



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Civil

Estudio operacional de embalses planificados para el Plan  
Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Maule  
Memoria para optar al título de Ingeniero Civil

DIEGO ANDRÉS MOENS de HASE MARTY

PROFESOR GUÍA:

MARCELO OLIVARES ALVEAL

PROFESOR CO-GUÍA:

DIEGO NIKLITSCHK FLORES

COMISIÓN:

XIMENA VARGAS MESA

SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL, MENCIÓN  
HIDRÁULICA SANITARIA AMBIENTAL

POR: DIEGO ANDRÉS MOENS de HASE MARTY

PROF. GUÍA: MARCELO OLIVARES ALVEAL

PROF. CO-GUÍA: DIEGO NIKLITSCHK FLORES

FECHA: 2023

## **ESTUDIO OPERACIONAL DE EMBALSES PLANIFICADOS PARA EL PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL MAULE**

Los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) son instrumentos de planificación cuyo propósito es orientar las decisiones público-privadas para enfrentar los efectos de la escasez hídrica en la cuenca de estudio. Particularmente, el PEGH de la cuenca del río Maule propone una alternativa de gestión que consiste en el desarrollo de infraestructura de regulación del recurso superficial. Esta alternativa se evalúa a partir de un modelo computacional acoplado hidrológico-operacional/superficial-subterráneo (WEAP/Modflow). La idea es tener una base más confiable frente a la toma de decisión. Así, en este trabajo de título se realiza un estudio operacional de cuatro de los embalses planificados en el PEGH: Embalse Lavadero, Embalse Achibueno, Embalse Longaví y Embalse Huedque.

Mediante el estudio del modelo computacional, la topología del sistema, la oferta y demanda, se realiza un análisis de disponibilidad hídrica para cada embalse. Luego, se presentan métodos de operación de embalses, relacionados con la oferta y demanda hídrica presente en el territorio. Finalmente, se presenta un análisis de sensibilidad a partir de un cambio en las variables climáticas ingresadas previamente al modelo. Así, con la ayuda del modelo computacional y la representación de sus resultados en diferentes indicadores, se determina el método de simulación adecuado, la óptima regla de operación a utilizar y el desempeño de cada embalse.

De manera general, los resultados muestran que cada embalse deberá seguir una regla de operación estándar, cuya modelación se debe hacer endógenamente al modelo para asegurar una adaptación a cambios en las variables climáticas. Además, presentan efectos positivos en el territorio, dando cuenta de un aumento en la confiabilidad mensual y seguridad de riego anual para cada zona beneficiada. No obstante, un aumento en la confiabilidad mensual no asegura un aumento en la seguridad de riego anual.

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a todxs quienes fueron parte de mi proceso universitario: familia, amigos, amigas, docentes y funcionarixs.

Sobre todo, a la montaña, rocas y glaciares, por siempre apoyarme en los momentos que más se necesitan y por ser una de nuestras principales fuentes de almacenamiento hídrico. Te cuido, Te agradezco, Te respeto.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivos de la memoria</b>	<b>3</b>
1.1.1. Objetivo general	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Indicadores para la toma de decisión</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Reglas de operación de embalses</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Descripción general de la zona de estudio</b>	<b>12</b>
2.3.1. Demanda agrícola	13
<b>2.4. Aspectos relevantes del plan</b>	<b>16</b>
2.4.1. Indicadores utilizados en el PEGH	16
<b>2.5. Modelo de simulación</b>	<b>18</b>
2.5.1. Mejoras propuestas al modelo existente	19
<b>3. MODELACIÓN DE EMBALSES PLANIFICADOS</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Formulación de la modelación</b>	<b>23</b>
3.1.1. Topología del sistema	23
3.1.2. Estudio de la demanda	23
3.1.3. Caudal ecológico	24
3.1.4. Análisis de disponibilidad	25
3.1.5. Incorporación en el modelo	26
<b>3.2. Análisis de los resultados</b>	<b>30</b>
3.2.1. Indicadores de WEAP	30
3.2.2. Cálculo de la seguridad de riego	30
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>32</b>
<b>4.1. Embalse Lavadero</b>	<b>32</b>
<b>4.2. Embalse Achibueno</b>	<b>41</b>
<b>4.3. Embalse Longaví</b>	<b>50</b>
<b>4.4. Embalse Huedque</b>	<b>60</b>
<b>4.5. Análisis de sensibilidad</b>	<b>69</b>
<b>5. DISCUSIONES</b>	<b>74</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>82</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>84</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El manejo del recurso hídrico (MRH) ha sido una actividad fundamental para la subsistencia de los ecosistemas a lo largo de la historia. El hombre siempre ha buscado beneficiarse eficientemente del recurso, creando redes de distribución, infraestructuras de almacenamiento y una gobernanza activa que permita el buen manejo de este. Son diversos los autores que evidencian la importancia de esta disciplina, no solo para asegurar el bienestar de las personas, sino que también el de los gobiernos y ecosistemas. Loucks D.P (1981), propone que el MRH es el estudio del recurso hídrico utilizando representaciones matemáticas de los componentes y sus interacciones para mejorar el entendimiento o asistir la toma de decisiones. Brown et al (2015), hacen énfasis en las diversas dificultades que presenta el MRH, tales como el crecimiento poblacional, la competencia entre usuarios, la degradación ecosistémica y el cambio climático. Esto hace del MRH una disciplina que debe adaptarse constantemente a su entorno, ya que, de no hacerlo o hacerlo deficientemente, pueden surgir consecuencias devastadoras. De esta manera, es importante para los gobiernos, industrias y la sociedad en general, poder predecir las consecuencias hidrológicas, socioeconómicas y ambientales (futura oferta hídrica, valor económico del agua, caudales ecológicos) de cada decisión que se tome.

Hace más de una década Chile se ha enfrentado a severos problemas de escasez hídrica. De hecho, datos expuestos por el (CR2) muestran que el déficit promedio de lluvias los últimos 10 años alcanza un 25 a 30% para gran parte de Chile, (Garreaud, 2019). En este contexto, la Dirección General de Aguas (DGA), organismo del Ministerio de Obras Públicas (MOP), que se encarga de gestionar, verificar y difundir la información hídrica del país, publicó una actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017). El estudio abarca registros de precipitación, evapotranspiración y caudales efluentes entre 1985 y 2015 y establece una variación del almacenamiento hídrico en distintas cuencas hidrográficas, con proyecciones al 2060.

A raíz de lo anterior, en el año 2019, la DGA-MOP comenzó con el desarrollo de Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) para cada cuenca del país. Particularmente, el trabajo de título se enfoca en el *PEGH de la Cuenca del Río Maule*, (UTP EVERIS CHILE S.A. e HIDROGESTIÓN S.A, 2020), el cual consta de su informe final aprobado y publicado por la DGA, (DGA, 2020). Este plan permite conocer la oferta y la demanda histórica, actual y potencial de agua; establece un balance hídrico y sus proyecciones a 30 años, diagnostica la

calidad de las aguas subterráneas y superficiales, el estado de información, infraestructura, instituciones que toman decisiones respecto al recurso hídrico y propone una cartera de acciones DGA y de terceros público-privados para mitigar los efectos de escasez hídrica en la cuenca. No obstante, la reforma al Código de Aguas, mediante la modificación del artículo 293 bis, (Ministerio de Obras Públicas, 2022) mandata a la DGA la creación de Planes Estratégicos de Recursos Hídricos (PERH), para las 101 cuencas hidrográficas existentes en el país, los cuales buscan propiciar la seguridad hídrica en el contexto de las restricciones asociadas al cambio climático. Estos planes, que serán actualizados cada 10 años, vienen a mejorar las bases establecidas para los PEGHs, dándoles un carácter más definitivo e íntegro en relación con la gestión del recurso hídrico.

El PEGH estudiado propone diversas alternativas de gestión para enfrentar la escasez hídrica, las cuales fueron evaluadas a partir de un modelo computacional acoplado hidrológico-operacional/superficial-subterráneo (WEAP/Modflow). Esta memoria es un análisis de cuatro de los embalses propuestos en el PEGH, los cuales se enmarcan en el escenario de gestión del recurso superficial, el cual consiste en el desarrollo de infraestructura de regulación, que va a permitir el traspaso intra e interanual del recurso excedentario. No obstante, debido a diversos factores, no se indagó acerca de las reglas de operación óptimas que debiesen llevar estos embalses y el análisis de su efecto en diferentes indicadores e impacto en el territorio no fue detallado. De esta manera, para tener una base más confiable frente a la toma de decisión, en este trabajo de título se realiza un estudio operacional de los embalses planificados en el PEGH de la cuenca del río Maule.

Así, gracias al modelo WEAP hidrológico/operacional acoplado con Modflow definido en el PEGH de la cuenca del río Maule se busca contribuir a la gestión hídrica superficial en el territorio. El producto de este trabajo determina la metodología de modelación adecuada que permite encontrar la regla de operación que debiesen llevar cuatro de los embalses propuestos en el PEGH, los cuales no tienen influencia de otros embalses aguas arriba y se encuentren en el sector valle-costa de la cuenca. Además, evidencia la utilidad y limitaciones del modelo computacional, particularmente para la evaluación de distintos embalses de regulación y su análisis en indicadores de desempeño. Todo esto, para favorecer la toma de decisión y el enfrentamiento a la escasez hídrica en el territorio.

## **1.1. Objetivos de la memoria**

### **1.1.1. Objetivo general**

Contribuir a la gestión hídrica de la cuenca del Maule a partir de un mejoramiento de la gestión de aguas superficiales mediante la operación de embalses planificados, que apunten a indicadores de desempeño, favoreciendo así la toma de decisión en un contexto de escasez hídrica.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Definir la regla de operación óptima que deben seguir los embalses planificados según información entregada por el modelo WEAP.
- Encontrar la mejor herramienta, o combinación de ellas para modelar la operación de embalses planificados.
- Evaluar el efecto del mejoramiento de la regla de operación de los nuevos embalses en término de diferentes indicadores, relacionándolo a un contexto de toma de decisión.

## 2. MARCO TEÓRICO

Los *modelos computacionales* son la principal manera de anticipar los resultados y el comportamiento de medidas a implementar, que, al ser una simplificación de la realidad es inherente que tengan limitaciones. Loucks D.P (2017), muestra la importancia de la modelación para planear y manejar el recurso hídrico, lo que permite estudiar comparativamente el efecto en cantidad y calidad de diferentes alternativas de decisión que satisfagan los objetivos planteados. De esta manera, el desempeño de la modelación depende tanto de las *incertidumbres*, que pueden ser medibles (*p.ej.* la simplificación de un sistema de canales), como de los *procesos*, que son predecibles (*p.ej.* el crecimiento poblacional) por el modelador, ambos influenciados por el comportamiento impredecible de cada individuo e institución.

Se pueden distinguir dos categorías de modelos computacionales. Por un lado, se tienen los *modelos de simulación*, que son del tipo descriptivo y buscan responder al "*qué pasa si...*" mediante refinamiento de la alternativa escogida. Por el otro, están los *modelos de optimización*, que son prescriptivos y responden al "*cuál es...*", buscando la mejor alternativa asociada a un objetivo específico. De hecho, Loucks D.P (1981) identifica buenos resultados cuando ambas categorías trabajan juntas. Harou (2009), presenta diferentes tipos de software asociados a estos modelos.

Asociado a la modelación, se encuentran los *tomadores de decisión*, quienes determinan las medidas a implementar con respecto a lo que entiendan del resultado de ella. Loucks D.P (2017), menciona la importancia de separar los datos de salida de la simulación con su interpretación, puesto que los modelos entregan información, pero NO toman una decisión. De hecho, no pueden identificar las hipótesis u objetivos a cumplir, pero sí la alternativa que mejor responde a una hipótesis u objetivo en particular. Por lo que, para acertar en la toma de decisión, se hace esfuerzo en el entendimiento más que en la simulación misma. Es necesario no solo interpretar los resultados, sino que también entender el problema, los objetivos planteados y el sistema en general, lo que se logra mediante una *modelación colaborativa*, juntando ingenieros y analistas. Por esto, se estudia la relación causa-efecto de cada medida propuesta, asumiendo que no es siempre posible satisfacer a todos; se hacen compromisos por un lado para ganar en otro.

Para completar lo anterior, Jacobs (2008), propone la importancia de la *gobernanza participativa* e información científica en la toma de decisión. El

manejo del recurso hídrico ya no es un sistema centralizado, sino que toda una estructura de resolución, y es fundamental que exista participación ciudadana. A pesar de que la gobernanza puede tornarse más compleja y burocrática, en el largo plazo se expandiría la cultura de aprendizaje y mejores decisiones serían tomadas. Esto se aprecia en Israel, país pionero en temas de gestión hídrica, donde existe un compromiso de la sociedad con el agua, en el cual, desde temprana edad los ciudadanos reciben educación sobre el cuidado y la importancia del ahorro, haciendo la comunidad parte integral de la cadena del recurso hídrico.

## **2.1. Indicadores para la toma de decisión**

Para apoyar la comprensión de los resultados y la toma de decisión se utilizan diferentes tipos de indicadores, los cuales permiten definir estados del sistema según distintas definiciones y son escogidos por las personas encargadas de presentar los resultados.

Los indicadores que se utilizan en esta memoria se enfocan en el trabajo de Hashimoto (1982), Kjeldsen (2004) y sus relacionados. De manera general, los resultados entregados por cada simulación pueden ser de carácter satisfactorio o insatisfactorio, las condiciones que permitan identificar estos estados son relevantes para la toma de decisión.

Hashimoto (1982), propone, por un lado, el uso de *algoritmos de decisión multiobjetivo*, donde el conjunto de beneficios y perjuicios asociados a cada alternativa son fáciles de identificar, lo que ayuda a evaluar diversas opciones (privadas, públicas...). Estos algoritmos incluyen un criterio de *desempeño de riesgo*, que permite comprender la incertidumbre del futuro. Por otra parte, menciona los *métodos Bayesianos*, que, mediante un análisis probabilístico, asocia el parámetro de decisión a las incertidumbres del sistema. Finalmente, se exponen los *criterios de desempeño*, los cuales serán el foco de esta memoria.

La evaluación del desempeño del sistema está basada en la *falla* de este. Para esto, se hace una valoración de las salidas del modelo y se determina si están sobre o bajo un valor límite establecido previamente. Dentro de estos criterios, o como se llamarán más adelante; *indicadores de desempeño*, se tienen los siguientes:

- *Confiabilidad*: Descrito como la frecuencia (o probabilidad,  $\alpha$ ) de que el sistema se encuentre en un estado satisfactorio, en un período de tiempo dado. Comúnmente es lo opuesto al riesgo  $(1-\alpha)$ .

- *Resiliencia*: Que tan rápido el sistema se recupera de una falla. El problema aparece cuando las fallas se prolongan. Se puede representar matemáticamente mediante una probabilidad condicional. Suele tener misma variación que la confiabilidad.
- *Vulnerabilidad*: Representa la magnitud de una falla, inclusive si la probabilidad de falla es pequeña se debe tomar atención a su magnitud y/o consecuencias.

Para la resiliencia y vulnerabilidad existen dos definiciones matemáticas utilizadas. La primera se enfoca en el promedio de las fallas observadas, mientras que la segunda se enfoca en su máximo valor. Cuando se usan series de corta longitud el uso de la definición de valor medio genera un problema; para evitar esto, se aumenta la muestra a partir de series estocásticas, lo que mejora la estimación del promedio de fallas. En consecuencia, si se trabaja con periodo histórico de menos de 100 años, se recomienda usar la definición del valor máximo.

De esta manera, los tomadores de decisión deben estar conscientes de la fragilidad de los sistemas frente a posibles fallas al momento de escoger una alternativa. Para poder representar probabilísticamente estos indicadores se definen los *estados de falla del sistema*, lo cual se hace mediante experiencia previa o metodologías de prueba y error. Hoy en día, el criterio de falla que comúnmente se encuentra en los PEGH es el de disponibilidad hídrica (o brecha hídrica), o sea si se presenta menos oferta que demanda en cierto punto el sistema presentará un falla.

Kjeldsen (2004) estudia la utilidad de estos indicadores y examina que combinación es la óptima para afrontar un problema multiobjetivo. De manera general, se busca una confiabilidad y resiliencia alta y vulnerabilidad baja. Además, hay que tener cuidado con la superposición de diferentes criterios de decisión en un problema multiobjetivo, puesto que comúnmente son interdependientes entre sí. A continuación, se presenta la correlación entre los valores de los indicadores mencionados:

- *Resiliencia-Vulnerabilidad*: Correlación entre vulnerabilidad y el inverso de resiliencia es positiva (sistema con alta resiliencia suele tener baja vulnerabilidad). En una definición multicriterio es recomendado dejar uno de estos dos de lado, para evitar que se superpongan.
- *Confiabilidad-Resiliencia*: Correlación positiva entre confiabilidad y resiliencia. Sistemas confiables suelen tener alto grado de resiliencia.

- *Confiabilidad-Vulnerabilidad*: Correlación positiva entre confiabilidad e inverso de vulnerabilidad. Sistemas con alta confiabilidad tienden a ser menos vulnerables.

Finalmente, Loucks D.P (1997) propone el criterio de *sustentabilidad*, que se define mediante los índices de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad, estimados a partir de criterios subjetivos, tomando en cuenta lo que es o no aceptable. La sustentabilidad va más allá de lo que es medible o cuantificables y se torna en un objetivo social antes que científico, se consideran las opiniones públicas y responde la pregunta; ¿Qué debe ser satisfecho hoy y qué cambios se necesitan para asegurar un legado futuro?

## 2.2. Reglas de operación de embalses

Los embalses de almacenamiento pueden ser de uso múltiple (riego, generación eléctrica, consumo humano etc.) o uso único; el trabajo de estudio se enfoca en estos últimos, particularmente en embalses de riego.

El objetivo es crear reglas de operación que permitan al sistema pasar los periodos de escasez sufriendo el menor daño posible, (Shih & ReVelle, 1994, 1995). De manera general, se prefiere una secuencia de pequeñas fallas antes de una catastrófica. Para esto, los sitios de demanda (ciudades, predios agrícola, etc.) están sujetos a restricciones en el uso, deben saber vivir con racionamiento para reducir temporalmente la demanda y así aumentar el almacenamiento evitando fallas grandes en el futuro. Se raciona el agua cuando el volumen disponible más el afluente al embalse es menor que el volumen demandado en cierta temporada. A raíz de lo anterior, se proponen dos tipos de reglas de operación que comúnmente se utilizan:

- *Regla de operación estándar (ROE)*: Se caracteriza por el siguiente set de ecuaciones (E: entrega, A: almacenamiento, I: afluentes (*inflows*), D: demanda, C: capacidad):

$$\left\{ \begin{array}{ll} E_t = A_{t-1} + I_t, & \text{si, } A_{t-1} + I_t \leq D_t \quad (1.1) \\ E_t = D_t, & \text{si, } D_t \leq A_{t-1} + I_t \leq C \quad (1.2) \\ E_t = A_{t-1} + I_t - C, & \text{si, } A_{t-1} + I_t - D_t > C \quad (1.3) \end{array} \right. \quad (1)$$

Esta regla es óptima cuando se busca minimizar el déficit total de liberación; si la demanda excede un cierto porcentaje sobre la capacidad, el embalse se vaciará constantemente. No incorpora un mecanismo de racionamiento para temporadas futuras, además, como la falla no es aceptable, los índices de

confiabilidad son muy elevados, cuando el objetivo de la gestión del agua no es reducir las fallas, sino que reducir su impacto. Esta regla establece la máxima prioridad en liberar el agua para uso inmediato.

- *Regla de operación con hedging*

Esta regla apunta a no entregar necesariamente el 100% de la demanda en una temporada de riego, sino que retener agua en el embalse con el objetivo de anticiparse a posibles déficits severos en temporadas posteriores. De un punto de vista económico es más rentable tener pequeños periodos de escasez en el presente en vez de uno severo en el futuro. Aquí, se supone que la pérdida económica por escasez es lineal y el beneficio marginal de almacenar agua hoy es igual al beneficio marginal de usar esta agua en el futuro.

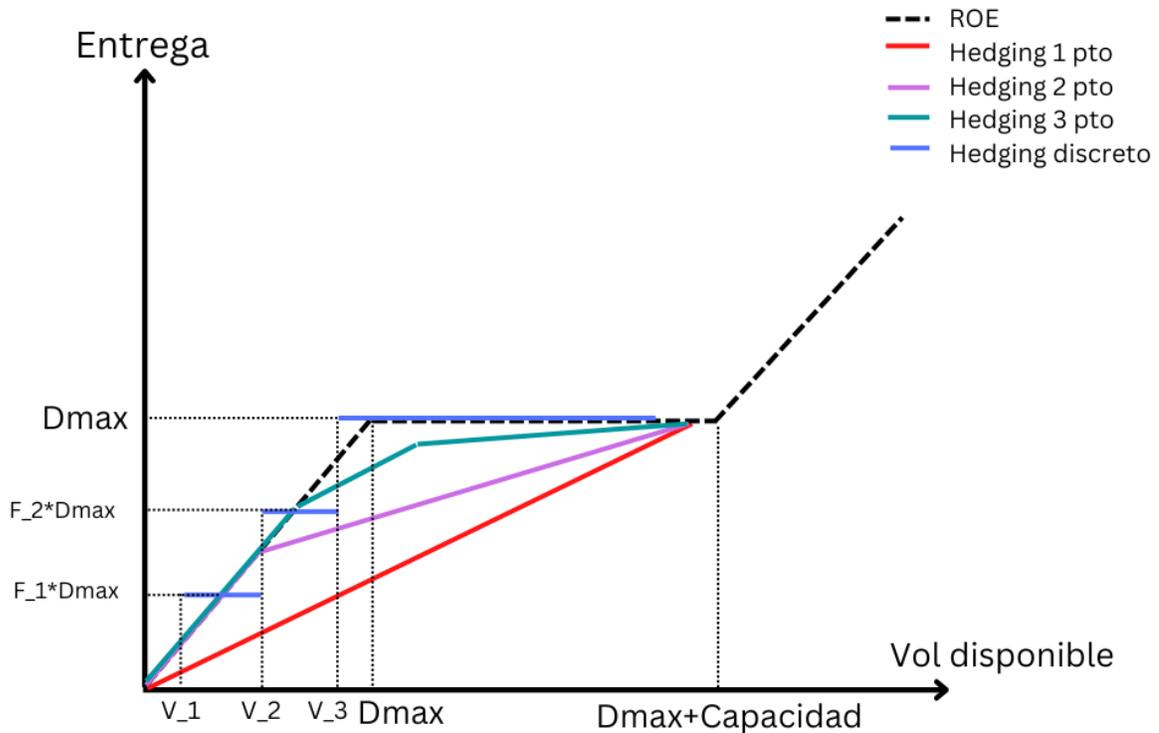
Para establecer bien las RO con *hedging* es necesario hacerse 2 preguntas claves:

- ¿Qué tan temprano en el tiempo y a qué nivel de almacenamiento y afluentes proyectados es necesario iniciar el racionamiento?
- ¿Cuánto debe reducirse la demanda y, por lo tanto, el reparto durante cada uno de los intervalos del período de racionamiento?

Uno de los primeros autores en mencionar este método fue Hashimoto (1982), quien muestra la relación entre el aumento de la frecuencia de falla a cambio de una disminución del impacto de ciertas fallas (mejora vulnerabilidad a cambio de empeoramiento de confiabilidad). Además, indica "cuándo" y "por cuánto" realizar el *hedging*, que se responde separadamente. La primera es a partir de *volúmenes de activación* y la segunda con *factores de racionamiento*.

El volumen de activación (*trigger value*), indica el inicio del racionamiento. Si es pequeño, el máximo periodo de escasez va a disminuir (vulnerabilidad disminuye), pero el racionamiento será más frecuente (confiabilidad disminuye), este valor suele estar relacionado con el volumen disponible (*almacenamiento + afluentes*), la demanda por temporada y el número de meses de entrega de agua. De esta manera, se establecen reglas de operación según lo observado en periodos anteriores, experiencias y políticas públicas. Dentro de las RO con *hedging* existen distintos tipos, que se determinan en función del número de volúmenes de activación que existan (1, 2 o 3 puntos), donde la pendiente de la recta que relaciona la entrega y el almacenamiento va cambiando, (Andrew J Draper, Jay R Lund, 2004), lo que se aprecia en la Figura 2-1. Cabe señalar que, para el *hedging* de 2 y 3 puntos, los puntos de quiebre en las pendientes corresponden a los volúmenes de activación.

Por otro lado, están las RO *hedging* discretas. Ming-Yen Tu (2008) muestra estas RO a partir de curvas de operación (*rule curves*), donde el volumen disponible debe siempre situarse en cierto rango de valores, si no se activa el *hedging* respectivo. Aquí, la RO depende igualmente de volúmenes de activación ( $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  en la Figura 2-1) y de factores de racionamiento ( $F_1$  y  $F_2$ ) que definen el número de puntos del método.

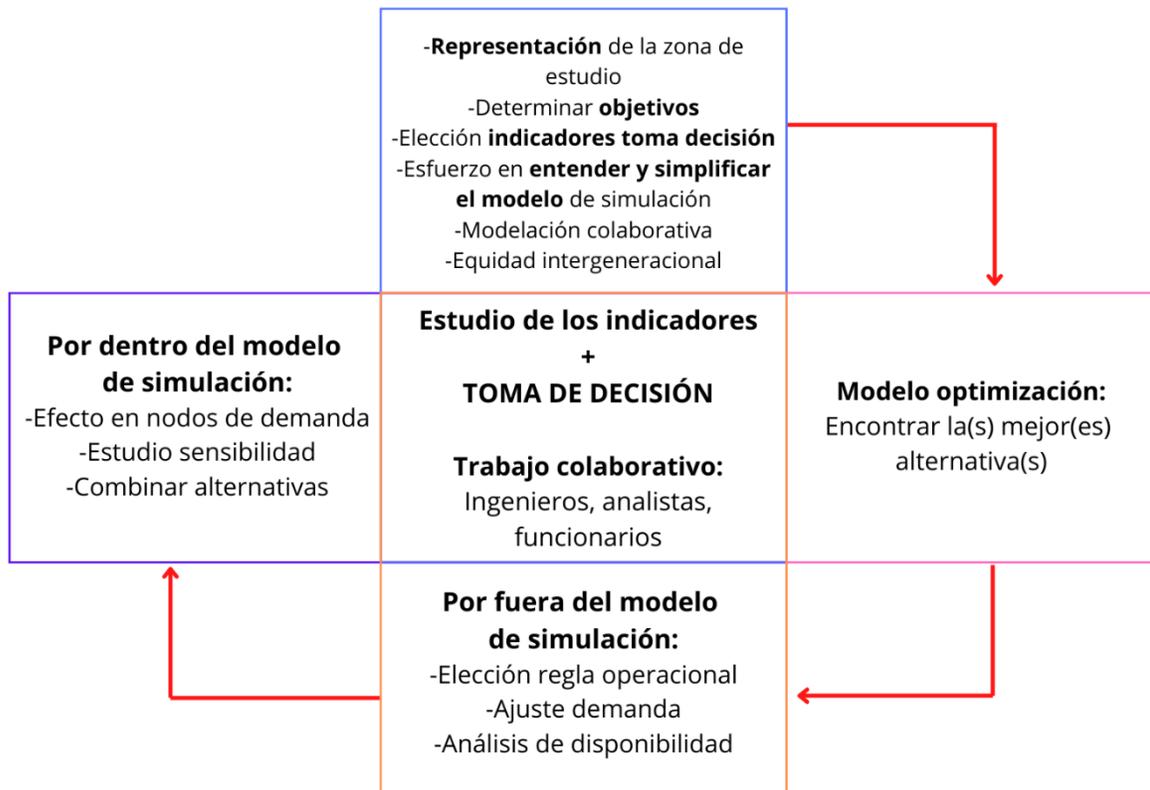


**Figura 2-1: Tipos de RO para embalses.** Fuente: Elaboración propia a partir de (Shih & ReVelle, 1994, 1995) y (Ming-Yen Tu, 2008)

La elección de los volúmenes de activación, o bien, la fracción a liberar en el momento y la que se almacena para uso futuro puede tornarse algo compleja, sobre todo por la incertidumbre de los afluentes (a menos que sean únicamente por deshielo). Andrew J Draper y Jay R Lund (2004) muestran una relación entre el volumen de almacenamiento remanente y el *hedging* óptimo a realizar. Esto se realiza a partir de curvas de beneficio relacionadas al cumplimiento de la demanda, donde el beneficio marginal disminuye con el aumento del uso hídrico, y curvas que representan la utilidad económica del almacenamiento remanente, se puede encontrar un *hedging* óptimo balanceando ambos beneficios marginales. Además, You & Cai (2008) muestra

la importancia de considerar las incertidumbres en la estimación de los afluentes cuando se emplean las funciones de beneficio. También, evidencia el efecto de la evaporación en los parámetros que definen la RO con *hedging*. Las pérdidas por evaporación reducen el efecto del *hedging* en el embalse, puesto que, implica un aumento de la entrega inmediata de agua.

