



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería Agrícola
Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola con Menciones en Agroindustrias,
Mecanización y Energía y Recursos Hídricos.



**Evaluación de una modelación hidrológica implementada en WEAP como
herramienta para el desarrollo de un futuro modelo operacional de la cuenca del río
Itata**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Agrícola con Menciones en Recursos
Hídricos.

ELÍAS ALFONSO CASTILLO AGUILERA
CHILLÁN-CHILE
2022

Profesor Guía: José Luis Arumí Ribera
Dpto. de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Esta tesis ha sido realizada en el Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.

Profesor Guía

Dr. José Luis Arumí Ribera
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Evaluador Interno

Dr. Octavio Lagos Roa
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Evaluador Externo

Dr. Enrique Muñoz Ortiz
Facultad de Ingeniería
Universidad Católica de la Santísima
Concepción

Director del Programa

Dr. Javier Ferrer Valenzuela
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción



ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. OBJETIVO | 6 |
| 2.1 Objetivo general | 6 |
| 2.2 Objetivos específicos | 6 |
| 3. METODOLOGÍA | 7 |
| 3.1 Área de estudio..... | 7 |
| 3.2 Modelo WEAP | 11 |
| 3.3 Definición del estado hídrico actual de la cuenca del río Itata | 13 |
| 3.4 Evaluación de ajuste del modelo..... | 17 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 20 |
| 5. CONCLUSIONES | 29 |
| 6. REFERENCIAS | 30 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Distribución de la demanda consuntiva actual de la región del Biobío. Fuente: DGA (2017)..... | 4 |
| Figura 2. Ubicación geográfica de la cuenca del río Itata y sus subcuencas. | 7 |
| Figura 3. Elevación en la cuenca del río Itata..... | 8 |
| Figura 4. a) Zonas climáticas de la cuenca (Fuente CIREN) b) Precipitaciones promedio anual y b) Temperatura promedio anual. Estos últimos elaborados con datos obtenidos de la base de WorldClim-Gobal Climate Data (1950-2000). | 9 |
| Figura 5. Geología de la cuenca, elaborado a partir de datos del Sernageomin. | 10 |
| Figura 6. Uso de suelo y vegetación en la cuenca elaborado a partir de datos de la CONAF. | 11 |
| Figura 7. Esquema general del modelo WEAP. | 13 |

| | |
|--|----|
| Figura 8. Estaciones fluviométricas presentes en la cuenca del río Itata. En color azul, las estaciones utilizadas como punto de control en la modelación o catchments. | 15 |
| Figura 9. Estaciones fluviométricas presentes en la cuenca del río Itata. En color azul, las estaciones utilizadas como punto de control en la modelación o catchments. | 16 |
| Figura 10. Interfaz gráfica de WEAP en la cuenca del río Itata. | 17 |
| Figura 11. Serie de tiempo de caudales observados a partir del análisis de estaciones fluviométricas. Fuente: Elaboración propia. | 21 |
| Figura 12. Datos de caudales simulados versus observados. Fuente: Elaboración propia. ... | 23 |
| Figura 13. Promedio mensual de datos simulados versus observados de caudales para el periodo 2010-2019. Fuente: Elaboración propia. | 24 |
| Figura 14. Diferencia entre pronósticos de escorrentías durante el fenómeno de El Niño (banda rosa) y La Niña (banda celeste) (NOAA). | 26 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Valores referenciales del Criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe | 18 |
| Tabla 2. Valores referenciales para rangos <i>Ceff</i> y <i>Ceff</i> %..... | 19 |
| Tabla 3. Estaciones fluviométricas para la evaluación de caudales observados | 20 |
| Tabla 4. Resultados estadísticos para las siete estaciones fluviométricas analizadas en este trabajo. | 28 |

RESUMEN

El Centro-Sur de Chile ha experimentado una prolongada sequía desde el año 2010, con importantes déficits de precipitación. Este fenómeno ha provocado una disminución en los caudales, inclusive en una mayor envergadura de lo que se esperaba. El objetivo de este proyecto es evaluar la herramienta WEAP (“Water Evaluation and Planning”) para desarrollar un futuro modelo operacional del río Itata. La metodología se basa en la revisión de datos topográficos, de clima y precipitación, así como del uso de suelo y geología de la cuenca. Se utilizarán para generar un escenario base (actual) para ser implementado en WEAP para conocer los beneficios y limitaciones de datos observados versus datos simulados. Este estudio será el punto de partida para la construcción de un modelo operativo que permitirá a los tomadores de decisiones y las partes interesadas locales (junta de vigilancia, asociaciones de canalistas, grupos de interés), tener una comprensión rápida y sencilla de la disponibilidad de los recursos hídricos a diferentes niveles de la cuenca.

Los resultados del presente trabajo permiten concluir que la información y datos disponible, y luego integrados a WEAP, no son suficientes para una modelación representativa de los caudales presentes en la cuenca del río Itata. Por esto, es necesario iniciar estudios de interacción entre agua superficial y subterránea. En general se recomienda considerar estudios de este nexo, además de acumulación y derretimiento nival. Por otro lado, conocer los caudales desviados para riego podría mejorar la estimación de caudales mediante modelos simulados.

Palabras clave: sequía, caudales, modelo, recursos hídricos, WEAP.

ABSTRACT

The Center-South of Chile has experienced a prolonged drought since 2010, with significant precipitation deficits. This phenomenon has caused a decrease in flows, even to a greater extent than expected. The objective of this project is to evaluate the WEAP (“Water Evaluation and Planning”) tool to develop a future operational model of the Itata River. The methodology is based on the review of topographic, climate and precipitation data, as well as the use of land and the geology of the basin. They will be used to generate a base (current) scenario to be implemented in WEAP to understand the benefits and limitations of observed data versus simulated data. This study will be the starting point for the construction of an operating model that will allow decision makers and local stakeholders (oversight board, channel associations, interest groups), to have a quick and simple understanding of the availability of water resources at different levels of the basin.

The results of this work allow us to conclude that the information and data available, and then integrated into WEAP, are not sufficient for a representative modeling of the flows present in the Itata river basin. For this reason, it is necessary to start studies of the interaction between surface and groundwater. In general, it is recommended to consider studies of this nexus, in addition to snow accumulation and melting. On the other hand, knowing the flows diverted for irrigation could improve the estimation of flows through simulated models.

Keywords: drought, flows, model, water resources, WEAP.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro-Sur de Chile ha experimentado una prolongada sequía desde el año 2010, con importantes déficits de precipitación. Esta sequía ha provocado una disminución en los caudales, inclusive en una mayor envergadura de lo que se esperaba por la disminución en precipitaciones, indicando una intensificación de la propagación de la sequía (Alvarez-Garretón et al., 2020). Las herramientas de modelación hidrológica permiten simular escenarios alternativos para apoyar la gestión del recurso hídrico. En concreto, estas herramientas permiten a los tomadores de decisiones y las partes interesadas locales (junta de vigilancia, asociaciones de canalistas, grupos de interés), tener una comprensión rápida y sencilla de la disponibilidad de los recursos hídricos en los diferentes niveles de la cuenca (Assaf et al., 2008).

En la actualidad existen una serie de modelos disponibles para realizar simulaciones de series de tiempo hidrológicas, los cuales se clasifican en dos tipos, considerando la clase de modelación que realizan, los modelos estadísticos, conceptuales y los modelos en base a procesos físicos. Los modelos estadísticos se caracterizan por realizar una modelación de la variable en función del comportamiento histórico de la misma, en algunos casos es solo función de la misma variable y en otros se incorpora más variables que estén directamente relacionadas con el proceso, donde el caso más recurrente en hidrología es la modelación del proceso precipitación-escorrentía. Los modelos conceptuales buscan un modelo parsimonioso que entregue una solución matemáticamente elegante ante una entrada compleja (Jakeman y Hornberger 1993), incluye procesos de calibración y validación, para finalmente llegar a una expresión asociada a factores numéricos, que generalmente no tienen significado físico, que buscan ajustar la respuesta del sistema a datos de salida conocidos frente a datos de entrada también conocidos, de manera de analizar la validez de los valores obtenidos. En este tipo de modelos, cuando las variables a considerar son hidrológicas, se hace necesario realizar un análisis de estacionalidad, modificando las series de manera tal que se elimine las posibles tendencias, periodicidades y estacionalidad, para así asociarlas a un proceso estocástico.

Los modelos basados en procesos físicos, tal como su nombre lo dice, incorporan los procesos hidrológicos de manera más explícita (Abbott et al. 1986), caracterizando la zona de estudio en términos geomorfológicos y procesos que se dan en toda su extensión. Los procesos incorporados y por ende la cantidad de variables involucradas dependen directamente del uso que se dará a la respuesta obtenida y a la información disponible en la zona, aunque se debe tener en cuenta la dificultad de representar los procesos a través de expresiones analíticas, lo que incorpora cierto nivel de incertidumbre en los resultados (Beven, 1989), además de la que se encuentra implícita en los datos utilizados (Butts et al., 2004). Cabe destacar que conforme avanza el desarrollo de modelos hidrológicos se evidencia que los resultados de la modelación dependen en mayor medida de su estructura, función objetivo y calidad de la información, que de la complejidad del modelo y de la longitud de los datos (Gan et al. 1996). A su vez, dada la gran cantidad de modelos desarrollados para representar, ya sea el comportamiento de una cuenca a través de procesos o en particular la relación precipitación-escorrentía, se han realizado distintas evaluaciones de su comportamiento (Klemes, 1986; Beven 2006), abordando las diferentes fuentes de incertidumbre y temas como la equifinalidad entre otros, donde la conclusión más relevante quizás, radica en que los criterios de evaluación dependen directamente del uso que se le dé a los resultados de la modelación.

WEAP ("Water Evaluation and Planning System") es un modelo basado en procesos físicos, fue creado en 1988 como iniciativa del Stockholm Environment Institute (SEI), con el objetivo de generar una herramienta de planificación flexible, integral y transparente para evaluar la sostenibilidad de los patrones actuales de demanda y suministro de agua, y explorar escenarios alternativos de largo alcance. Funciona usando el principio básico del balance hídrico y puede simular una amplia gama de los componentes naturales e intervenidos de estos sistemas. Entre estos, se incluye la escorrentía por precipitación, flujos base, y recarga de aguas subterráneas por precipitación; análisis de las demandas sectoriales; conservación del agua; derechos de agua y prioridades de asignación, operaciones de los embalses; generación de hidroelectricidad; seguimiento de la contaminación y calidad de las aguas; evaluaciones de vulnerabilidad; y requisitos de los ecosistemas. WEAP

explícitamente incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso (WEAP-CCG-SEI, 2009).

