

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA HIDRÁULICA**

**MODELACIÓN OPERACIONAL DEL SISTEMA LAGUNA DEL MAULE, CHILE.**

**EUGENIO FUENTES C.<sup>1</sup>**  
**MARCELO OLIVARES A.<sup>2</sup>**  
**MARIA JULIA WIENER<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

La laguna del Maule es un embalse multipropósito, para riego y generación hidroeléctrica, cuya operación está sujeta al convenio ENDESA-Riego del año 1947. Como parte del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule (DGA, 2020), se utilizó un modelo de simulación hidrológico-operacional desarrollado en la plataforma WEAP, denominado “modelo cordillera”. Dicho modelo tenía varias limitaciones, que resultaron en una pobre representación de la evolución del volumen histórico de la laguna del Maule. Más aún, para el período futuro, se consideró un solo modelo climático (CSIRO) y una proyección muy simplificada de la demanda hidroeléctrica. En el presente trabajo se abordaron estas limitaciones, partiendo por una validación y modificación del modelo cordillera en el período histórico, que consistieron principalmente en una mejor representación del convenio de operación. Posteriormente, para el período futuro (2022-2046) se desacopló el módulo precipitación-escorrentía del modelo y se incorporaron como datos de entrada los caudales afluentes bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 obtenido del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) para 4 modelos climáticos globales. Adicionalmente, se incorporó la demanda hidroeléctrica proyectada obtenida de un modelo de optimización de largo plazo del sistema eléctrico desarrollado en la plataforma AMEBA. En términos operacionales, bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (período futuro 2022-2046) se obtuvo que el volumen de la laguna del Maule se ubica en el colchón intermedio del embalse la mayor parte del tiempo, obteniendo que las entregas no suministran la demanda total proyectada, donde la estacionalidad uso de riego se produce principalmente en verano y las entregas de uso hidroeléctrico en la época de otoño e invierno. El presente trabajo demuestra la importancia de integrar en un modelo operacional de recursos hídricos los resultados de modelos hidrológicos y del modelo de operación del sistema eléctrico, posibilitando futuros análisis del sistema laguna del Maule.

---

<sup>1</sup> Egresado de Magíster, Universidad de Chile - email: efuentes.ing@gmail.com

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email: maroliva@uchile.cl

<sup>3</sup> Profesora Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso - email: julia.wiener@uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos de la cuenca del Maule se utilizan principalmente para el desarrollo agrícola y generación hidroeléctrica. La agricultura en la cuenca del Maule representa cerca del 20% del área agrícola y el 15% de las exportaciones a nivel nacional. La cuenca se caracteriza por un gran potencial de desarrollo agrícola, que incluye principalmente cultivos como cereales, frutales, viñas, hortalizas y leguminosas (INE, 2021). La temporada de riego agrícola se desarrolla principalmente entre los meses de septiembre y mayo, que coinciden con el periodo de menor precipitación.

Por otro lado, el Sistema Eléctrico Nacional cuenta con una capacidad instalada de 30.190 MW (Energía Abierta, 2022). El 22% de la capacidad instalada corresponde a generación de energía hidroeléctrica (de embalse y pasada), equivalente a 6.655 MW (Energía Abierta, 2022). En la cuenca del Maule, la potencia instalada hidroeléctrica es de 1.680 MW (DGA, 2020), que corresponde al 25% de la capacidad instalada de generación de energía hidroeléctrica del Sistema Eléctrico Nacional, siendo de gran importancia para la producción de energía a nivel nacional.

La subcuenca definida por la estación fluviométrica Río Maule en Armerillo, es un sector donde se concentra gran parte de la generación hidroeléctrica y existe una potencial interferencia operacional con el sistema de riego, principalmente por el uso compartido de los recursos hídricos de la laguna Maule, cuya operación está regulada por el convenio ENDESA-Riego del año 1947. El convenio Endesa Riego (1947), define las condiciones de uso de agua en tres niveles del embalse denominados: colchón superior, colchón intermedio y colchón inferior. A pesar de la existencia de este convenio, se observan interferencias operacionales debido a la estacionalidad de ambos usos (riego e hidroelectricidad) particularmente desde el año 2011 cuando el embalse comenzó a experimentar los efectos de escasez de agua asociada a la megasequía, descendiendo el volumen de agua de la laguna del Maule desde el colchón superior al colchón intermedio en aproximadamente 500 Hm<sup>3</sup>.

El presente estudio se desarrolló a partir del denominado “modelo cordillera” elaborado en la plataforma WEAP, disponible públicamente en la DGA, como parte de Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule (DGA, 2020). La simulación del modelo se desarrolló en escala temporal semanal. Se realizó el análisis y validación operacional del modelo, principalmente para mejorar la representación del volumen histórico de la Laguna del Maule. Estas mejoras al modelo WEAP original dieron lugar al denominado modelo WEAP Modificado, donde posteriormente se desacopló el módulo precipitación-escorrentía y se incorporó como datos de entrada los caudales afluentes a la cuenca asociados a los distintos modelos climáticos globales del proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). Adicionalmente, en el módulo operacional se ingresó la demanda hidroeléctrica proyectada obtenida de un modelo de optimización en AMEBA, una plataforma desarrollada por la consultora SPEC Energy Consulting, en un horizonte de 25 años de simulación (periodo 2022-2046). A través de estas mejoras al modelo, este trabajo contribuye al análisis de la interferencia operacional del uso de agua entre la generación hidroeléctrica y el riego en la cuenca alta del río Maule.

## 2. ZONA DE ESTUDIO

### 2.1. Descripción Física

El área de estudio (ver figura 1) corresponde a la subcuenca aportante a la estación fluviométrica río Maule en Armerillo (cuenca andina ubicada en la zona central de Chile) que abarca una superficie aproximada de 5469 km<sup>2</sup>. El régimen de esta cuenca es nivo-pluvial, registrando una precipitación media anual de 1600 mm. La temperatura media anual registrada es del orden 7,6°C (base de datos CR2MET, año 2020, versión 2.0). El río Maule es el principal curso de agua de la cuenca con una extensión aproximada de 240 km, que nace a partir de la laguna del Maule y desemboca en las costas marítimas de la ciudad de Constitución. Los principales afluentes del río Maule en la zona de estudio corresponden a los ríos: Puelche, Cipreses, Claro y Melado. El área de estudio incluye 3 embalses: laguna del Maule (uso multipropósito, capacidad 1420 Hm<sup>3</sup>), laguna Invernada (uso hidroeléctrico, capacidad 174 Hm<sup>3</sup>) y el embalse Melado (uso hidroeléctrico, capacidad 133 Hm<sup>3</sup>).