Finalmente, la necesidad de incorporar *hedging* se determina en las etapas de planificación o etapas preliminares de operación de los embalses, sin embargo, trae ciertas incertidumbre, al cambiar con el tiempo, las ofertas, demandas, fuentes de abastecimiento y condiciones del embalse se deben ir actualizando constantemente, (Ming-Yen Tu, 2008). Además, para establecer la regla de operación óptima, es fundamental el acceso a buenos modelos de predicción de escorrentía. Cabe destacar que, para establecer *hedging* es bueno tener condiciones hidrológicas más bien estables en el tiempo, en la actualidad, no es evidente por efectos del cambio climático. Como consideración para este trabajo se decide incorporar o no la RO con *hedging* según si cada embalse logra llegar a su capacidad máxima en cada temporada de llenado, donde las entregas de cada mes son proporcionales a la demanda de este y el volumen disponible para la temporada. La Figura 2-2 muestra un resumen del marco conceptual que determina el procedimiento completo para la toma de decisión. Este trabajo se enfoca en partes de las etapas de simulación, tanto por dentro (endógeno) como por fuera (exógeno) del modelo, donde se estudia la operación de los embalses seleccionados a partir de ciertos indicadores de desempeño.



**Figura 2-2: Resumen del marco conceptual para la toma de decisión.**

### **2.3. Descripción general de la zona de estudio**

Toda la información presente en la descripción de la zona de estudio se fundamenta en el "*Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Maule*" publicado por la DGA en el 2020 y realizado en una colaboración UTP entre Everis Chile S.A e Hidrogestión S.A, (UTP EVERIS CHILE S.A. e HIDROGESTIÓN S.A, 2020).

La Cuenca del Maule se ubica en la zona centro sur del país, abarcando prácticamente la totalidad de la Región del Maule, con una pequeña superficie en la Región del Ñuble. Se inscriben las provincias de Cauquenes, Curicó, Linares y Talca en la Región del Maule y la Provincia de Itata y Punilla por la parte de la Región del Ñuble. Su superficie es de 21.054 km<sup>2</sup> y cuenta con una población de 852.035 habitantes, donde 72,1% vive en zonas urbanas y el 38,9% en zonas rurales, (INE, 2017).

Como la casi totalidad del territorio Chileno continental, la cuenca se caracteriza por estar formada geográficamente de 3 zonas. Primero, la cordillerana que se caracteriza por su actividad hidroeléctrica y número importante de embalses. Segundo, el valle central donde domina la actividad agrícola y existen condiciones geológicas que permite grandes almacenamiento hídricos subterráneos. Tercero, el litoral costero o Cordillera de la Costa, donde la actividad agrícola sigue siendo la principal, sin embargo, los acuíferos presentes son de menor tamaño y calidad que en la zona central. Además, la cuenca se separa en tres unidades de gestión (UDG): Maule, Loncomilla y Perquillauquén, subdivididas en nodos hidrológicos. Estas unidades reúnen sectores que comparten una gestión común de los recursos hídricos.

Según información entregada en el plan, la cuenca del río Maule es un sistema complejo y se caracteriza por ser una de las más intervenidas del país, donde aproximadamente 97% del uso consuntivo se destina a la agricultura. El régimen natural de los recursos hídricos se ve modificado a partir de distintos elementos de acumulación, trasvase y distribución, que al mismo tiempo deben ser considerados como sistemas dinámicos (activos) en la modelación y planificación estratégica.

Los principales elementos que la componen se presentan en la Figura 2-3. Se pueden apreciar nueve embalses que son utilizados para generación eléctrica o de uso mixto (riego y generación eléctrica), con un total de 1.680 MW de capacidad instalada. Estos son los embalses Colbún, Machicura, Melado, Ancoa, Bullileo, Digua y Tutuvén, y las lagunas del Maule y La Invernada

(ambas reguladas), sumados llegan a 3.743 Hm<sup>3</sup> de capacidad de almacenamiento en la cuenca. Además, existen seis embalses para riego potenciales a construir (dos ya se encuentran priorizados, y uno en proyecto), con un total de 956 Hm<sup>3</sup> embalsados. En la Figura 2-3 se muestran los cinco sistemas de riego importante en el contexto de la memoria, siendo un total de diez en la cuenca, estos cuentan con una compleja red de canales (6.976 km), la cual en su conjunto es un activo de igual valor que la capacidad embalsada en la cuenca.

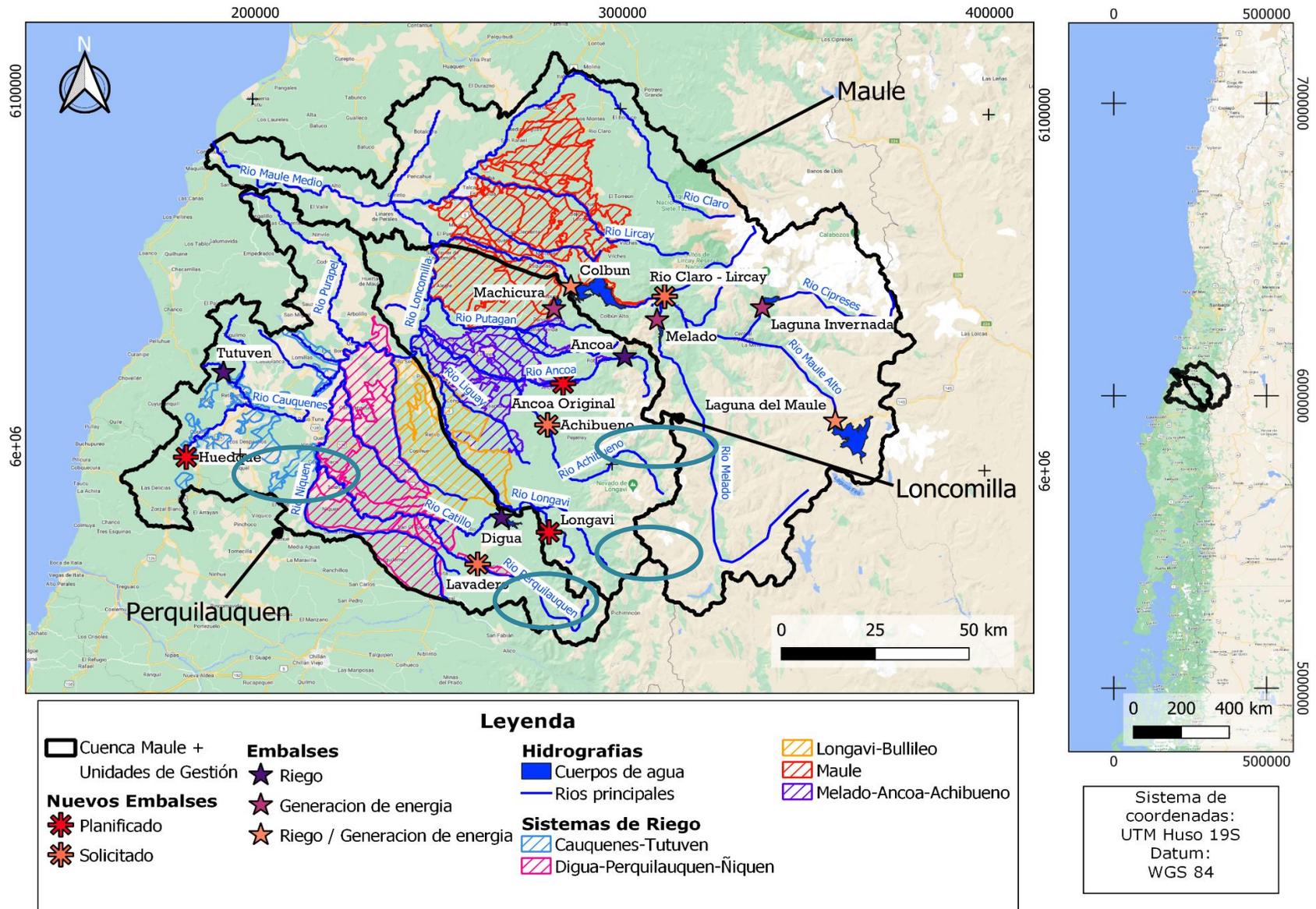
### **2.3.1. Demanda agrícola**

El PEGH de la cuenca del río Maule hizo un trabajo detallado en la estimación de las demandas: no solo utilizó información entregada por la DGA y censos agropecuarios, sino que también, la entregada por usuarios del agua de la cuenca (Juntas de Vigilancia). Entre ambas cifras se encuentra la superficie efectivamente regada, la que enfrentaría distintas seguridades de riego, que va desde un 85% para la superficie fija estimada por DGA en 2017 (185.334 ha), hasta un 15% para la superficie potencial declarada por las organizaciones de usuarios de agua (335.670 ha). De esta manera, se aplicó como criterio para la estimación de la demanda que esta superficie se riega en promedio con una seguridad del 50%.

Como consideración para este trabajo, tanto la superficie como la eficiencia de riego se mantiene fija en todo el periodo de modelación (2035-2050), tratando de aislar y cuantificar el efecto de regulación de cada embalse y de los cambios en las forzantes meteorológicas hacia 2050. El PEGH definió 114 *zonas de riego*, que se caracterizan por poseer sistemas de riego relativamente independientes, dentro de lo que pueden serlo áreas que se alimentan por una fuente común, y cuyos límites normalmente están constituidos por esteros, quebradas o trazado de canales importantes actuales o posibles en el futuro. Luego, los canales, mediante un número de acciones y una tasa de reparto, alimentan estas zonas de riego. Debido a la extensa red presente en la cuenca, para la simplificación del modelo se aplica un criterio de reducción de canales, que consiste en incluir dentro del canal matriz a aquellos canales secundarios que abastecen a la misma zona de riego que su canal matriz. Igualmente, se considera un criterio de agrupación de canales, en los casos en que muchos canales que abastecen a la misma zona de riego tengan bocatomas en puntos cercanos del mismo río. De esta manera, las bocatomas presentes en la memoria (Sección 4) no son extracciones reales, pero sí representan

adecuadamente los procesos que ocurren. El Anexo G muestra las agrupaciones correspondientes a este trabajo de memoria.

Finalmente, para el 2019 se estima una demanda agrícola neta (demanda hídrica del cultivo menos precipitación efectiva) de 1597 Hm<sup>3</sup>/año y una demanda bruta de 2858 Hm<sup>3</sup>/año. Además, según información entregada por el PEGH, las extracciones por pozos de bombeo en la cuenca alcanzan los 10.79 m<sup>3</sup>/s para el periodo 2000-2020, lo que equivale a 330 Hm<sup>3</sup>/año, o sea aproximadamente el 11,5% del agua destinada para riego proviene de aguas subterráneas.



**Figura 2-3: Mapa de la cuenca de estudio. Fuente: Elaboración propia**

## **2.4. Aspectos relevantes del plan**

A raíz del estado actual de la cuenca, se establece una seguidilla de acciones que permiten enfrentar todos los temas relacionados a la gestión del recurso hídrico. Esta etapa, suele llamarse la de *Formulación*, que corresponde a las definiciones estratégicas del Plan, estableciendo lineamientos, acciones, restricciones, metas, estrategias y medidas para su cumplimiento. El Anexo F expone la etapa de formulación empleada en el PEGH de la cuenca del río Maule, (UTP EVERIS CHILE S.A. e HIDROGESTIÓN S.A, 2020).

Se destaca que este plan busca responder a temas de *seguridad hídrica*. El estudio de "*Seguridad Hídrica en Chile en un contexto de Cambio Climático*", realizado por el Laboratorio de Análisis Territorial de la Universidad de Chile en 2017, señala que la seguridad hídrica implica tener "*Acceso al agua en un nivel de cantidad y calidad adecuada, definida por cada cuenca, para su sustento y aprovechamiento en el tiempo, tanto para la salud, subsistencia, desarrollo socio-económico y la conservación de los ecosistemas, manteniendo una alta resiliencia frente a amenazas asociadas a sequías, crecidas y contaminación*". El objetivo del plan es garantizar la seguridad de abastecimiento para consumo humano, ecosistemas, economía y frente a riesgos de origen natural.

### **2.4.1. Indicadores utilizados en el PEGH**

Se utilizaron indicadores de seguridad de uso del agua, que permiten estudiar el efecto de cada escenario de gestión en el territorio. Los indicadores utilizados son de impacto, es decir, miden en unidades de volumen de agua (Hm<sup>3</sup>/año) el aporte de cada medida al Plan Estratégico. Se presentan de manera muy general en la cuenca y se relacionan a un periodo histórico, por lo que pueden traer problemas de interpretación a nivel local. La Tabla 2-1 muestra un resumen de estos indicadores.

**Tabla 2-1: Indicadores de uso de agua.** Fuente: PEGH Maule (DGA,2020)

Indicador	Definición
Balance superficial (-)	<p>Relación existente entre la demanda satisfecha y la demanda total superficial. Este relación se normaliza para la comparación entre los distintos periodos de tiempo entre el valor para el periodo histórico 2000-2020.</p> <p>Este indicador mide la <i>vulnerabilidad</i> del sistema, asociado a la magnitud del déficit hídrico superficial.</p>
Cobertura agrícola (-)	<p>Relación existente entre la demanda satisfecha de la cobertura agrícola y la demanda total. Esta relación se normaliza para la comparación entre los distintos periodos de tiempo entre el valor para el periodo histórico 2000-2020.</p> <p>Este indicador mide la <i>vulnerabilidad</i> del sistema, asociado a la magnitud del déficit hídrico agrícola.</p>
Tasa de reparto (-)	<p>Se considera Indicador de tasa de reparto como la relación directa del porcentaje de cumplimiento de la tasa de reparto ponderada para cada Junta de Vigilancia. Esta relación se normaliza para la comparación entre los distintos periodos de tiempo entre el valor para el periodo histórico 2000-2020.</p> <p>Este indicador mide la <i>confiabilidad</i> del sistema, asociado a la frecuencia de falla donde no se cumple las entregas preestablecidas por cada junta de vigilancia.</p>
Generación eléctrica (-)	<p>Se considera Indicador de generación como la relación existente entre el volumen generado en un periodo de tiempo y lo generado en el periodo de tiempo de 2000-2020.</p> <p>Este indicador se relaciona a una medida de <i>vulnerabilidad</i> del sistema, puesto que compara un volumen generado hoy con respecto a otro base, entregando una magnitud de falla.</p>
Volumen embalsado (-)	<p>Se considera Indicador de Volumen acumulado como la relación existente entre el volumen acumulado en lagunas y embalses en un periodo de tiempo y lo acumulado en el periodo de tiempo de 2000-2020.</p> <p>Este indicador se relaciona a una medida de <i>vulnerabilidad</i> del sistema, puesto que compara un volumen acumulado hoy con respecto a otro base, entregando una magnitud de falla.</p>

## 2.5. Modelo de simulación

Para evaluar los escenarios propuestos, la consultora encargada del desarrollo del plan mejoró y actualizó el modelo hidrológico-operacional, superficial-subterráneo ya existente en la cuenca de estudio. Este modelo utiliza dos software que trabajan de manera acoplada: WEAP y Modflow.

La interfaz gráfica donde se trabaja pertenece a WEAP, un programa de modelación y planificación flexible, integral y transparente, que permite evaluar los patrones actuales y futuros de demanda y suministro de agua. Es un software DSS que se define como semi-distribuido, funciona con elementos tipo nodos, donde cada uno representa un elemento en específico (cuenca, acuífero, embalse, etc), se conectan entre sí a partir de flechas, que simbolizan canales, trasvases, demandas desde otro nodo, flujos de escurrimiento e infiltración. La plataforma contempla todos los elementos de distribución, almacenamiento, oferta y demanda de agua, con el objetivo que el usuario tenga una mirada más completa e integrada de todos los factores involucrados. Además, al ser un modelo hidrológico-operacional incluye herramientas para representar la escorrentía a partir de variables climáticas, que serán incorporadas como *inputs*. Es flexible, permite incorporar prioridades de uso, reglas de operación de canales y embalses, además de acoplarse a un modelo subterráneo mediante el software Modflow.

Modflow es un software de modelación hidrogeológica del tipo distribuido; toda la masa acuífera del espacio se representa a partir de prismas conectados unos con otros (formando una grilla) por relaciones matemáticas correspondientes al flujo en el acuífero. Cada una de las celdas tiene propiedades físicas que intentan representar lo mejor posible las características reales del subsuelo. Al acoplar ambos programas, se considera la interacción entre superficie y acuíferos, dando la oportunidad de representar de mejor manera la realidad en comparación a modelos hidrológicos solo superficiales o solo subterráneos.

Desde el punto de vista espacial de la modelación hidrológica en la cuenca del Maule, se realizaron dos modelos por separado. Por un lado, se tiene el cordillerano, creado en base al modelo elaborado en el estudio "*Fortalecimiento de las capacidades para enfrentar los desafíos del cambio climático en Chile*" (CORFO, 2013). Este presenta un pequeño volumen acuífero y una alta intervención humana (embalses y canales), por lo que,

para evitar complicaciones computacionales, no se desarrolla de manera acoplada, sino que únicamente con WEAP. Por el otro, se tiene el modelo de valle y costa que, debido a las grandes masas acuíferas presentes en la cuenca, se representa a partir de un acople superficial-subterráneo. Cabe destacar que todos los embalses analizados en la memoria se encuentran en esta área. De esta manera, los *outputs* generados por el modelo cordillerano servirán de condiciones de borde para el modelo valle y costa.

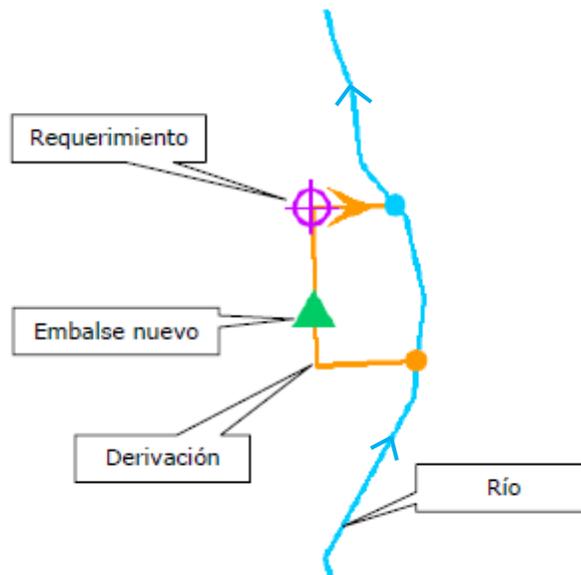
Finalmente, la modelación se desarrolla tomando como periodo histórico base los datos de los años hidrológicos comprendidos entre 1985 y 2015, con un horizonte de simulación hasta el 2050, y una discretización temporal mensual. Para poder contar con series de precipitación y temperatura (variables más importantes) completas en el periodo histórico, se utilizan las obtenidas del producto CR2MET v2.0, que se validan con datos de estaciones meteorológicas de la DGA. Las series proyectadas se obtienen a partir de modelos globales de clima acoplados; particularmente se utiliza el modelo CSIRO Mk3-6-0, que considera un escenario de forzamiento radiativo RCP 8.5. Estas series completas se encuentran en los Anexos del PEGH, (DGA, 2020).

### **2.5.1. Mejoras propuestas al modelo existente**

La memoria se enfoca en la alternativa de gestión de aguas superficiales, que se planea llevar a cabo mediante la construcción de nuevos embalses.

Para evaluar el escenario en el PEGH del Maule, los embalses fueron incorporados al modelo computacional, sin embargo, presenta ciertas limitaciones que deben ser mejoradas. Para esto, se hizo un análisis acerca de las demandas potencialmente cubiertas por estos, y de las reglas de operación que debiesen seguir. La Figura 2-4 muestra el funcionamiento empleado para los embalses en el modelo de simulación del PEGH del Maule. Este funcionamiento consiste en que los embalses reciben todo el caudal que viene en el río entre los meses de mayo a agosto (por medio de la "Fracción Derivada" igual al 100% de los elementos "Derivación") y realizan su desembalse total entre los meses de diciembre y abril (por medio del elemento "Requerimiento") con un caudal constante y sin diferenciar la distribución temporal de la demanda, es decir, el desembalse en cada mes es el mismo.

Así, los nuevos embalses no influyen en los caudales utilizados entre los meses de septiembre a abril por las juntas de vigilancia ubicadas aguas abajo, percibiendo únicamente los efectos de los embalses en las aguas que éstos acumularon en el periodo de no riego y que liberan en los meses de la temporada. Este funcionamiento podría parecerse a una regla de operación estándar; sin embargo, al no considerar la demanda potencial, ni los afluentes en cada temporada, carece de fundamento y requiere ser revisado para representar de mejor manera la realidad.



**Figura 2-4: Ejemplo de la incorporación de un nuevo embalse en el modelo existente**

### 3. MODELACIÓN DE EMBALSES PLANIFICADOS

Ahora que se expuso el problema y contexto para el desarrollo de la memoria, se presentan los embalses a estudiar. Tal como se mencionó anteriormente, para facilitar el análisis y que los resultados no dependan de otros embalses aguas arriba, o de las condiciones de borde del modelo cordillerano, se decide estudiar embalses "solitarios". Estos embalses se encuentran en la cabecera de sus respectivas subcuencas, y son los siguientes: Embalse Huedque, Lavadero, Longaví, y Achibueno, que se pueden visualizar en la Figura 2-3.

La información utilizada para determinar las características principales de cada embalse se obtuvo de las siguientes fuentes:

- Embalse Huedque: "*Estudio de prefactibilidad proyecto construcción de embalse de riego Huedque, comuna de Cauquenes.*", (CNR, 2012)
- Embalse Longaví: "*Estudio de prefactibilidad construcción sistema de riego embalse Longaví, región del Maule*", (CNR, 2015)
- Embalse Achibueno: "*Estudio de prefactibilidad "Mejoramiento del sistema de riego en río Achibueno, región del Maule"*", (CNR, 2014)
- Embalse Lavadero:
  - "*Análisis técnico-económico de un embalse de riego con derechos eventuales en la cuenca del río Perquillauquén*", (Riquelme, 2021)
  - "*Embalse Lavadero - Río Perquillauquén- Antecedentes Generales*" (Asociación Embalse Digua Parral, 2020)
- *Modelo WEAP Valle y Costa de la cuenca del río Maule*, (UTP EVERIS CHILE S.A. e HIDROGESTIÓN S.A, 2020)

Tal como lo muestra la Tabla 3-1, las características principales consideradas para cada embalses son; su capacidad máxima, volumen muerto, entrada en operación y superficie potencial cultivada. Con fines de modelación, el PEGH consideró el mismo año de entrada de operación para los cuatro embalses, esto asumiendo que los proyectos son aprobados y puestos en marcha bastante pronto, lo que no necesariamente será el caso. A excepción del embalse Huedque que se encuentra en una zona costera, los embalses estudiados presentan capacidades similares buscando abastecer hídricamente a la zona central de la cuenca.

**Tabla 3-1: Características principales de cada embalse.** Fuente: PEGH Maule (DGA, 2020) y Estudios de prefactibilidad (CNR, 2012, 2014, 2015)

	<b>Huedque</b>	<b>Longaví</b>	<b>Lavadero</b>	<b>Achibueno</b>
Rango potencial de superficie cultivada [ha]	2500-3500	40 000-45 000	38 000-42 000	25 000-30 000
Año entrada en operación	2036	2036	2036	2036
Capacidad [Hm <sup>3</sup> ]	38	279	273	187
Volumen muerto [Hm <sup>3</sup> ]	3,8	27,9	27,3	18,7

### **3.1. Formulación de la modelación**

#### **3.1.1. Topología del sistema**

Las zonas de influencia de cada embalse son todas las bocatomas y/o zonas de riego que se sitúan aguas abajo y son parte de la junta de vigilancia respectiva, o sistema de riego que tenga derechos de aprovechamiento sobre sus aguas.

De esta manera, como el objetivo no es modificar el modelo computacional, los esquemas se crean a partir de los códigos observado en el WEAP (Boc: bocatoma, AN: Cuenca naciente, AN\_2: Escorrentía salida cuenca naciente, CL: cuenca no naciente, RS: Flujo retorno). Los elementos "AN\_2" presentes en los aportes superficiales representan una escorrentía de salida de cada subcuenca del modelo; el programa las llama "Runoff". Estas son calculadas según el "Soil Moisture Method", donde los resultados dependen directamente del uso de suelo presente en la subcuenca. Por lo que, si en algún escenario se llegase a incorporar una demanda en el territorio, la escorrentía de salida va a variar. A diferencia de las sin sufijo, "AN", que representan escorrentías de cabecera y no son influenciadas por ninguna actividad, manteniéndose iguales en todo escenario.

Así, las figuras que se presentan en la sección 4 corresponden en cada caso a una parte del modelo WEAP Maule Valle-Costa, simulados todos a la vez.

#### **3.1.2. Estudio de la demanda**

Un embalse es rentable si logra aumentar la superficie cultivada, por esto se hace un análisis de la demanda en dos tipos. La primera, representa todas las extracciones existentes aguas abajo de los embalses, correspondiendo a las demandas actuales. No obstante, según como está definido el modelo WEAP, las demandas en cada bocatoma dependen de la tasa de reparto (TR) establecida por cada Junta de Vigilancia en cuestión y su número de acciones. Estas TR, a su vez, dependen de las escorrentías en la cabecera de cada junta de vigilancia. Sin embargo, al instalar los embalses, las TR ya no estarán definidas por estas escorrentías, sino que, por el caudal liberado por cada embalse. Así, para medir el desempeño del embalse en las bocatomas existentes (con y sin proyecto), se mantiene una demanda fija por bocatoma existente; *el primer supuesto clave es establecer tasas de reparto constantes durante toda la modelación*, que se muestran en la Tabla

3-2. Estas tasas de reparto corresponden a tasas nominales establecidas en el PEGH del Maule a partir de información entregada por cada junta de vigilancia. De un punto de vista práctico no es posible mantener una tasa de reparto si es que hay más o menos agua, sin embargo, es necesario fijarlas para poder comparar los resultados entre los escenarios con y sin proyecto.

**Tabla 3-2: Estudio de la demanda.** Fuente: PEGH Maule (DGA, 2020)

	Huedque	Longaví	Lavadero	Achibueno
Tasa de reparto nominal [l/s*acción]	No hay JV	1,5	1	1,5
Número de acciones	-	25 700	25 639	13 379
Seguridad de Riego estimada <sup>1</sup>	-	69%	S/I	60-65%

De esta manera, el análisis de disponibilidad no se hace a partir de la demanda en cada zona de riego, sino que, a partir de los derechos de agua otorgados en cada Junta de Vigilancia beneficiada por el embalse.

La segunda, es la demanda determinada en los informes de prefactibilidad de cada embalse, que se considera como una demanda adicional futura. Esta es una demanda bruta y se incorpora únicamente en los escenarios con embalses.