WEAP ha sido utilizado en varios estudios de impacto y planificación en recursos hídricos (Purkey 2008, Ingol-Blanco 2009). Por ejemplo, Angarita et al. (2018) utilizó el modelo para estudiar los impactos a escala de cuenca del desarrollo hidroeléctrico en los humedales de Mompós, Colombia. En este caso, el modelo logró identificar que la fragmentación de los corredores de conectividad entre las llanuras de inundación y la reducción de las cargas de sedimentos mostraron los mayores impactos atribuidos a la expansión del desarrollo de hidroeléctricas. Otro estudio por Dale et al. (2015) desarrolló una evaluación integrada del nexo agua-energía en relación al cambio climático en Sacramento, California. En este estudio, el modelo incluyó la integración de modelos a escala de cuenca que incluyen proyecciones de la demanda y la oferta de agua y energía para usuarios del sector residencial, comercial, industrial y agrícola. Los resultados de este estudio, basándose en escenarios de variabilidad climática, sugieren que las importaciones de electricidad a la región aumentarían aproximadamente en un 35% durante períodos más cálidos y secos, cuando la producción de la energía regional es limitada (Dale et al., 2015).

En Chile, la Dirección General de Aguas (DGA), junto con la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC) y el Instituto de Ambiente de Estocolmo (SEI), en 2019 desarrollaron una herramienta para el análisis de gestión, cuyo objetivo principal es desarrollar un modelo operacional en la plataforma WEAP para 5 cuencas nacionales. Esto en el marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos (cuyo objetivo es elaborar e implementar un instrumento estratégico de planificación de carácter indicativo que oriente y coordine las políticas nacionales, planes y programas relacionados directa o indirectamente con el agua), complemento al Plan Estratégico de Cuenca (portafolio de acciones a corto, mediano y largo plazo, que permitan gestionar eficientemente el agua y adaptarse a los efectos del cambio climático, las actividades de desarrollo socioeconómico y medioambiental). (DGA, 2019).

Otra ventaja que ofrecen los productos generados a partir de la modelación WEAP es facilitar la participación de las partes interesadas en la planificación y gestión de los recursos hídricos. Desde esta mirada, la interfaz que ofrece WEAP, permite desarrollar modelos para identificar los recursos y su gestión racional, proporcionando una comprensión preliminar de las interrelaciones entre los componentes del sistema. Entrega una estimación de la importancia relativa de varios escenarios según criterios definidos, facilita la comunicación entre todas las partes involucradas, ayudándoles a llegar a un entendimiento común de cómo funciona la cuenca hidrográfica, lo que puede conducir a una visión compartida de cómo se podrían gestionar los recursos hídricos a futuro (Assaf et al., 2008).

Durante el año 2017, en el marco de la iniciativa “Análisis para el Desarrollo del Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH)” se realizó un estudio para estimar la demanda actual y proyectada de los recursos hídricos a nivel nacional. Dicho estudio contiene análisis regionales, con una caracterización considerando la escala espacial también a niveles de cuencas y/o subcuencas (DGA, 2017). Para el caso de la región del Biobío, que incluye la región de Ñuble, la Figura 1 muestra que las mayores demandas consuntivas se distribuyen entre los sectores productivos de agricultura (41,9%) e industriales (30,8%) (DGA, 2017).

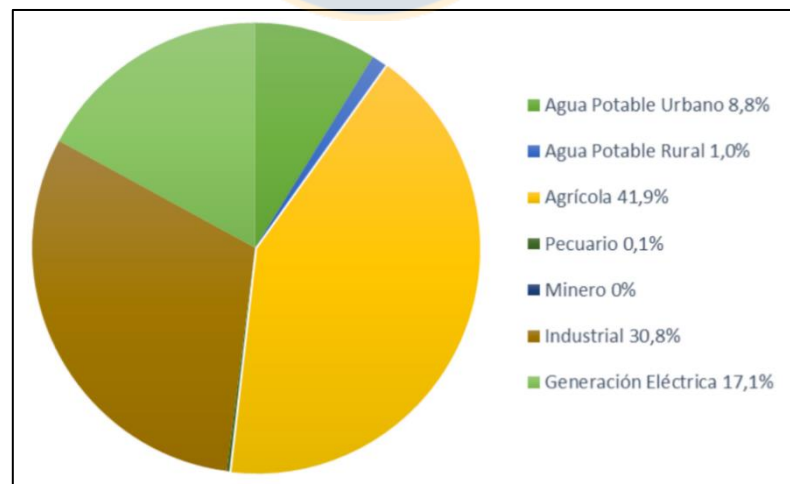


Figura 1. Distribución de la demanda consuntiva actual de la región del Biobío.

Fuente: DGA (2017)

La cuenca del río Itata, foco de este estudio, se considera compleja. Desde el punto de vista del balance hídrico de la cuenca del río, la magnitud de su superficie y la variabilidad de los procesos naturales y antrópicos dentro de ella son múltiples. La cuenca atraviesa transversalmente el país, comenzando en la alta montaña y finalizando en la desembocadura al mar, lo que implica presencia dentro de la cuenca de río de régimen nival, pluviales o combinación de ambas; como también diferentes tipos de actividades humanas, predominando la forestal y la agricultura. Todo esto hace que sea complejo representar todos los procesos anteriores en un modelo y que, a la vez, sea capaz de mostrar caudales en diferentes puntos de la cuenca y en diferentes meses. En este sentido, la herramienta WEAP ofrece una solución para la planificación y distribución de agua aplicada a diferentes escalas.

Evaluar la representatividad y validez de modelo hidrológico de la cuenca del río Itata implementado en WEAP para la construcción futura de un modelo operacional de la oferta y demanda de los recursos hídricos. La metodología se basa en la revisión de datos topográficos, antrópicos, de clima y precipitación, así como del uso de suelo y geología de la cuenca.

Se evaluó la bondad de ajuste de los datos simulados en el modelo con los datos observados, provenientes de estaciones fluviométricas, utilizando los criterios de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970). También los resultados se evaluaron mediante un RMSE (Raíz del Error Medio Cuadrático) y un Ceff (Ritter et al., 2014).

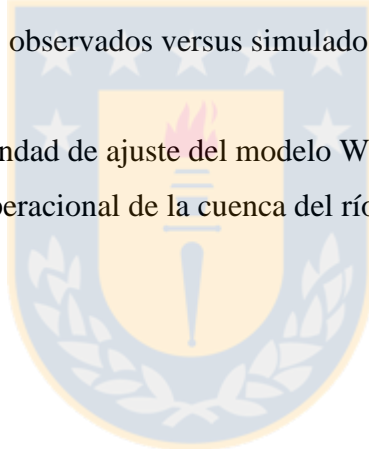
2. OBJETIVO

2.1 Objetivo general

Evaluar la representatividad y validez de modelo hidrológico de la cuenca del río Itata implementado en WEAP para la construcción futura de un modelo operacional de la oferta y demanda de los recursos hídricos.

2.2 Objetivos específicos

1. Con la información disponible, implementar el modelo WEAP para la simulación de caudales en la cuenca del río Itata.
2. Evaluar los datos observados versus simulados a partir de la herramienta WEAP.
3. Determinar la bondad de ajuste del modelo WEAP para ser utilizado en un futuro modelo operacional de la cuenca del río Itata.



3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Itata, que se ubica en la región del Ñuble. Esta área se divide en cinco subcuencas: Ñuble Alto, Ñuble Bajo, Itata Bajo e Río Itata Alto e Itata Medio (Figura 2) y sus principales cauces son el río Itata, río Ñuble, río Chillán, río Cato y río Diguillín. Las comunas que están dentro de la cuenca del río Itata son: Ninhue, Treguaco, Portezuelo, Ranquil, Coelemu, Quillón, Bulnes, San Ignacio, Pemuco, Yungay, El Carmen, Pinto, Cabrero, Coihueco, San Fabian, San Carlos, Chillán, Chillán Viejo, San Nicolas, Tucapel y Quirihue.

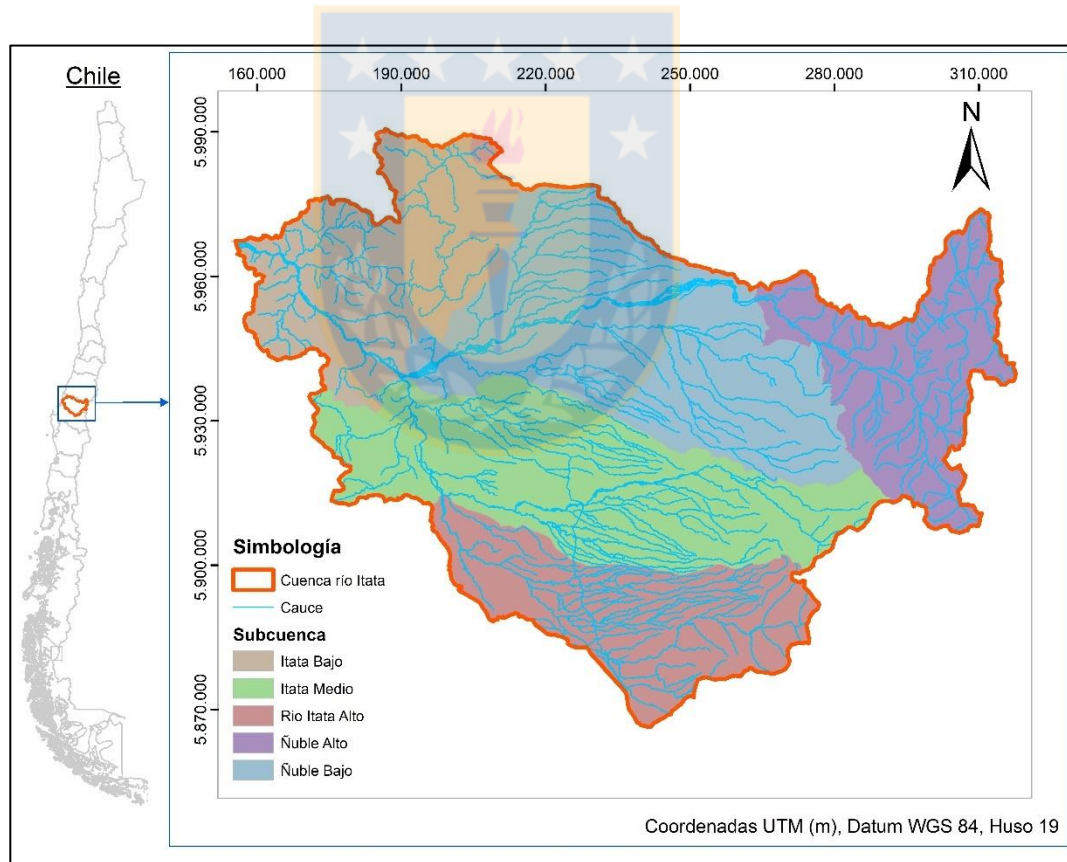


Figura 2. Ubicación geográfica de la cuenca del río Itata y sus subcuencas.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 3, la cuenca de estudio comienza en la zona de alta montaña, alcanzando alturas de más de 3.000 m.s.n.m., pasando por la macroforma denominada depresión intermedia, luego cruza la cordillera de la costa, para finalmente terminar en el mar. Este hecho la convierte en una cuenca de régimen hidrológico pluvial-nival, predominantemente pluvial. De acuerdo con las elevaciones del territorio, las distintas zonas corresponden a: 1. Planicies litorales; 2. Cordillera de la Costa; 3. Depresión Central; 4. Precordillera; y 5. Cordillera de los Andes.