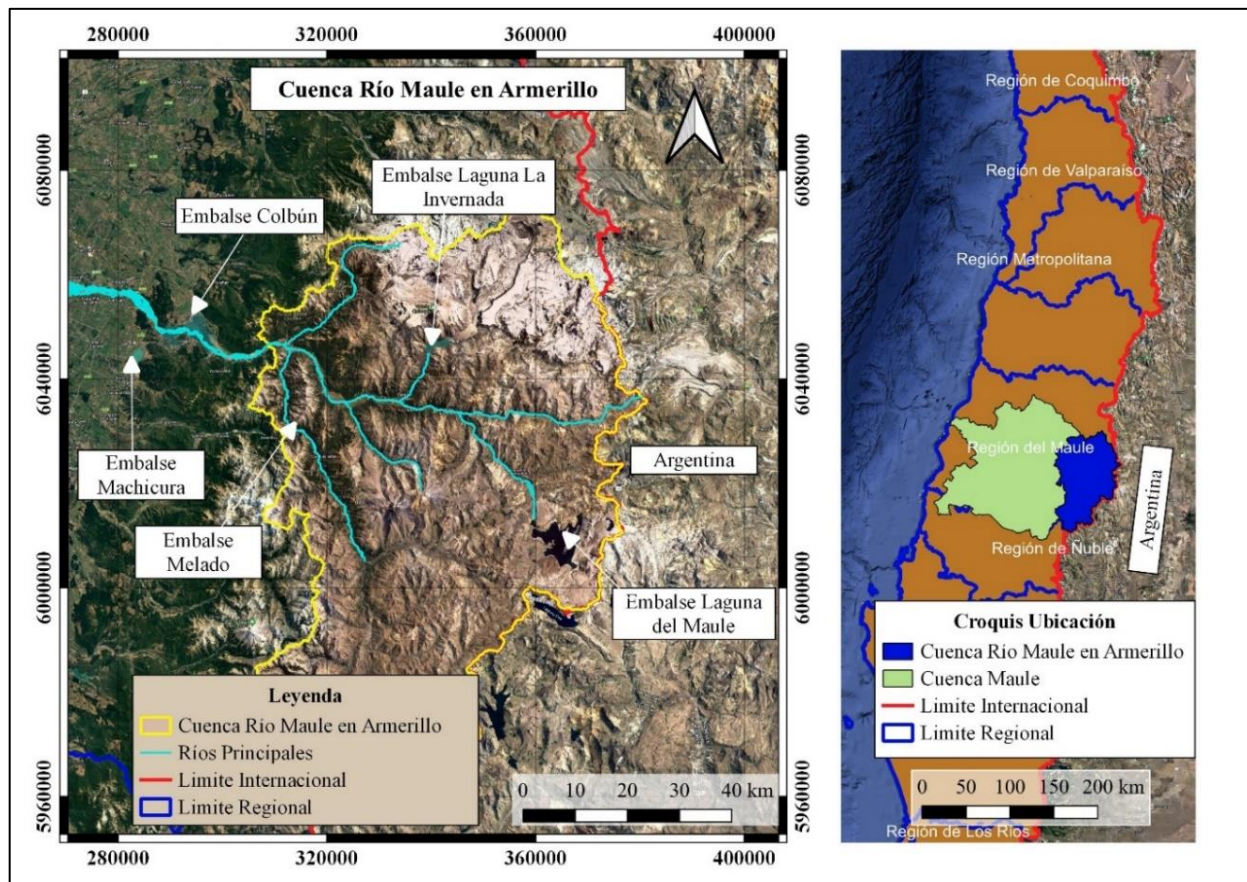


Figura 1. Ubicación cuenca río Maule en Armerillo. Fuente: Elaboración Propia

### 2.2. Descripción Operacional

La cuenca del río Maule en Armerillo es una cuenca intervenida por el sistema de riego e hidroelectricidad, produciéndose potenciales interferencias operacionales por el uso compartido de los recursos hídricos, principalmente de la laguna del Maule. El uso del agua en la cuenca es

regulado por los derechos de agua y por el Convenio Endesa-Riego del año 1947, que establece las entregas de la laguna del Maule para riego e hidroelectricidad. La disponibilidad de los recursos hídricos de la cuenca río Maule se realiza en el sector de Armerillo, para poder satisfacer la demanda del Sistema Riego Maule compuesto por canales de riego asociados a la cuenca en estudio (Figura 2) y canales de riego que se encuentran aguas abajo del cierre de la cuenca. Los principales usuarios de la cuenca del río Maule en Armerillo la componen el sector hidroeléctrico (Colbún S.A., ENEL) y el sistema de riego. En la figura 2, se muestra diagrama unifilar de la zona de estudio.