### 3.1.3. Caudal ecológico

Con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y asegurar el mantenimiento de la flora y fauna, se determina un caudal ecológico mínimo que debe llevar el río aguas abajo de cada embalse y de las zonas de riego. Como primer análisis, se extraen los caudales ecológicos presentados en los informes de prefactibilidad de cada embalse, que se establecen a partir de

---

<sup>1</sup> Según información entregada en el PEGH de la cuenca del río Maule.

las series de caudales mínimos históricos y de los criterios del *Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos* de la Dirección General de Aguas, (DGA, 2008). Además, se establece la siguiente metodologías de cálculo:

- Cauce con derechos constituidos con caudal ecológico mínimo utilizando el criterio del diez por ciento (10%) del caudal medio anual (QMA)

Para esta determinación se consideran las series de escorrentías proyectadas (2024-2050) extraídas de la parte hidrológica del modelo WEAP. Los valores utilizados para el presente trabajo corresponden a la metodología establecida en el Decreto 14/2013 del Ministerio del Medio Ambiente<sup>2</sup> representando caudales ecológicos mayores, lo que permitirá un mejor cuidado del medio ambiente. Cabe destacar que, estos caudales se determinan con fines de verificar su cumplimiento en el modelo, sin incorporarlos como una demanda propiamente tal.

#### **3.1.4. Análisis de disponibilidad**

Con el objetivo de tener un primer análisis referencial que permita mostrar que tan holgado o exigido hídricamente se encuentra cada embalse, se determina la disponibilidad hídrica de cada uno. Cabe destacar que, este análisis se hace únicamente para el periodo proyectado (2024-2050), puesto que los embalses no entrarán en operación antes de ello y se busca ser lo más preciso posible en relación con las escorrentías consideradas.

Primero, se corre el modelo WEAP, haciendo foco en la parte hidrológica, para obtener una serie mensual de afluentes a cada embalse. Se hace lo mismo con lo que se llamará "Aporte", que corresponden a todos los flujos de retorno y escorrentías aguas abajo del embalse que alimentan los nodos de demanda. Cabe destacar que este procedimiento se realiza en la situación sin embalse.

Segundo, a partir de los datos antes mencionados y una distribución empírica tipo Weibull se determinan curvas de variación estacional

---

<sup>2</sup> <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053200&idVersion=2015-01-15&idParte=>

proyectadas<sup>3</sup> para distintas probabilidades de excedencia, tanto para los afluentes como los aportes, presentes en el Anexo E.

Con lo anterior, sumado al caudal ecológico previamente determinado, la demanda total por embalse y considerando la temporada de llenado de Mayo a Agosto y temporada de riego de Septiembre a Abril, es posible generar balances hídricos en cada embalse según distintas probabilidades de excedencia. Estos balances ilustran de manera referencial la disponibilidad hídrica para cada embalse por temporada, sin ser del todo representativos, puesto que los supuestos utilizados son muy fuertes; como por ejemplo se considera un cumplimiento total de la demanda, no se operan los embalses, sino que se hace un balance a nivel temporal y no se asume evaporación ni pérdidas por infiltración. De manera general, se observan déficits hídricos considerables para probabilidades de excedencia altas, lo que indica posibles problemas en la seguridad de abastecimiento de los sectores considerados.

Finalmente, se determina la necesidad o no de incorporar *hedging*. Para esto, se hace un análisis del llenado de cada embalse, si en cada temporada los embalses logran llegar a su capacidad máxima con una frecuencia razonable (mayor al 90% de las temporadas), entonces la incorporación del *hedging* no será necesaria puesto que el racionamiento para la siguiente temporada no tendría sentido ya que el embalse de llenará de todas maneras.

### **3.1.5. Incorporación en el modelo**

Una vez determinada la regla de operación óptima a seguir por cada embalse, se decide modelar de dos maneras diferentes. Por un lado, se establece una regla de operación *exógena al modelo*, según los valores de demanda y caudales afluentes a cada embalse previamente determinados. Por el otro, mediante las herramientas a disposición del software WEAP, se establece una regla de operación *endógena al modelo*. Así, se puede comparar el desempeño de ambas metodologías; estos modelos de operación se catalogan de *previsión perfecta* y siguen la regla de operación estándar (ROE) en la ecuación (1.1):

---

<sup>3</sup> Las CVE se determinaron a partir de escorrentías mensuales de cada año (2024-2050) obtenidos del modelo WEAP

- Entrega exógena:

*Inputs:* Serie proyectada de afluentes a cada embalse; Demanda hídrica mensual (asociada al riego).

*Outputs:* Entregas del embalse mensuales ponderado según proporción de la temporada (Oferta/Demanda)

Para esto, en septiembre (inicio temporada de riego) se determina el almacenamiento en el embalse, y un factor  $\alpha$ , el cual se multiplica a la demanda de cada mes para determinar el desembalse mensual del embalse para la temporada en cuestión.

La ecuación (2) permite determinar el almacenamiento del embalse al inicio de la temporada a partir de:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si, } \sum_{May}^{Sep} \mathbf{Afluentes}_{mes_i} - \sum_{May}^{Sep} \mathbf{Demanda}_{mes_i} > \mathbf{Cap}_{embalse} \Rightarrow \mathbf{Almacenamiento} = \mathbf{Cap} \\ \text{Si no,} \qquad \qquad \qquad \mathbf{Almacenamiento} = \sum_{May}^{Sep} \mathbf{Afluentes}_{mes_i} - \sum_{May}^{Sep} \mathbf{Demanda}_{mes_i} \end{array} \right.$$

( 2 )

La ecuación (3) representa la proporción entre el agua disponible para la temporada y la demanda de la temporada:

$$\alpha = \frac{\mathbf{Almacenamiento} + \sum_{Sep}^{Abr} \mathbf{Afluente}_{mes_i}}{\sum_{Sep}^{Abr} \mathbf{Demanda}_{mes_i}} \quad ( 3 )$$

$$\mathbf{Entrega}_{mes_i} = \alpha * \mathbf{Demanda}_{mes_i} \quad ( 4 )$$

Para la temporada de no riego, si es que existe demanda, se desembalsa su totalidad.

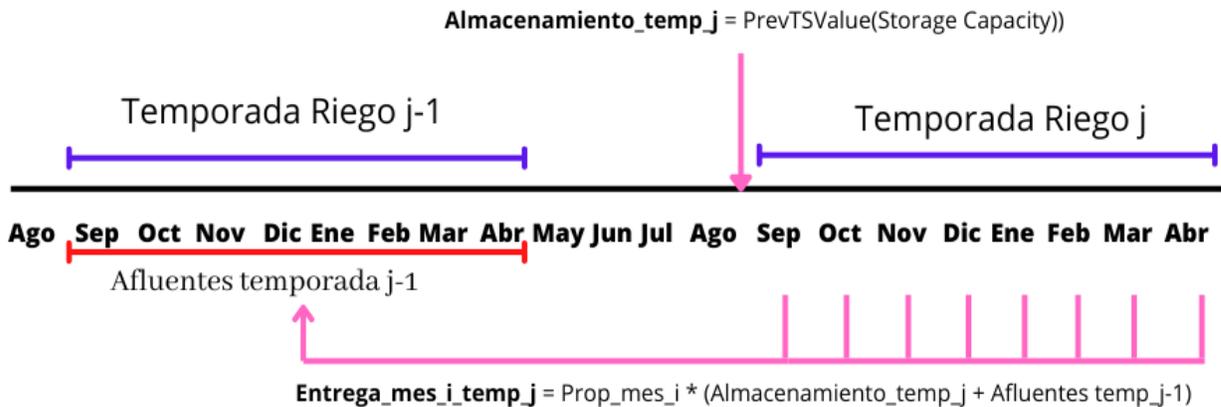
Luego, se ingresa la serie completa de desembalses calculada (mensual entre 2036-2050) al modelo WEAP, estableciendo la operación de cada embalse.

Finalmente, a partir de las series de demandas, afluentes mensuales al embalse y estas ecuaciones de balance, mediante la herramienta Excel, se genera un simulación por fuera del modelo, logrando obtener una serie de

volúmenes embalsados y entregas del embalse en la ventana temporal (2036-2050). Estas series serán catalogadas como *benchmark*, o *series de referencia*, y se utilizan como punto de comparación al momento de analizar los resultados entregados por WEAP.

- Regla de operación endógena:

Para esto se utiliza la herramienta de WEAP *PrevTSValue*, la cual permite extraer valores del final de pasos temporales anteriores, incluyendo operaciones matemáticas como la mediana, máximo, suma etc. Así, se crea una regla de operación para una temporada *J* a partir de la suma de afluentes de cada mes de la temporada anterior (*J-1*) y el almacenamiento al inicio de la temporada de riego (*J*). Para validar completamente esta RO se hace el supuesto que los afluentes en todas las temporadas son similares. El esquema en la Figura 3-1 lo ilustra.



**Figura 3-1: Regla de operación generada por dentro del modelo WEAP**

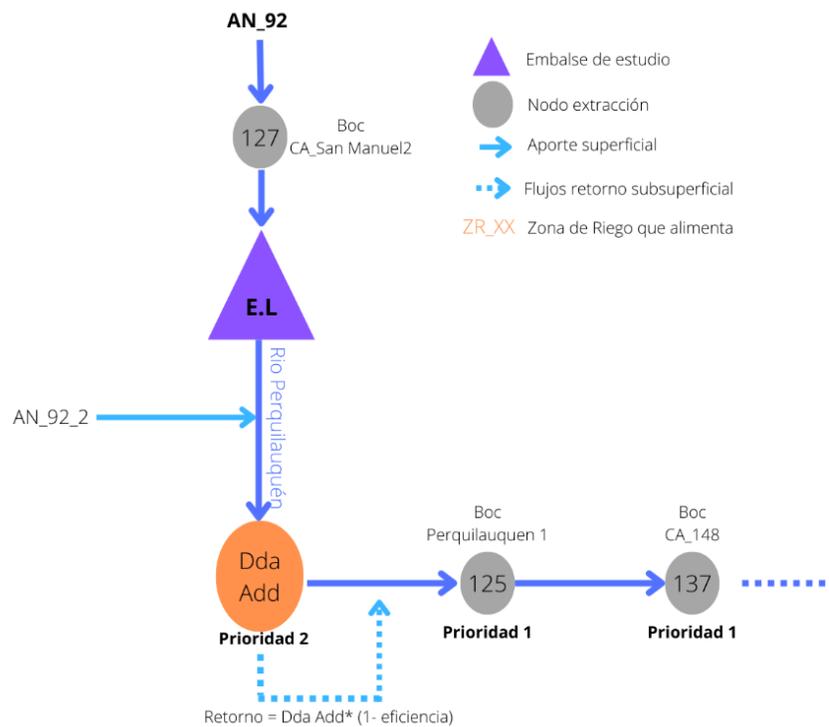
Donde la proporción de cada mes se determina por fuera del modelo y se define como:

$$Prop_{mes_i} = \frac{Demanda_{mes_i}}{\sum_{Sep}^{Abr} Demanda_{mes_i}} \quad (5)$$

Cabe destacar que, matemáticamente ambos modelos representan lo mismo, sin embargo, la gran diferencia es el desfase de los afluentes para

la regla de operación *endógena*. Por lo que se espera obtener resultados similares (suponiendo estacionariedad de afluentes) pero no idénticos.

La demanda adicional futura se ingresa al modelo como un nodo de demanda aguas abajo de cada embalse. Como el objetivo no es perjudicar a las bocatomas existentes, este nodo se ingresa con una *prioridad* de categoría inferior; el modelo va a priorizar la entrega a las bocatomas antiguas, independiente de que se encuentren aguas abajo. La Figura 3-2 toma como ejemplo el embalse Lavadero. *Otro supuesto importante es que la eficiencia de riego de este nuevo nodo de demanda es del 60% y el flujo de retorno generado se incorpora directamente al río.* Se escoge una eficiencia del 60% puesto que es la eficiencia promedio observada en el desarrollo del PEGH.



**Figura 3-2: Ejemplo de incorporación de la demanda adicional**

Finalmente, se incorporan los cuatro embalses en el mismo modelo WEAP y se simulan todos a la vez.

## 3.2. Análisis de los resultados

### 3.2.1. Indicadores de WEAP

Una vez obtenidas las series de tiempo mensuales de entregas y volúmenes de embalse, así como los caudales en otros puntos relevantes es posible analizar su efecto en los nodos de demanda. Así, para facilitar el análisis del desempeño de cada embalse, se utilizan directamente los indicadores ofrecidos por el programa. Estos indicadores corresponden a:

- *Cobertura*: El porcentaje del requerimiento de cada sitio de demanda que se cumple a nivel mensual (paso temporal), del 0 % (sin entrega de agua) al 100 % (entrega del requerimiento completo). El informe de cobertura brinda una evaluación rápida de qué tan bien se están satisfaciendo las demandas. Como la cobertura se calcula en cada paso de tiempo, se tiene una serie de coberturas mensuales. Este indicador mide la *vulnerabilidad* del sistema, relacionado a la cobertura hídrica.
- *Confiabilidad (Reliability)*: El porcentaje de los intervalos de tiempo (mensual) en los que la demanda de un sitio de demanda se satisfizo por completo. El valor entregado corresponde a lo relacionado a todo el periodo de modelación. Por ejemplo, si un sitio de demanda tiene demandas insatisfechas en 6 meses de un escenario de 10 años, la confiabilidad sería  $(10 * 12 - 6) / (10 * 12) = 95\%$ .

Los resultados de cobertura se muestran de manera relativa al escenario sin embalse. Estas se calculan como  $(A-B)/B * 100$ , donde *A* representa la comparada y *B* la del escenario sin proyecto, por lo que resultados positivos muestran buen rendimiento y negativos uno malo. Para la demanda adicional, al no existir en el escenario sin embalse (por defecto toma valor de 100%) se debe interpretar como  $100-X$ , donde *X* es lo que muestran los gráficos en la sección de resultados.

### 3.2.2. Cálculo de la seguridad de riego

Como complemento a los indicadores proporcionados directamente por WEAP, se calcula la seguridad de riego para cada embalse. La seguridad de riego se determina como el porcentaje de años dentro del periodo de simulación donde se entregó un volumen de agua tal que dicho año no se considera fallado. Para la determinación de *año fallado*, se adopta el criterio

de cálculo establecido por la Ley 18 450. Esto es, aquel en que un mes se entregue menos del 85% de la demanda o cuando en dos meses consecutivos se entregue menos del 90% de la demanda. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$SR = \frac{(N-N_f)*100}{N} [\%] \quad ( 6 )$$

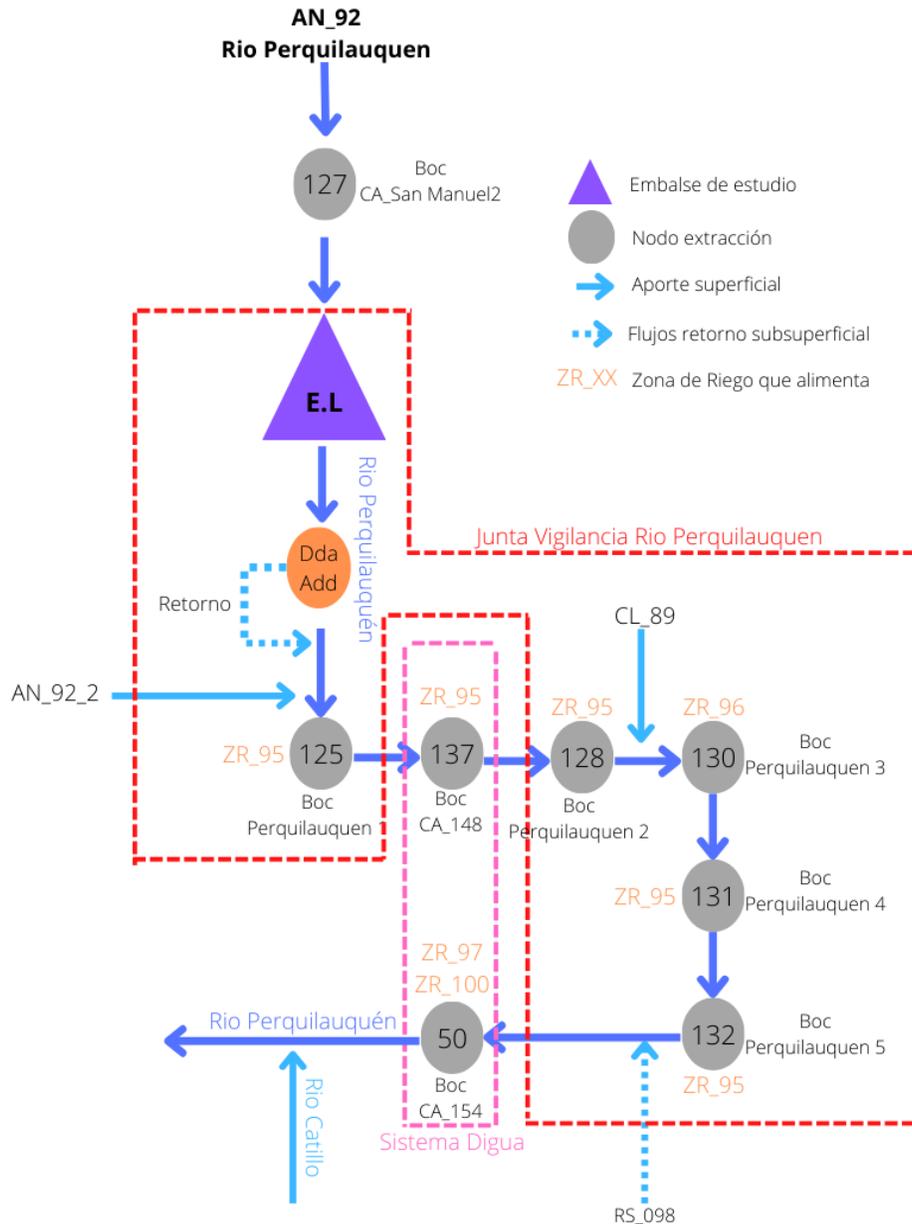
Donde: SR: Seguridad de Riego [%], N: Número de años simulados, N<sub>f</sub>: Número de años fallados.

En el marco de la memoria, se considera el indicador de cobertura como referencia del cumplimiento de la demanda para determinar los años fallados, y se determina una seguridad de riego del recurso superficial por zona de riego (ZR) beneficiada de cada embalse. De esta manera, la seguridad de riego si bien considera aspectos asociados a la vulnerabilidad del sistema debido a que mide por cuanto se falló en completar la demanda, se cataloga como un indicador de confiabilidad por temporada, y a diferencia de la confiabilidad antes mencionada esta si incluye un umbral de falla (o déficit admisible).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Embalse Lavadero

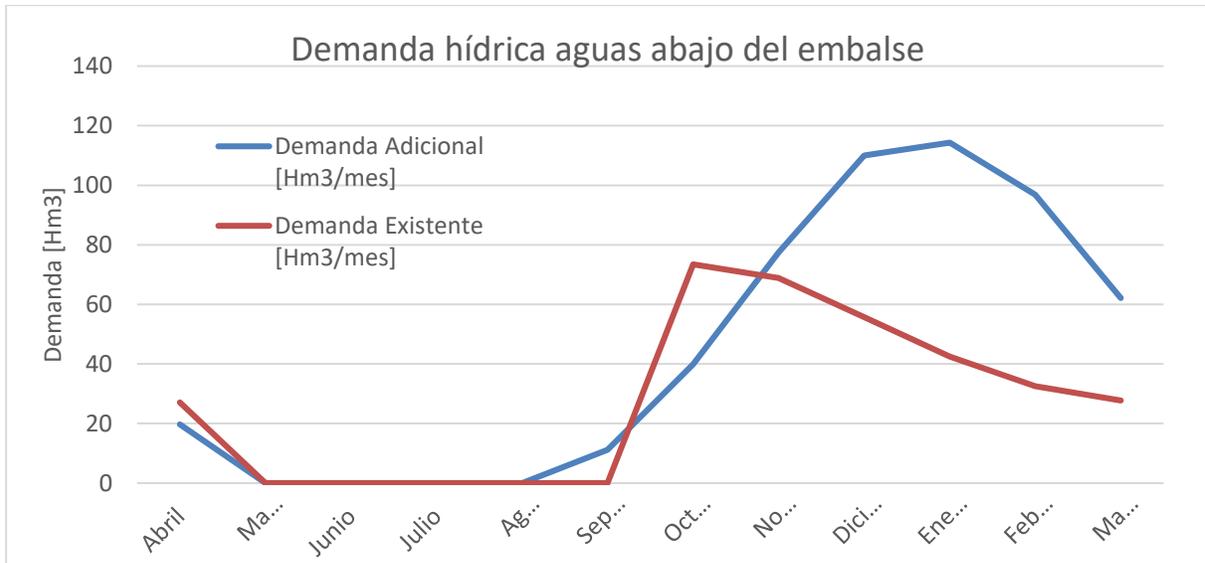
La topología del sistema para el embalse Lavadero se muestra en la Figura 4-1. Esta topología hace parte del modelo WEAP.



**Figura 4-1: Topología del sistema para el embalse Lavadero.**  
*Fuente: Elaboración propia basado en Modelo WEAP valle y costa (UTP Everis Chile-Hidrogestión, 2020)*

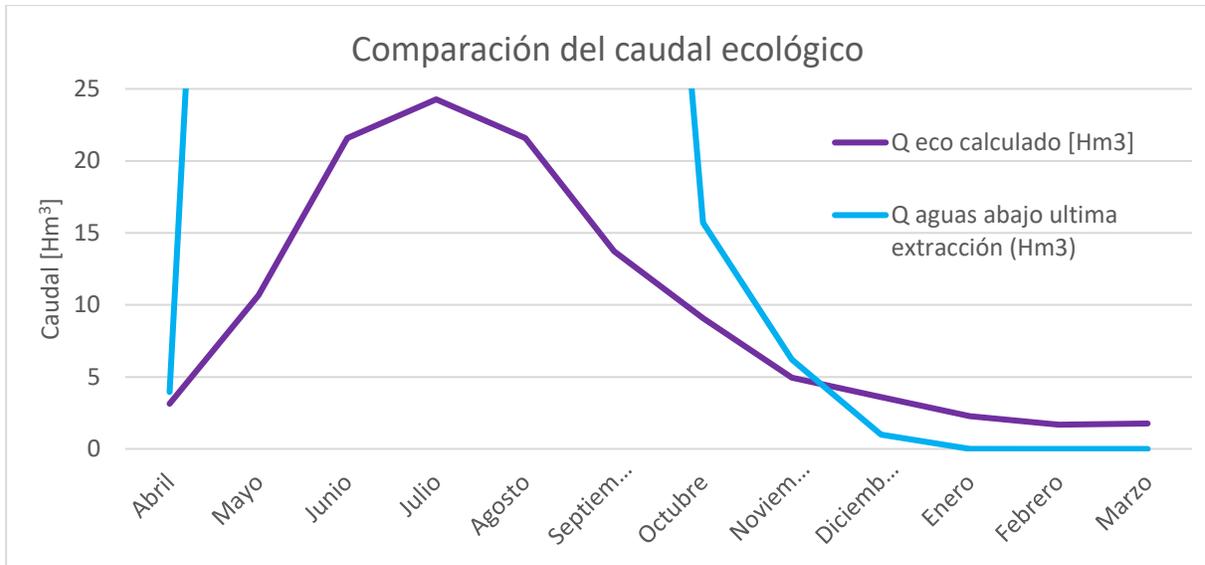
Para este embalse, se tiene más de un sistema o JV que se benefician de sus aguas, es decir, su operación podría ser más compleja de lo que se representa en la modelación y es una de las razones por las cuales se fija la tasa de reparto.

Luego, las demandas asociadas a este embalse se presentan en la Figura 4-2.



**Figura 4-2: Demanda hídrica actual (rojo) y adicional (azul) para el embalse Lavadero**

Según la metodología presentada y las curvas de variación estacional del Anexo E, la Figura 4-3 muestra el caudal ecológico calculado según la metodología de la sección 3.1.3, además del promedio mensual del caudal ecológico simulado en un escenario sin embalses bajo el nodo 50 de la topología en la Figura 4-1.



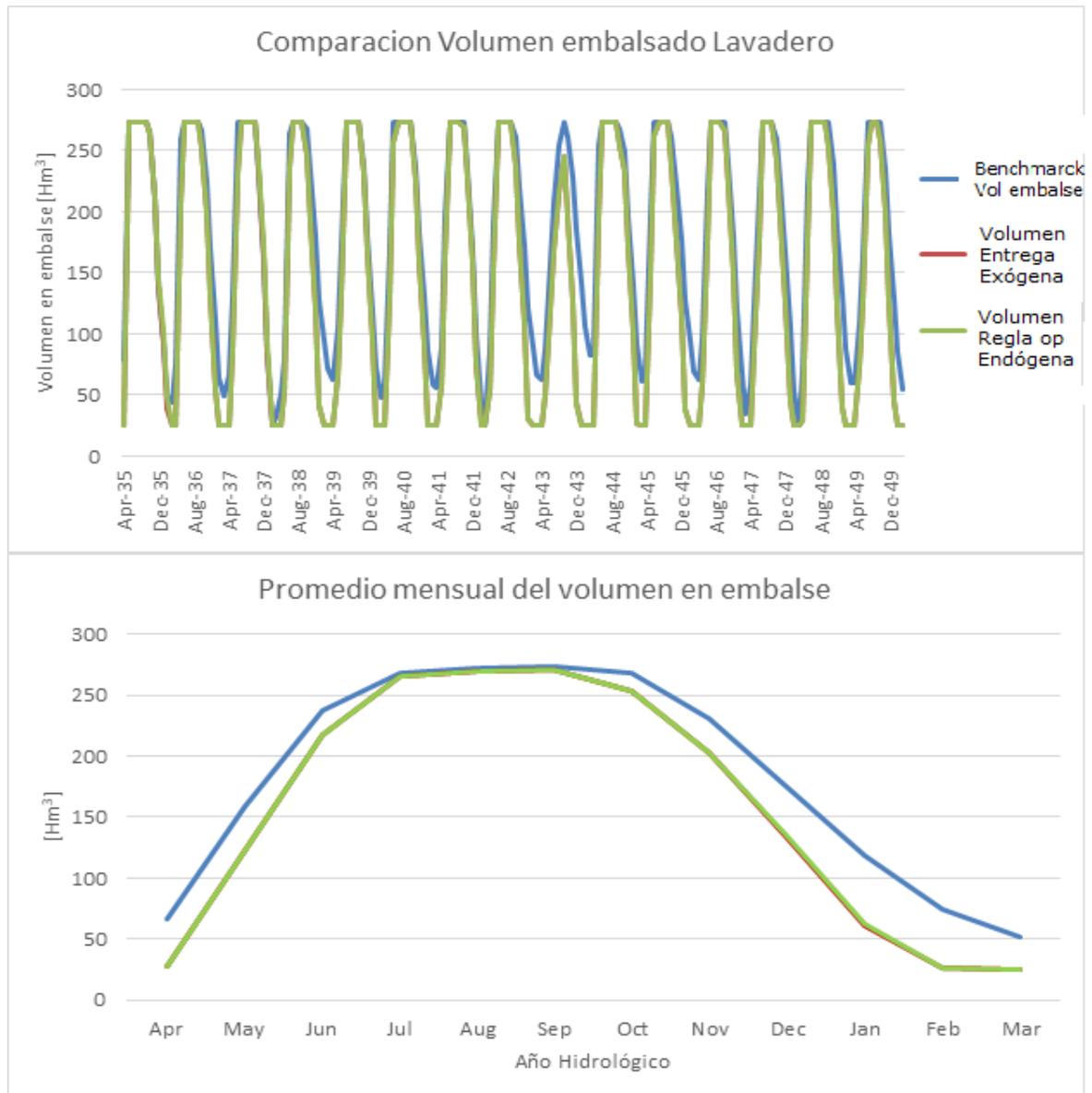
**Figura 4-3: Caudal ecológico calculado (morado) y promedio mensual simulado (azul) para el embalse Lavadero**

Luego, la disponibilidad hídrica del embalse según la metodología de cálculo de la sección 3.1.4, según diferentes probabilidades de excedencia se muestra en la Tabla 4-1, donde el color rojo indica un déficit hídrico y el azul una situación holgada. Este balance se hace bajo el nodo 50 del esquema en la Figura 4-1.

