



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS Y PROPUESTA PRELIMINAR DE ACTUALIZACIÓN DEL
CONVENIO PARA EL USO COMPARTIDO DE LOS RECURSOS DEL
EMBALSE LAGUNA DEL MAULE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PABLO IVER GORZIGLIA

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
XIMENA VARGAS MESA
JAMES MCPHEE TORRES

SANTIAGO DE CHILE
2023

ANÁLISIS Y PROPUESTA PRELIMINAR DE ACTUALIZACIÓN DEL CONVENIO PARA EL USO COMPARTIDO DE LOS RECURSOS DEL EMBALSE LAGUNA DEL MAULE

La operación del embalse multipropósito Laguna del Maule se encuentra regulada por un convenio entre los usuarios que data de 1947. El convenio establece entregas para riego e hidroelectricidad en tres zonas del embalse, definidas como colchón superior, intermedio e inferior. Este convenio no ha sido actualizado desde su inicio, y la Laguna ha ido experimentando bajas considerables en su volumen almacenado, especialmente desde el 2011 hasta la fecha.

Para abordar este problema, el objetivo general de la memoria es evaluar el Convenio de operación de la Laguna del Maule y proponer cambios de actualización para enfrentar la escasez hídrica del sector en cuatro escenarios de cambio climático.

Se proponen tres alternativas que consisten en agregar un cuarto colchón al embalse entre los actuales colchones intermedio e inferior. Este se agrega quitándole 190 [hm^3] al colchón superior. La alternativa 1 asigna un 50 % de reserva del volumen y afluentes para la recuperación de la laguna en el colchón de transición. La alternativa 2, agrega además de lo definido por la alternativa 1 un 10 % de reserva del volumen y afluentes para la recuperación de la laguna en el colchón intermedio. Por último, la alternativa 3 mantiene los volúmenes establecidos en la alternativa anterior y disminuye el límite máximo de extracción para uso de hidroelectricidad en todos los colchones, pasando de 250 [hm^3] a 200 [hm^3].

Para evaluar y comparar las tres alternativas de actualización propuestas se utiliza un modelo en el programa computacional WEAP desarrollado como parte del PEGH, que permite simular el comportamiento hidrológico y operacional de la cuenca de estudio. Este modelo utiliza datos de caudales afluentes (BHN 2018) obtenidas con forzantes de cuatro modelos climáticos (CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC) y caudales de demandas de generación hidroeléctrica (proporcionados por el modelo de optimización AMEBA, que emula la operación del sistema eléctrico a largo plazo). A partir del modelo se obtienen series de tiempo de entregas y volúmenes para el período 2021-2047. Estas series son luego procesadas para calcular indicadores como la seguridad de riego y el volumen almacenado.

Los resultados principales de la presente investigación indican una mejora en la evolución del volumen embalsado en el horizonte de modelación evitando caídas a la porción inferior para todas las alternativas. También, se logra mantener y hasta aumentar las entregas de riego totales, almacenando agua para entregarla en temporadas de sequías prolongadas. La seguridad de riego se ve aumentada para las tres alternativas propuestas, aumentando de 41 % en el caso base al 76 % en la alternativa 3 para el modelo CCSM4. Por último, para el caso de la generación hidroeléctrica, las entregas son menores para las propuestas de actualización del Convenio, por lo que se sugiere trabajo futuro enfocado en un análisis más exhaustivo en esa arista.

*Para quienes creyeron,
y quienes estuvieron.*

Pablo

Agradecimientos

Agradecer a mi papá y a mi mamá, por sus enseñanzas, retos y felicitaciones durante mi vida y etapa formativa, así como en mis años universitarios.

Agradecer a mis hermanas y hermanos por su apoyo y buena onda, por las alegrías que me han dado en la casa.

Agradecer a mis abuelas y abuelo, pilares fundamentales en mi felicidad.

Agradecer a mis amigos de todas mis etapas, en especial a aquellas y aquellos que estuvieron y me hicieron sentir cómodo, me dieron amor, me apoyaron y me dieron goce.

Agradecer al fútbol y al deporte, gracias por darme tantas herramientas y vivencias claves en la vida.

Agradecer a la Universidad, a sus docentes, funcionarios y funcionarias, por hacer nacer en mí un amor por la ciencia, y acrecentar mi búsqueda por la equidad y la empatía.