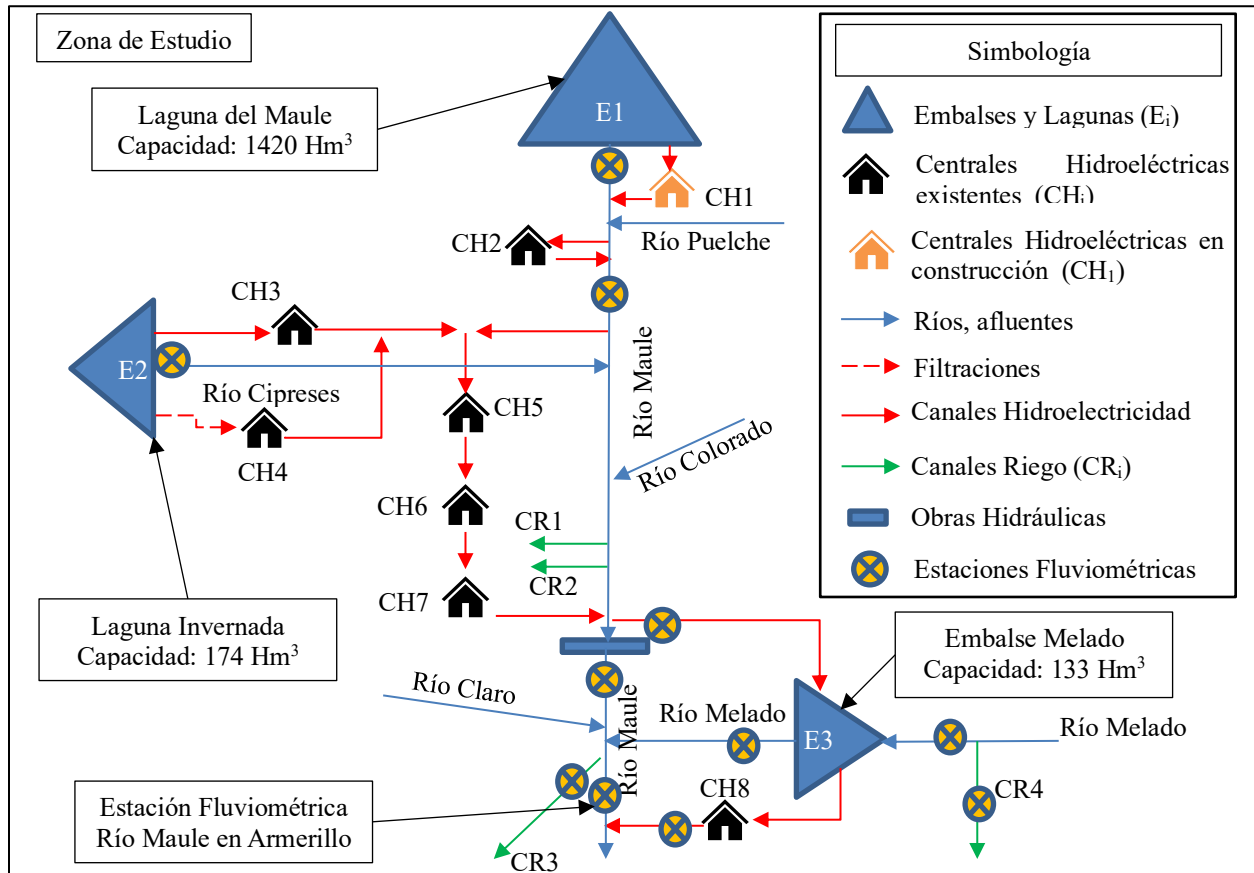


Figura 2. Esquema Operacional cuenca río Maule en Armerillo.

En la Tabla 1, 2 y 3, se describen los embalses, centrales hidroeléctricas y canales de riego asociados al esquema operacional de la cuenca río Maule en Armerillo de la figura 2.

Tabla 1 Embalses cuenca río Maule en Armerillo

Sigla	Embalses y lagunas	Volumen Máximo (Hm <sup>3</sup> )	Uso
E1	Laguna del Maule	1420	Riego/Hidroelectricidad
E2	Laguna La Invernada	174	Hidroelectricidad
E3	Embalse Melado	133	Hidroelectricidad

Tabla 2 Principales Canales de Riego Cuenca Río Maule en Armerillo

Sigla	Canales
CR1	Las Garzas
CR2	Las Suizas
CR3	Maule Norte Alto
CR4	Melado Los Hierros

Tabla 3 Centrales Hidroeléctricas Cuenca Maule en Armerillo

Sigla	Central	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Potencia (MWh)	Empresa	Puesta en Servicio
CH1	Los Cóndores	25	150	ENEL	En Construcción
CH2	La Mina	60	34	Colbún S.A.	2017
CH3	Cipreses	36	106	ENEL	1955
CH4	Ojos de Agua	13	9	ENEL	2008
CH5	Isla	84	70	ENEL	1963
CH6	Curillinque	84	40	ENEL	1993
CH7	Loma Alta	84	89	ENEL	1997
CH8	Pehuenche	300	570	ENEL	1991

Sobre la regulación del río Maule entre el Departamento de Riego de la Dirección General de Obras Públicas y la Empresa Nacional de Electricidad S.A. (1947), se desarrolló el convenio Endesa Riego con el objetivo de obtener un mejor aprovechamiento de las aguas del río Maule, integrando el uso de los recursos hídricos de la laguna del Maule, de acuerdo con los requerimientos y necesidades del sistema de riego e hidroelectricidad. La obra del embalse Laguna del Maule fue construida en virtud de un acuerdo entre la mayoría de los regantes y el Fisco, lo cual estaría plasmado en un Convenio del año 1945 y a las disposiciones de la Ley 4.445 de 1928. Luego, se incorporó a la ENDESA de modo de ampliar la capacidad de regulación y para que las aguas embalsadas fueran también utilizadas para generación eléctrica, lo cual estaría plasmado en el Convenio de 1947. En la figura 3, se presenta resumen de los aspectos principales del convenio Endesa-Riego del año 1947, donde el volumen total de la laguna Maule se subdivide en tres colchones: superior, intermedio e inferior.

1420 Hm <sup>3</sup>	Volumen	Riego	Hidroelectricidad*
630 Hm <sup>3</sup>	V= 790 Hm <sup>3</sup> Colchón Superior	-Uso Déficit de Riego. -Volumen máximo temporada riego 800 Hm <sup>3</sup> .	-Uso déficit de riego (sin indemnización). -Volumen adicional = 250 Hm <sup>3</sup> . -Economías de Agua laguna Invernada -Volumen compensación máximo 350 Hm <sup>3</sup> .
170 Hm <sup>3</sup>	V= 460 Hm <sup>3</sup> Colchón Intermedio	Uso déficit de riego hasta un volumen máximo para la temporada de riego del 80 % de la reserva ordinaria más el 80% de los afluentes.	-Uso déficit de riego. -Cuota adicional uso hidroeléctrico con un volumen máximo de generación del 20% de la reserva ordinaria más el 20% de los afluentes.
0 Hm <sup>3</sup>	V= 170 Hm <sup>3</sup> Colchón Inferior	Uso común acuerdo entre Endesa y DOH.	Uso común acuerdo entre Endesa y DOH.
			*: - Caudal medio mensual = 25 m <sup>3</sup> /s. - Caudal medio diario = 30 m <sup>3</sup> /s.

Figura 3. Resumen Convenio Endesa Riego, 1947.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. Modificación Modelo WEAP Original

Para el desarrollo de estudio se utilizó como base el “modelo cordillera”, desarrollado como parte de Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule (DGA, 2020), denominado en este estudio modelo WEAP original. En primer lugar, se realizaron cambios que apuntaban a mejorar la representación del volumen de la laguna en el período histórico, incluyendo: i) La modificación de la formulación del caudal reconstituido en Armerillo, que representa el caudal disponible para abastecer la demanda del sistema de riego en la zona de estudio, reemplazando la función incorporada en el modelo WEAP original del oficio DGA N°601/2008 (vigente por un periodo de 5 años) por la función del oficio DGA N°681/2013, que se encuentra vigente hasta la actualidad. ii) Modificación en la topología de entregas de la laguna del Maule por la integración de la central hidroeléctrica Los Cóndores y modificación en la topología de entregas de la laguna Invernada. iii) Modificaciones en las prioridades de demanda.