**Tabla 4-1: Análisis de disponibilidad hídrica para el embalse Lavadero**

	Promedio	Q <sub>50%</sub>	Q <sub>85%</sub>	Q <sub>95%</sub>
Disponibilidad (Mayo-Agosto) [Hm <sup>3</sup> ]	534	474	298	225
Disponibilidad (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	337	297	214	162
Demanda total + Q eco (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]		517		
Demanda total + Q eco (Mayo-Agosto) [Hm <sup>3</sup> ]		102		
Capacidad embalse [Hm <sup>3</sup> ]		273		
Almacenamiento embalse + Dispo (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	610	570	410	285
Disponibilidad por temporada [Hm <sup>3</sup> ]	93	53	-107	-232

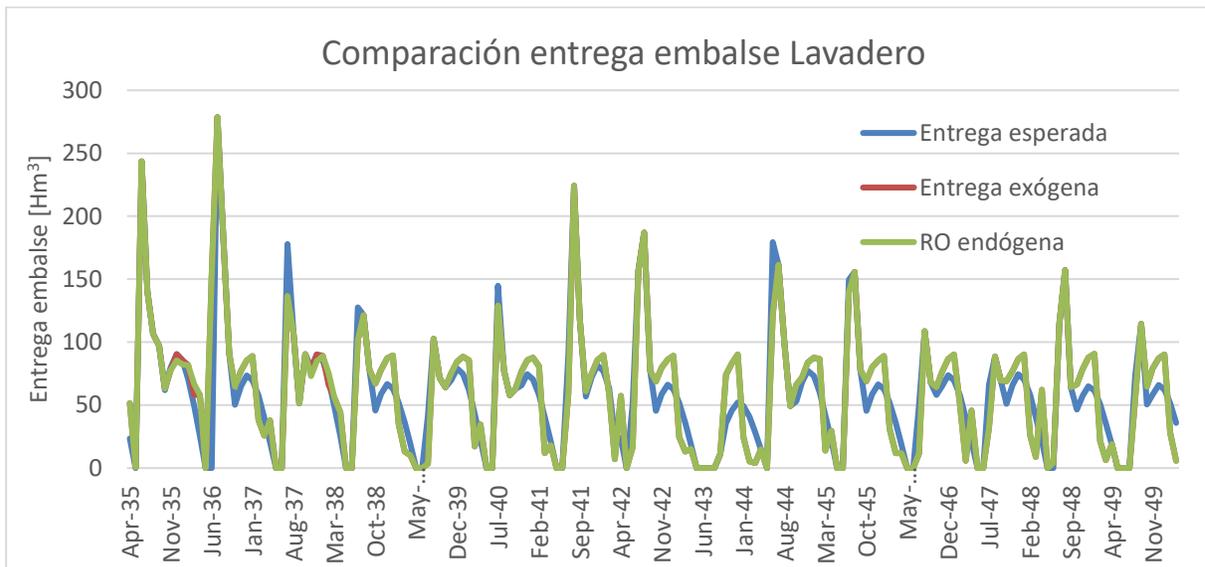
La Tabla 4-1 muestra que la disponibilidad entre mayo y agosto relacionada al  $Q_{85\%}$  es mayor a la capacidad del embalse. La Figura 4-4 exhibe el volumen embalsado en los 15 años de simulación, donde solo en una temporada el embalse no se llena (temporada 2043-2044), lo que equivale a una frecuencia de no llenado del 6,7%. Esta frecuencia es lo suficientemente pequeña como para *no considerar hedging y establecer una regla de operación estándar*.



**Figura 4-4: Serie del volumen embalsado (arriba) y promedio del volumen mensual (abajo) para el embalse Lavadero**

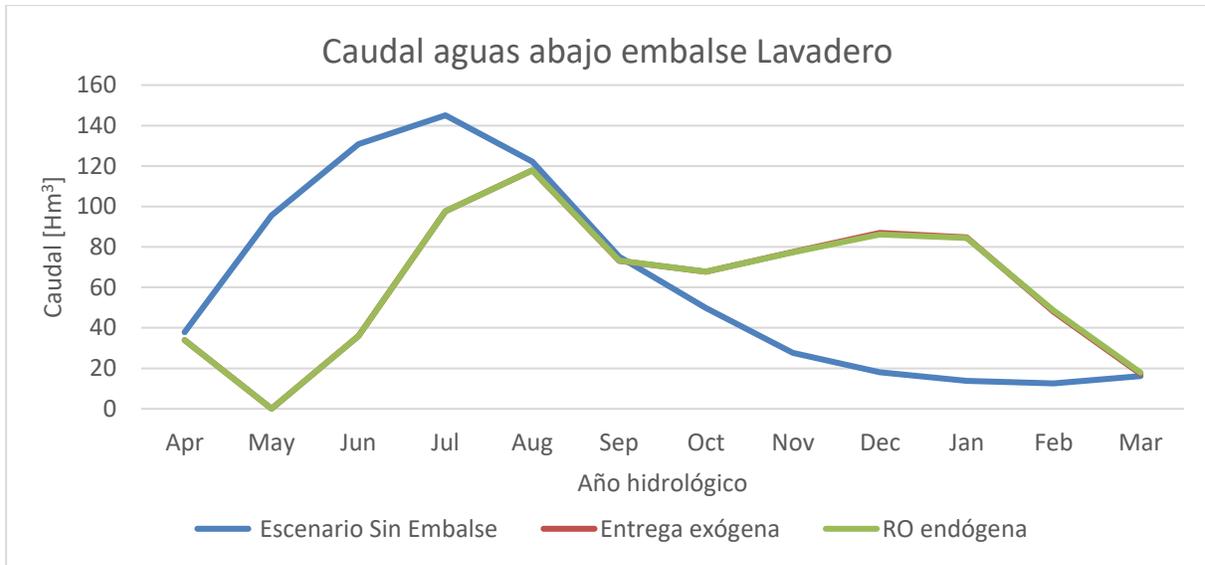
Luego, según la Tabla 4-1, para una probabilidad de excedencia del 85%, se cumple la condición de la ecuación (1.1). Así, *la entrega por temporada será igual al almacenamiento más los afluentes*.

Según las metodologías descritas en la sección 3.1.4, la Figura 4-5 muestra las entregas del embalse según las metodologías vistas para la *entrega exógena, la regla de operación endógena y la serie de referencia (entrega esperada)*.



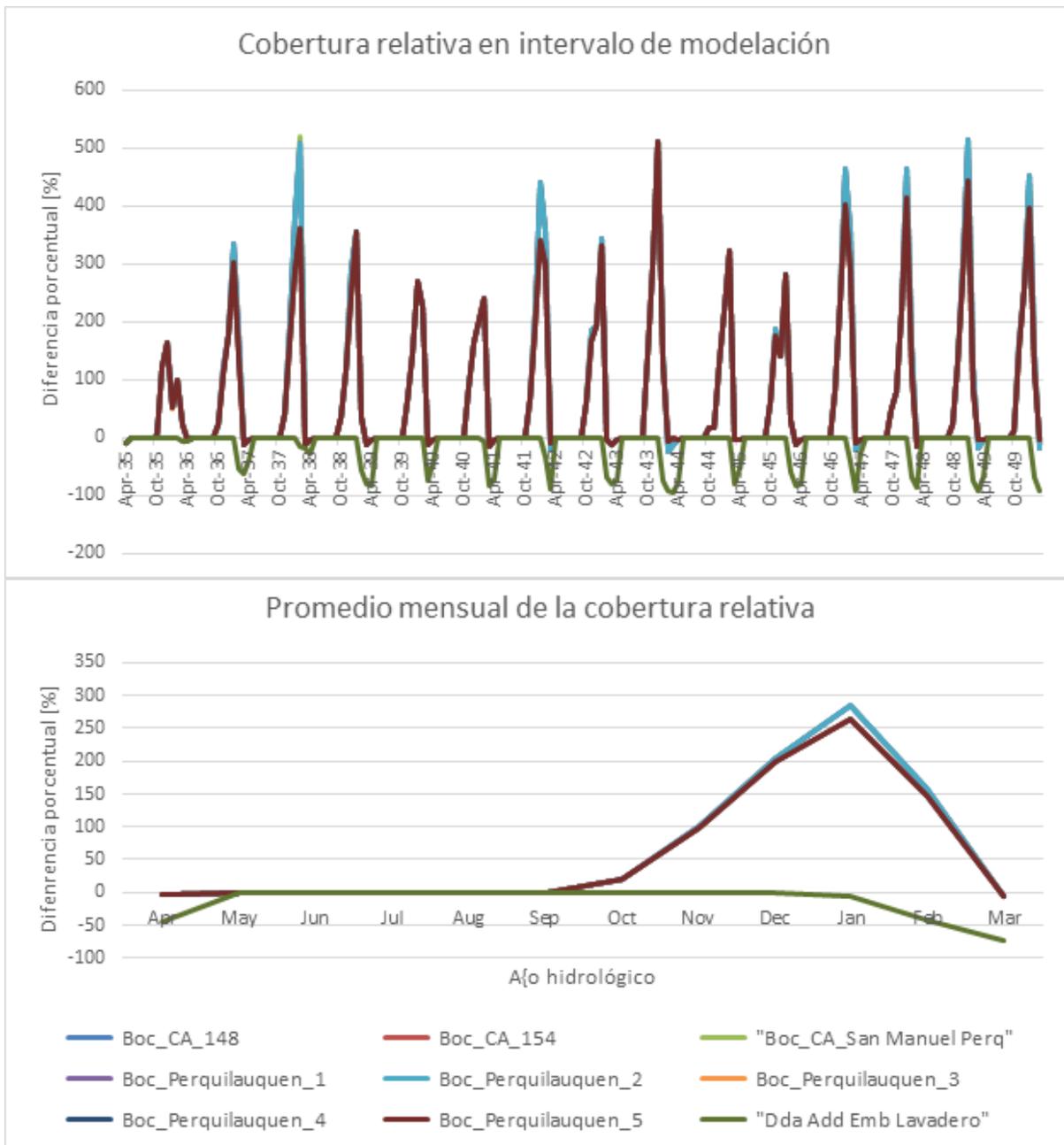
**Figura 4-5: Entregas simuladas del embalse Lavadero**

Además, la Figura 4-6 muestra el efecto de regulación interanual que este genera.



**Figura 4-6: Promedio mensual de caudales medidos por la simulación WEAP aguas abajo del embalse Lavadero**

A continuación, la Figura 4-7 presenta el efecto del embalse en las bocatomas beneficiadas aguas abajo, las cuales se pueden visualizar en la Figura 4-1. Cabe destacar que los resultados de cobertura se muestran de manera relativa al escenario sin embalse. Además, por cómo se planteó el problema, la demanda ambiental no cuenta con prioridad en el modelo, sino que solo se revisa su cumplimiento.



**Figura 4-7: Simulación de la cobertura relativa al escenario sin proyecto para el embalse Lavadero**

En este caso, a excepción de los meses de febrero, marzo y abril, para la demanda adicional, todas las bocatomas muestran buen desempeño.

Finalmente, como criterios de toma de decisión, la Tabla 4-2 presenta la *seguridad de riego* según la metodología establecida junto con el *indicador de confiabilidad* para cada zona de riego beneficiada.

**Tabla 4-2: Resultado final de los indicadores de toma de decisión para el embalse Lavadero**

	ZR_100	ZR_95	ZR_96	ZR_97	Dda Adicional
Magnitud demanda por temporada [Hm <sup>3</sup> ]	35	30	20	10	150
Confiabilidad Escenario Sin Embalses [%]	66	52	61	60	-
Confiabilidad Escenario Embalse [%]	77	67	67	69	89
Confiabilidad Escenario Embalse (1/2 Dda Adicional) [%]	79	67	68	70	90
SR Escenario Sin Embalse [%]	0	0	0	0	-
SR Escenario Embalse [%]	60	13	7	13	7
SR Escenario Embalse (1/2 Dda Adicional) [%]	60	20	27	40	13
Proporción cubierta por aguas subterráneas [%]	14	7	4	11	0

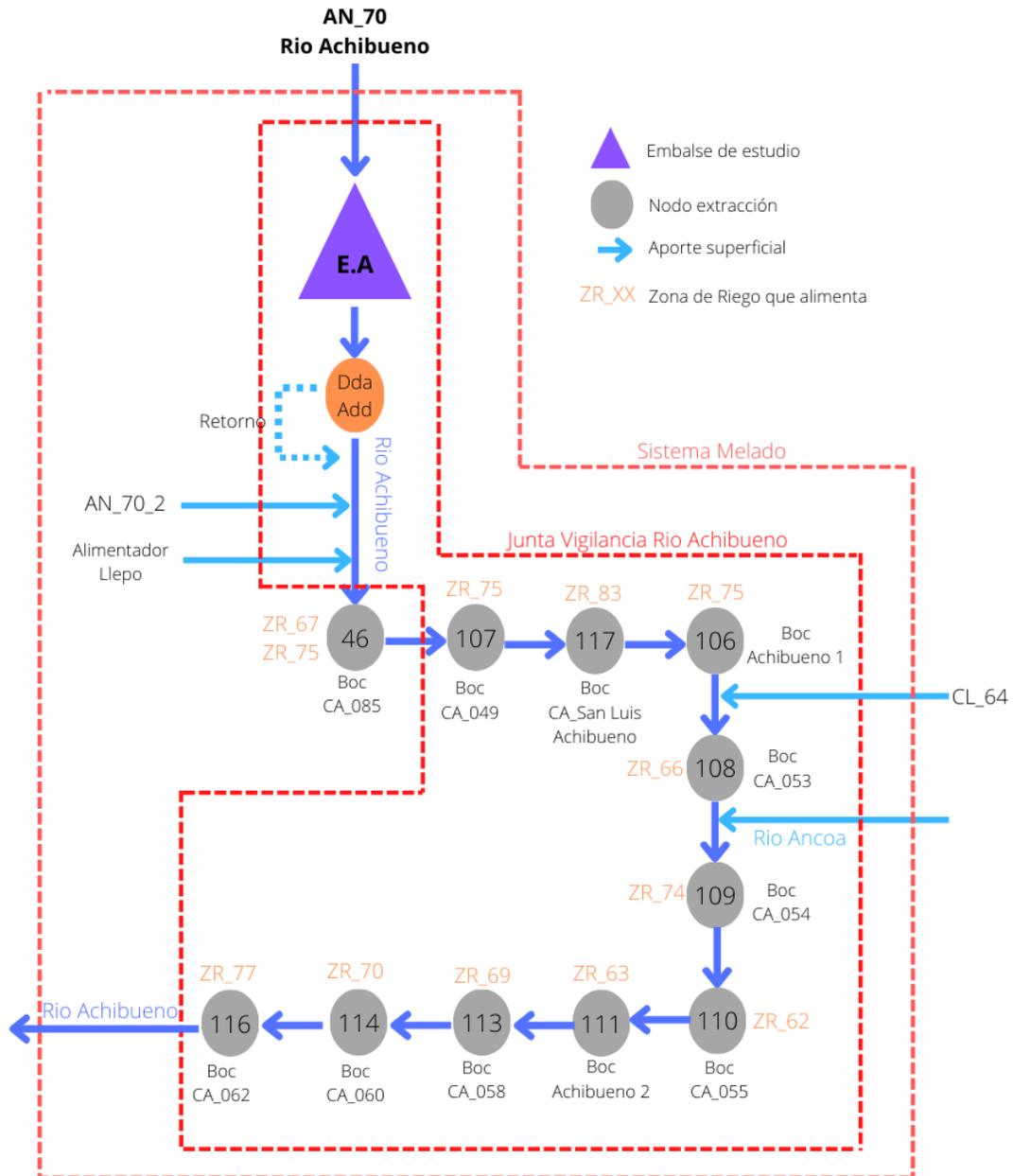
Tal como se muestra en la Figura 4-4 y Figura 4-5, no es evidente predecir exactamente lo que va a entregar el modelo WEAP, lo que se ve debido a la diferencia que se observa entre la serie referencia y la simulada. De hecho, a inicios de temporada el embalse entrega más de lo que se demanda, lo que genera un déficit hídrico para finales de temporada. Para la temporada 43-44, al ser una temporada particularmente seca, se espera amortiguar las entregas, sin embargo, el modelo WEAP entrega todo a inicios de temporada. Esto se explica por el efecto de las prioridades de cada nodo aguas abajo del embalse.

Luego, con respecto a los indicadores, se puede observar que la presencia de este embalse viene a mejorar la situación sin proyecto, donde, en cada caso, se observa una mejora en la cobertura, confiabilidad y seguridad de riego. No obstante, en relación con los resultados obtenidos se ve que el sector presenta una sobre demanda hídrica. De hecho, los cálculos de seguridad de riego según resultados de simulación muestran valores nulos para la situación sin proyecto y una leve mejora en el escenario con embalse, sin llegar a una seguridad del 85%. Esto ocurre independiente del hecho que el PEGH considera una superficie de riego inferior a la declarada por las organizaciones de usuarios, por lo que en la realidad la situación es aún más crítica. Sin embargo, si se compara la magnitud de la demanda por temporada en la Tabla 4-2, con el volumen del embalse, se debería cubrir completamente la demanda, lo que según los resultados de la simulación no ocurre. Esto se puede deber a; pérdidas de conducción, extracciones en las bocatomas no destinadas a las zonas de riego establecidas, flujos de retorno no considerados, malas eficiencias de riego y superficies de riego potencialmente cubiertas por el embalse no consideradas debido a como se establecieron las ZR en el modelo WEAP.

De lo anterior, para el embalse Lavadero, desde un punto de vista hídrico y de repartición interanual del recurso existe una mejora. Sin embargo, si se quiere tener resultados más precisos es necesario revisar y ajustar la superficie cultivada para asegurar una seguridad de riego del 85%.

## 4.2. Embalse Achibueno

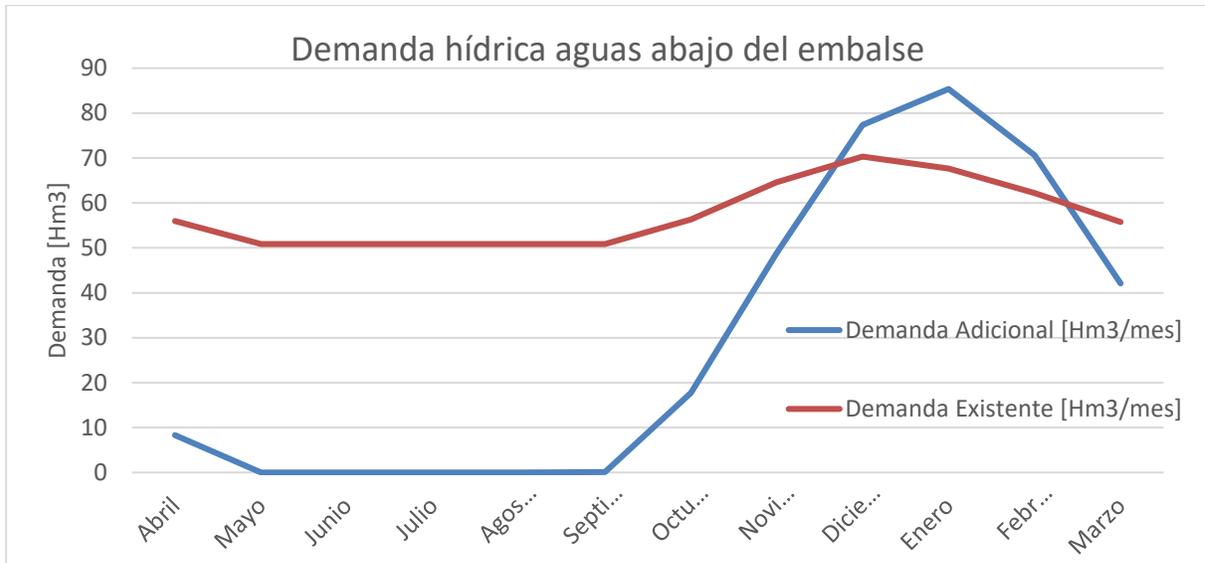
La topología del sistema para el embalse Achibueno se muestra en la Figura 4-8. Esta topología hace parte del modelo WEAP.



**Figura 4-8: Topología del sistema para el embalse Achibueno.**  
*Fuente: Elaboración propia basado en Modelo WEAP valle y costa (UTP Everis Chile-Hidrogestión, 2020)*

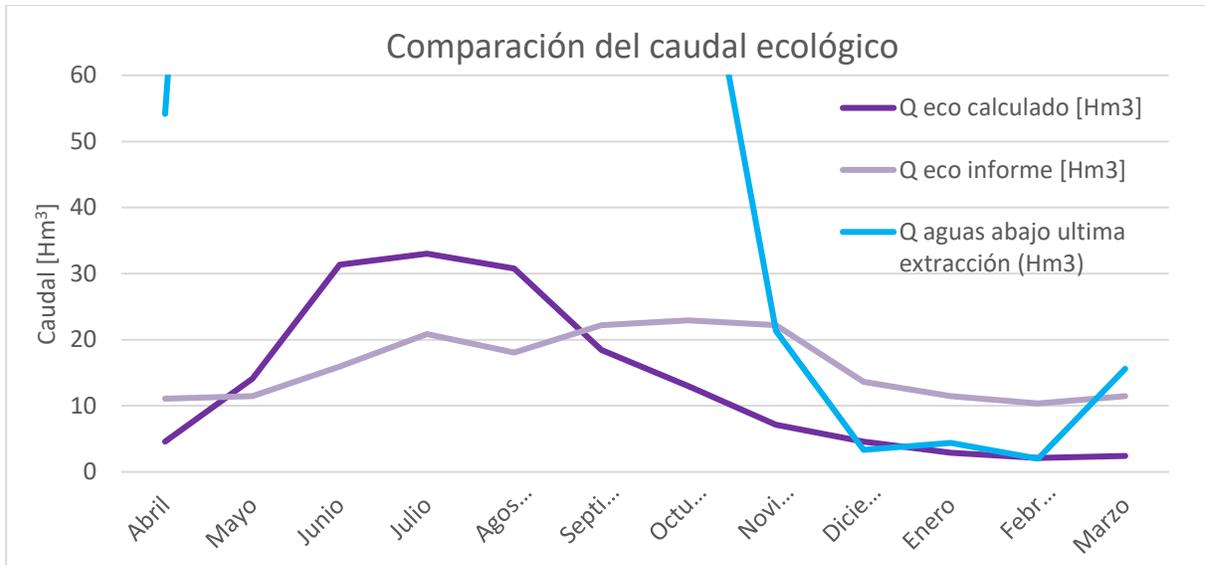
Para este embalse, se tiene más de un sistema o JV que se benefician de sus aguas, es decir, su operación podría ser más compleja de lo que se representa en la modelación y es una de las razones por las cuales se fija la tasa de reparto.

Luego, las demandas asociadas a este embalse se presentan en la Figura 4-9.



**Figura 4-9: Demanda hídrica actual (rojo) y adicional estimada (azul) para el embalse Achibueno**

Según la metodología presentada y las curvas de variación estacional del Anexo E, la Figura 4-10 muestra el caudal ecológico calculado según la metodología de la sección 3.1.3, además del promedio mensual del caudal ecológico simulado en un escenario sin embalses bajo el nodo 116 de la topología en la Figura 4-8.



**Figura 4-10: Caudal ecológico calculado (morado) y promedio mensual simulado (azul) para el embalse Achibueno<sup>4</sup>**

Luego, la disponibilidad hídrica del embalse según la metodología de cálculo de la sección 3.1.4, según diferentes probabilidades de excedencia se muestra en la Tabla 4-3, donde el color rojo indica un déficit hídrico. Este balance se hace bajo el nodo 116 del esquema en la Figura 4-8.

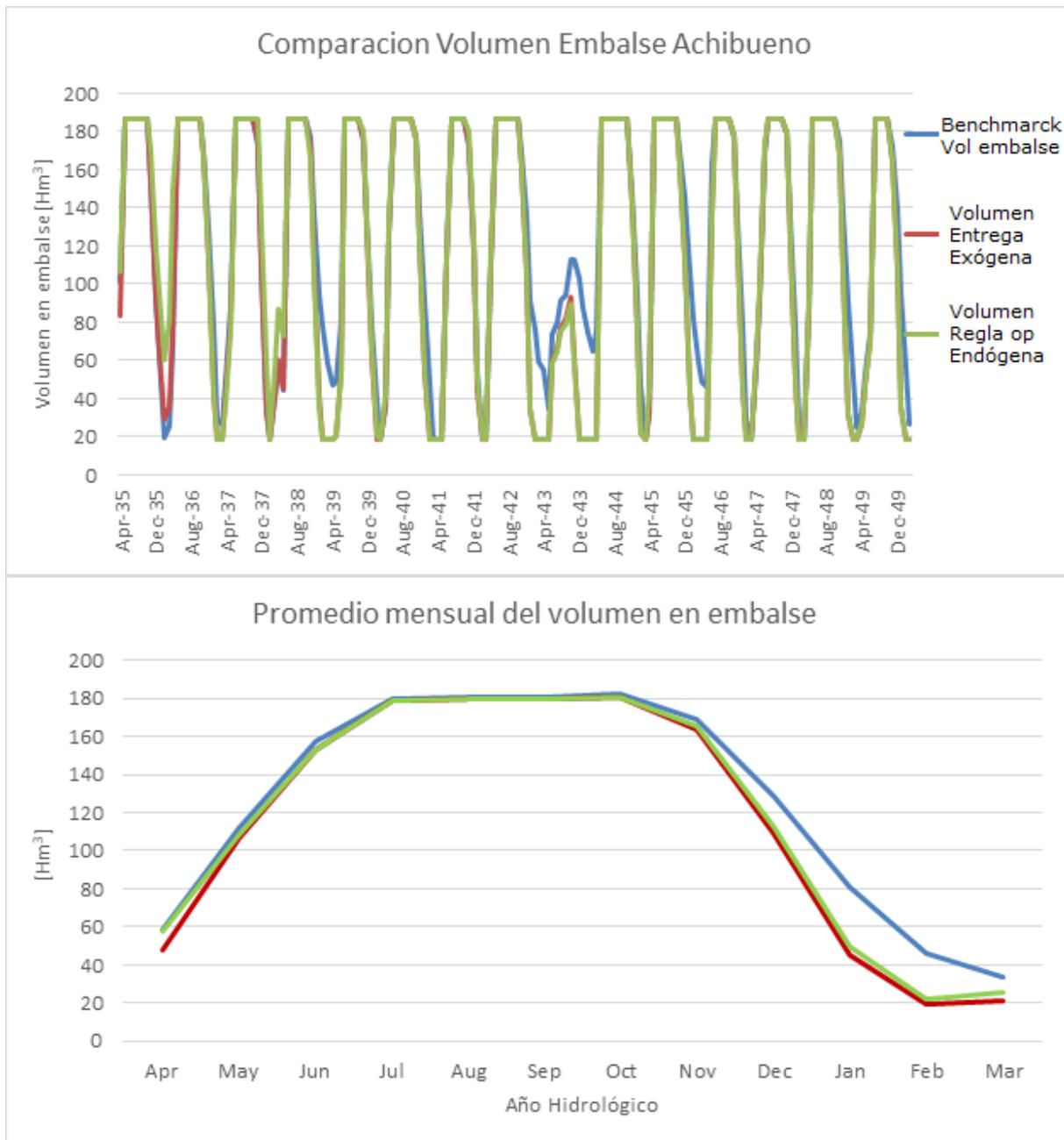
---

<sup>4</sup> Morado claro corresponde al extraído del informe de prefactibilidad: "Estudio de prefactibilidad "Mejoramiento del sistema de riego en río Achibueno, región del Maule", (CNR, 2014)

**Tabla 4-3: Análisis de disponibilidad hídrica para el embalse Achibueno**

	<b>Promedio</b>	<b>Q<sub>50%</sub></b>	<b>Q<sub>85%</sub></b>	<b>Q<sub>95%</sub></b>
Disponibilidad (Mayo-Agosto) [Hm <sup>3</sup> ]	697	579	317	234
Disponibilidad (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	622	540	378	269
Demanda total + Q eco (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	934			
Demanda total + Q eco (Mayo-Agosto) [Hm <sup>3</sup> ]	375			
Capacidad embalse [Hm <sup>3</sup> ]	187			
Almacenamiento embalse + Dispo (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	809	727	565	367
Disponibilidad por temporada [Hm <sup>3</sup> ]	<b>-125</b>	<b>-207</b>	<b>-369</b>	<b>-568</b>

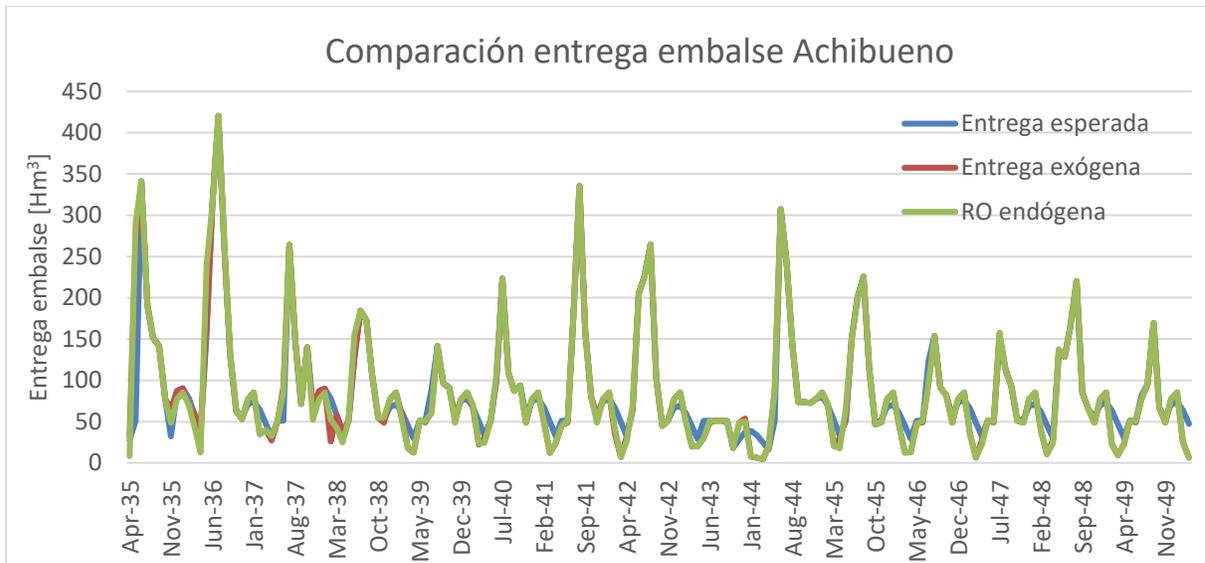
La Tabla 4-3 muestra que la disponibilidad entre mayo y agosto relacionada al Q<sub>85%</sub> es mayor a la capacidad del embalse. La Figura 4-11 exhibe el volumen embalsado en los 15 años de simulación, donde solo en una temporada el embalse no se llena (temporada 2043-2044), lo que equivale a una frecuencia de no llenado del 6,7%. Esta frecuencia es lo suficientemente pequeña como para *no considerar hedging y establecer una regla de operación estándar*.