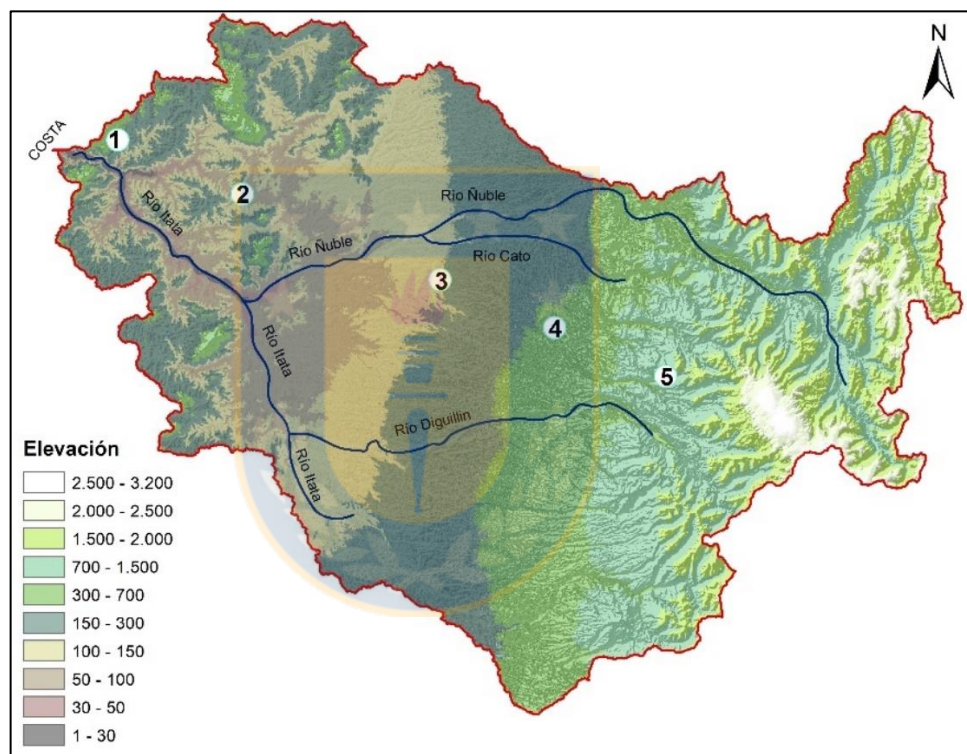


Figura 3. Elevación en la cuenca del río Itata. Fuente: Elaboración propia.

La cuenca marca la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que comienzan a desarrollarse desde el borde sur de la cuenca (Figura 4 a). En la franja costera y en los sectores altos y laderas occidentales de la Cordillera de la Costa se presenta un clima templado húmedo, con una humedad constante con precipitaciones que fluctúan entre 860 mm y 1.100 mm anuales de norte a sur de la cuenca. Hacia el interior el clima templado mediterráneo posee temperaturas más fluctuantes, donde las precipitaciones alcanzan entre 1.000 a 1.300 mm anuales con un período seco de

cuatro meses. Este contraste es particularmente perceptible en el valle longitudinal, franja en la cual las temperaturas presentan un mayor contraste entre día y noche. Su distribución predomina sobre toda la zona intermedia, bordes orientales de la Cordillera de la Costa y los sectores más bajos de la precordillera. En la Cordillera de los Andes por sobre los 1.500 metros de altitud se desarrolla el clima frío de altura con abundantes precipitaciones, alcanzando incluso los 1.500 mm anuales, lo que, sumado a las bajas temperaturas imperantes, permiten la presencia de nieves permanentes en la sección de mayores altitudes (Figura 4 a, b y c).

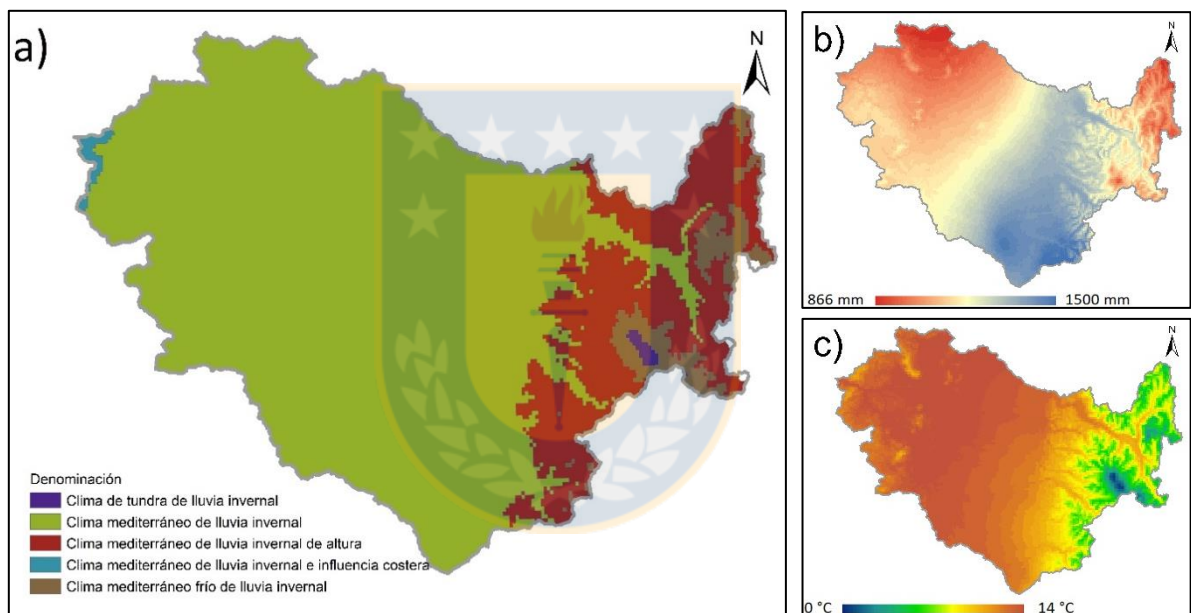


Figura 4. a) Zonas climáticas de la cuenca (Fuente CIREN) b) Precipitaciones promedio anual y c) Temperatura promedio anual. Estos últimos elaboración propia con datos obtenidos de la base de WorldClim-Gobal Climate Data (1950-2000).

En la depresión central, los suelos se caracterizan por ser pardos no cálcicos, formados sobre sedimentos aluviales y cenizas volcánicas (Figura 5). En Chile, los suelos derivados de materiales volcánicos representan entre el 50% y 60% del total de suelos arables que hay en el país (Tosso, 1985), concentrándose en forma importante entre las regiones Metropolitana y Décima. En la cuenca del río Itata son ocupados intensamente por la

agricultura y fruticultura, actividades antrópicas con significativo impacto en un balance hídrico.

Sobre la geología y el uso de suelo, en la precordillera andina, los suelos forestales ocupan una franja de ancho variable hacia el sur de la región (Figura 6). En la cordillera de la costa, se desarrollan suelos pardo-forestales. Su uso principal es la forestación de especies tales como pino y eucaliptus. En el litoral se localizan los suelos de praderas costeras sobre terrazas marinas. Debido a la mayor humedad y precipitaciones del litoral, estos suelos son muy desarrollados (Sarricolea & Herrera-Ossandon, 2016).

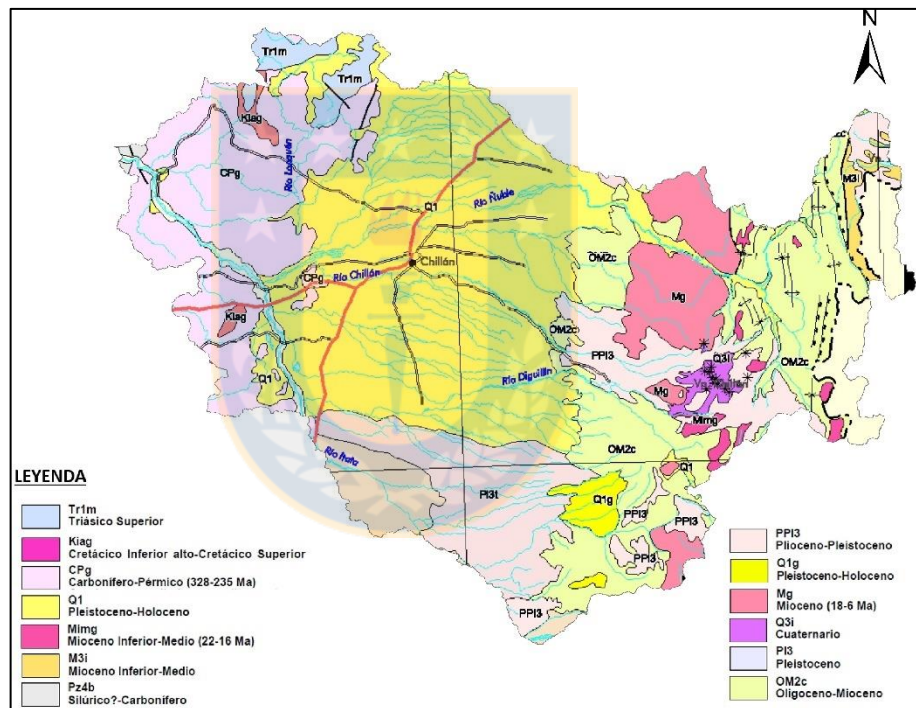


Figura 5. Geología de la cuenca, Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Sernageomin.