En la figura 4, se muestra el efecto combinado de las modificaciones descritas en el párrafo anterior sobre la representación del volumen de la Laguna del Maule durante el período histórico. La línea de color verde corresponde a la simulación del modelo WEAP modificado, línea de color azul solo modificando el caudal reconstituido en Armerillo, línea de color rojo simulación del modelo WEAP original y la línea de color negro evolución del volumen histórico (observado) de la laguna Maule.

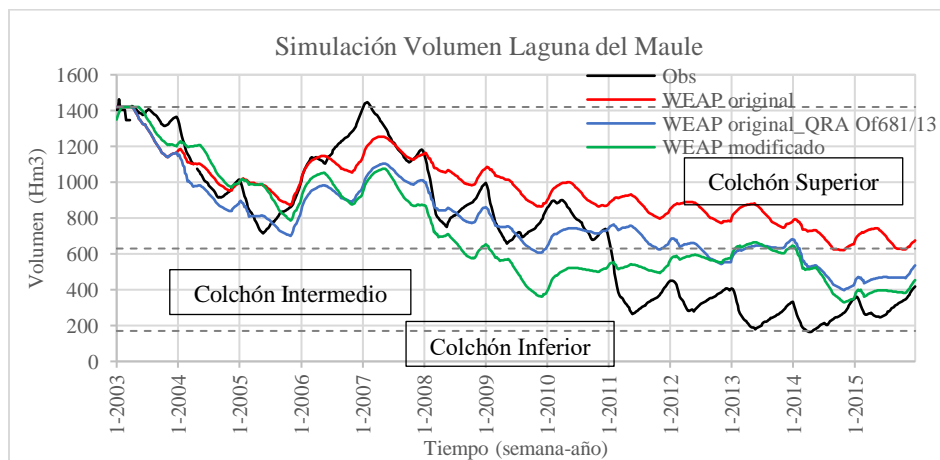


Figura 4. Simulación volumen histórico laguna del Maule (series semanales).

Realizadas las mejoras al modelo WEAP original en el periodo histórico, para el modelo WEAP modificado escenario futuro (2022-2046) se realizaron las siguientes modificaciones. En primer lugar, se desacopló el módulo precipitación-escorrentía del modelo WEAP modificado reemplazando los nodos *catchment* por nodos de ríos, donde se incorporó como datos de entrada los caudales afluentes del escenario de cambio climático RCP8.5 obtenido del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). En segundo lugar, en el módulo operacional se incorporó como serie de tiempo la demanda hidroeléctrica proyectada obtenida de un modelo de optimización de largo plazo del sistema eléctrico desarrollado en la plataforma AMEBA por la empresa SPEC Energy Consulting. En la figura 5, se muestra la topología del modelo WEAP modificado de la cuenca río Maule en Armerillo, que incorpora las mejoras realizadas en el presente capítulo.

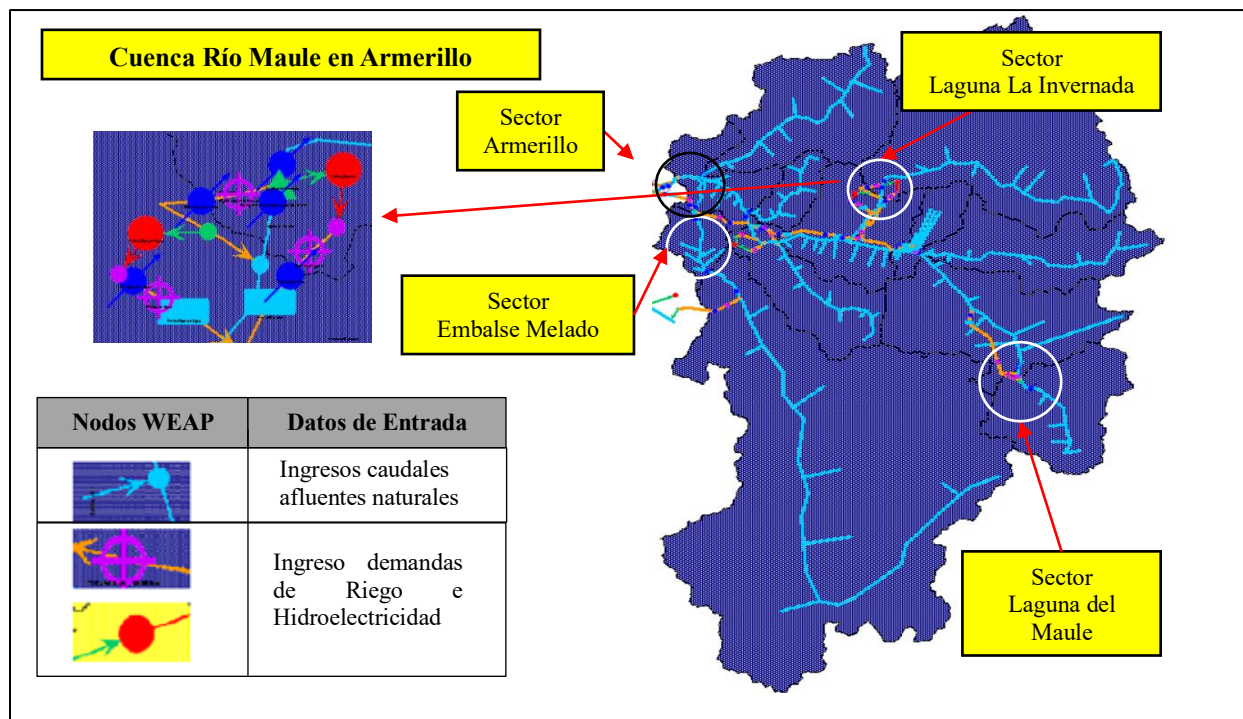


Figura 5. Topología Modelo WEAP Modificado.

### 3.2. Escenarios Hidrológicos

El estudio del proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) consideró el escenario de cambio climático RCP8.5, que busca establecer un límite superior en los efectos de cambio climático (DGA, 2018), considerando el aumento de la forzante radiativa a  $8,5 \text{ W/m}^2$  para el año 2100. En el proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional, se calibró el modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) usando el producto grillado CR2Met, como base para la obtención de las forzantes meteorológicas a una resolución de  $0,05 \times 0,05$  grados (latitud, longitud). Para el escenario de cambio climático RCP8.5 se utilizó cuatro modelos de circulación global (GCM) aplicando en las series meteorológicas el método de escalamiento estadístico Quantile Delta Mapping (Cannon, 2016). Las series meteorológicas escaladas se ingresaron como datos de entrada en el modelo VIC calibrado para estudiar el efecto del cambio climático en las diferentes cuencas de Chile (DGA, 2018), dando lugar a escenarios hidrológicos.