**Figura 4-11: Serie del volumen embalsado (arriba) y promedio del volumen mensual (abajo) para el embalse Achibueno**

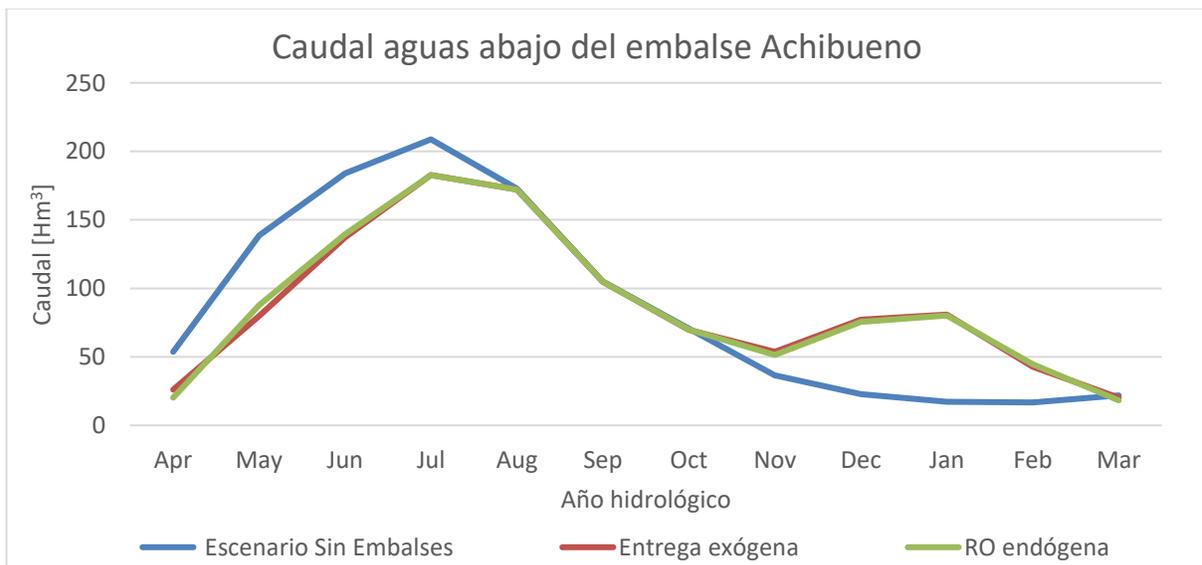
Luego, según la Tabla 4-3, para una probabilidad de excedencia del 85%, se cumple la condición de la ecuación (1.1). Así, *la entrega por temporada será igual al almacenamiento más los afluentes.*

Según las metodologías vistas en la sección 3.1.4, la Figura 4-12 muestra las entregas del embalse según las metodologías vistas para la *entrega exógena*, la *regla de operación endógena* y la *serie de referencia (entrega esperada)*.



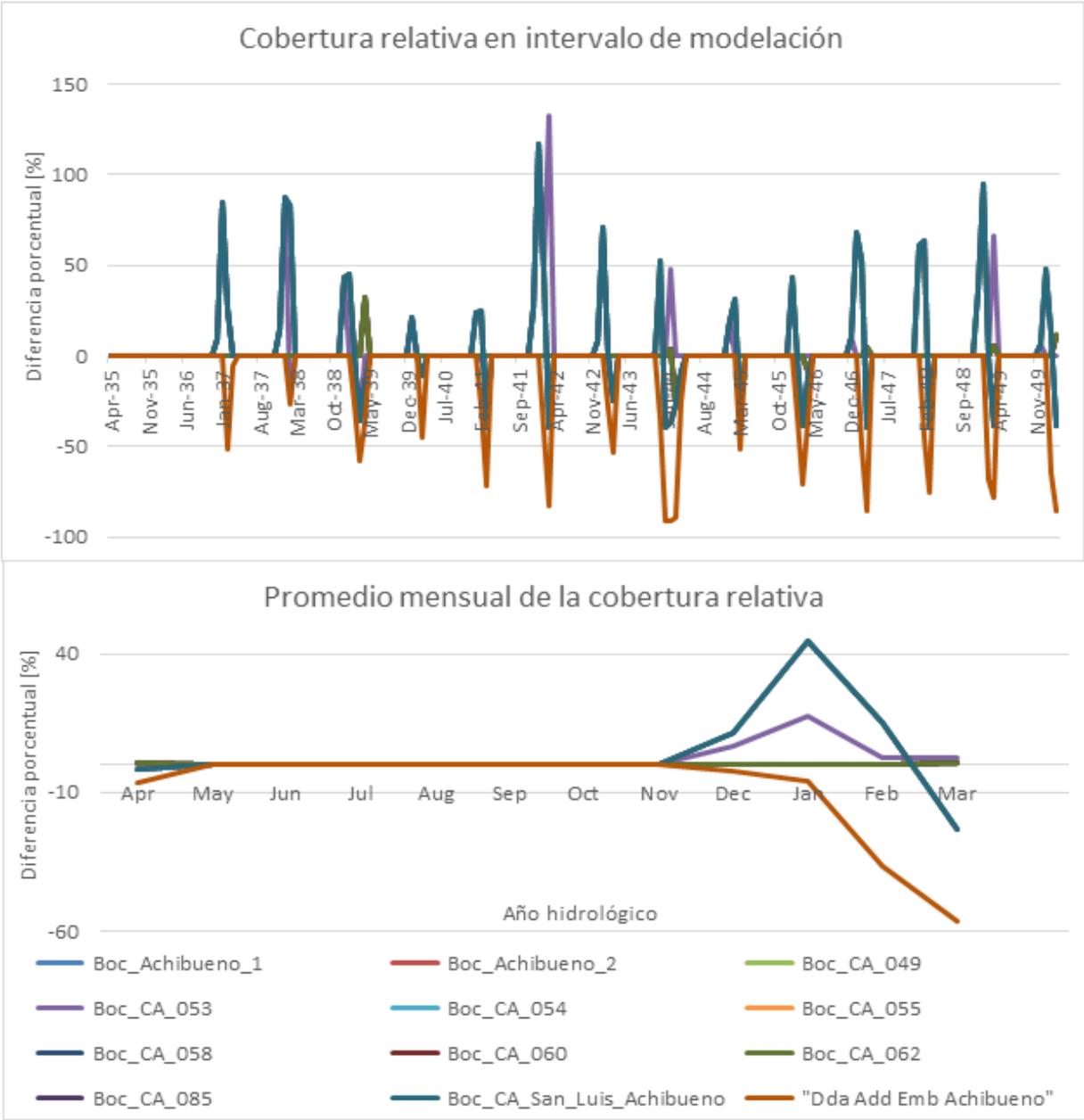
**Figura 4-12: Entregas simuladas del embalse Achibueno**

Además, la Figura 4-13 muestra el efecto de regulación interanual que este genera.



**Figura 4-13: Promedio mensual de caudales medidos por la simulación WEAP aguas abajo del embalse Achibueno**

A continuación, la Figura 4-14 presenta el efecto del embalse en las bocatomas beneficiadas aguas abajo. Cabe destacar que los resultados de cobertura se muestran de manera relativa al escenario sin embalse. Además, por cómo se planteó el problema, la demanda ambiental no cuenta con prioridad en el modelo, sino que solo se revisa su cumplimiento.



**Figura 4-14: Simulación de la cobertura relativa al escenario sin proyecto para el embalse Achibueno**

Las bocatomas que presentan mal rendimiento a fines de temporada son: *Boc\_Achibueno\_1*, *Boc\_0\_49*, *Boc\_0\_85* y *Boc\_San\_Luis\_Achibueno*, las cuales no reciben los aporte de la escorrentía "CL\_64" ni del río Ancoa. Además, para fines de la temporada (marzo) el embalse se encuentra prácticamente vacío, es decir, lo que perciben las bocatomas es la escorrentía natural del río Achibueno. De esta manera, independiente de la presencia del embalse, las bocatomas reciben menos agua y disminuyen su cobertura. También, se muestra que hasta diciembre es posible cubrir el 100% de la demanda adicional, resultado que disminuye hacia finales de la temporada de riego.

Finalmente, como criterios de toma de decisión, en la Tabla 4-4 se presenta la *seguridad de riego* según la metodología establecida junto con el *indicador de confiabilidad* para cada zona de riego beneficiada.

**Tabla 4-4: Resultado final de los indicadores de toma de decisión para el embalse Achibueno**

	ZR_62	ZR_63	ZR_67	ZR_69	ZR_70	ZR_74	ZR_75	ZR_77	ZR_83	Dda Adicional
Magnitud demanda por temporada [Hm <sup>3</sup> ]	8	40	1.0	6	11	2	70	6	10	300
Confiabilidad Escenario Sin Embalse [%]	100	82	95	92	77	100	81	94	100	-
Confiabilidad Escenario Embalse [%]	100	90	96	92	77	100	81	94	99	92
Confiabilidad Escenario Embalse (1/2 Dda Adicional) [%]	100	91	96	92	77	100	85	94	99	97
SR Escenario Sin Embalse [%]	100	27	73	93	7	100	7	93	100	-
SR Escenario Embalse [%]	100	93	100	93	7	100	27	93	93	20
SR Escenario Embalse (1/2 Dda Adicional) [%]	100	93	100	93	7	100	27	93	93	73
Proporción cubierta por aguas subterráneas [%]	22	5	0	0	7	0	7	0	0	0

Al igual que para el embalse Lavadero, la Figura 4-11 y Figura 4-12, muestran que no es evidente predecir exactamente lo que va a entregar el modelo WEAP. De hecho, tomando el mismo ejemplo, las entregas para la

temporada 43-44 deberían ser amortiguadas, sin embargo, al no disminuir las demandas (independiente de que sea un año seco) el modelo busca cubrirlas a inicios de temporada quedando el embalse rápidamente sin agua.

Luego, la temporada 35-36 muestra diferencias notables para la *RO endógena*. Según el modelo WEAP, el embalse entró en operación el año 2036, por lo que esta temporada representa una condición de borde. La *entrega exógena* se muestra similar a la *serie referencia* puesto que la entrega estuvo fijada con anterioridad y no depende de ninguna condición inicial.

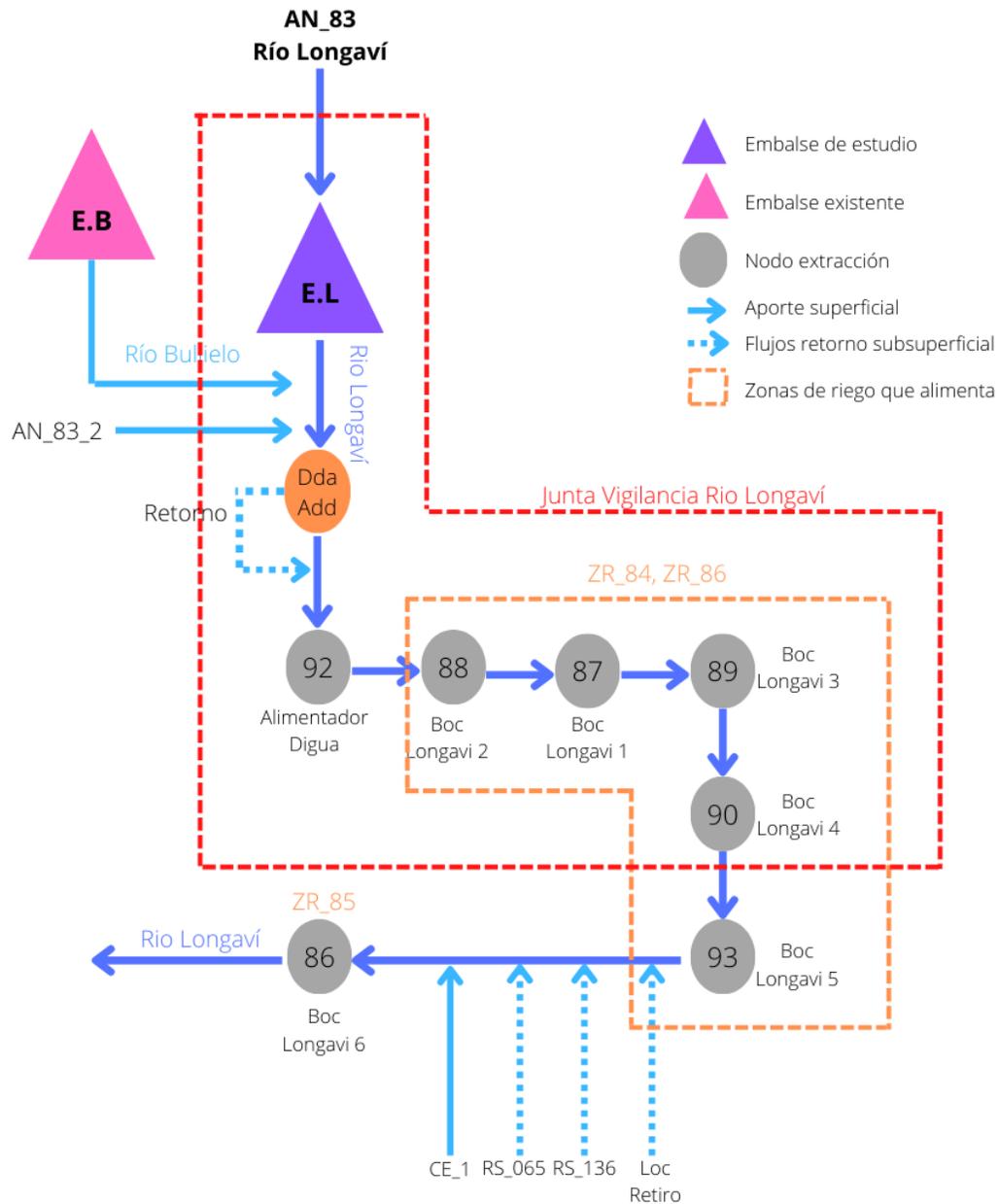
Con respecto a la cobertura en las bocatomas beneficiadas, se puede observar que presentan problemas para finales de la temporada de riego (marzo-abril). Esto se debe a dos razones principales; el embalse se queda sin agua y las escorrentías de salida de cada subcuenca (aportes aguas abajo del embalse) se ven disminuidas por el efecto de la incorporación de una nueva superficie cultivada.

Luego, en el escenario sin embalse existen cuatro zonas de riego que no cumplen la SR del 85%, resultado que se mejora en el escenario con proyecto, con tan solo dos ZR que no cumplen el criterio (ZR\_70 y ZR\_75). La confiabilidad se mantiene bastante elevada mostrando una baja frecuencia de falla en el sistema. También, según los resultados de la simulación, la disminución de la demanda adicional no parece tener un efecto en la cobertura de las ya existentes, pero sí logra aumentar considerablemente la seguridad de riego de la añadida. De hecho, si se compara la magnitud de la demanda por temporada en la Tabla 4-4 con la capacidad del embalse, para no exigir tanto al sistema, es mucho más razonable emplear la mitad de la demanda adicional.

Finalmente, para el embalse Achibueno, de un punto de vista hídrico y según los indicadores existe una mejora, sin embargo, es necesario repartir de mejor manera el recurso en la temporada para evitar los déficit observados en marzo y abril. Además, se debe disminuir la superficie cultivada de la ZR\_70 y 75 para asegurar una SR del 85%.

### 4.3. Embalse Longaví

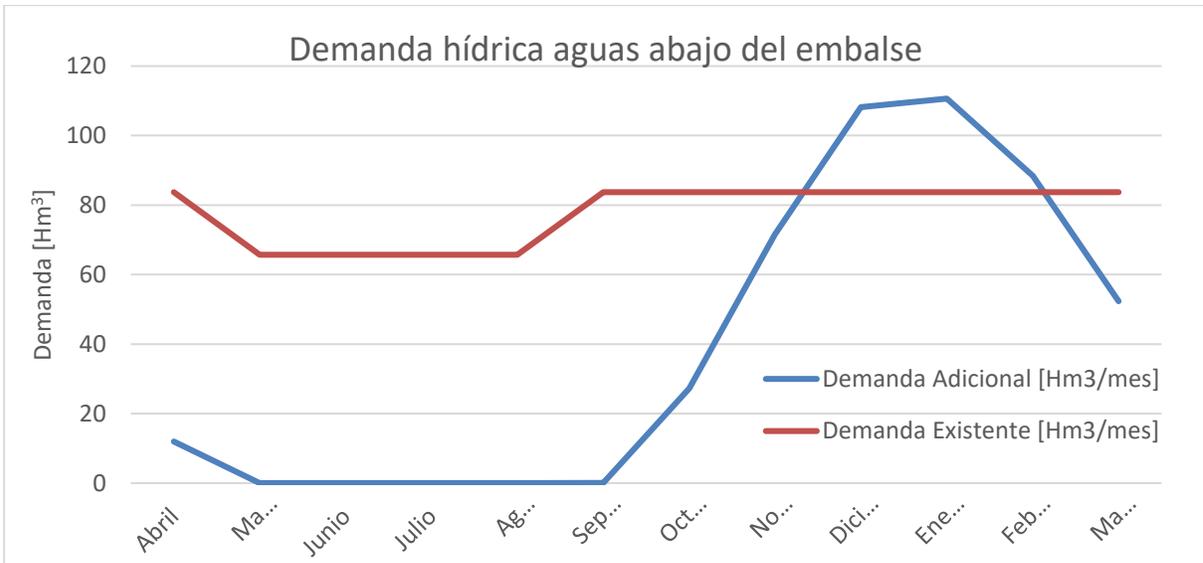
La topología del sistema para el embalse Longaví se muestra en la Figura 4-15. Esta topología hace parte del modelo WEAP.



**Figura 4-15: Topología del sistema para el embalse Longaví.** Fuente: Elaboración propia basado en Modelo WEAP valle y costa (UTP Everis Chile-Hidrogestión, 2020)

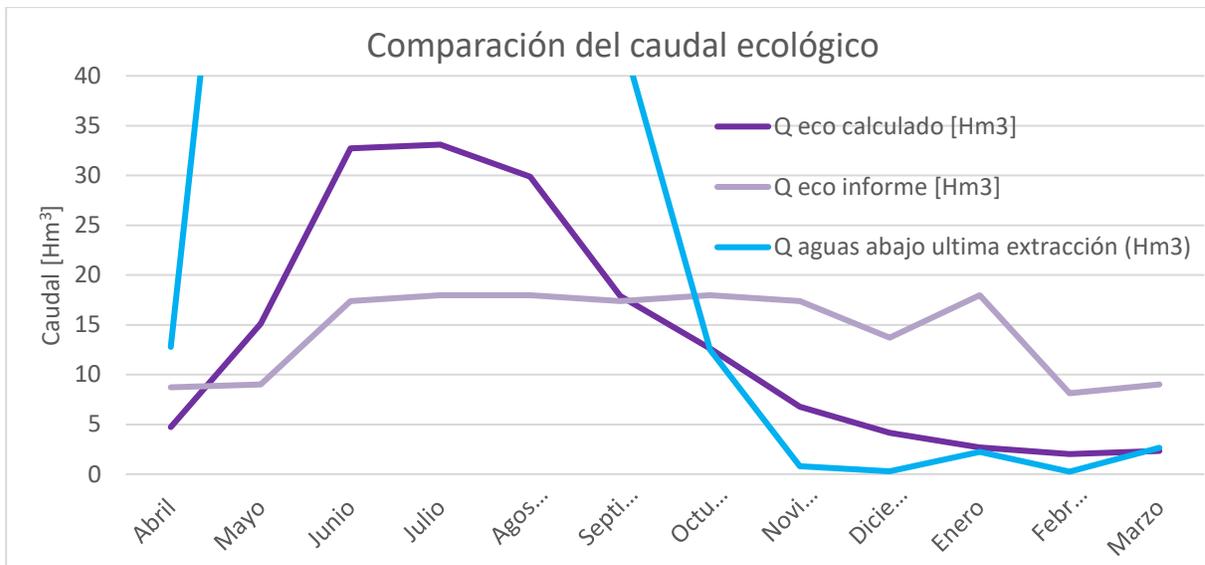
Para el embalse Longaví, si bien todas las bocatomas forman parte de una única JV, estas también se ven influenciadas por el embalse Bullileo, por lo que sus RO deberían ser trabajadas en conjunto.

Luego, las demandas asociadas a este embalse se presentan en la Figura 4-16. Se recuerda que estas demandas fueron estimadas a partir de una tasa de reparto fija, razón de la monotonía estacional observada.



**Figura 4-16: Demanda hídrica actual (rojo) y adicional estimada (azul) para el embalse Longaví**

Según la metodología presentada y las curvas de variación estacional del Anexo E, la Figura 4-17 muestra el caudal ecológico calculado según la metodología de la sección 3.1.3, además del promedio mensual del caudal ecológico simulado en un escenario sin embalses bajo el nodo 86 de la topología en la Figura 4-15.



**Figura 4-17: Caudal ecológico calculado (morado) y promedio mensual simulado (azul) para el embalse Longaví<sup>5</sup>**

Luego, la disponibilidad hídrica del embalse según la metodología de cálculo de la sección 3.1.4, según diferentes probabilidades de excedencia se muestra en la Tabla 4-5, donde el color rojo indica un déficit hídrico. Este balance se hace bajo el nodo 86 del esquema en la Figura 4-15.

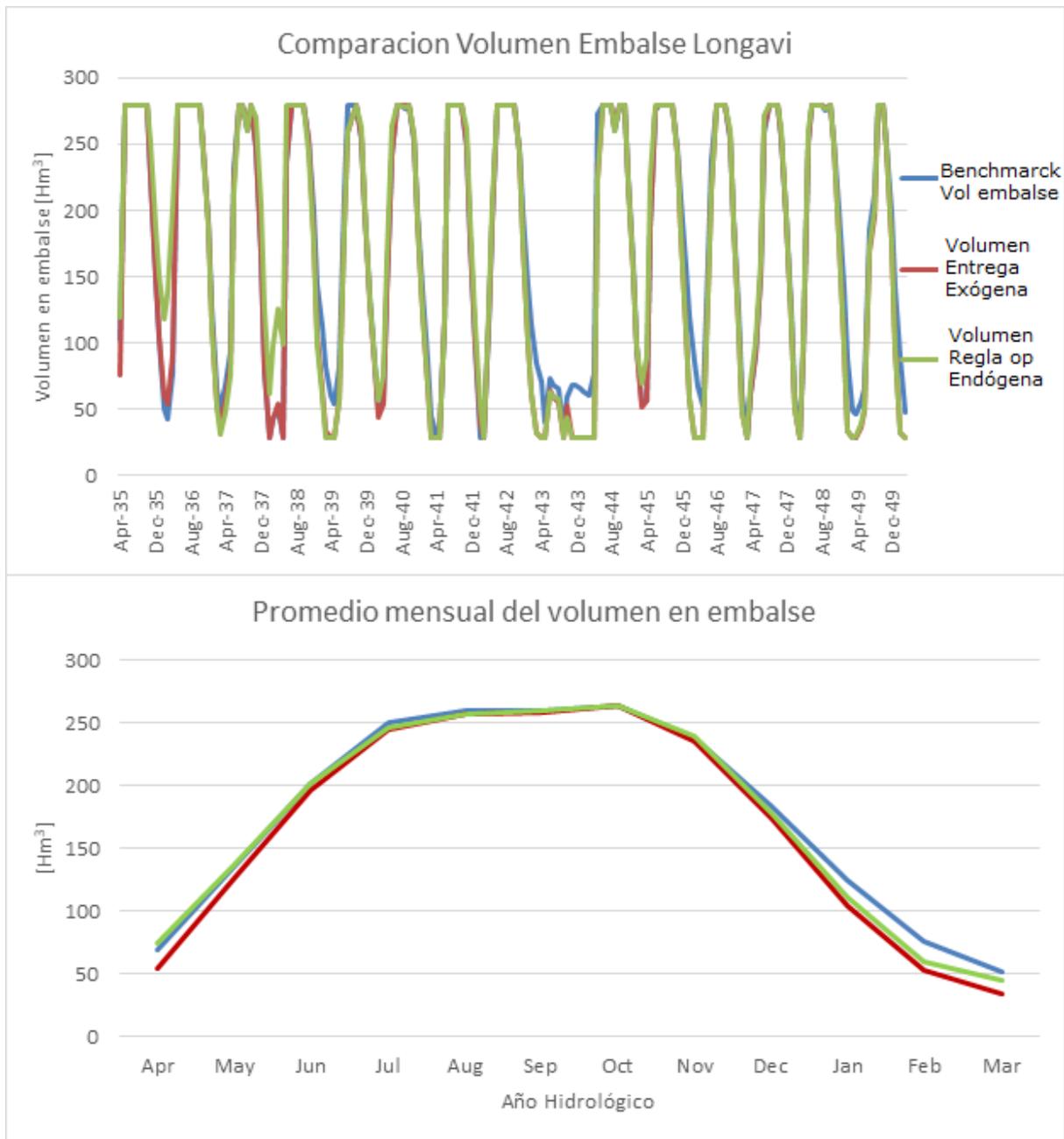
---

<sup>5</sup> Morado claro corresponde al extraído del informe de prefactibilidad: "Estudio de prefactibilidad construcción sistema de riego embalse Longaví, región del Maule", (CNR, 2015)

**Tabla 4-5: Análisis de disponibilidad hídrica para el embalse Longaví**

	<b>Promedio</b>	<b>Q<sub>50%</sub></b>	<b>Q<sub>85%</sub></b>	<b>Q<sub>95%</sub></b>
Disponibilidad (Mayo-Agosto) [Hm <sup>3</sup> ]	655	584	323	241
Disponibilidad (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	469	399	259	190
Demanda total + Q eco (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	1212			
Demanda total + Q eco (Mayo-Agosto) [Hm <sup>3</sup> ]	390			
Capacidad embalse [Hm <sup>3</sup> ]	279			
Almacenamiento embalse + Dispo (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	748	678	454	304
Disponibilidad por temporada [Hm <sup>3</sup> ]	<b>-464</b>	<b>-534</b>	<b>-1020</b>	<b>-1170</b>

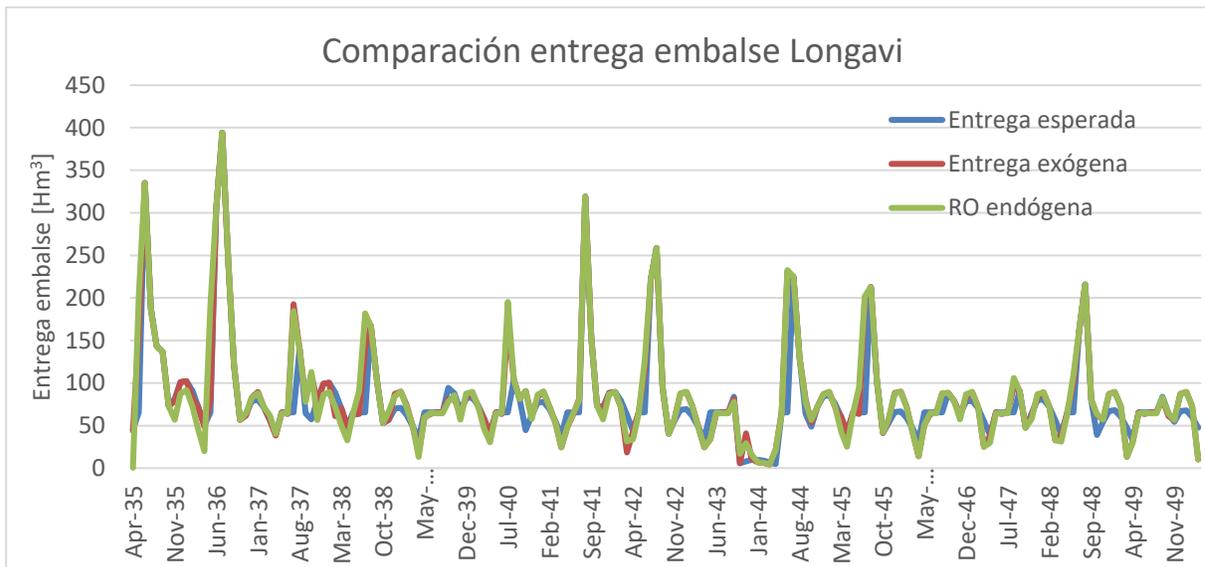
La Tabla 4-5 muestra que la disponibilidad entre mayo y agosto relacionada al Q<sub>85%</sub> es mayor a la capacidad del embalse. La Figura 4-18 exhibe el volumen embalsado en los 15 años de simulación, donde solo en una temporada el embalse no se llena (temporada 2043-2044), lo que equivale a una frecuencia de no llenado del 6,7%. Esta frecuencia es lo suficientemente pequeña como para *no considerar hedging y establecer una regla de operación estándar*.