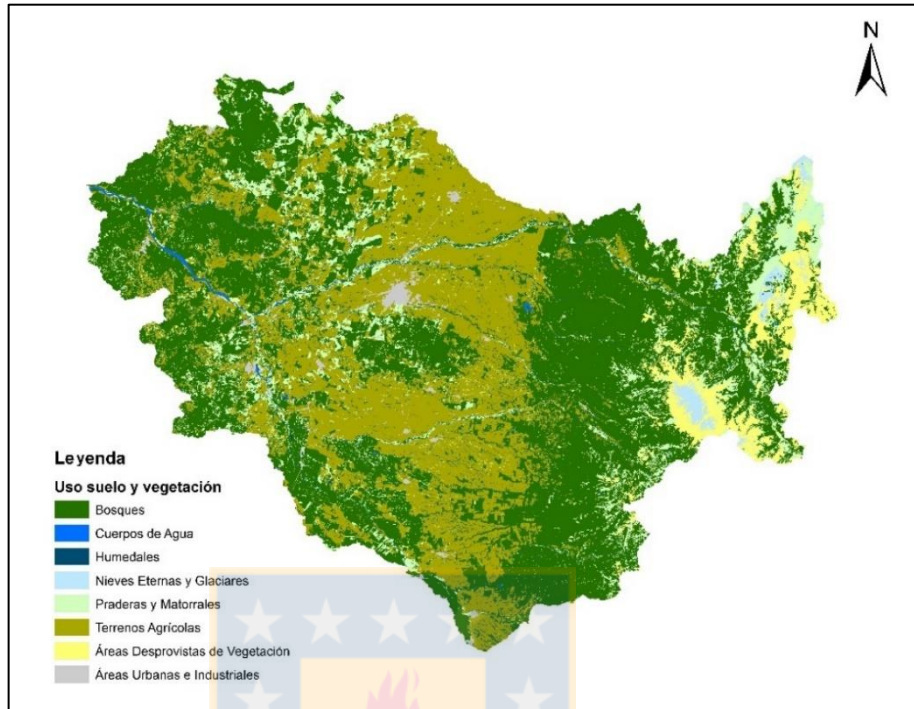


Figura 6. Uso de suelo y vegetación en la cuenca elaboración propia a partir de datos de la CONAF. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Modelo WEAP

El modelo está basada en el principio básico del balance hídrico y puede aplicarse a una sola cuenca hidrográfica o sistemas más complejos, como cuencas hidrográficas transfronterizas. Se considera un modelo del tipo conceptual, con enfoque de esquematización del sistema físico y naturales para describir los procesos hidrológicos. De aquí se desglosan como los componentes del sistema físico (técnico): por ejemplo, embalses, pozos de sondeo, desvíos, tuberías, canales, ciudades, plantas de tratamiento de aguas residuales, instalaciones hidroeléctricas y de aguas residuales, instalaciones hidroeléctricas y explotaciones agrícolas de regadío. Los componentes del sistema natural corresponden a, por ejemplo, cuencas, acuíferos, ríos y lagos. Los componentes se esquematizan mediante una red de elementos interconectados sin referencia geográfica, dividiéndolos en nodos (donde

existe demanda del agua) y enlaces (donde se transfiere el agua entre los nodos) (Psomas et al., 2016).

El desarrollo de un modelo WEAP incluye las siguientes etapas:

1. Definición del estudio: En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
2. Búsqueda de información: En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.
3. Desarrollo del modelo: En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.
4. Calibración: Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.
5. Generación de escenarios: Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las 8 políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación. Sin embargo, esta sección se escapa de los límites del presente trabajo (WEAP-CCG-SEI, 2009).

La Figura 7. muestra el esquema general del modelo WEAP:

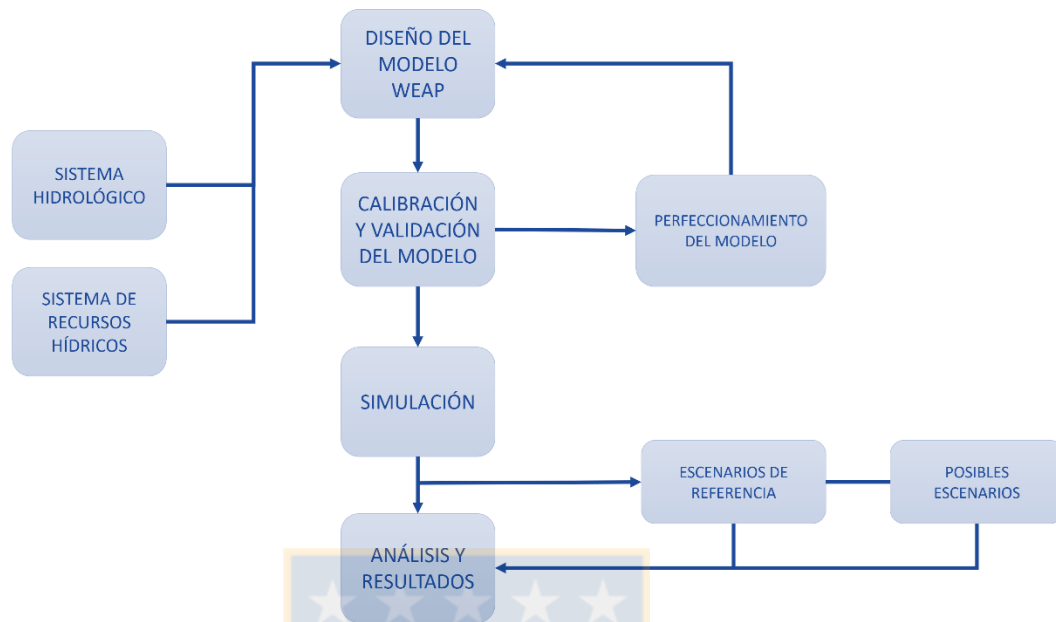


Figura 7. Esquema general del modelo WEAP.

3.3 Definición del estado hídrico actual de la cuenca del río Itata

La definición del escenario actual de esta investigación, que es determinar el balance de agua dentro de la cuenca del río Itata entre los años 2010 al 219, se realiza a partir de una búsqueda de información en agencias del gobierno, base de datos, información satelital, entre otros. El modelo inicial implementado con estos datos permite hacer una revisión preliminar del modelo (WEAP-CCG-SEI, 2009). Los datos que han sido descritos anteriormente en Área de estudio serán llevados al software WEAP como escenario actual.

Los componentes del balance hidrológico modelados usando el programa WEAP son evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial (i.e.interflow), y flujo base). WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar estos componentes del balance hidrológico para cada una de las unidades espaciales básicas que tienen que ser identificados en el modelo. Estas unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como *catchments*. Los *catchments* tienen que ser definidos a través de procedimientos de

delimitación de subcuencas. A través de este proceso se obtiene la caracterización de cobertura vegetal necesaria, incluyendo el estimado de las áreas y la distribución de cobertura vegetal dentro de cada zona de captación. Los datos climáticos requeridos para realizar la modelación incluyen precipitación, temperatura, humedad, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud, y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante) (Guía Metodológica de WEAP, 2009).

Se utilizó la última versión oficial del modelo WEAP (Versión: 2021.0, Julio 18, 2021). Esta versión agrega al modelo el efecto de la radiación y su incidencia en el derretimiento de nieve. Sin embargo, las estimaciones nivel del modelo WEAP no considera una salida por sublimación en el balance del manto nival, y por falta de información local, no fue posible la evaluación de la estimación de nieve.

Esta versión de la herramienta WEAP, permite descargar un modelo digital de elevación, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA), con resolución de 3 segundo y 15 segundos, equivalente a resoluciones de 90 metros y 500 metros, respectivamente. Para esta modelación se trabajó con la resolución de 90 metros. Con esto, se incorporó al modelo información espacial del uso de suelo; y por ende, la cantidad de demanda de agua en la cuenca para ese concepto. Así mismo, a través el modelo de elevación en WEAP y, por ende, la topografía de la cuenca, se trazaron los cauces y se delimitaron las subcuencas dentro del programa.

Para el consumo urbano se consideró la cantidad de población de cada comuna presente en la cuenca (datos del INE), consumo promedio per cápita, pérdidas por conducción de agua potable y flujos de retorno proveniente de la restitución de aguas desde las plantas de tratamiento de aguas servidas.

Los datos de precipitación y temperatura utilizados en el modelo fueron obtenidos de los productos meteorológico (CR2MET) desarrollados por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) los que consideran información meteorológica local, topografía local y productos satelitales; en particular, se utilizó el reanálisis atmosférico ERA Interim (Dee et

al., 2011), desarrollado por el ECMWF (European Centre for MediumRange Weather Forecasts).

Se incluye además la información de estaciones fluviométricas presentes en la cuenca pertenecientes a la Dirección General de Aguas.

En la Figura 8, se muestran la posición geográfica de las estaciones fluviométricas presentes en la cuenca, identificándose las que cuyos caudales se utilizaron para comparar los caudales simulados resultantes del modelo.

