99	0,92	-6,90	32	51,08	44,84	-12,21
12	28,07	24,59	-12,38	33	5,62	5,35	-4,87
13	3,77	3,38	-10,47	34	2,41	2,28	-5,43
14	18,98	15,25	-19,64	35	1,20	1,10	-7,94
15	1,43	1,45	1,06	36	42,38	36,92	-12,88
16	29,51	26,05	-11,73	37	43,58	38,02	-12,74
17	32,71	29,04	-11,22	38	45,10	39,19	-13,11
18	2,84	2,44	-14,18	39	0,62	0,43	-31,36
19	51,90	45,50	-12,34	40	4,16	3,27	-21,49
20	51,90	45,50	-12,34	41	3,12	2,32	-25,74
21	0,82	0,66	-19,89				

**Anexo A.10. Variación del caudal medio para el periodo
2000 - 2020 y 2030 - 2050 por mes.**

Mes	2000 - 2020	2030 - 2050	Variación (%)
1	7,28	6,43	-11,71
2	6,05	5,70	-5,82
3	5,59	5,40	-3,44
4	8,01	5,89	-26,40
5	14,76	16,57	12,25
6	28,38	29,62	4,35
7	29,88	24,52	-17,96
8	32,03	23,32	-27,20
9	22,98	16,69	-27,37
10	15,94	14,15	-11,23
11	12,21	11,68	-4,35
12	9,99	8,54	-14,50

Anexo A.11. Variación de la recarga media para el periodo 2000 - 2020 y 2030 - 2050 por subcuenca.

Subcuenca	2000 - 2020	2030 - 2050	Variación (%)	Subcuenca	2000 - 2020	2030 - 2050	Variación (%)
1	10,23	13,84	35,29	22	58,25	52,79	-9,39
2	9,83	15,40	56,66	23	66,26	59,25	-10,58
3	18,52	23,14	24,98	24	19,73	13,33	-32,46
4	11,37	13,03	14,61	25	14,23	12,56	-11,73
5	37,60	31,17	-17,10	26	63,92	58,26	-8,86
6	40,60	33,49	-17,52	27	13,13	11,78	-10,27
7	28,52	33,11	16,11	28	16,40	13,58	-17,23
8	22,17	24,05	8,46	29	13,30	15,82	18,90
9	38,43	38,50	0,17	30	35,38	29,07	-17,84
10	28,48	31,23	9,65	31	45,15	40,76	-9,72
11	11,77	11,30	-3,94	32	26,26	23,53	-10,40
12	31,07	30,98	-0,28	33	37,35	35,98	-3,65
13	46,77	44,76	-4,30	34	27,25	27,82	2,11
14	19,56	19,92	1,86	35	33,66	33,10	-1,66
15	33,67	36,02	6,97	36	14,84	15,14	2,04
16	23,34	23,37	0,15	37	3,31	5,09	53,67
17	37,25	36,76	-1,30	38	25,52	22,48	-11,92
18	30,39	38,77	27,56	39	11,55	11,60	0,45
19	34,02	29,43	-13,48	40	15,80	13,12	-16,96
20	22,59	21,17	-6,29	41	11,33	12,31	8,65
21	30,35	25,68	-15,39				

Anexo A.12. Variación de la recarga media para el periodo 2000 - 2020 y 2030 - 2050 por mes.

Mes	2000 - 2020	2030 - 2050	Variación (%)
1	0,22	0,11	-51,92
2	0,66	2,14	226,16
3	1,87	4,29	130,12
4	11,04	7,85	-28,87
5	40,33	57,56	42,71
6	85,39	90,55	6,04
7	74,39	53,66	-27,87
8	71,15	56,58	-20,48
9	24,37	16,25	-33,32
10	11,13	18,55	66,67
11	4,44	6,86	54,47
12	2,58	2,44	-5,39