Mediante un código generado en Python, se obtuvieron los caudales afluentes futuros al intersectar los polígonos de las bandas de elevación de la cuenca río Maule en Armerillo con el producto grillado del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). Para la ejecución del código se requirió como datos de entrada polígonos en formato shapes (.shp) de las 83 bandas de elevación definidas en el modelo cordillera, requiriendo la asignación de un código identificador y atributos de área en  $\text{km}^2$ . Los atributos generados para cada banda de elevación se realizaron mediante la herramienta computacional QGIS, software de libre acceso para sistemas de información geográfica.

### 3.3. Demanda Hidroeléctrica Proyectada

La operación de embalses para generación hidroeléctrica está determinada por el Coordinador Eléctrico Nacional, que utiliza un modelo de programación de largo plazo (PLP) para satisfacer la demanda eléctrica a mínimo costo, y cuyos resultados alimentan a los modelos de programación diaria o semanal (Matus et al., 2014). El modelo PLP considera el convenio ENDESA-Riego laguna del Maule (año 1947), que define las condiciones de uso de agua en los tres colchones del embalse.

Para efectos del presente estudio, se considera que la demanda de agua para hidroelectricidad está dada por los resultados de la programación de largo plazo. Así, la proyección de la demanda hidroeléctrica en la cuenca río Maule en Armerillo bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (modelos climáticos CSIRO, CCSM4, IPSL y MIROC) se obtuvo del PLP implementado en la plataforma AMEBA en un horizonte de 25 años de simulación (periodo 2022-2046). La demanda hidroeléctrica obtenida en AMEBA se ingresó como una serie de tiempo en un nodo de demanda en el modelo WEAP modificado. La principal limitación para el desarrollo de este estudio es que se utilizaron distintas fuentes de información para el desarrollo de simulaciones en el modelo WEAP modificado y en el modelo de optimización desarrollado en AMEBA. En el modelo WEAP modificado se utilizó como datos de entrada los caudales afluentes de escenarios de cambio climático RCP8.5 del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). En cambio, en el modelo de optimización en AMEBA se utilizó como datos de entrada los caudales afluentes de escenarios de cambio climático de la Comisión Nacional de Energía (CNE) en cada central de Chile, que requiere la integración de todo el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para el desarrollo del modelo de optimización, como se resume en la figura 6.

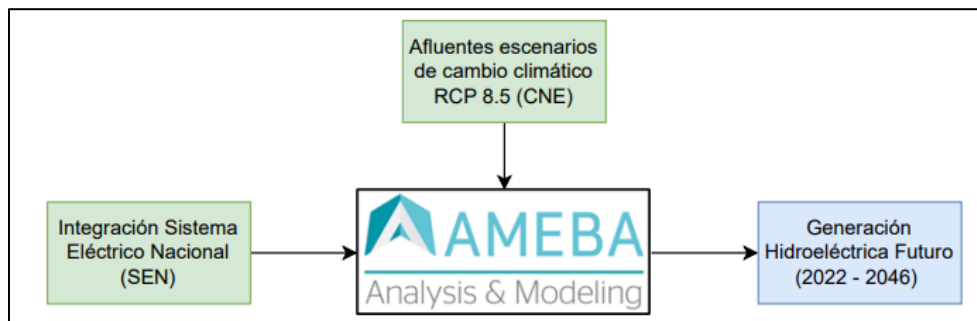


Figura 6. Modelación Hidroeléctrica en AMEBA.

A pesar de las discrepancias entre las fuentes de información, se utilizó como datos de entrada en el modelo WEAP modificado los caudales afluentes proyectados del Balance Hídrico Nacional que corresponde a la información oficial del estudio de cuencas en Chile desarrollado para la Dirección General de Aguas, y la incorporación de la demanda hidroeléctrica proyectada obtenida del modelo de Sistema de Energías que replica el proceso del coordinador del sistema para distintos escenarios hidrológicos.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. Demanda Hidroeléctrica Proyectada

En la figura 7, se muestra la demanda hidroeléctrica proyectada para la Central Cipreses abastecida desde la laguna Invernada (figura 7.a) y para la central Pehuenche, que se alimenta de las entregas del embalse Melado (figura 7.b). La línea de color rojo corresponde a la demanda hidroeléctrica del modelo WEAP original, y la línea de color negro a la demanda hidroeléctrica obtenida del modelo de optimización (AMEBA), periodos 2022-2046, para el modelo climático CSIRO.