Agradecer a la vida, al conocimiento, a los viajes, a las oportunidades, al fracaso y a la tierra.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Introducción y Motivación	1
1.2. Objetivos	3
2. Antecedentes	4
2.1. Caracterización de la Cuenca	4
2.2. Convenio de ENDESA-Riego	7
2.3. Modelo Operacional de la cuenca Maule Cordillerano	10
2.4. Reglas de Operación de Embalses	12
3. Diagnóstico Situación Actual y Futura Proyectada sin Cambios al Convenio	16
3.1. Datos Observados Situación Actual Período Histórico	16
3.2. Comportamiento de Modelos GCM en Período Histórico y Futuro	19
3.3. Modelación de la Situación sin Cambios en Período Futuro	22
4. Propuesta de Soluciones y Modelación de Alternativas	30
4.1. Alternativa 1	32
4.2. Alternativa 2	37
4.3. Alternativa 3	41
5. Análisis y Discusión de Soluciones	45
6. Conclusiones y Trabajo Futuro	63
Bibliografía	66
Anexos	68
A. Modelo WEAP	68
B. Modelo PYTHON	69
C. Anexo F2 del PEGH	70

Índice de Tablas

2.1.	Hidroeléctricas Zona de Estudio Fuente: Elaboración Propia	6
2.2.	Canales de Regadío Zona de Estudio Fuente: Elaboración Propia	6
3.1.	Estadísticos afluentes Laguna del Maule período 2022-2047 Fuente: Elaboración Propia	20
3.2.	Estadísticos afluentes Laguna del Maule período 1991-2021 Fuente: Elaboración Propia	21
3.3.	Temporadas con Déficit de Riego Fuente: Elaboración Propia	25
3.4.	Años Fallos Caso Base Fuente: Elaboración Propia	28
3.5.	Seguridad de Riego Caso Base Fuente: Elaboración Propia	28
4.1.	Porcentaje de Semanas con Valores bajo los 200[hm^3] Fuente: Elaboración Propia	33
4.2.	Temporadas con Déficit de Riego con Alternativa 1 Fuente: Elaboración Propia	35
4.3.	Años Fallos Alternativa 1 Fuente: Elaboración Propia	36
4.4.	Seguridad de Riego Alternativa 1 Fuente: Elaboración Propia	37
4.5.	Porcentaje de Semanas con Valores bajo los 200 [hm^3] Alternativa 2 Fuente: Elaboración Propia	37
4.6.	Temporadas con Déficit de Riego con Alternativa 2 Fuente: Elaboración Propia	39
4.7.	Años Fallo Alternativa 2 Fuente: Elaboración Propia	40
4.8.	Seguridad de Riego Alternativa 2 Fuente: Elaboración Propia	41
4.9.	Porcentaje de Semanas con Valores bajo los 200 [hm^3] Alternativa 3 Fuente: Elaboración Propia	41
4.10.	Temporadas con Déficit de Riego con Alternativa 3 Fuente: Elaboración Propia	43
4.11.	Años Fallos Alternativa 3 Fuente: Elaboración Propia	44
4.12.	Seguridad de Riego Alternativa 3 Fuente: Elaboración Propia	44
5.1.	Déficit Totales de Riego Fuente: Elaboración Propia	50
5.2.	Déficit Remanente de Riego Totales Fuente: Elaboración Propia	54
5.3.	Estadísticos Déficit Remanente de Riego Fuente: Elaboración Propia	55
5.4.	Comparación Seguridad de Riego Fuente: Elaboración Propia	56
5.5.	Volúmenes Generación Totales Fuente: Elaboración Propia	60
5.6.	Estadísticos Volúmenes Generación Totales Fuente: Elaboración Propia	60
5.7.	Volúmenes Entregas Riego Totales Fuente: Elaboración Propia	61
5.8.	Estadísticos Volúmenes Entregas Riego Totales Fuente: Elaboración Propia	62

Índice de Ilustraciones

2.1.	Cuenca del río Maule Fuente: Elaboración Propia	4
2.2.	Diagrama unifilar de la zona de estudio Fuente: Elaboración Propia basada en PEGH (2020) y JVRM ([22])	5
2.3.	Distribución de la demanda física de usos consuntivos Fuente: PEGH Maule (2020)	7
2.4.	Porciones embalse Laguna del Maule Fuente: Elaboración Propia	8
2.5.	Variación estacional riego Fuente: Elaboración Propia basada en el Convenio (1947)	8
2.6.	Resumen usos de agua Fuente: Elaboración Propia en base al Convenio (1947)	10
2.7.	Standard Operating Policy (SOP) y Hedging Rule Fuente: Elaboración Propia basada en Draper and Lund (2004)	13
2.8.	Curvas de regla de embalse Fuente: Elaboración Propia basada en Ming-Yen Tu et al. (2003)	14
3.1.	Volumen embalsado Laguna del Maule histórico 2002-2022 Fuente: Elaboración Propia basada en información DGA en período 2002-2022	16
3.2.	Cota de Laguna del Maule histórico 1991-2022 Fuente: Elaboración Propia con datos suministrados por Colbún S.A.	17
3.3.	Entregas Mensuales Laguna del Maule histórico 2007-2020 Fuente: Elaboración Propia con datos suministrados por Colbún S.A.	18
3.4.	Entregas Históricas Laguna del Maule histórico 2007-2020 Fuente: Elaboración Propia con datos suministrados por Colbún S.A.	18
3.5.	Caudales Afluentes Laguna del Maule período 2022-2047 Fuente: Elaboración Propia	20
3.6.	Caudales Afluentes Laguna del Maule período 1991-2021 Fuente: Elaboración Propia	20
3.7.	Promedios diarios caudales afluentes Laguna del Maule período 1991-2047 Fuente: Elaboración Propia	21
3.8.	Volúmenes Futuros Fuente: Elaboración Propia	22
3.9.	Promedio Semanal Volumen Embalsado Fuente: Elaboración Propia	23
3.10.	Déficit Riego v/s Entrega Riego CCSM4 Fuente: Elaboración Propia	24
3.11.	Déficit Riego v/s Entrega Riego CSIRO Fuente: Elaboración Propia	24
3.12.	Déficit Riego v/s Entrega Riego IPSL Fuente: Elaboración Propia	25
3.13.	Déficit Riego v/s Entrega Riego MIROC Fuente: Elaboración Propia	25
3.14.	Tasa de Reparto en Frecuencia Acumulada Fuente: Elaboración Propia	26
4.1.	Diagrama Porciones de Embalse en Alternativas Fuente: Elaboración Propia .	31
4.2.	Volumen Embalsado Alternativa 1 Fuente: Elaboración Propia	33
4.3.	Déficit Riego v/s Entrega Riego CCSM4 Alternativa 1 Fuente: Elaboración Propia	34
4.4.	Déficit Riego v/s Entrega Riego CSIRO Alternativa 1 Fuente: Elaboración Propia	34
4.5.	Déficit Riego v/s Entrega Riego IPSL Alternativa 1 Fuente: Elaboración Propia	35