**Figura 4-18: Serie del volumen embalsado (arriba) y promedio del volumen mensual (abajo) para el embalse Longaví**

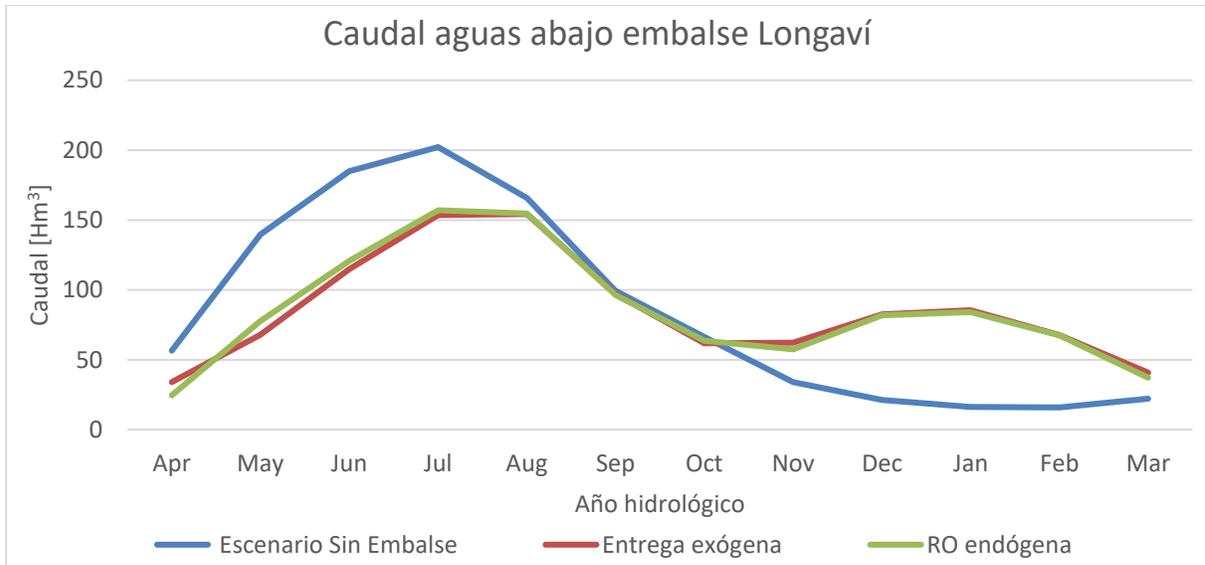
Luego, según la Tabla 4-5, para una probabilidad de excedencia del 85%, se cumple la condición de la ecuación (1.1). Así, *la entrega por temporada será igual al almacenamiento más los afluentes.*

Según las metodologías vistas en la sección 3.1.4, la Figura 4-19 muestra las entregas del embalse según las metodologías vistas para la *entrega exógena*, la *regla de operación endógena* y la *serie de referencia (entrega esperada)*.



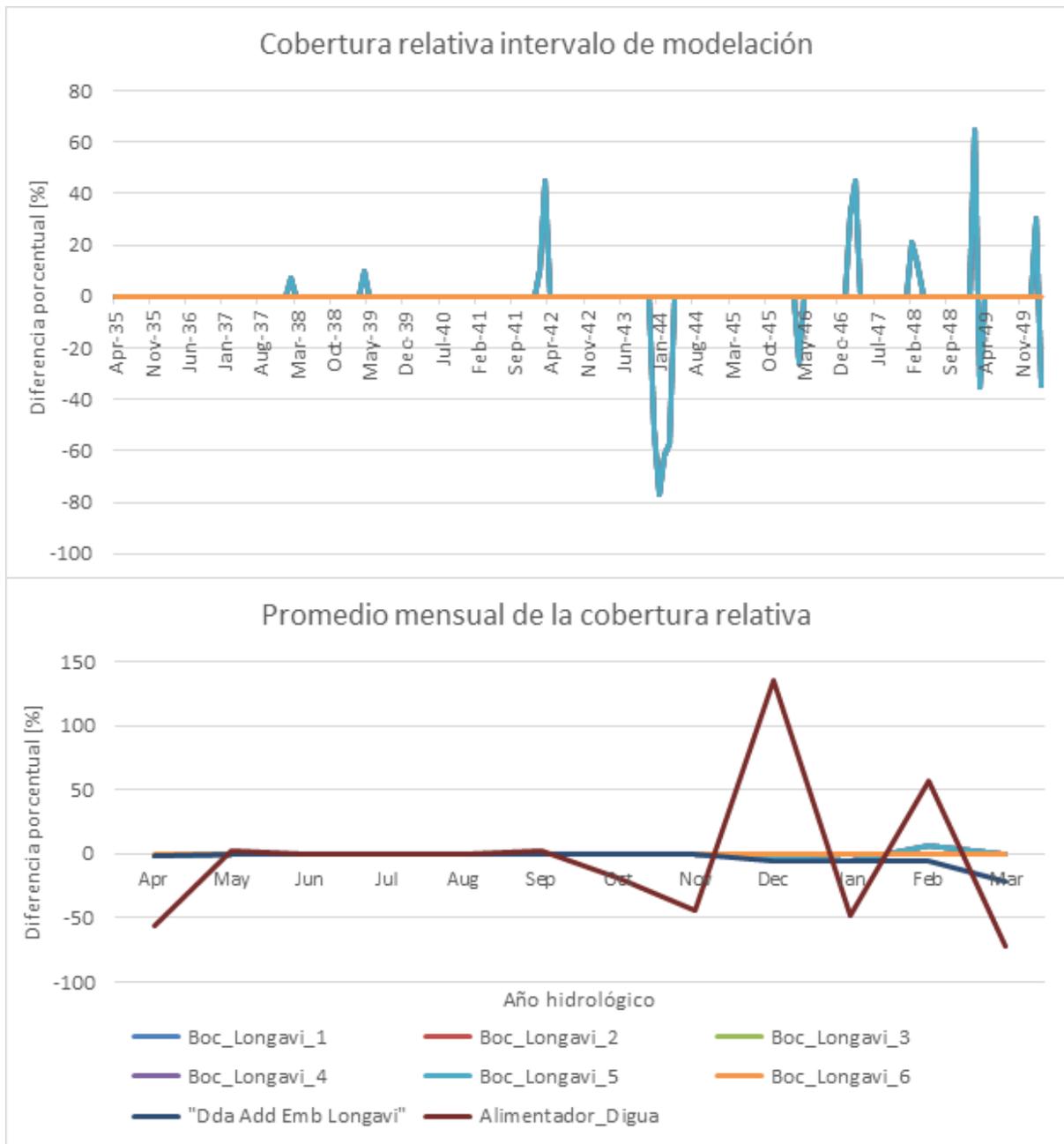
**Figura 4-19: Entregas simuladas del embalse Longaví**

Además, la Figura 4-20 muestra el efecto de regulación interanual que este genera.



**Figura 4-20: Promedio mensual de caudales medidos por la simulación WEAP aguas abajo del embalse Longaví**

A continuación, la Figura 4-21 presenta el efecto del embalse en las bocatomas beneficiadas aguas abajo, la "Boc\_Longai\_6" es la única que presenta comportamiento diferenciado en relación con las otras bocatomas, mostrando un buen rendimiento en la cobertura debido a todos los flujos de retorno que la benefician (Figura 4-15).



**Figura 4-21: Simulación de la cobertura relativa al escenario sin proyecto para el embalse Longaví**

La disminución de la cobertura se debe principalmente al efecto del alimentador Digua; existe un juego entre la prioridad que este tiene y lo que trae el río. El análisis de los caudales aguas arriba de las bocatomas muestra que, para el escenario con embalse, aguas arriba del alimentador Digua, el

caudal es muy superior en comparación al escenario sin proyecto. Sin embargo, aguas abajo del alimentador, únicamente en febrero se tiene un caudal superior para el escenario con embalse, lo que indica que el alimentador Digua se toma prácticamente todo el recurso, razón por la cual aumenta tanto su cobertura relativa. Cabe destacar que, la demanda adicional se cubre en aproximadamente un 95%, menos para el mes de marzo que baja al 78%, lo que es un buen resultado en vista del gran aumento de la superficie de riego. Además, la diferencia porcentual de las bocatomas se ve pequeño puesto que, en el escenario sin proyecto presentan una cobertura elevada.

Finalmente, como criterios de toma de decisión, la Tabla 4-6 presenta la *seguridad de riego* según la metodología establecida junto con el *indicador de confiabilidad* para cada zona de riego beneficiada.

**Tabla 4-6: Resultado final de los indicadores de toma de decisión para el embalse Longaví**

	ZR_84	ZR_85	ZR_86	Dda Adicional
Magnitud demanda por temporada [Hm <sup>3</sup> ]	300	8	25	400
Confiabilidad Escenario Sin Embalses [%]	74,2	99,2	99,7	-
Confiabilidad Escenario Embalses [%]	69,6	99,3	99,8	97
Confiabilidad Escenario Embalses (1/2 Dda Adicional) [%]	78	99,3	99,8	97
SR Escenario Sin Embalses [%]	0	93	100	-
SR Escenario Embalses [%]	20	93	100	60
SR Escenario Embalses (1/2 Dda Adicional) [%]	27	100	100	60
Proporción cubierta por aguas subterráneas [%]	30	14	62	0

La Figura 4-18 y Figura 4-19, muestran que las entregas son más acertadas, obteniendo resultados muy similares entre la modelación y la serie referencia. Esto se debe a que existen menos extracciones aguas abajo que tengan una influencia en el desembalse por el efecto de las prioridades en el modelo. Segundo, para la temporada 35-36 ocurre el mismo efecto de condición de borde observado para el embalse Achibueno.

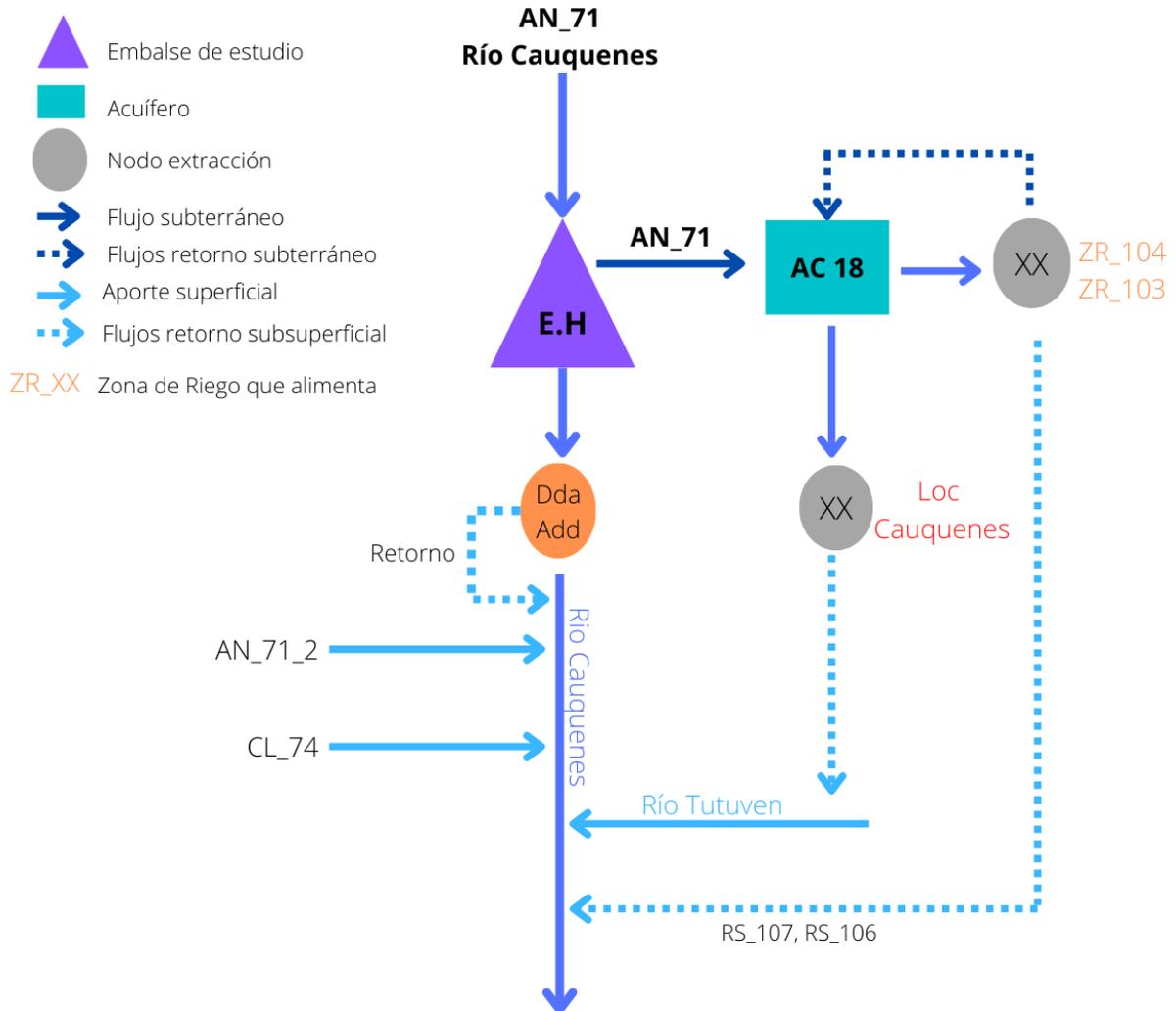
En relación con el efecto en las bocatomas, de manera general se puede observar una mejora en la cobertura. Sin embargo, el alimentador Digua, que tiene extracciones del orden de 700 Hm<sup>3</sup>/temporada parece influir directamente en los resultados. De hecho, es responsable de exigir hídricamente al análisis de disponibilidad de la Tabla 4-5 y que la confiabilidad de la ZR 84 disminuya en el escenario con proyecto. Por esto, para un análisis más específico es fundamental definir correctamente la influencia del embalse Longaví en el alimentador del embalse Digua, para así, no considerar recurso hídrico que en realidad está destinado a otros sectores.

Luego, a pesar de que la demanda adicional corresponde al 115% de la ya existente, los indicadores observados muestran buen desempeño, obteniendo una baja frecuencia de falla y una seguridad de riego razonable (60%). En este caso, a diferencia del embalse Achibueno, una disminución a la mitad en la demanda adicional si parece tener un efecto en el mejoramiento de la cobertura de la demanda ya existente; particularmente para la ZR 84.

Así, para el embalse Longaví, desde un punto de vista hídrico existe una evidente mejora. Para la ZR 85 y 86 la confiabilidad y seguridad de riego se mantiene elevada. La ZR 84 muestra leves aumentos, sin embargo, es necesario revisar su superficie cultivada para poder asegurar una SR del 85%. Además, se agrega una demanda adicional que representa casi el 100% de la demanda existente con una alta confiabilidad y seguridad de riego aceptable.

#### 4.4. Embalse Huedque

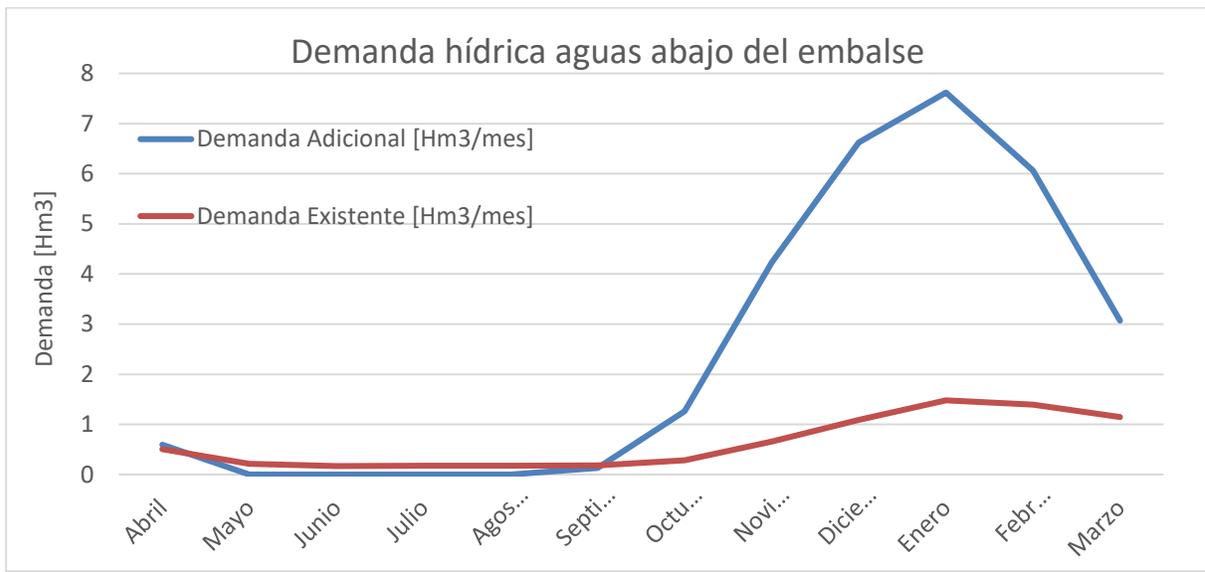
La topología del sistema para el embalse Huedque se muestra en la Figura 4-22. Esta topología hace parte del modelo WEAP.



**Figura 4-22: Topología del sistema para el embalse Huedque,**  
*Fuente: Elaboración propia basado en Modelo WEAP valle y costa (UTP  
 Everis Chile-Hidrogestión, 2020)*

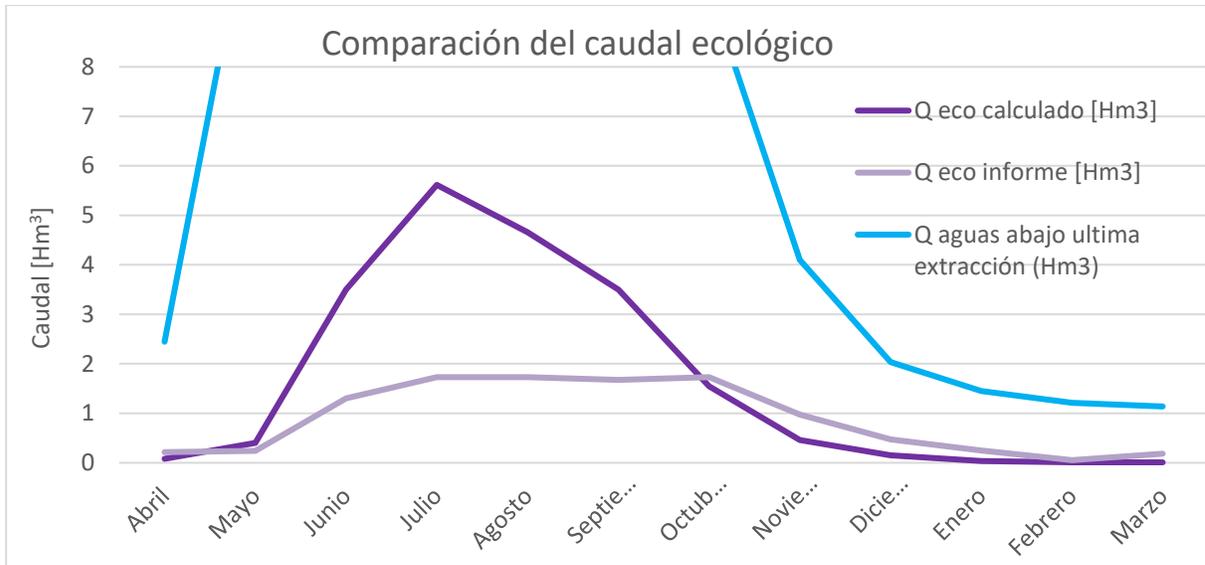
Se puede notar que el embalse Huedque tiene una topología particular, puesto que, las zonas de riego (103 y 104) aguas abajo se alimentan de fuentes subterráneas. Para evaluar la influencia de este embalse se buscará sustituir la demanda del acuífero.

Luego, las demandas asociadas a este embalse se presentan en la Figura 4-23. Cabe destacar que, las demandas ya existente corresponden a demandas de aguas subterráneas, que se buscarán suplir mediante la incorporación del embalse. La demanda adicional corresponde a la demanda estimada por el proyecto más la demanda subterránea.



**Figura 4-23: Demanda hídrica actual (rojo) y adicional estimada (azul) para el embalse Huedque**

Según la metodología presentada y las curvas de variación estacional del Anexo E, la Figura 4-24 muestra el caudal ecológico calculado según la metodología de la sección 3.1.3, además del promedio mensual del caudal ecológico simulado en un escenario sin embalses bajo el nodo de demanda adicional en la Figura 4-22.



**Figura 4-24: Caudal ecológico estimado (morado) y promedio simulado (azul) para el embalse Huedque<sup>6</sup>**

Luego, la disponibilidad hídrica del embalse según la metodología de cálculo de la sección 3.1.4, según diferentes probabilidades de excedencia se muestra en la Tabla 4-7, donde el color rojo indica un déficit hídrico y el azul una situación holgada. Este balance se hace bajo el nodo de demanda adicional del esquema en la Figura 4-22.

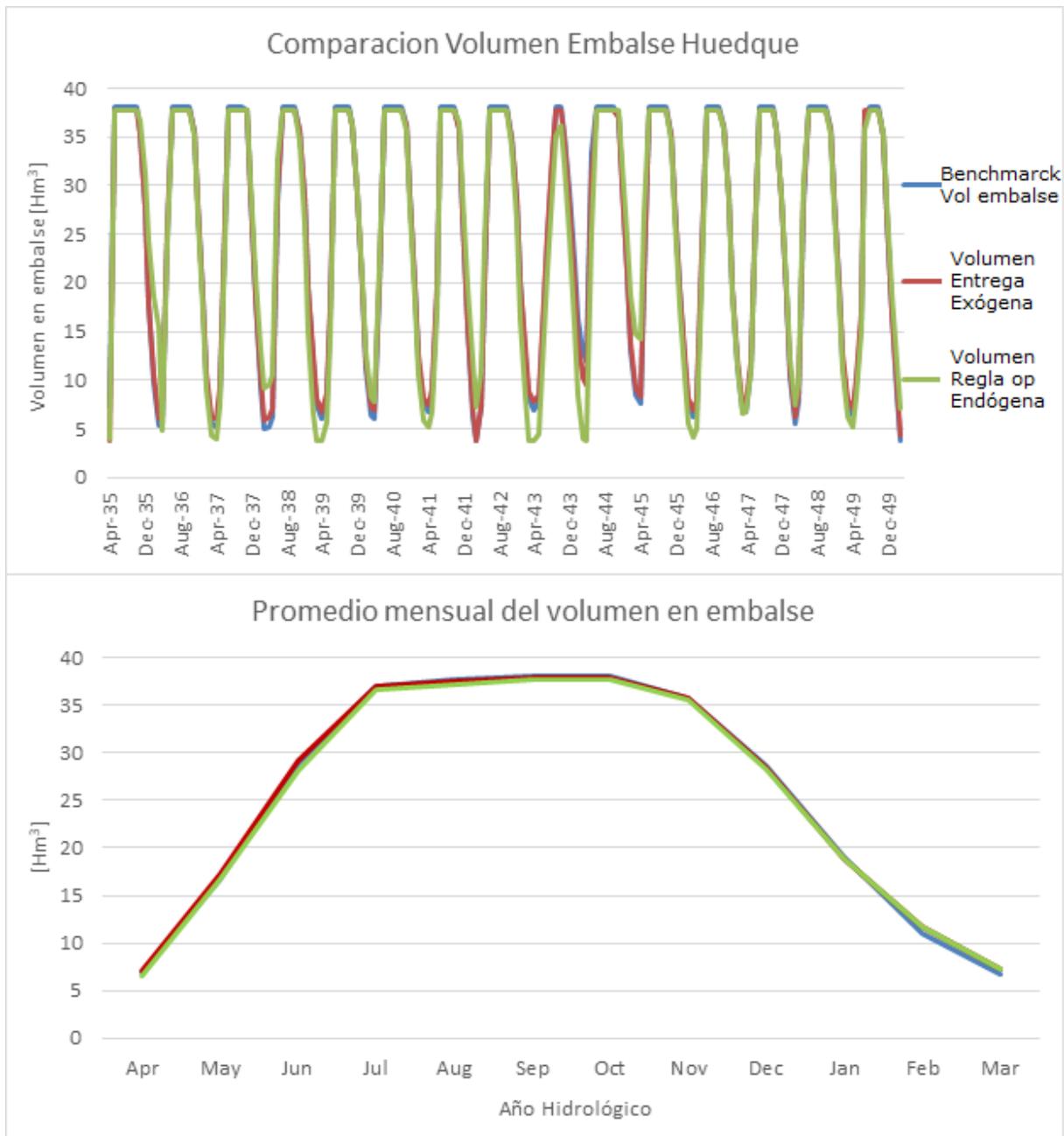
---

<sup>6</sup> Morado claro corresponde al extraído del informe de prefactibilidad: "Estudio de prefactibilidad proyecto construcción de embalse de riego Huedque, comuna de Cauquenes.", (CNR, 2012)