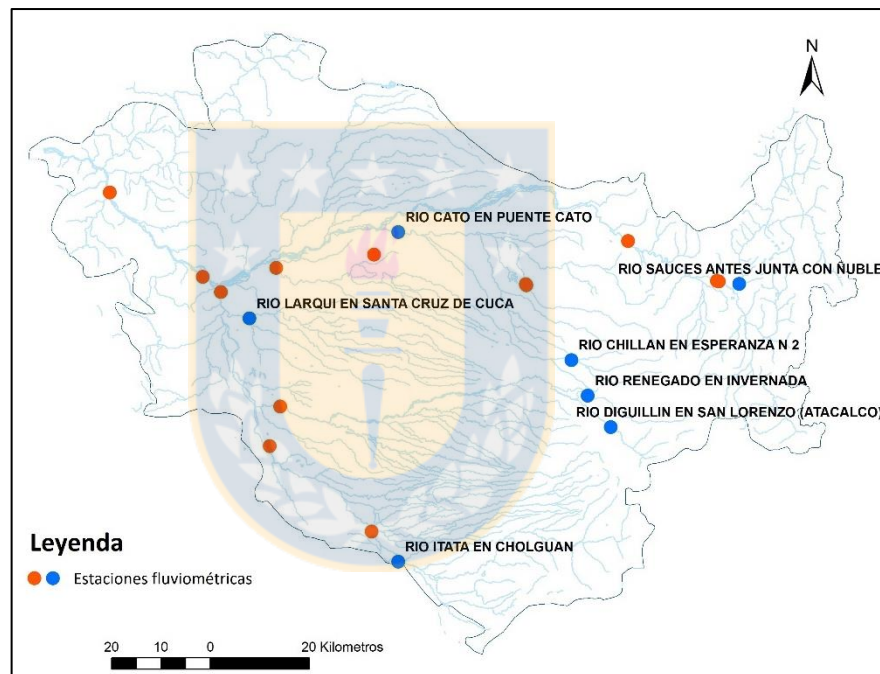


Figura 8. Estaciones fluviométricas presentes en la cuenca del río Itata. En color azul, las estaciones utilizadas como punto de control en la modelación o catchments.

Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de control son donde están posicionadas las estaciones fluviométricas que miden la esorrentía (caudales observados) de cada subcuenca (Figura 9).

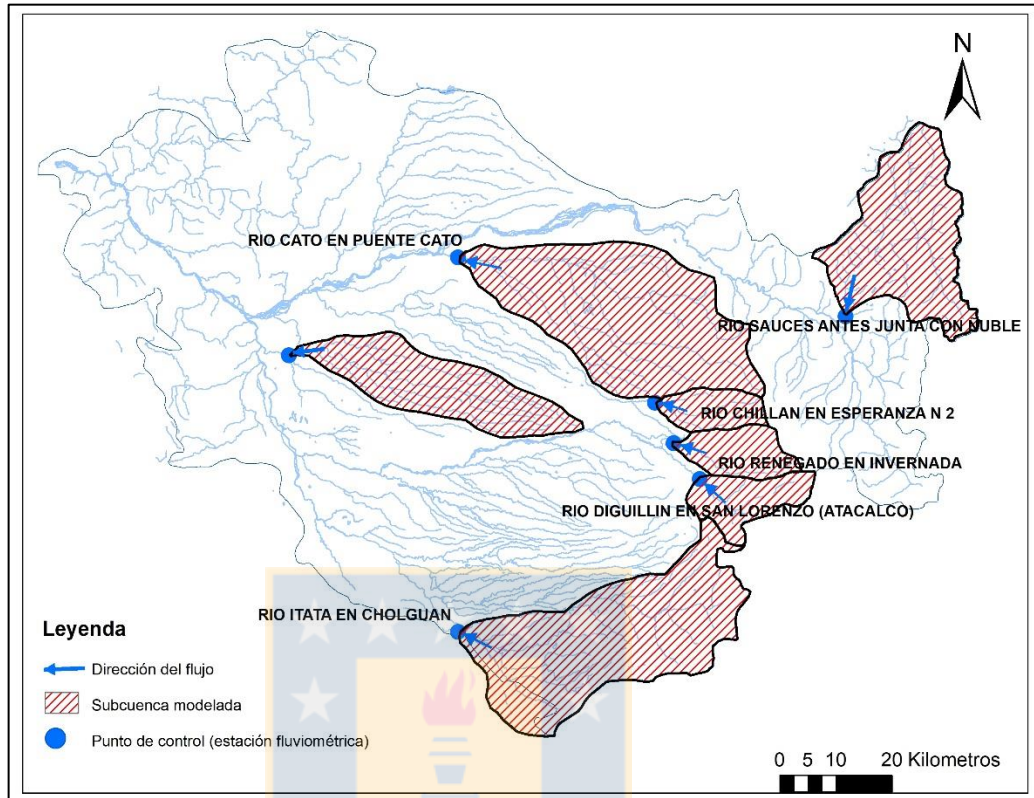


Figura 9. Estaciones fluviométricas presentes en la cuenca del río Itata. En color azul, las estaciones utilizadas como punto de control en la modelación o catchments.

Fuente: Elaboración propia.

WEAP es accesible debido a su interfaz gráfica, lo cual lo hace más simple que otros modelos similares. Posee herramientas de SIG para la configuración del sistema, en donde arrastrando y soltando se pueden posicionar elementos a utilizar en la modelación como los que se observan en la Figura 10. Estos elementos corresponden a estaciones fluviométricas, con sus datos mensuales de caudales, obtenidos desde la DGA; ciudades y su demanda de agua por la población, obtenida de censos; flujos de retornos de plantas de tratamiento de aguas servidas; pérdidas por conducciones; extracciones de caudales desde fuentes de captaciones subterránea y/o superficiales; todos estos últimos datos obtenidos desde la superintendencia de servicios sanitarios.

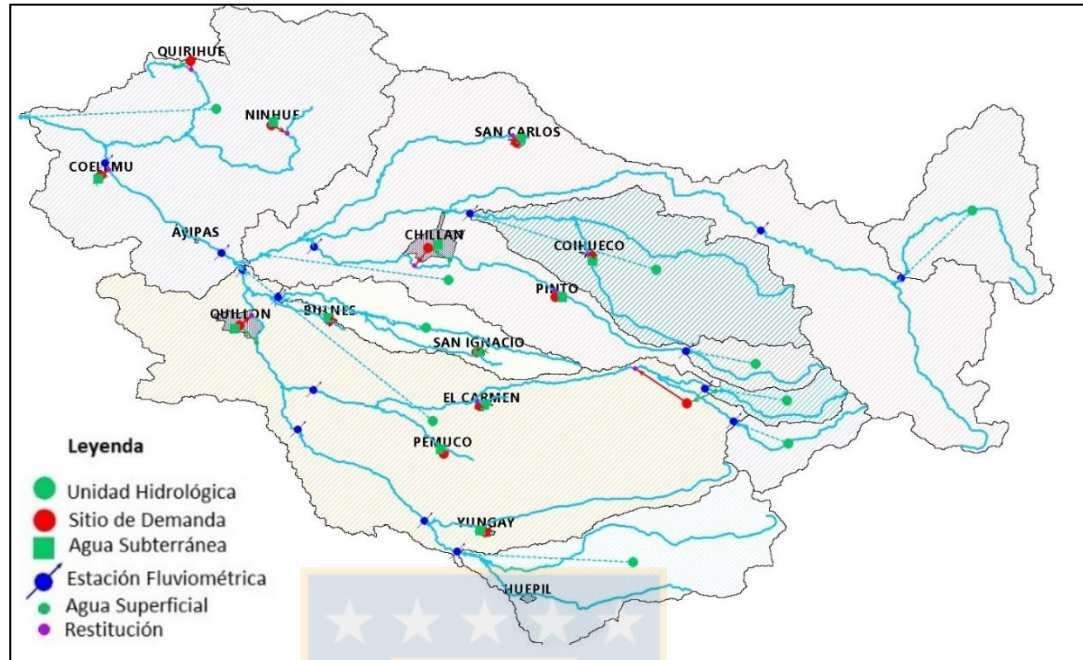


Figura 10. Interfaz gráfica de WEAP en la cuenca del río Itata. Siendo Unidad Hidrológica: cuencas a modelar o área seleccionada generada por un punto de interés, donde se especifican procesos como precipitación, evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve, escorrentía y riego. Sitio de Demanda: Consumo urbano; Agua Subterránea: Extracción desde captaciones de agua subterránea, para el consumo urbano (se asume acuífero con capacidad inicial infinita). Estación Fluviométricas: Estaciones de medición de caudal necesarias para comparar los resultados del modelo; Agua Superficial: Extracción desde captaciones de agua superficial, para el consumo urbano; Restitución: Corresponde al flujo de retorno proveniente de la demanda urbana. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Evaluación de ajuste del modelo

En WEAP, se seleccionó el método de precipitación-escorrentía para la modelación de caudales (caudales simulados), que permite convertir la precipitación de una cuenca en caudales medios mensuales. Este método determina evapotranspiración de cultivos o

vegetación utilizando sus coeficientes de cultivo. El resto de la lluvia no consumida por evapotranspiración y por consumo de las zonas urbanas, es simulada como escorrentía hacia el río. O podría ser aportada entre escorrentía al río o flujo subterráneo al sistema acuífero de acuerdo con el esquema topológico de la cuenca en estudio.

Se evalúa la bondad de ajuste del modelo generado con los datos observados y simulados a través del Criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970). El NSE es un indicador adimensional utilizado para evaluar modelos hidrológicos, caracterizado por su flexibilidad para ser aplicado a distintos modelos matemáticos (McCuen et al., 2006).

El método permite estimar la varianza de las observaciones mediante la normalización de la función objetivo de mínimos cuadrados:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Obs,i} - Q_{Sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{Obs,i} - \bar{Q})^2} \quad Ec. 1$$

donde, Q_{Obs} es el caudal observado, Q_{Sim} es el caudal simulado y \bar{Q} es el caudal promedio del caudal observado para el período de datos utilizados.

Si bien Nash-Sutcliffe entrega valores entre $-\infty$ y 1, en rangos que explican un ajuste insuficiente, satisfactorio, bueno, muy bueno y excelente, no existe un consenso global sobre la representatividad de estos rangos.

Tabla 1. Valores referenciales del Criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe

| Eficiencia | Ajuste |
|-------------------|---------------|
| < 0,2 | Insuficiente |
| 0,2 – 0,4 | Satisfactorio |
| 0,4 – 0,6 | Bueno |
| 0,6 – 0,8 | Muy Bueno |
| > 0,8 | Excelente |

Fuente: Molnar, 2011.

De acuerdo con McCuen et al. (2006), el método NSE es un buen indicador de bondad de ajuste, pero hay que tener en cuenta sus limitaciones. En este trabajo se utilizó la sugerencia de Sign et al. (2004) donde se complementa el NSE con el cálculo de valores de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar (SD). Sign et al. (2004) sugiere que valores de RMSE inferiores a la mitad de la SD pueden considerarse bajos. Esta relación ha sido nombrada *Ceff* (Ritter et al., 2014):

$$Ceff = 1 - \left(\frac{RMSE}{SD} \right)^2 \quad Ec. 2$$

donde, RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Obs,i} - Q_{Sim,i})^2}{n}} \quad Ec. 3.$$

y SD:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Obs,i} - \bar{Q})^2}{n}} \quad Ec. 3.$$

Donde, *n* es el número de datos.