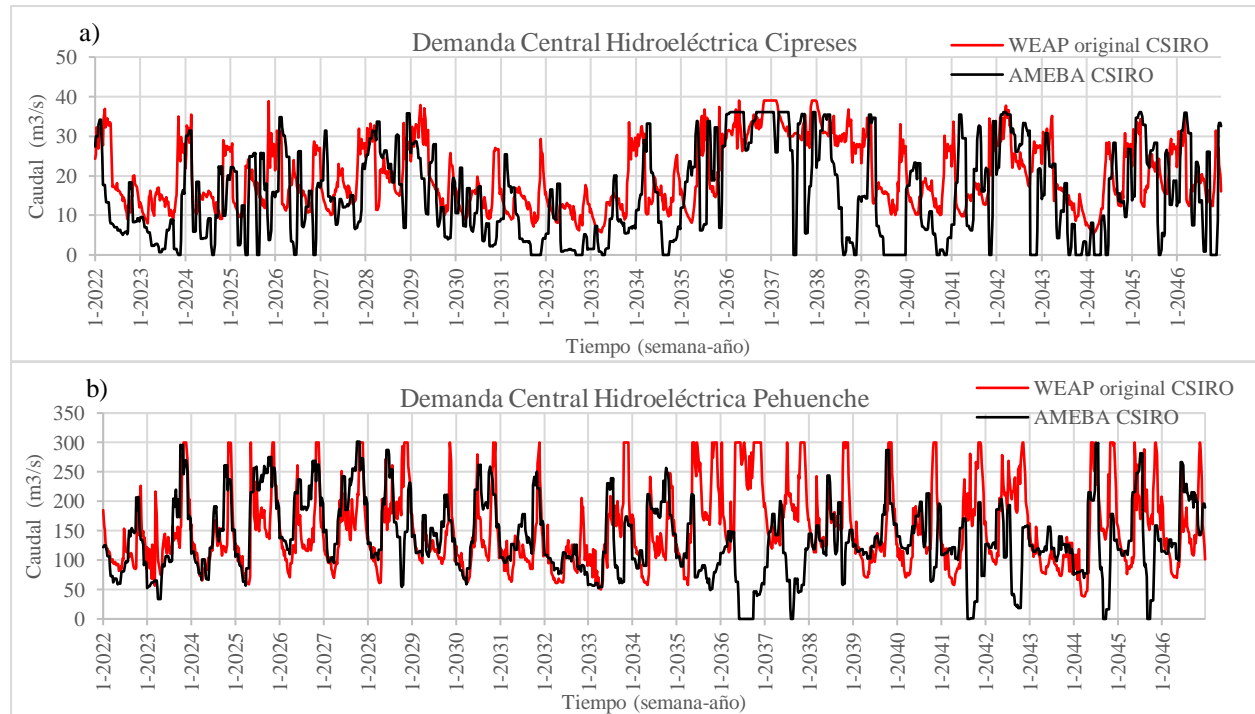


Figura 7. Demanda eléctrica escenario futuro, modelo climático CSIRO, periodo 2022-2046 (series semanales): a) Central Hidroeléctrica Cipreses, b) Central Hidroeléctrica Pehuenche.

De la figura 7, se aprecian diferencias significativas entre las demandas utilizadas en el modelo WEAP original y aquellas obtenidas del modelo de optimización del sistema eléctrico. En gran parte del periodo de simulación la demanda del modelo WEAP original es mayor a la demanda proyectada en AMEBA. Es importante mencionar que la demanda eléctrica del modelo WEAP original (periodo futuro) se obtuvo mediante reglas matemáticas endógenas. En cambio, el modelo de optimización (AMEBA) optimiza la operación de todo el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), con el objetivo de satisfacer la demanda eléctrica al mínimo costo. Por ello, en el presente trabajo se utilizó esta última fuente para mejorar la representación de la demanda proyectada para las simulaciones realizadas bajo los modelos climáticos CSIRO, CCSM4, IPSL y MIROC. Esta proyección de demanda se considera un resultado intermedio, que se utiliza como variable de entrada en el modelo WEAP.

## 4.2. Volumen Laguna del Maule

En el modelo WEAP modificado se incorporó la central Los Cóndores, que se encuentra en fase de construcción, bajo el supuesto que esta entrará en operación en el año 2024. La demanda hidroeléctrica central Los Cóndores se obtuvo del modelo en AMEBA, y se ingresó como nodo de demanda en el modelo WEAP modificado bajo las restricciones de las reglas de operación del convenio ENDESA - Riego del año 1947.

La figura 8.a corresponde al volumen semanal simulado de la Laguna del Maule y la figura 8.b corresponde a la curva de duración del volumen simulado de la Laguna del Maule, bajo el escenario de cambio climático RCP8.5, para un periodo de análisis de 25 años (periodo 2022-2046). Las simulaciones se realizaron con resolución semanal, donde la línea de color negro corresponde al volumen observado desde el año 2011 hasta el año 2021, las líneas de color azul, rojo, verde y morado corresponden a los resultados obtenidos del modelo WEAP modificado (periodo 2022-2046). Se consideró como condición inicial el volumen observado de los embalses para la simulación del modelo WEAP modificado en el periodo 2022-2046.

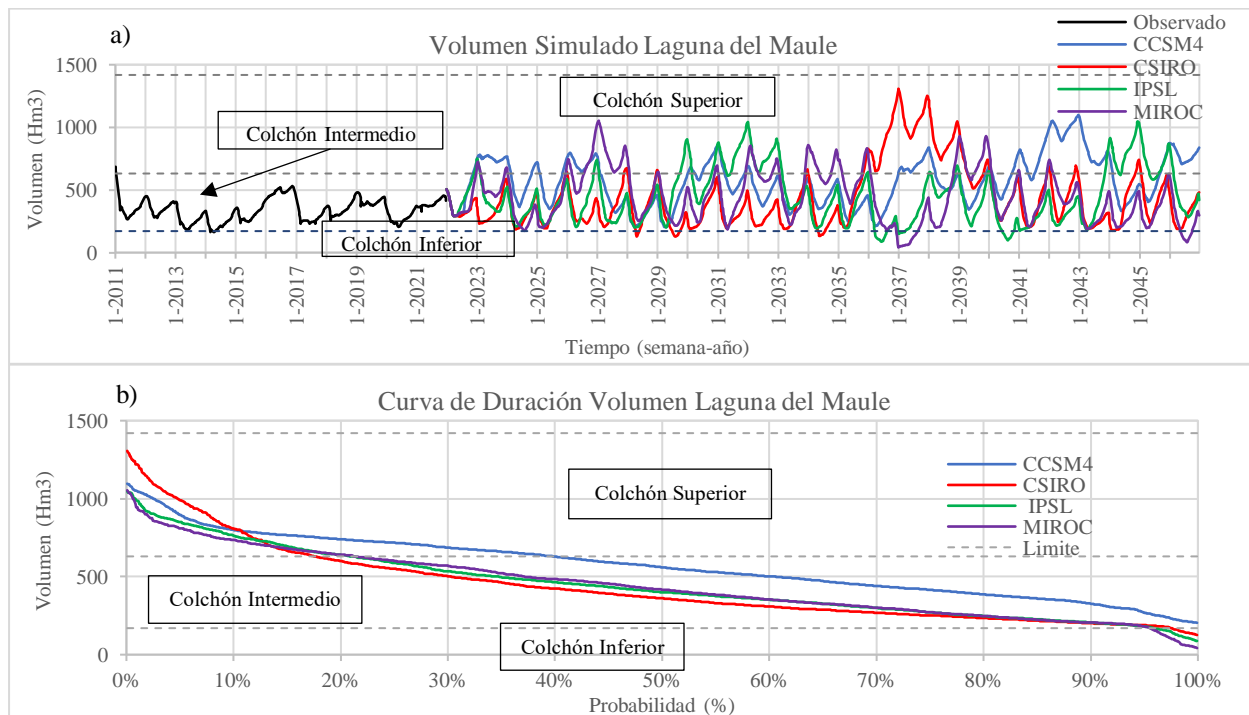


Figura 8. Simulación Modelo WEAP Modificado Laguna del Maule volumen simulado y observado, escenario de cambio climático RCP8.5: a) Series semanales, b) Curva de duración.