**Tabla 4-7: Análisis de disponibilidad hídrica para el embalse Huedque**

	<b>Promedio</b>	<b>Q<sub>50%</sub></b>	<b>Q<sub>85%</sub></b>	<b>Q<sub>95%</sub></b>
Disponibilidad (Mayo-Agosto) [Hm <sup>3</sup> ]	95	83	49	28
Disponibilidad (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	33	30	22	11
Demanda total + Q eco (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	46			
Demanda total + Q eco (Mayo-Agosto) [Hm <sup>3</sup> ]	24			
Capacidad embalse [Hm <sup>3</sup> ]	38			
Almacenamiento embalse + Dispo (Sept-Abril) [Hm <sup>3</sup> ]	71	68	46	14
Déficit por temporada [Hm <sup>3</sup> ]	25	22	0,7	-31

La Tabla 4-7 muestra que la disponibilidad entre mayo y agosto relacionada al Q<sub>85%</sub> es mayor a la capacidad del embalse. La Figura 4-25 exhibe el volumen embalsado en los 15 años de simulación, se puede observar que en todas las temporadas el embalse se llena. Así, *no se considera hedging y se establece una regla de operación estándar.*

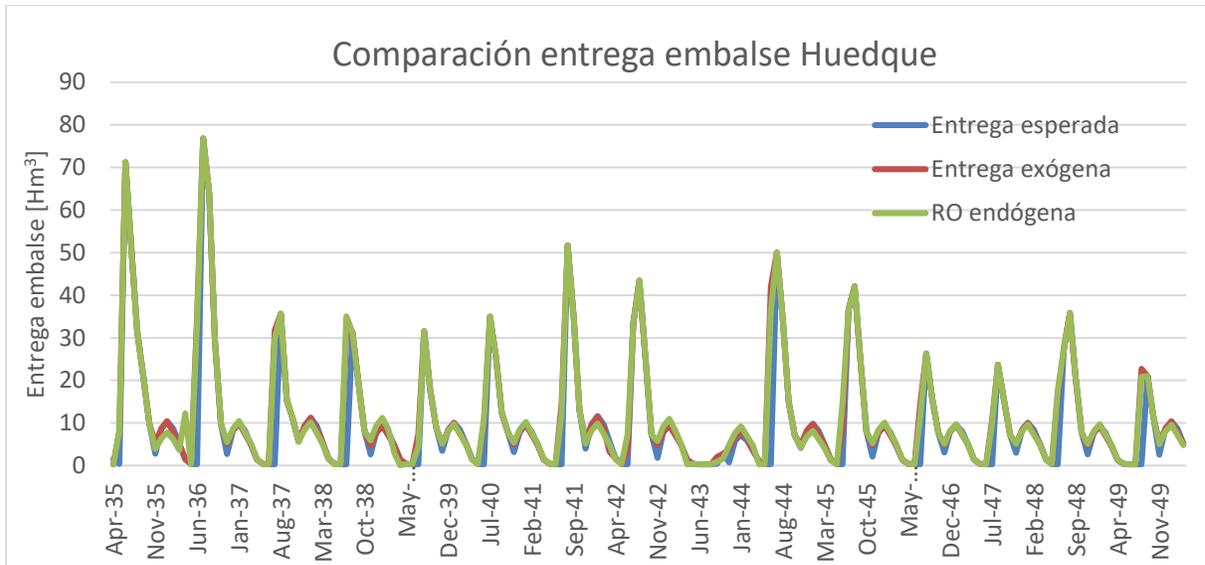


**Figura 4-25: Serie del volumen embalsado (arriba) y promedio del volumen mensual (abajo) para el embalse Hueque**

Particularmente, para este embalse, según la Tabla 4-7, para una probabilidad de excedencia del 85%, ninguna de las condiciones de la ecuación (1) se cumplen. Por esto, arbitrariamente se decide trabajar con

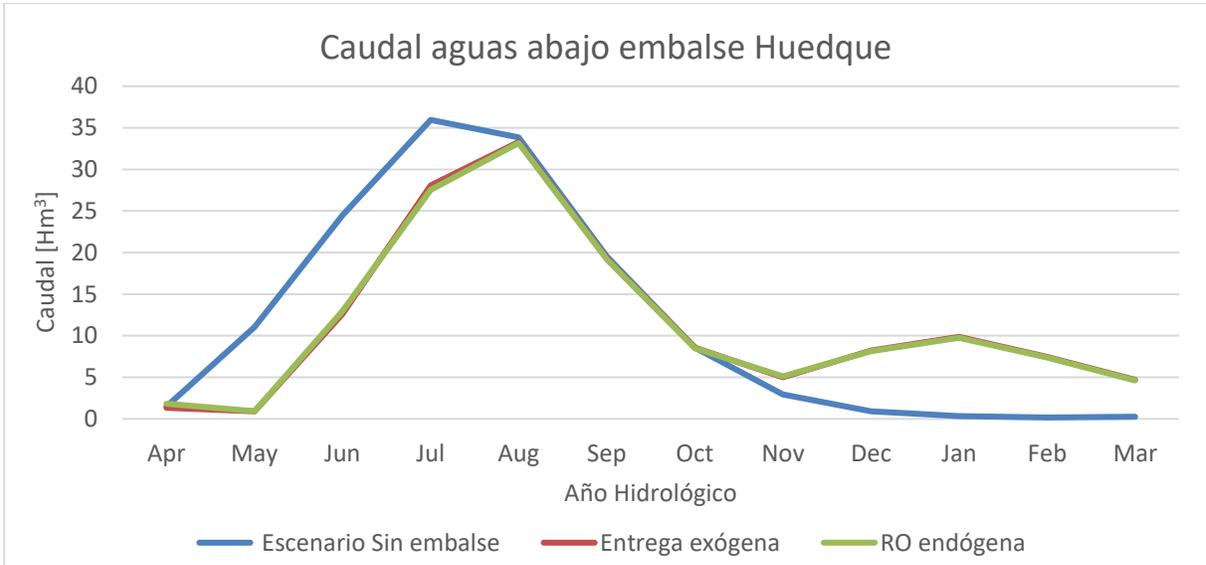
el esquema de la ecuación (1.1), donde *la entrega por temporada será igual al almacenamiento más los afluentes*.

Así, según las metodologías vistas en la sección 3.1.4, la Figura 4-26 muestra las entregas del embalse según las metodologías vistas para la *entrega exógena, la regla de operación endógena y la serie de referencia (entrega esperada)*.



**Figura 4-26: Entregas simuladas del embalse Huedque**

Además, la Figura 4-27 muestra el efecto de regulación interanual que este genera.



**Figura 4-27: Promedio mensual de caudales medidos por la simulación WEAP aguas abajo del embalse Huedque**

A continuación, la Figura 4-28 presenta el efecto del embalse en la demanda adicional incorporada. Cabe destacar que, esta demanda corresponde a la demanda agrícola adicional esperada más la demanda de las zonas de riego ZR\_103, ZR\_104 y la demanda de la Localidad Cauquenes.



**Figura 4-28: Simulación de la cobertura absoluta de la demanda adicional del embalse Huedque**

Aquí, se observa que la demanda adicional se cubre prácticamente en un 100% para todo el año hidrológico. Así, este embalse no solo permitiría aumentar la superficie regada, pero también suplir las extracciones de acuíferos cercanos.

Finalmente, como criterios de toma de decisión, la Tabla 4-8 presenta la *seguridad de riego* según la metodología establecida junto con el *indicador de confiabilidad* para cada zona de riego beneficiada.

**Tabla 4-8: Resultado final de los indicadores de toma de decisión para el embalse Huedque**

	<b>Dda Adicional</b>
Confiabilidad Escenario Sin embalse [%]	-
Confiabilidad Escenario Embalses [%]	99,7
SR Escenario Embalses [%]	100

La Figura 4-25 y Figura 4-26, muestran que las entregas de la simulación están en acuerdo con las de la serie referencia. Esto se explica debido a que no existe ninguna bocatoma aguas abajo del embalse que tenga efecto de prioridad sobre las entregas del embalse, así, el desembalse del modelo WEAP se guía completamente en la regla de operación que se le establece. De hecho, este es el único caso donde se aprecia la influencia del desfase temporal de los afluentes en la *RO endógena*. Esto se observa en la temporada de riego 44-45, la que le sigue a la temporada seca del 43-44, donde el volumen asociado a la *RO endógena* se mantiene más elevado (menos entregas) en comparación a los otros, debido a que los afluentes de la temporada 43-44 fueron particularmente bajos.

Luego, la demanda adicional se consideró como la suma entre la demanda propuesta en los informes de prefactibilidad con la demanda existente en acuíferos cercanos al sector. A pesar de aquello, se observan resultados favorables en relación con los indicadores de confiabilidad y seguridad de riego, dando la impresión de que la demanda asociada al embalse podría ser escalada aún más.

#### **4.5. Análisis de sensibilidad**

Finalmente, se hace un análisis de sensibilidad de las reglas de operación establecidas en cada embalse. Para esto, se procede a cambiar las forzantes climáticas que alimentan al modelo WEAP. Como se mencionó anteriormente, las simulaciones se realizaron gracias a datos de precipitación y temperatura provenientes del modelo CSIRO Mk3-6-0.

Así, se cambian estas forzantes por las obtenidas del modelo climático IPSL-CM5A-LR, las cuales se encuentran en los Anexos del PEGH del Maule (DGA, 2020) y se estudia el desempeño de los embalses en los indicadores seleccionados. Cabe destacar que, para este modelo, al igual que el CSIRO Mk3-6-0, los escenarios evaluados están dentro la trayectoria de concentración de gases de efecto invernadero al equivalente del forzamiento radiactivo a 8,5 W/m<sup>2</sup> (RCP 8.5) en 2100. Además, las proyecciones del IPSL-CM5A-LR consideran una alta sensibilidad climática previendo disminuciones de precipitación de hasta 20-25%, a diferencia del modelo CSIRO Mk3-6-0 donde disminuyen entre un 5 y 10%, (DGA, 2020).

La elección de los modelos climáticos fue establecida en el PEGH de la cuenca del río Maule (UTP EVERIS CHILE S.A. e HIDROGESTIÓN S.A, 2020). Para cada embalse, los resultados según la regla de operación utilizada se pueden observar en las Tabla 4-9 a Tabla 4-12, cabe destacar que se consideró la mitad de la demanda adicional.

### Embalse Lavadero:

La Tabla 4-9 muestra los resultados de las simulaciones en los indicadores estudiados. Por un lado, se observa una mejora en la confiabilidad entre el escenario con y sin proyecto. Además, se nota que los resultados entregados por la RO endógena son levemente mejores a los de las entregas exógenas, esto se explica puesto que las entrega exógenas fueron determinadas mediante el modelo CSIRO Mk3-6-0 y son menos adaptables a cambios en las variables climáticas. Por el otro, en comparación a los resultados obtenidos con el modelo CSIRO Mk3-6-0, tanto para el escenario con y sin embalses, los indicadores muestran valores proporcionalmente superiores, sin que destaque ninguna zona de riego, por lo que el modelo parece responder bien a los cambios en las variable climáticas.

**Tabla 4-9: Resultados del embalse Lavadero para el modelo IPSL-CM5A-LR**

	ZR_100	ZR_95	ZR_96	ZR_97	Dda Adicional
Confiabilidad Escenario Sin Embalses [%]	67	53	63	63	-
Confiabilidad Escenario Embalses, Entrega exógena [%]	80	67	69	71	89
Confiabilidad Escenario Embalses, RO endógena [%]	80	68	69	72	90
SR Modelo Entrega exógena [%]	53	20	27	27	7
SR Modelo RO endógena [%]	60	20	27	27	7

Embalse Achibueno:

La Tabla 4-10 muestra los resultados de las simulaciones en los indicadores estudiados. Para el escenario sin embalses, a excepción de las ZR\_63 y ZR\_75 donde el indicador sube de un punto, la confiabilidad muestra resultados idénticos a los obtenidos con el modelo CSIRO Mk3-6-0. Para el escenario con proyecto, las tendencias son las mismas. No obstante, la seguridad de riego se ve disminuida para la ZR\_75 y se mantiene para la ZR\_63. Estas son las zonas de riego con mayor demanda hídrica por temporada y parecen ser sensibles frente a una alta variabilidad climática. Además, se verifica que un aumento en la confiabilidad no asegura un aumento en la seguridad de riego debido al umbral de falla aceptable que cuenta este último.

**Tabla 4-10: Resultados del embalse Achibueno para el modelo IPSL-CM5A-LR**

	ZR_62	ZR_63	ZR_67	ZR_69	ZR_70	ZR_74	ZR_75	ZR_77	ZR_83	Dda Adicional
Confiabilidad Escenario Sin Embalses [%]	100	83	95	92	77	100	83	94	99	-
Confiabilidad Escenario Embalses, Entrega exógena [%]	100	92	95	92	77	100	87	94	99	98
Confiabilidad Escenario Embalses, RO endógena [%]	100	92	96	92	77	100	87	94	99	99
SR Modelo Entrega exógena [%]	100	100	93	100	7	100	7	93	100	80
SR Modelo RO endógena [%]	100	100	100	100	7	100	13	93	100	80

### Embalse Longaví:

La Tabla 4-11 muestra los resultados de las simulaciones en los indicadores estudiados. En este caso, para la ZR\_84 ocurre lo mismo que en el embalse Achibueno. Esta zona de riego es la con mayor demanda hídrica, presentando un aumento de 3% en la confiabilidad, pero una disminución de 14% en la seguridad de riego. Así, nuevamente las zonas con mayor demanda son las más sensibles a una fuerte variabilidad climática. Finalmente, y como elemento de discusión para trabajos futuros, al observar los resultados de la simulación con el modelo IPSL-CM5A-LR, se encontró que la frecuencia de no llenado de este embalse alcanzó casi un 30%. Razón clave para suponer que aquí se podría en realidad necesitar una regla de operación de tipo *hedging*.

**Tabla 4-11: Resultados del embalse Longaví para el modelo IPSL-CM5A-LR**

	ZR_84	ZR_85	ZR_86	Dda Adicional
Confiabilidad Escenario Sin Embalses [%]	74	99	100	-
Confiabilidad Escenario Embalses, Entrega exógena [%]	77	99	100	96
Confiabilidad Escenario Embalses, RO endógena [%]	77	99	100	96
SR Modelo Entrega exógena [%]	13	93	100	53
SR Modelo RO endógena [%]	13	93	100	53

### Embalse Huedque:

La Tabla 4-12 muestra los resultados de las simulaciones en los indicadores estudiados. Primero, los indicadores muestran valores inferiores a los obtenidos con el modelo CSIRO Mk3-6-0, notablemente para la seguridad de riego que disminuye en 20%. Segundo, este embalse es el único caso donde la entrega exógena muestra mejor desempeño en termino de los indicadores que la RO endógena, lo que se explica porque el embalse Huedque está holgado hídricamente. Como la entrega exógena fue generada a partir del modelo CSIRO Mk3-6-0, que presenta afluentes mayores a los del modelo IPSL-CM5A-LR, las entregas del embalse serán superiores en comparación a la RO endógena, sin comprometer el volumen del embalse y en consecuencia un leve aumento en la cobertura.

**Tabla 4-12: Resultados del embalse Huedque para el modelo IPSL-CM5A-LR**

			<b>Dda Adicional</b>
Confiabilidad Escenario Embalses [%]	Sin	-	
Confiabilidad Escenario Embalses Entrega exógena [%]		99,5	
Confiabilidad Escenario Embalses, RO endógena [%]		98,7	
SR Modelo Entrega exógena [%]		93	
SR Modelo RO endógena [%]		80	

## 5. DISCUSIONES

A pesar de las limitaciones del modelo WEAP, los resultados presentados entregan un idea clara tanto de la operación que debiesen llevar los embalse estudiados como su desempeño general en cada zona de influencia.

El estudio se fundamenta completamente en el modelo WEAP hidrológico-operacional generado en el PEGH de la cuenca del río Maule. Primero, es a partir de los *inputs* climáticos del modelo CSIRO-Mk3-6-0 que el programa genera las esorrentías afluentes a cada embalse, que son la base tanto del análisis de disponibilidad como de la operación de los embalses. De hecho, otros modelos climáticos podrían mostrar que los embalses no se llenan de manera frecuente y por ende la necesidad de incorporar *hedging*, expandir su capacidad o descartar su construcción. Segundo, con respecto a la estimación de la demanda actual, no se consideró directamente lo demandado por cada sector de riego, sino que los derechos de agua pertenecientes a las junta de vigilancia beneficiadas. Estos derechos de aprovechamiento se asocian a una tasa de reparto fija, y se extraen directamente del modelo WEAP. Aquí, el objetivo no es el análisis agroeconómico, sino que analizar el desempeño de los embalses a través de diversos indicadores. De hecho, el análisis de disponibilidad se encuentra exigido hídricamente, percibiendo déficits hídricos (Embalse Longaví y Achibueno notablemente), sin embargo, estos resultados no permiten descartar que los embalses puedan operar correctamente mediante la elección de una regla de operación adecuada.

Sabiendo lo anterior, a excepción de la operación endógena donde existe un desfaz en la información de afluentes, la operación de cada embalse supone una *previsión perfecta*, donde los operadores conocen exactamente tanto los afluentes como las extracciones a cada uno. El objetivo de la regla de operación del embalse para las entregas de riego es que los agricultores puedan conocer, en forma anticipada, el volumen de agua con que contarán en la temporada de riego siguiente y planifiquen adecuada y oportunamente las gestiones relacionadas con su producción agrícola. Así, el análisis con *previsión perfecta* no representa el caso más realista, puesto que es difícil predecir con exactitud los afluentes al embalse pero sirve como análisis previo para medir el desempeño de cada uno en el territorio. De esta manera, mientras los modelos climáticos y de esorrentía sean más precisos, más realista será la simulación de la operación de embalses.

Luego, se comparó el caudal medido en el río aguas abajo de la última bocatoma beneficiada (último nodo de la topología del sistema de cada embalse extraídas del modelo WEAP) con el caudal ecológico estimado según las dos metodologías mencionadas. De lo anterior se observa que, en periodo estival, para todos los casos (salvo el embalse Huedque) existe un incumplimiento del caudal mínimo que debe llevar el río. Si bien se debería verificar aguas abajo de cada extracción, se consideró las entradas al embalse y bocatomas beneficiadas como un sistema cerrado, donde en la salida se debe cumplir el criterio del caudal ecológico. De esta manera, al momento de operar los embalses será necesario ajustar la tasa de reparto de cada bocatoma, no seguir otorgando derechos de aprovechamiento superficiales y considerar el caudal ambiental como una demanda de alta prioridad en los embalses, para asegurar la condición de caudal ecológico y el mantenimiento de los ecosistemas.

El análisis preliminar de disponibilidad arrojó que los embalses logran llenar su capacidad con una frecuencia razonable (~90% de las temporadas simuladas), se consideró una RO estándar para su funcionamiento. Nuevamente, esta decisión depende fuertemente del modelo CSIRO-Mk3-6-0. Sin embargo, al simular las ROE con el modelo IPSL-CM5A-LR, el cual presenta una mayor sensibilidad climática, se obtuvieron resultados favorables, que validan en cierta medida la elección de regla de operación. De hecho, las operaciones estudiadas responden de buena manera a los cambios en las variables climáticas.

Siguiendo el mismo eje, en un principio se consideró el mes de septiembre como inicio de la temporada de riego. Sin embargo, para este mes, los afluentes a los embalses suelen ser superiores a las demandas, y al estar llenos, se deben desembalsar los excedentes. Este efecto de rebase se puede observar en las figuras que muestran el caudal aguas abajo del embalse (Figura 4-6 por ejemplo), donde en el escenario base como en el escenario con proyecto, los caudales entre agosto y octubre son los mismos. Así, se está considerando agua para la temporada que finalmente se termina perdiendo, lo que hace imposible cumplir los desembalses mensuales previamente planificados. De esta manera, se decide comenzar la operación en el mes de octubre y evitar cualquier problema del estilo, considerando septiembre como mes en temporada de no riego, desembalsando el total de lo demandado.

La RO que podría causar más controversia es la *endógena* al modelo, puesto que asume que los afluentes a cada temporada son similares. De hecho, se esperaría tener problemas para la temporada siguiente a la fallada (2043-2044), donde los afluentes al embalse fueron particularmente bajos. No obstante, WEAP logra identificar a cada paso temporal el volumen retenido, ajustando correctamente los desembalses. Esto se observa en las entregas y volumen embalsado para la temporada 2044-2045, que son prácticamente los mismos para los tres casos estudiados (Figura 4-5, Figura 4-12, Figura 4-19 y Figura 4-26). Además, al ser una regla de operación generada *endógenamente*, permite adaptarse de manera independiente al cambio en las variables climáticas. Resultado que se evidencia en el análisis de sensibilidad con el modelo climático IPSL-CM5A-LR, donde la confiabilidad obtenida para la *RO endógena* es levemente superior a las *entregas exógenas*.

A partir de los resultados, se evidencia el efecto de regulación interanual que genera cada embalse, donde el caudal aguas abajo sube considerablemente para el periodo estival, Figura 4-6, Figura 4-13, Figura 4-20 y Figura 4-27. Luego, la Figura 4-4, Figura 4-11, Figura 4-18 y Figura 4-25 muestran que el volumen modelado en el programa WEAP, es similar al de las series de referencia, es decir, basta conocer los afluentes y las demandas mensuales, para definir la regla de operación a seguir y el comportamiento del embalse en el periodo de simulación. No obstante, para ciertos embalses (Lavadero, Achibueno), si bien el volumen embalsado sigue la misma tendencia en el modelo y en la serie de referencia, se observan diferencias en las entregas mensual. De hecho, según la Figura 4-4 y Figura 4-11 para inicios de temporada, el modelo WEAP desembalsa más de lo que se espera según las series de referencia, lo que provoca un déficit hídrico para finales de temporada y en consecuencia una disminución en la cobertura.

Esto último se debe al factor de *prioridades* que se le da a cada nodo en el modelo WEAP, las cuales se mantienen fijas en toda la modelación; donde siempre se buscará asegurar el abastecimiento de los nodos con mayor prioridad. En el modelo utilizado, las bocatomas ya existentes tienen prioridad 1, la demanda adicional prioridad 2 y los embalses una menor. De hecho, se pudo notar que la prioridad de los embalses (considerada para su llenado) influye directamente en los resultados, si se les da una baja, funcionan casi como una central de pasada y se vacían rápidamente

entregando más de lo que se espera, lo contrario ocurre si es alta. Típicamente se impone un valor de 99 (prioridad más baja) para que se llene únicamente si las otras demandas fueron satisfechas. El problema de aquello es que no se evidencia de manera clara cómo el embalse ayuda a cubrir sus demandas, puesto que no desembalsa como se espera que lo haga. En este caso, el modelo WEAP no considera el déficit admisible que se preestablece (*entrega exógena y RO endógena*) y se guía únicamente en las prioridades, lo que muestra una gran limitación, sobre todo con sistemas muy complejos como lo es la cuenca del Maule. Efectivamente, el objetivo es que los embalses se vacíen (*ROE*), pero no en los primeros meses, sino que progresivamente durante la temporada de riego. Así, mientras más elementos (nodos) existan, más complejo es entender cómo el programa hace las entregas, lo que es el caso para el modelo de la cuenca del río Maule.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo de título se contribuye a la gestión hídrica de la cuenca del Maule a partir de un mejoramiento de la gestión de aguas superficiales. Se analizaron cuatro embalses planificados en el contexto del plan estratégico de gestión hídrica. El estudio se realizó a partir de un modelo WEAP existente y la interpretación de sus resultados gracias a diferentes indicadores. La metodología empleada responde a los objetivos planteados en la memoria; entrega información importante para la elaboración del modelo operacional de los embalses estudiados y presenta indicadores que favorecen la toma de decisión en un contexto de escasez hídrica.

De manera general, los embalses muestran buen rendimiento, se mejora la situación actual y permiten en algunos casos añadir nuevas superficies de riego, sin embargo, aún se encuentran zonas con una seguridad de riego inferior al 85% que deben ser ajustadas. Además, se mostró que la regla de operación endógena se adapta mejor a cambios en las variables climáticas, no obstante, requiere utilizar un modelo computacional que involucra ciertas limitaciones, por esto, es bueno utilizar en forma conjunta resultados obtenidos exógena y endógenamente al modelo WEAP:

- *Exógeno*: Permite analizar fácilmente la disponibilidad hídrica del sistema, el llenado de los embalses e identificar la superficie regada con SR del 85%.
- *Endógeno*: Permite ver el efecto del embalse en las bocatomas beneficiadas, entrega resultado en indicadores y se adapta fácilmente a cambios en variables meteorológicas.

Sin embargo, el trabajo presentó ciertas limitaciones que deben ser tomadas en consideración para estudios posteriores, dentro de estas se destacan:

- La variabilidad climática incorpora incertidumbre en la determinación de la regla de operación a emplear, por lo que se debe hacer un análisis de sensibilidad sobre el llenado de los embalses con distintos modelos climáticos. En este caso, la validez de los resultados depende completamente en la validez del modelo climático CSIRO Mk3-6-0.
- Al no aceptar déficit y entregar todo lo disponible por temporada, en una regla de operación estándar el índice de confiabilidad es muy elevado, más aún si se considera el periodo fuera de la temporada de riego. En el caso hipotético de operar con *hedging*, se impone un

racionamiento en la temporada, y la confiabilidad mensual se verá obligatoriamente disminuida, por lo que se debe tener cuidado con su interpretación.

- El modelo WEAP no tiene noción del déficit admisible mensual, y se enfoca en la prioridades que se le establecen, además no tiene la capacidad de mirar hacia el futuro los afluentes a cada embalse.
- Si la demanda excede un cierto porcentaje sobre la disponibilidad del embalse (almacenamiento + afluentes), aunque el embalse comience lleno al inicio de la temporada de riego, cada año será “*fallado*”. En este caso se debe o ajustar la demanda o considerar un déficit admisible por mes, lo cual cómo se vio es una limitación del modelo WEAP. En una ROE, que el embalse comience lleno no asegura una buena seguridad de riego para las zonas beneficiadas.
- Al momento de estudiar la operación de cada embalse (sin comparar a un escenario sin proyecto) es necesario adaptar las demandas a la disponibilidad hídrica, es decir, la tasa de reparto, considerada como un caudal por derecho de agua otorgado, no puede mantenerse fija
- Para mantener consistencia con la realidad, la demanda adicional se debe incorporar progresivamente al modelo y no el 100% en el primer mes de simulación como se hizo en este trabajo.
- El criterio del caudal ecológico establecido en el PEGH no se cumple por sí solo. Por esto, a diferencia de cómo se trató en este trabajo, es necesario incorporar la demanda ambiental con primera prioridad frente a las demandas de riego.

Con respecto a los indicadores utilizados, la *cobertura* comúnmente se relaciona con la magnitud de la falla, sin embargo, en esta memoria se presenta relativa al escenario sin embalses, para comparar la situación hídrica entre las alternativas con y sin proyecto. No obstante, su valor absoluto, sigue siendo necesario para el cálculo de la seguridad de riego. La *confiabilidad* se relaciona con la frecuencia de falla; en este trabajo se calcula como frecuencia mensual, así, como considera los meses en la temporada de no riego, donde la demanda es cero, su valor sube considerablemente y complica la interpretación. Po esto, no necesariamente representa lo que ocurre en la temporada de riego y es una de las razones porqué se puede tener una alta confiabilidad junto con una baja seguridad de riego. Finalmente, calculando la confiabilidad como frecuencia anual aparece la seguridad de riego, que se puede entender como una medida de

vulnerabilidad del sistema o bien como una medida de confiabilidad por temporada con un umbral de falla admisible. De esta manera, se evitan las demandas iguales a cero fuera de la temporada de riego. Así, relacionando los resultados a lo expuesto en la literatura, se puede verificar la relación entre confiabilidad y vulnerabilidad, donde sistemas con alta confiabilidad tienden a ser menos vulnerables, correlación que se acentúa con la disminución de la demanda.

Como trabajo futuro, para mejorar el modelo WEAP y aprovechar la capacidad de mirar en el futuro las variables ingresadas, sería interesante reemplazar toda la parte hidrológica por series de escorrentías calculadas con anterioridad, siempre y cuando sean calculadas de manera integral considerando la interacción superficie y acuíferos. Esto evitaría el problema del desfase de los afluentes en la *RO endógena* y alivianaría considerablemente la demanda computacional de la simulación. También, se debe considerar la combinación de estrategias (embalses, eficiencia de riego, uso aguas subterráneas) para así proponer un modelo de gestión más realista y socioeconómicamente factible de cara a la escasez hídrica que Chile está enfrentando.