Los rangos definidos para *Ceff* presentan valores $\leq 0,75$ y $\geq 0,91$ y también se entregan valores porcentuales (*Ceff%*). A partir de los rangos mencionados anteriormente, la evaluación de la bondad de ajuste se representa cualitativamente en no aceptable, aceptable, buena y muy buena (Tabla 2).

Tabla 2. Valores referenciales para rangos *Ceff* y *Ceff%*

| <i>Ceff</i> | <i>Ceff%</i> | Ajuste |
|-------------|--------------|--------------|
| $\leq 0,75$ | > 50 | No aceptable |
| 0,75 – 0,84 | 40 – 50 | Aceptable |
| 0,84 – 0,91 | 30 – 40 | Buena |
| $\geq 0,91$ | ≤ 30 | Muy Buena |

Fuente: Modificado de Sign et al. (2004).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

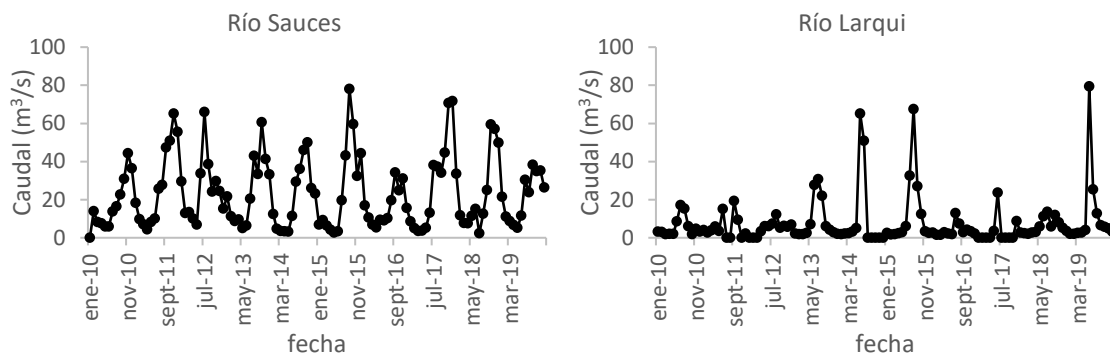
Para siete subcuencas del río Itata (puntos de control) se obtuvieron desde estaciones fluviométricas series de tiempo de caudales mensuales (caudales observados), entre enero y diciembre. Por disponibilidad de datos, se decidió analizar el periodo entre el 2010 - 2019. Los nombres de las estaciones fluviométricas utilizadas como puntos de control de la modelación son: Río Sauce, Larqui, Cato en Puente Cato, Chillán en Esperanza, Itata en Cholguán, Renegado y Diguillín en San Lorenzo. Las ubicaciones de las estaciones georreferenciadas se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Estaciones fluviométricas para la evaluación de caudales observados

| Estación | Código DGA | Coordenadas (UTM) | |
|------------------------------|------------|-------------------|-----------|
| | | Este | Norte |
| Río Sauce | 08104001-K | 296.587 | 5.939.407 |
| Río Larqui | 08134003-K | 733.342 | 5.934.618 |
| Río Cato en Puente Cato | 08114001-4 | 764.521 | 5.950.139 |
| Río Chillán en Esperanza | 08117006-1 | 254.539 | 5.924.825 |
| Río Itata en Cholguán | 08123001-3 | 760.322 | 5.883.561 |
| Río Renegado | 08130001-1 | 265.901 | 5.916.793 |
| Río Diguillín en San Lorenzo | 08130002-K | 270.575 | 5.910.410 |

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de red Hidrométrica de la DGA.

Las series temporales de los caudales observados se muestran en la Figura 11.



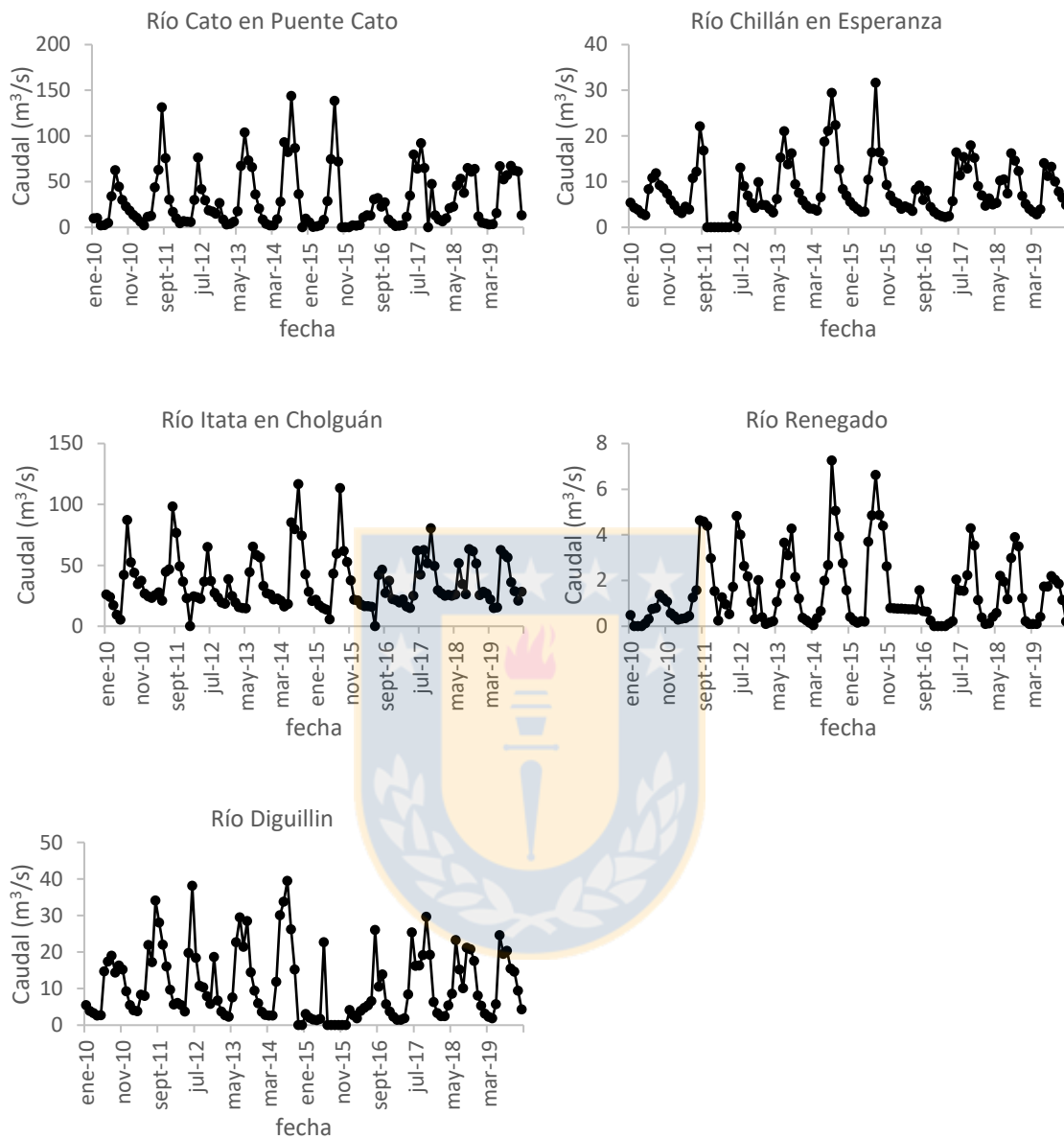
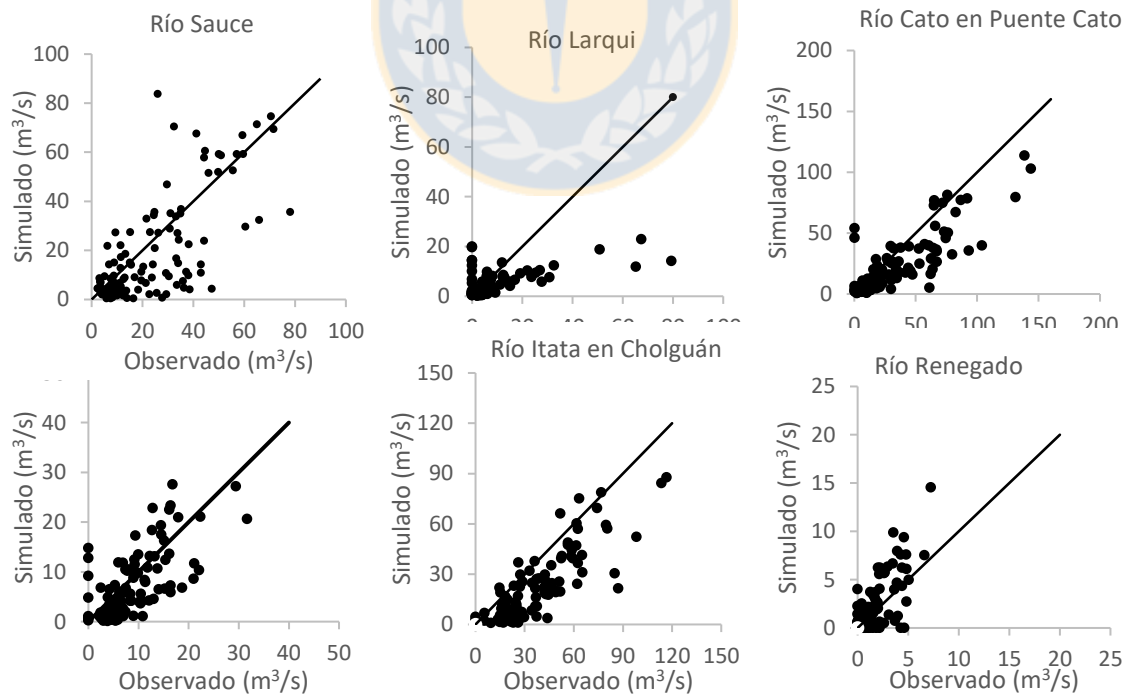


Figura 11. Serie de tiempo de caudales observados a partir del análisis de estaciones fluviométricas. Fuente: Elaboración propia.

La modelación hidrológica en zonas de montaña, como gran parte del área estudiada, es bastante compleja, debido a la escasez de datos, a la alta variabilidad climática, a la geología y topografía. Para la modelación de la nieve se realizó una estimación simple en WEAP, basada en la temperatura de fusión, radiación y precipitaciones.