De la Figura 8, se puede apreciar que durante el período histórico, el volumen observado de la laguna Maule se encuentra principalmente en el colchón intermedio. Para las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado, el volumen de la laguna Maule opera principalmente en el colchón intermedio (periodo 2022-2046), encontrándose en algunos periodos en el límite del colchón intermedio y colchón inferior o inclusive pasando desde el colchón intermedio al colchón inferior. En el escenario CCSM4, la probabilidad de que el volumen de la laguna se encuentre en el colchón superior es de un 40% y en el colchón intermedio es de un 60%, siendo en promedio

mayor el volumen simulado que las simulaciones realizadas con los modelos climáticos CSIRO, IPSL y MIROC. Para los escenarios CSIRO, IPSL y MIROC, la probabilidad de que el volumen de la laguna se encuentre al menos en el colchón intermedio es de un 95% y en el colchón inferior es de un 5%.

### 4.3. Entregas Laguna del Maule

En esta sección se presentan los resultados entregas para riego e hidroelectricidad laguna del Maule, regulada por el convenio ENDESA-Riego del año 1947, bajo el escenario de cambio climático RCP8.5. La figura 9.a muestra las entregas semanales para riego desde la laguna del Maule durante periodo de análisis 2022-2046 y la figura 9.b presenta resultados ciclo semanal representado por las entregas promedio para cada semana del año.

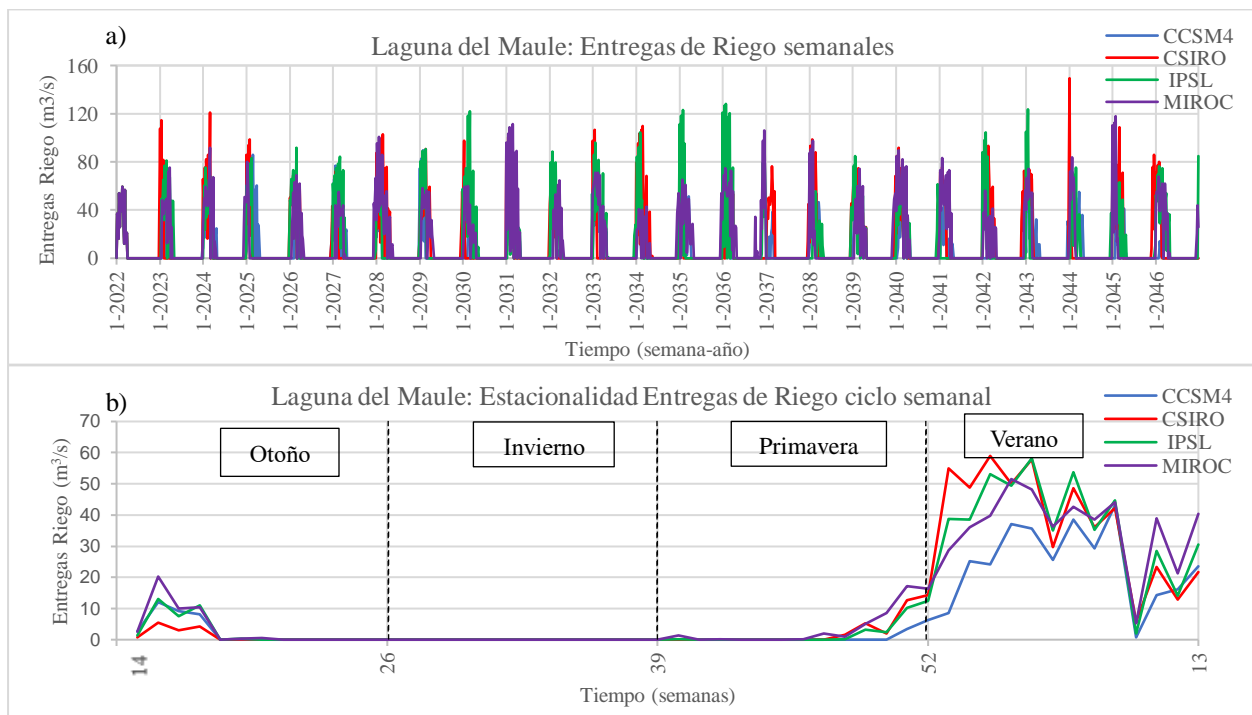


Figura 9. Entregas para Riego Laguna del Maule modelo WEAP modificado (periodo 2022-2046): a) Series semanales, b) Ciclo semanal.

De la Figura 9, se aprecia que bajo los escenarios hidrológicos de cambio climático, las entregas para riego de la laguna Maule siguen la estacionalidad de la demanda de riego, concentrada principalmente en la época de verano. Bajo el escenario correspondiente al modelo CCSM4 se producen menores entregas de riego en comparación a los escenarios CSIRO, IPSL y MIROC.

Las entregas para generación hidroeléctrica obtenidas con el modelo WEAP modificado se muestran en las figuras 10.a y 10.b que corresponden a la serie de entregas en el periodo 2022-2046 y a entregas ciclo semanales, respectivamente.