El objetivo detrás de toda toma de decisión es poder predecir las consecuencias hidrológicas, socioeconómicas y ambientales de cada alternativa escogida (futura oferta/demanda hídrica, valor económico del agua, caudales ecológicos). Para esto, es necesario hacer compromisos y asumir que siempre existirán partes descontentas; por ejemplo, la degradación de flora y fauna en un proyecto de embalse comúnmente genera controversia. Así, la elección de criterios de decisión, el trabajo colaborativo, y el entendimiento de la modelación, son fundamentales al momento de evaluar una alternativa. La memoria evidenció que mientras más complejo es el sistema modelado, más difícil es la interpretación de los resultados, no obstante, modelos complejos, por ejemplo, con más detalle espacial, permiten ver más efectos de distribución entre usuarios y llegar a ser más representativos de la realidad, por lo que se recomienda trabajar tanto con expertos modeladores (WEAP) como con sistemas más pequeños y fáciles de representar (subcuencas, por ejemplo) para obtener resultados fiables. Además, sería interesante combinar estos modelos de simulación con uno de optimización, para encontrar la mejor alternativa que responda a un set de objetivos antes de enfocarse en una en particular.

Finalmente, este trabajo de título entrega un aporte a la gestión hídrica en la cuenca del río Maule mediante la operación de cuatro nuevos embalses. De este modo, se evidenciaron lineamientos a seguir para orientar la gestión del recurso superficial y toma de decisión en un contexto de subsistencia, desarrollo socioeconómico e imprescindible conservación de los ecosistemas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Andrew J Draper, Jay R Lund. (2004). *Optimal Hedging and Carryover Storage Value*.
- Arriagada Terán, A. a. (2003). *Bases plan director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Maule, diagnóstico*. Santiago de Chile: DGA.
- Asociación Embalse Digua Parral. (2020). *Embalse Lavadero-Río Perquilauquen Antecedentes Generales*.
- Brown et al. (2015). The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management. *Water resources research*, 6110--6124.
- Center for Climate and Resilience Research. (s.f.). Obtenido de (CR2): <https://www.cr2.cl/sequia-escasez-hidrica-y-vegetacion/>
- CNR. (2012). *Estudio de prefactibilidad proyecto construcción de embalse de riego Huedque, comuna de Cauquenes*.
- CNR. (2014). *Estudio de prefactibilidad "Mejoramiento del sistema de riego en río Achibueno, región del Maule"*.
- CNR. (2015). *ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD "Construcción sistema de riego embalse Longaví, región del Maule"*.
- DGA, U. d. (2017). *Actualización del Balance hídrico Nacional*. DGA.
- Eastman Mendoza, C. P. (2011). *Capacitación de los usuarios del agua de riego para la gestión de la calidad del recurso hídrico en la Cuenca del Río Maule*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Edson de Oliveira Vieira, S. S.-S.-P. (2020). *Integrated Water Resource Management: Cases from Africa, Asia, Australia, Latin America and USA*.
- Garreaud, R. J.-Á. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A Climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 1-19.
- GCF Ingenieros and others. (2006). *Estudio e implementación de modelos hidrológicos acoplados a SIG para el manejo y planificación: cuencas del Maule, Mataquito e Itata*. Santiago de Chile: CNR.
- Harou, J. J.-V.-A. (2009). Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 627--643.
- Hashimoto, T. (1982). *Reliability, Resiliency, and Vulnerability criteria for water resource system performance evaluation*.

- Jacobs. (2008). *Linking knowledge with action in the pursuit of sustainable water-resource management*.
- Kjeldsen, T. R. (2004). Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *Hydrological sciences journal*, Vol 49-5.
- Loucks D.P. (1981). *Water Resources Planning. Analysis*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Loucks D.P. (1997). *Quantifying trends in system sustainability*.
- Loucks D.P. (2017). *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications*. Springer.
- Martínez Valdés, Y. &. (2018). *La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos*. Santiago de Chile: Ingeniería hidráulica y ambiental.
- Ming-Yen Tu, N.-S. H.-C.-G. (2008). *Optimization of Hedging Rules for Reservoir Operations*.
- Ministerio de Obras Públicas. (2022). *Reforma del Código de Aguas de Chile*. Santiago de Chile.
- Riquelme, J. (2021). *Memoria de título: Análisis técnico-económico de un embalse de riego con derechos eventuales en la cuenca del río Perquillauquén*. Santiago de Chile.
- Rodrigo Fuster, C. E. (2017). *Estudio de Seguridad Hídrica en Chile en un contexto de cambio climático para la elaboración del plan de adaptación de los recursos hídricos al cambio climático*. Laboratorio de Análisis Territorial de la Universidad de Chile.
- Shih, J., & ReVelle, C. (1994, 1995). *Water supply operations during drought: Continuous hedging rule*.
- Shih, J.-S., & ReVelle, C. (1995). *Water supply operations during drought: A discrete hedging rule*. Pittsburg.
- Tu, M.-Y., Hsu, N.-S., & and William W.-G. Yeh, H. (2003). *Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging rules*.
- UTP EVERIS CHILE S.A. e HIDROGESTIÓN S.A. (2020). *Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Maule*. Santiago de Chile: DGA.
- You, J., & Cai, X. (2008). *Hedging rule for reservoir operations: A numerical model*.
- You, J.-Y., & Cai, X. (2008). *Hedging rule for reservoir operations: A theoretical analysis*.

## **ANEXOS**

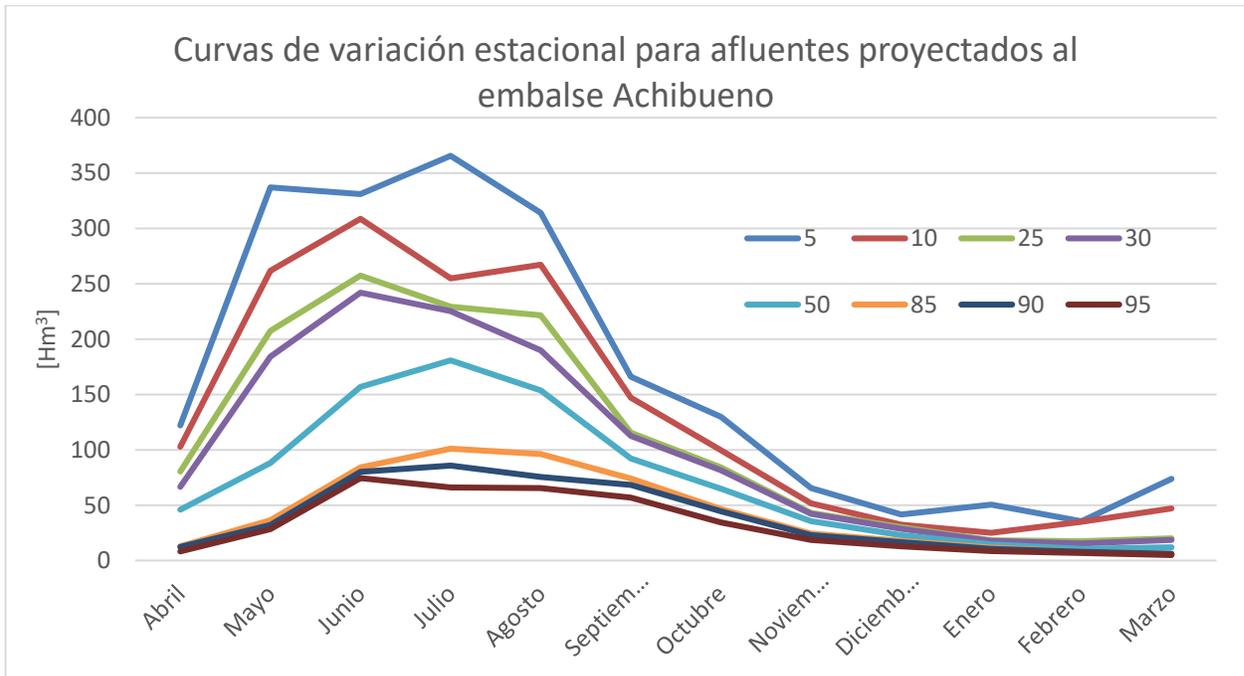
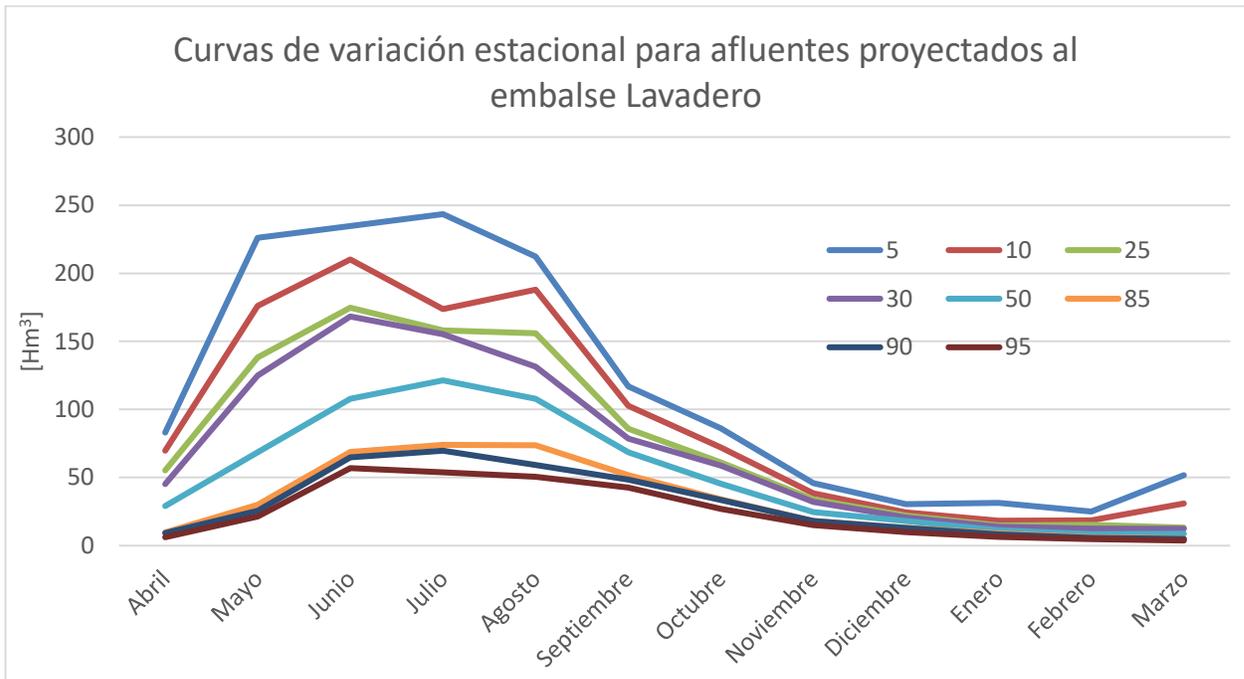
**ANEXO A: Archivo Digital, Análisis de disponibilidad hídrica de los embalses estudiados**

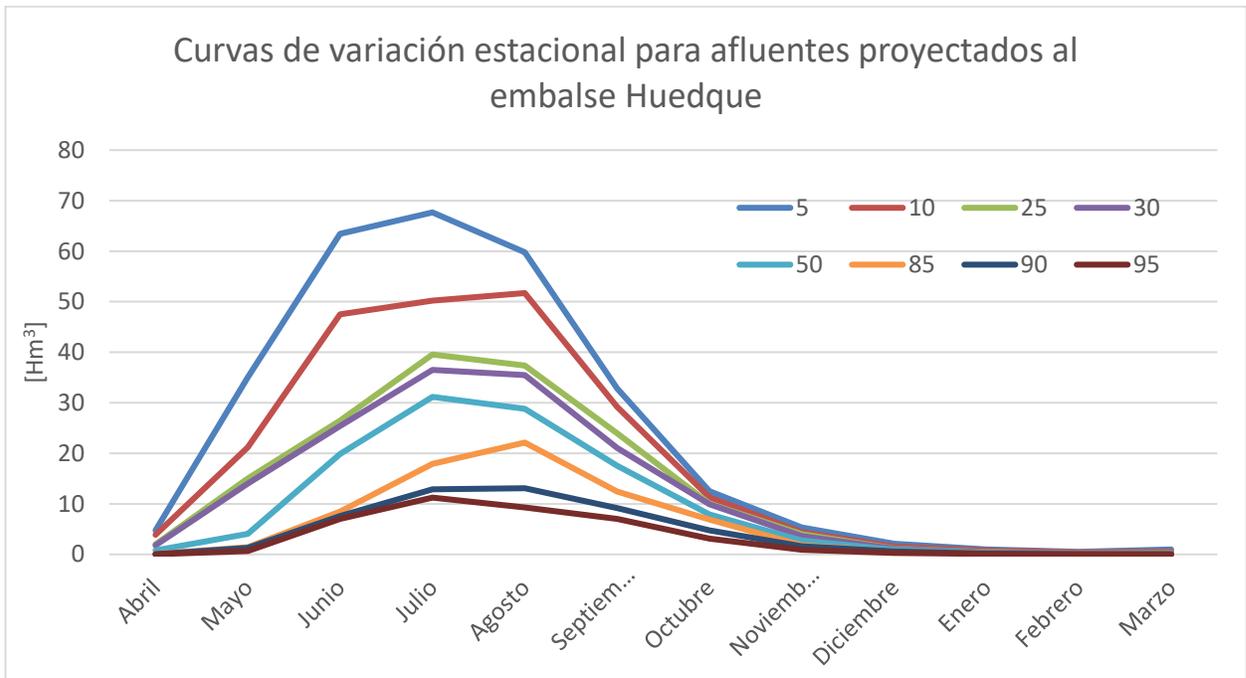
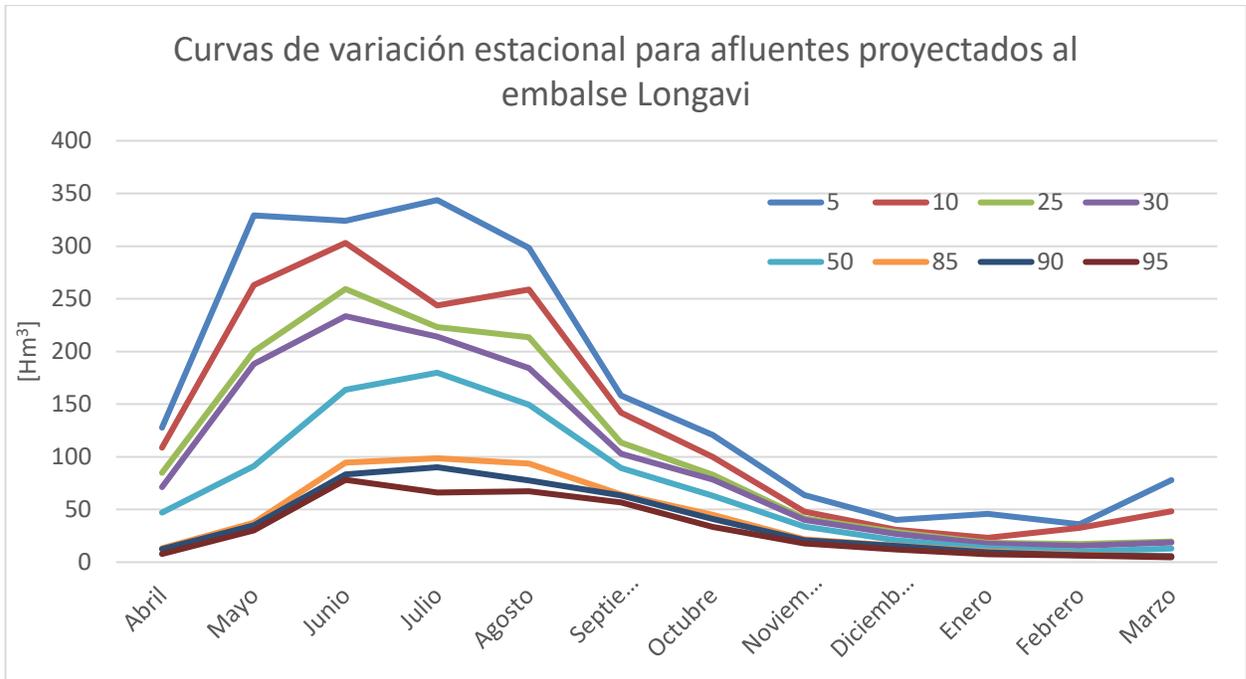
**ANEXO B: Archivo Digital, Modelo operacional con regla estándar para embalses estudiados**

**ANEXO C: Archivo Digital, Cálculo de seguridad de riego**

**ANEXO D: Archivo Digital, Resultados de la modelación**

## ANEXO E: CURVAS DE VARIACION ESTACIONAL





## ANEXO F: RESUMEN DE LA FORMULACIÓN DEL PEGH

El PEGH de la cuenca del Maule se enfoca en lo que se hace llamar *ejes estratégicos*. Estos se categorizan en 2 tipos:

- **BALANCE:** Abordan temas relacionados al balance hídrico de la cuenca y al mantenimiento de los ecosistemas (disponibilidad de agua, eficiencia y sostenibilidad).
- **GESTIÓN:** Abordan la gestión de temas específicos, incluida la gobernanza del propio Plan Estratégico (consumo humano, conservación, información, gobernanza).

Se destaca que, para la definición de ejes estratégicos se tomó como referencia el análisis realizado en el contexto de la Mesa Nacional del Agua (Mesa Nacional del Agua, 2020). Así, gracias a estudios bibliográficos, noticieros, encuestas ciudadanas y otros adicionales, se definen *temas materiales* por eje estratégico y por UDG (y por nodo). Estos son cualquier brecha, acción, conflicto, activo o pasivo que sea de relevancia para los distintos actores que participen en la gestión de los recursos hídricos de la cuenca. De esta manera, se identifica el problema basado en el eje de gestión que le corresponde, lo que conlleva a la definición de *objetivos*, que corresponden a prioridades del territorio obtenidas del proceso de caracterización, diagnóstico de la cuenca y definición de los temas materiales. La Tabla 0-1 muestra un resumen de los ejes estratégicos y sus objetivos propuestos en el plan.

**Tabla 0-1: Definición de los ejes estratégicos y objetivos del plan.**  
**Fuente: PEGH Maule**

Eje estratégico		Objetivo
Balance	1- Disponibilidad de agua	1.1 Incorporar nuevas fuentes de agua superficial 1.2 Incorporar nuevas fuentes de agua subterránea
	2- Eficiencia en el uso del agua	2.1 Aumentar la tecnificación del uso de las aguas en la agricultura 2.2 Aumentar la eficiencia en el uso de las aguas mediante transferencia tecnológica

	3- Sostenibilidad	3.1 Reducir la brecha de cumplimiento de los caudales ecológicos de la cuenca 3.2 Contribuir a la sustentabilidad de los acuíferos
Gestión	4- Consumo humano	4.1 Aumentar la seguridad de abastecimiento de agua para consumo humano
	5- Conservación de ecosistemas	5.1 Proteger y Restaurar la cuenca aportante y los ecosistemas acuáticos y terrestres 5.2 Disminuir la tasa de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas
	6- Información sobre los recursos hídricos	6.1 Aumentar el conocimiento e información sobre los recursos hídricos y el uso que se realiza de ellos 6.2 Aumentar el control de extracciones de agua por parte de los actores privados.
	7- Gobernanza del Agua	7.1 Fortalecer a los organismos participantes de la Gobernanza 7.2 Implementación de una gobernanza para el Plan Estratégico

Luego, para lograr los objetivos planteados, se propone una serie de acciones separadas en tres tipos:

- *Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)*: Prácticas para restaurar el ciclo hidrológico emulando propiedades de los sistemas. Trae beneficios ambientales, sociales y económicos, infraestructuras verdes y medidas naturales. Sus efectos se manifiestan generalmente al largo plazo. (Recarga natural de acuíferos, zanjas de infiltración, revegetación, restauración de riberas, construcción de humedales artificiales, prácticas adecuadas de gestión forestal)
- *Soluciones basadas en la Gestión (SbG)*: Intervenciones de corto/mediano plazo, bajo capital de inversión. Requiere participación de los usuarios y se enfoca en el principio de "mejorar lo que ya existe" (Acuerdos de distribución de aguas, automatización de compuertas, capacitación de usuarios, buenas prácticas agrícolas, protección de sitios prioritarios)

- *Soluciones basadas en la Infraestructura (SbI)*: Intervenciones de mediano/largo plazo; requiere evaluación social y mucho capital de inversión (Embalses superficiales, trasvases, obras de elevación, reutilización de aguas, pozos de extracción)

Finalmente, según eje estratégico se proponen *metas hídricas*, determinadas a partir de los resultados del balance hídrico previamente realizado. Estas metas se definen en Hm<sup>3</sup>/año según el estado de vulnerabilidad del sistema, o sea según la magnitud de la falla o déficit observados.

- Ejes estratégicos 1 y 2: Las metas se escogen como el valor máximo de las brechas hídricas observadas en el balance de agua, y las expectativas de los usuarios en cada uno de los sectores.
- Eje estratégico 3: La meta se relaciona al hecho de que no se puede tener un aumento en la disponibilidad de agua para usos humanos y productivos, sin una recarga equivalente en los acuíferos más un aporte a la recuperación de los caudales ecológicos. (recarga>demanda)

Cabe destacar que los ejes de GESTIÓN no se miden con metas hídricas.

### **Criterios de sostenibilidad**

Estos criterios deben asegurar que el plan no traerá efectos negativos, tanto para los usuarios, como para los ecosistemas. En lo principal, se busca prevenir una sobreexplotación, mediante un equilibrio entre los recursos hídricos superficiales y subterráneos gestionados, y los que son reincorporados al ciclo hidrológico. Además, se ven relacionados, tanto con los ejes, como los objetivos antes mencionados, y se definen a continuación:

- *Prioridad al consumo humano* por sobre otros usos. Se hace un estudio detallado sobre los distintos APR del territorio y se toma la decisión que más convenga dependiendo de su ubicación, seguridad de abastecimiento y urgencia territorial. Por ejemplo, se incorpora la posibilidad de que los APR que cuentan con menor seguridad de abastecimiento funcionen en red con el resto de los usos del agua en el territorio. O bien, si está ubicado en una zona hidrogeológicamente favorable, tendrá su captación en forma independiente.
- *Sustentabilidad del acuífero*. El objetivo es que el plan contrarreste su huella hídrica (ie: *recarga>demanda*), manteniendo, o mejorando el

estado de los acuíferos en el tiempo, independiente de las acciones que se implementen. Este criterio se encuentra completamente inmerso en uno de los ejes estratégicos propuestos en el plan.

- *Caudal ecológico.* En los lugares donde se tiene un caudal ecológico asignado, se propone un aumento voluntario de los caudales de estiaje a un mínimo de 100 l/s. Esto buscará resolver la brecha identificada en la totalidad de los sectores, a excepción Maule Alto-Melado que cuenta con una brecha superior a 90 m<sup>3</sup>/s.

### **Escenarios de gestión propuestos**

Para enfrentar los problemas hídricos observados se proponen los siguientes escenarios (o alternativas) de gestión:

#### *1) Escenarios de Gestión de Aguas Subterráneas:*

La cuenca posee almacenamiento muy superior a la demanda sobre el recurso. Además, como la cuenca suple su demanda principalmente con agua superficial, esta alternativa no ha sido abordada con mucho detalle. El uso del agua subterránea puede aumentar la oferta superficial y eventualmente la recarga a los acuíferos. Así, mediante una gestión activa del acuífero, que considere la recarga natural y artificial de agua se espera responder de manera bastante inmediata a los problemas hídricos presentes.

#### *2) Escenario de Gestión de aguas superficiales:*

Consiste en el desarrollo de infraestructura de regulación (embalses), que va a permitir el traspaso intra e interanual del recurso excedentario. Así, se planea la construcción de nuevos embalses (dentro del Plan Nacional de embalses y embalses solicitados por los usuarios) de regulación de aguas superficiales. El modelo computacional indicó que todos los embalses son factibles desde el punto de vista hidrológico, y en general con buen desempeño. Sin embargo, las reglas de operación empleadas en el PEGH fueron supuestos que podrían ser analizados y evaluados teniendo como objetivo una utilización óptima del recurso hídrico, tomando en cuenta más criterios en esa línea.

#### *3) Escenario de Gestión del Uso del agua:*

El objetivo es resolver la brecha hídrica mediante la reducción de la demanda de agua. Aunque la demanda sea multisectorial, el 97% del uso hídrico en la cuenca corresponde al sector agrícola, por lo que este escenario se enfoca

en el sector agrícola. Así, mejorar la eficiencia de riego es una prioridad en la cuenca (opinión actores, porcentajes eficiencia observado, etc.). En particular, en este escenario de gestión, a diferencia del escenario base de modelación (donde la eficiencia se mantiene constante en todo el periodo proyectado), la eficiencia de riego se aumenta paulatinamente hasta un promedio del 70% al año 2035.

*4) Estrategia de Gestión Compuesta:*

Se busca equilibrar el uso de cada solución y aplicar criterios de realismo en términos de los plazos potenciales de implementación, con el objetivo de responder a las necesidades de los usuarios y del territorio.

## ANEXO G: Agrupación de canales

**Tabla 0-2: Canales sometidos al criterio de reducción de la red de canales mediante la agrupación de canales**

Canal agrupador	Canal agrupado	Elemento que abastece
Achibueno_3	CA64	ZR-80
Achibueno_3	CA65	ZR-80
Achibueno_3	CA66	ZR-80
Achibueno_3	CA67	ZR-80
Achibueno_3	CA68	ZR-80
Alimentador_Digua	CA113	Embalse Digua
JV_Achibueno_1	CA47	ZR-75
JV_Achibueno_1	CA48	ZR-75
JV_Achibueno_1	CA50	ZR-75
JV_Achibueno_1	CA51	ZR-75
JV_Achibueno_1	CA52	ZR-75
JV_Achibueno_2	CA56	ZR-63
JV_Achibueno_2	CA57	ZR-63
JV_Achibueno_2	CA59	ZR-63
JV_Longavi_1	CA117	ZR-84
JV_Longavi_1	CA118	ZR-84
JV_Longavi_1	CA121	ZR-84
JV_Longavi_1	CA122	ZR-84
JV_Longavi_1	CA124	ZR-84
JV_Longavi_1	CA125	ZR-84
JV_Longavi_2	CA114	ZR-84
JV_Longavi_2	CA115	ZR-84
JV_Longavi_2	CA116	ZR-84
JV_Longavi_2	CA119	ZR-84
JV_Longavi_2	CA123	ZR-84
JV_Longavi_3	CA120	ZR-84
JV_Longavi_3	CA126	ZR-84
JV_Longavi_3	CA127	ZR-84
JV_Longavi_3	CA128	ZR-84
JV_Longavi_3	CA129	ZR-84
JV_Longavi_3	CA133	ZR-84
JV_Longavi_3	CA134	ZR-84
JV_Longavi_4	CA130	ZR-84
JV_Longavi_4	CA131	ZR-84

<b>Canal agrupador</b>	<b>Canal agrupado</b>	<b>Elemento que abastece</b>
JV_Longavi_4	CA132	ZR-84
JV_Longavi_4	CA135	ZR-84
JV_Perquillauquen_1	CA145	ZR-95
JV_Perquillauquen_1	CA146	ZR-95
JV_Perquillauquen_1	CA147	ZR-95
JV_Perquillauquen_2	Bajos de Huenutil	ZR-95
JV_Perquillauquen_2	Buen Recuerdo	ZR-95
JV_Perquillauquen_3	Canchuque	ZR-96
JV_Perquillauquen_3	Bucalemu	ZR-96
JV_Perquillauquen_3	Méndez	ZR-96
JV_Perquillauquen_4	CA149	ZR-95
JV_Perquillauquen_4	CA150	ZR-95
JV_Perquillauquen_4	CA151	ZR-95
JV_Perquillauquen_4	Santa Fresia	ZR-95
JV_Perquillauquen_5	CA152	ZR-95
JV_Perquillauquen_5	CA153	ZR-95
Longavi_6	CA138	ZR-85
Longavi_6	CA139	ZR-85

*Fuente: Anexo H-2 PEGH Maule (DGA, 2020)*