WEAP incluye varios módulos que permiten integrar modelo de agua subterránea, como MODFLOW (modelo tridimensional de aguas subterráneas de diferencias finitas, basado en la simulación de procesos físicos). Sin embargo, dado que la interacción río-acuífero no estuvo considerada dentro de los objetivos de este estudio, no se modeló el comportamiento de las aguas subterráneas dentro de la cuenca del río Itata, por lo que no se conoce cuál es la percolación profunda y cómo esta podría aflorar a los cuerpos de aguas superficiales como flujo base o directamente al almacenamiento del acuífero.

Datos de zonas climáticas, elevación, consumo urbano de agua (superficial y subterráneas), uso de suelo y vegetación fueron implementados en WEAP para generar una simulación de caudales medios mensuales, durante el periodo 2010-2019. Estos datos fueron graficados (1:1) junto con los datos observados de las estaciones fluviométricas de la DGA, para realizar una evaluación inicial, indicando sobre y subestimaciones del modelo WEAP (Figura 12).



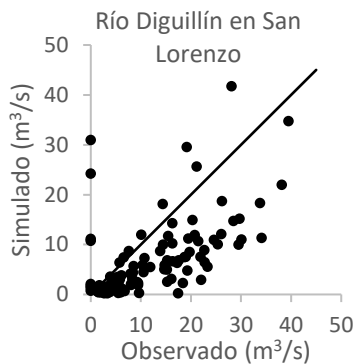


Figura 12. Datos de caudales simulados versus observados. Fuente: Elaboración propia.

Visualmente se aprecia que las mayores diferencias se encuentran para el río Larqui y Renegado. De este último se sabe que presenta pérdidas por infiltración y recuperaciones por afloramientos a lo largo del río, consistentes con la topografía y geología de la zona. (Zúñiga et al., 2012; Arumí et al., 2020).

Los gráficos de la Figura 13 muestra el detalle de cada estación, entregando el promedio mensual para el periodo 2010 y 2019 de los datos simulados y observados para la cuenca del río Itata. Se destaca que los datos simulados se ajustan para la temporada de estiaje para las estaciones de Río Sauce, Cato en Puente Cato y Renegado. Los gráficos reflejan que los caudales mínimos correspondiente al flujo base es durante los meses de enero-abril, temporada lluviosa de abril-septiembre, y derretimiento entre septiembre-enero. Adicionalmente, los gráficos permiten identificar el periodo con mayores diferencias que genera el modelo WEAP entre las temporadas. En este caso existen importantes subestimaciones del caudal de invierno. Esto ocurre para todas las estaciones analizadas, menos la estación del Renegado donde se observan sobreestimaciones de caudal.

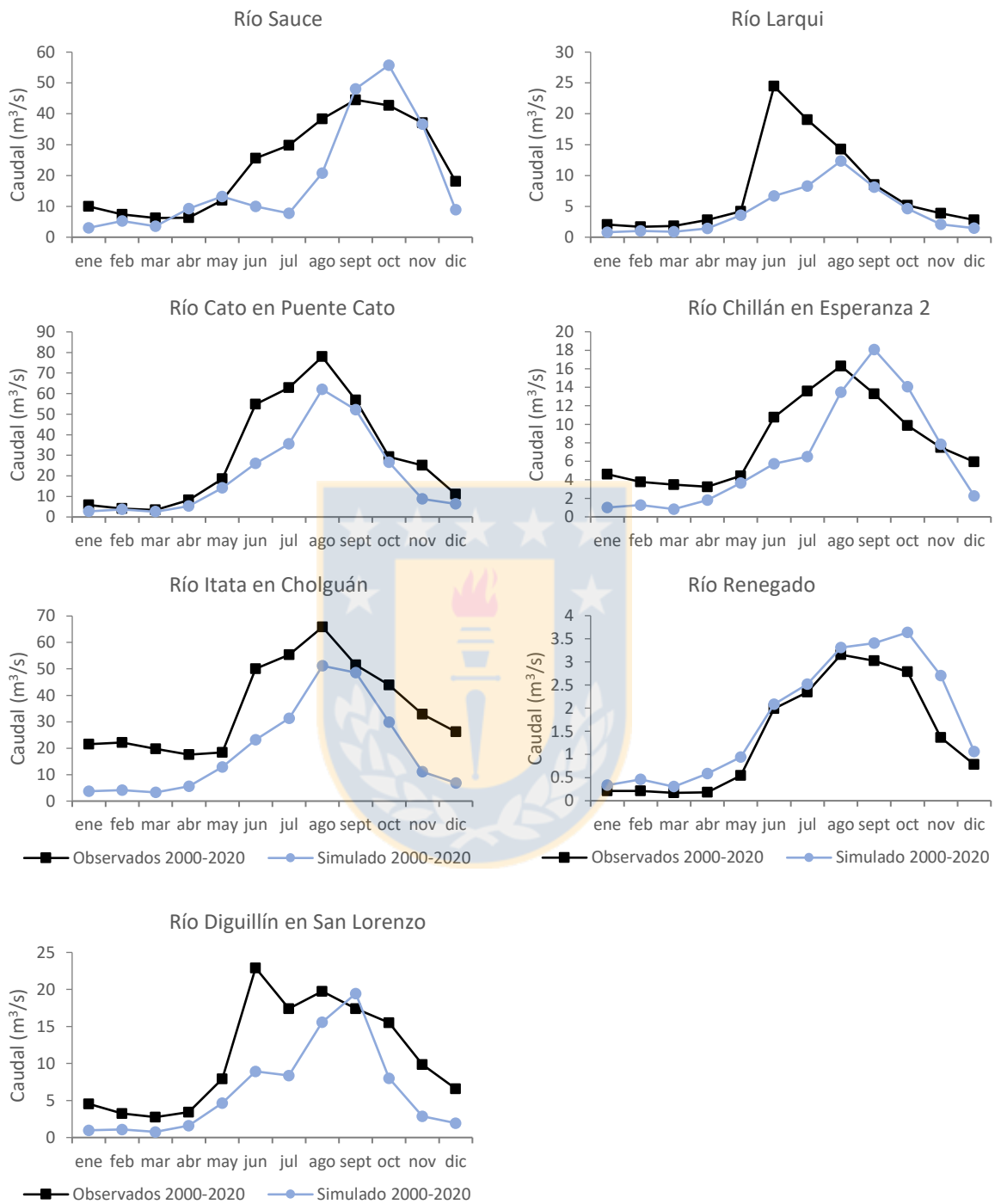


Figura 13. Promedio mensual de datos simulados versus observados de caudales para el periodo 2010-2019. Fuente: Elaboración propia.

Arumí et al. (2020) explica el Renegado corresponde a una parte plana de la cuenca del Renegado, donde los suelos del valle son predominantemente arenosos, con una alta tasa de infiltración y la existencia de rocas fracturadas que favorecen la recarga de aguas subterráneas. Esto es registrado por los datos observados, pues la escorrentía observada es menor producto del relleno de rocas fracturadas para esta subcuenca. El mismo estudio menciona la existencia de múltiples vertientes que afloran tras las altas pendientes a lo largo del valle. Si bien hay investigaciones desarrolladas para identificar, georreferenciar y analizar las aguas de las vertientes, no se encontraron antecedentes de las magnitudes de caudales que aportan a la cuenca. Se asume además que existe un número importante de vertientes que no han sido caracterizadas por la alta complejidad geográfica que presenta la zona (Arumí et al., 2020).

Otro estudio realizado por Zúñiga et al. (2012) establece una interacción de agua superficial con agua subterránea en el Renegado, y una probable conexión entre las subcuencas del tramo superior con la zona baja y media del Río Diguillín, tributarios del río Itata. El estudio mencionado anteriormente, indica la necesidad de considerar la existencia de la conexión subterránea y el derretimiento de glaciares que no fueron contemplados en el modelo (Zúñiga et al., 2012).

Durante el 2012 el modelo WEAP introdujo un módulo glacial que permite representar esta variable en forma explícita como elementos independientes. Esto permite generar una unidad de respuesta hidrológica subdividida entre una zona glaciar y no glaciar. (Condom et al., 2012). Sin embargo, para incluir este módulo, es necesario contar con información del área del glaciar y la relación que existe entre ella y el volumen glaciar (Cepeda, 2017). De acuerdo con Cepeda (2017) se requiere la aplicación de ecuaciones empíricas, modelos climatológicos, incluyendo información sobre la cobertura histórica, la tasa de variación del espesor y balance de masa, topografía basal y la relación que existe entre el área y volumen del glaciar.

Dado que las mediciones directas de estas variables son puntuales o prácticamente inexistentes, el estudio mencionado anteriormente recomienda la utilización de herramientas de percepción remota. Sin embargo, esto último no fue parte de este trabajo de investigación.

En cuanto a fenómenos climáticos se mencionan El Niño y La Niña que tienen una gran relevancia en la generación de la escorrentía y presentan alta variabilidad a lo largo del país (Correa, 2013). La Figura 14 muestra la calidad del pronóstico según la NOAA, donde el tamaño de los círculos está relacionado con la calidad del pronóstico. Los círculos de pequeño tamaño indican una mayor calidad según el sesgo. El color negro indica una subestimación y el blanco indica una sobreestimación de caudales.