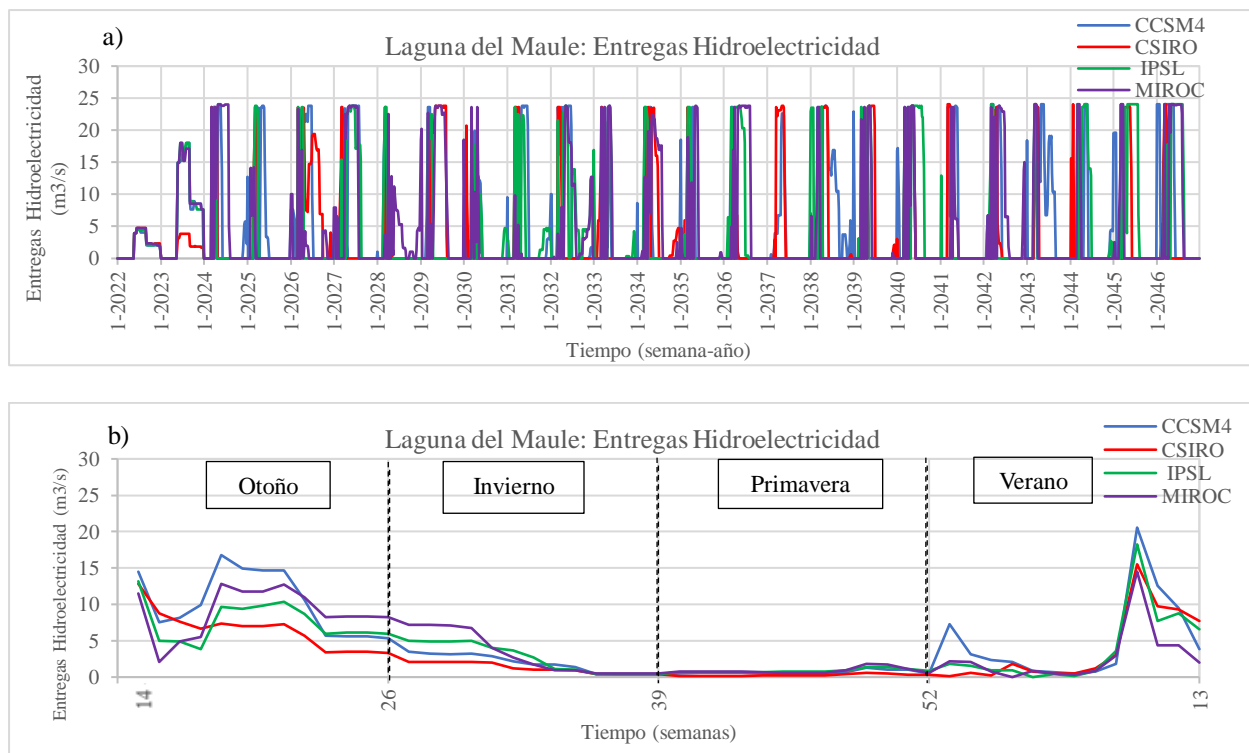


Figura 10. Entregas Hidroelectricidad laguna Maule modelo WEAP modificado (periodo 2022-2046): a) Series semanales, b) Series ciclo semanales.

De la figura 10, se puede apreciar que la estacionalidad de uso hidroeléctrico ocurre principalmente en la época de otoño e invierno y parte de verano con un caudal menor a la capacidad máxima de 25 m<sup>3</sup>/s de la central hidroeléctrica Los Cóndores.

A partir de las entregas de riego e hidroelectricidad laguna Maule, se obtuvo como desempeño la confiabilidad (Hashimoto et al., 1982) que es uno de los criterios más antiguos y utilizados en el análisis de sistema de recursos hídricos para satisfacer la demanda. Para el riego se consideró como etapa de desempeño el año calendario, obteniendo una confiabilidad (probabilidad de no falla) del 62% para un umbral del 85% de la demanda de riego anual, y para la hidroelectricidad se obtuvo una confiabilidad del 75% para un umbral del 85% de la demanda mensual de hidroelectricidad (confiabilidad promedio de los cuatro modelos climáticos).

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describieron las modificaciones y extensiones efectuadas a un modelo de simulación operacional de la cuenca alta del río Maule, desarrollado en la plataforma WEAP como parte del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca. El modelo WEAP modificado permite explorar cuatro escenarios hidrológicos proyectados para el análisis futuro de la cuenca, mediante el ingreso de caudales afluentes obtenidos del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) y de la demanda eléctrica proyectada bajo distintos modelos de cambio climático a través de la plataforma AMEBA ([www.ameba.cloud](http://www.ameba.cloud)). El modelo permite a los tomadores de decisión analizar y evaluar el impacto de los posibles escenarios futuros, mediante la formulación de políticas y esquemas operacionales para un uso más eficiente de los recursos en periodos de escasez hídrica.

Por otra parte, las proyecciones de demanda hidroeléctrica en la cuenca obtenidas a partir de la modelación de todo el Sistema Eléctrico Nacional, replicando el proceso del coordinador del sistema para los correspondientes escenarios hidrológicos asociados a distintos modelos climáticos, permite establecer metas de entrega de los embalses para uso hidroeléctrico más robustas y replicables que aquellas utilizadas en el modelo WEAP original mediante reglas matemáticas.

Los resultados del modelo WEAP modificado bajo el escenario de cambio climático RCP8.5, modelos climáticos CCSM4, CSIRO, IPSL, MIROC, muestran que el volumen del embalse se ubicó la mayor parte del tiempo en el colchón intermedio de la laguna, siendo la evolución del estado de la Laguna del Maule muy sensible a los modelos aplicados. Además, las entregas del embalse no suministran la demanda total proyectada, obteniendo como desempeño la confiabilidad. Para el riego se obtuvo una confiabilidad del 62% para un umbral de demanda de riego anual del 85%, y para la hidroelectricidad se obtuvo una confiabilidad del 75% para un umbral de demanda mensual de hidroelectricidad del 85% (confiabilidad promedio de los cuatros modelos climáticos).

Para finalizar, se recomienda utilizar la herramienta para explorar modificaciones al convenio y adecuarla a las nuevas condiciones climáticas y futura para poder reducir la interferencia operacional entre el uso de riego e hidroelectricidad de la Laguna del Maule, dada la escasez de recursos hídricos en el periodo histórico y en los posibles escenarios de cambio climático.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa SPEC Energy Consulting por las proyecciones de demanda hidroeléctrica obtenidas de la plataforma AMEBA. Se agradece a la Dirección General de Aguas por facilitar la información del modelo cordillera del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule. Este estudio fue financiado parcialmente por el proyecto NSFC190025 del Programa de Cooperación Internacional de la Agencia Nacional de Investigación (ANID).

## REFERENCIAS

Cannon, A. J. (2016). Multivariate bias correction of climate model output: Matching marginal distributions and intervariable dependence structure. *Journal of Climate*, 29(19), 7045–7064. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0679.1>

Center for Climate and Resilience Research (CR2). Base de datos. Productos grillados. Web: <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>.

Convenio ENDESA-Dirección de Riego del M.O.P. (1947). Uso compartido de los Recursos del Embalse Laguna del Maule.

Dirección General de Aguas (DGA), 2018. Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en la Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435.

Dirección General de Aguas (DGA), 2020. Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Maule. UTP EVERIS CHILE S.A.-HIDROGESTIÓN.

Energía Abierta, 2022. Capacidad Instalada. Disponible públicamente en: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>

Fuentes, E. (2023). Modelación para el Análisis de la Interferencia Operacional entre Hidroelectricidad y Riego en la cuenca del Maule, Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation. WATER RESOURCES RESEARCH, 18(1), 14–20

Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2021. Censo Agropecuario. Web: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>

Matus, M., Pereira, E., Puschel, S., & Ayaviri, J. (2014). Mejoras software de programación de Largo Plazo - Convenios de Riego y Gestión de Embalses. Centro de Energía. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.