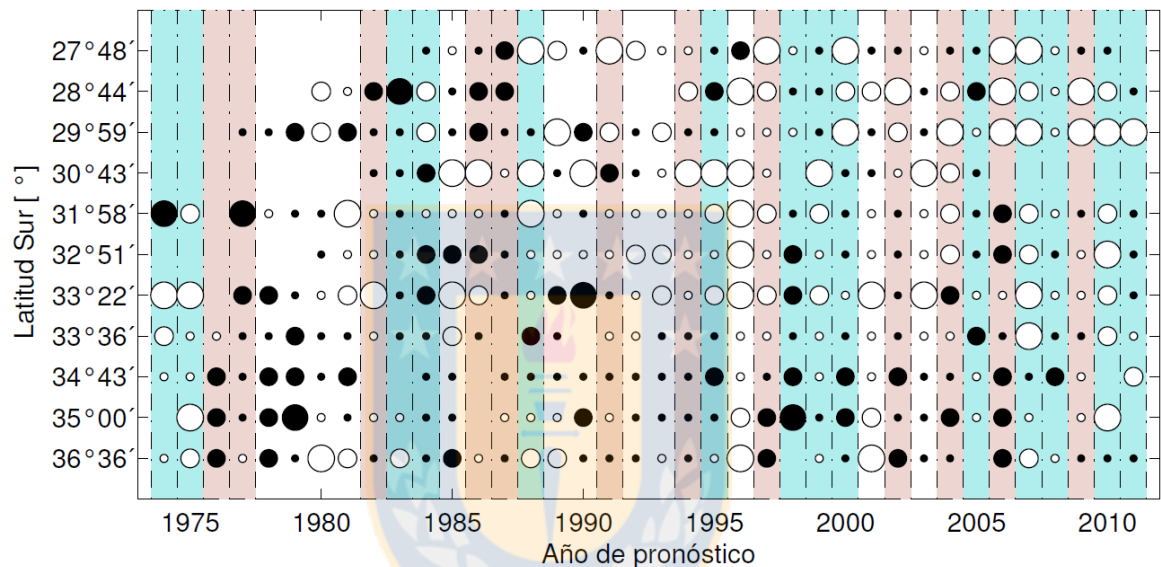


Figura 14. Diferencia entre pronósticos de escorrentías durante el fenómeno de El Niño (banda rosa) y La Niña (banda celeste) (NOAA). Fuente: Correa (2013)

Del estudio realizado por Correa (2013) se desprende que para las latitudes ubicadas al sur existen tanto sobre, como subestimaciones, con una tendencia hacia la sobreestimación para los años 2005-2010, aunque con un menor sesgo. La investigación estudia los registros de las estaciones fluviométricas en relación con la ruta de nieve de la DGA que corresponden a estaciones de monitoreo nival para mejorar la estimación y pronóstico de caudales. El estudio concluye que las lecturas son irregulares, pero que los volúmenes de deshielo y acumulación máxima de nieve en estaciones cercanas a las estaciones fluviométricas resultan importantes para la predicción de caudales. Además, menciona que existe una gran variabilidad en la acumulación nival registrada en distintas cuencas de dicho estudio, que fueron ubicadas desde el centro al centro sur de Chile. Lo anterior indica nuevamente la

necesidad de hacer un estudio más detallado para cada subcuenca del río Itata y así, cualquier cuenca con una fuerte influencia en sus caudales de la interacción río-acuífero y de la presencia de nieve.

Dicho esto, los resultados de simulación de caudales a través de la herramienta WEAP no permite generar resultados estadísticos fehacientes para la mayoría de las cuencas analizadas. Por esto, proyectar escenarios futuros con la actual modelación solo generaría información errónea. Para esto se requiere de la cuenca conocimiento preciso entre la interacción de aguas subterráneas y superficiales; de los procesos de acumulación y derretimiento de nieve; y un catastro de todas las extracciones artificiales dentro de la cuenca.

En los casos que las características de la cuenca no requieran tales conocimientos, WEAP a demostrado ser una buena herramienta. El año 2010, Mardones obtuvo mediante el modelo WEAP una buena modelación de caudales medios mensuales para las cuencas Elqui en Algarrobal y Hurtado en San Agustín, con coeficientes de Nash-Sutcliffe de 0,76 y 0,69, respectivamente. Estas cuencas no presentan la complejidad detallada en el párrafo precedente, ya que poseen nieves permanentes, precipitaciones poco abundantes (inferior a 175 mm promedio anual), régimen netamente nival (mayores caudales ocurren en verano), actividad agrícola reducida y con información suficiente disponible del principal acuífero presente en la cuenca (acuífero río del Elqui) (DGA/CADE-IDEPE, 2004).

En la cuenca del río Itata, los caudales para la Estación del Río Cato en Puente Cato fue el único que resultó (Tabla 4) con indicadores para el coeficiente de Nash-Sutcliffe (0,62) con un ajuste de carácter muy bueno (Tabla 5). Sin embargo, para la misma estación, los valores de C_{eff} fueron $\leq 0,75$, un ajuste de bondad no aceptable (Tabla 5). Sin embargo, este estudio puede ser el punto de partida para la construcción de un modelo operativo que permitirá a los tomadores de decisiones y las partes interesadas locales (junta de vigilancia, asociaciones de canalistas, grupos de interés), tener una comprensión rápida y sencilla de la disponibilidad de los recursos hídricos a diferentes niveles de la cuenca

Tabla 4. Resultados estadísticos para las siete estaciones fluviométricas analizadas en este trabajo.

| Estación | NS | RMSE | RD | DE obs (SD) | Ceff |
|------------------------------|-----------|-------------|-----------|--------------------|-------------|
| Río Sauce | 0,29 | 15,32 | 66,12 | 18,25 | 0,29 |
| Río Larqui | 0,24 | 11,19 | 148,04 | 12,86 | 0,24 |
| Río Cato en Puente Cato | 0,62 | 19,45 | 65,25 | 31,89 | 0,63 |
| Río Chillán en Esperanza | 0,25 | 5,15 | 63,78 | 5,98 | 0,26 |
| Río Itata en Cholguán | 0,16 | 20,12 | 56,78 | 22,10 | 0,17 |
| Río Renegado | -0,28 | 1,82 | 130,49 | 1,62 | -0,27 |
| Río Diguillín en San Lorenzo | 0,10 | 9,03 | 82,52 | 9,56 | 0,11 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Calidad de ajuste del modelo según Nash-Sutcliffe (NS) y Ceff para las estaciones fluviométricas utilizadas como puntos de control de la modelación.

| Estación | NS | Ceff |
|------------------------------|---------------|--------------|
| Río Sauce | Satisfactorio | No aceptable |
| Río Larqui | Satisfactorio | No aceptable |
| Río Cato en Puente Cato | Muy bueno | No aceptable |
| Río Chillán en Esperanza | Satisfactorio | No aceptable |
| Río Itata en Cholguán | Insuficiente | No aceptable |
| Río Renegado | Insuficiente | No aceptable |
| Río Diguillín en San Lorenzo | Insuficiente | No aceptable |

Fuente: Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se evaluó la representatividad y validez de un modelo hidrológico, implementado en la herramienta WEAP, para así desarrollar un futuro modelo operacional del río Itata, utilizando datos accesibles para cualquier usuario, como elevación, zonas climáticas, uso de suelo, geología, consumo humano y datos de precipitación.

Los caudales para la Estación del río Cato en Puente Cato fue el único resultado con indicadores para el coeficiente de Nash-Sutcliffe (0,62) con un ajuste de carácter muy bueno. Sin embargo, para la misma estación, los valores de Ceff indican valores $\leq 0,75$, un ajuste de bondad no aceptable.

Los resultados del presente trabajo permiten concluir que la información y datos disponible, y luego integrados a WEAP, no son suficientes para una modelación representativa de los caudales presentes en la cuenca del río Itata. Por esto, es necesario iniciar estudios de interacción entre agua superficial y subterránea. Además, se recomienda considerar estudios de este nexo, además de acumulación y derretimiento nival. Por otro lado, conocer los caudales desviados para riego podría mejorar la estimación de caudales mediante modelos simulados.

6. REFERENCIAS

- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., and Vis, M. (2020). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 429–446, <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>.
- Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Herrera-R., G. A., Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 2839–2865. doi:10.5194/hess-22-2839-2018
- Assaf, H., van Beek, E., Borden, C., Gijssbers, P., Jolma, A., Kaden, S., Wood, D. M. (2008). Chapter Thirteen Generic Simulation Models for Facilitating Stakeholder Involvement in Water Resources Planning and Management: A Comparison, Evaluation, and Identification of Future Needs. *Developments in Integrated Environmental Assessment*, 229–246. doi:10.1016/s1574-101x(08)00613-3
- Arumí, J.L., Delgado, V., Reicher, O. (2020). Sistemas de vertientes del valle del renegado, su importancia, características y vulnerabilidad, en *Seguridad hídrica: derechos de agua, escasez, impactos y percepciones ciudadanas en tiempos de cambio climático*. Ril Editores.
- Dale, L. L., Karali, N., Millstein, D., Carnall, M., Vicuña, S., Borchers, N., Sohn, M. D. (2015). An integrated assessment of water-energy and climate change in sacramento, california: how strong is the nexus? *Climatic Change*, 132(2), 223–235. doi:10.1007/s10584-015-1370-x
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., Vitart, F., (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- DGA (2017). Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/Estudios/04%20Resumen%20Ejecutivo/Resumen%20Ejecutivo.pdf>
- DGA (2019), Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos, SIT N° 445, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General

de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DICTUC S.A. & SEI.

Gao, J., Christensen, P., & Li, W. (2017). Application of the WEAP model in strategic environmental assessment: Experiences from a case study in an arid/semi-arid area in China. *Journal of Environmental Management*, 198, 363–371. doi:10.1016/j.jenvman.2017.04.068

Leong, W. K., & Lai, S. H. (2017). Application of Water Evaluation and Planning Model for Integrated Water Resources Management: Case Study of Langat River Basin, Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 210, 012024. doi:10.1088/1757-899x/210/1/012024

Mardones, G., (2009), Implementación y uso del Modelo WEAP en cuencas Nivales de la IV región para el Análisis del Cambio Climático. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Oti, J. O., Kabo-bah, A. T., & Ofosu, E. (2020). Hydrologic response to climate change in the Densu River Basin in Ghana. *Heliyon*, 6(8), e04722. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04722

Psomas, A., Panagopoulos, Y., Konsta, D., & Mimikou, M. (2016). Designing Water Efficiency Measures in a Catchment in Greece Using WEAP and SWAT Models. *Procedia Engineering*, 162, 269 - 276. doi:10.1016/j.proeng.2016.11.058

Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2016). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. doi:10.1080/17445647.2016.1259592

Stockholm Environment Institute, (2008). WEAP Water Evaluation And Planning System, Tutorial. <http://www.weap21.org/>

Tosso J. (1985), "Suelos Volcánicos de Chile". Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile.

WEAP-CCG-SEI, Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Desarrollada con contribuciones del PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador), Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) de la Universidad de Cuenca, Ecuador. Disponible en: https://cambioglobal.uc.cl/images/publicacionesextension/9_2009_Guia-para-la-modelacion-con-la-plataforma-WEAP_CCG-SEI.pdf

Zúñiga, R., Muñoz, E., & Arumí, J. L. (2012). Estudio de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. *Obras y Proyectos*. (11), 69–78. doi:10.4067/s0718-28132012000100007