4.6.	Déficit Riego v/s Entrega Riego MIROC Alternativa 1 Fuente: Elaboración Propia	35
4.7.	Volumen Embalsado Alternativa 2 Fuente: Elaboración Propia	37
4.8.	Déficit Riego v/s Entrega Riego CCSM4 Alternativa 2 Fuente: Elaboración Propia	38
4.9.	Déficit Riego v/s Entrega Riego CSIRO Alternativa 2 Fuente: Elaboración Propia	38
4.10.	Déficit Riego v/s Entrega Riego IPSL Alternativa 2 Fuente: Elaboración Propia	39
4.11.	Déficit Riego v/s Entrega Riego MIROC Alternativa 2 Fuente: Elaboración Propia	39
4.12.	Volumen Embalsado Alternativa 3 Fuente: Elaboración Propia	41
4.13.	Déficit Riego v/s Entrega Riego CCSM4 Alternativa 3 Fuente: Elaboración Propia	42
4.14.	Déficit Riego v/s Entrega Riego CSIRO Alternativa 3 Fuente: Elaboración Propia	42
4.15.	Déficit Riego v/s Entrega Riego IPSL Alternativa 3 Fuente: Elaboración Propia	43
4.16.	Déficit Riego v/s Entrega Riego MIROC Alternativa 3 Fuente: Elaboración Propia	43
5.1.	Volumen Almacenado Laguna del Maule CCSM4 Fuente: Elaboración Propia .	45
5.2.	Volumen Almacenado Laguna del Maule CSIRO Fuente: Elaboración Propia .	46
5.3.	Volumen Almacenado Laguna del Maule IPSL Fuente: Elaboración Propia . .	46
5.4.	Volumen Almacenado Laguna del Maule MIROC Fuente: Elaboración Propia .	46
5.5.	Déficit de Riego CCSM4 Fuente: Elaboración Propia	48
5.6.	Déficit de Riego CSIRO Fuente: Elaboración Propia	49
5.7.	Déficit de Riego IPSL Fuente: Elaboración Propia	49
5.8.	Déficit de Riego MIROC Fuente: Elaboración Propia	50
5.9.	Entregas Riego CCSM4 Fuente: Elaboración Propia	51
5.10.	Entregas Riego CSIRO Fuente: Elaboración Propia	51
5.11.	Entregas Riego IPSL Fuente: Elaboración Propia	51
5.12.	Entregas Riego MIROC Fuente: Elaboración Propia	52
5.13.	Déficit Remanente de Riego - CCSM4 Fuente: Elaboración Propia	52
5.14.	Déficit Remanente de Riego - CSIRO Fuente: Elaboración Propia	53
5.15.	Déficit Remanente de Riego - IPSL Fuente: Elaboración Propia	53
5.16.	Déficit Remanente de Riego - MIROC Fuente: Elaboración Propia	54
5.17.	Volumen Generación Modelo CCSM4 Fuente: Elaboración Propia	58
5.18.	Volumen Generación Modelo CSIRO Fuente: Elaboración Propia	58
5.19.	Volumen Generación Modelo IPSL Fuente: Elaboración Propia	59
5.20.	Volumen Generación Modelo MIROC Fuente: Elaboración Propia	59

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción y Motivación

La megasequía en Chile se ha prolongado desde el año 2010 hasta la actualidad ([1]), y sus efectos se han ido palpando año a año en las diferentes regiones del país; entre las regiones de Coquimbo y de La Araucanía los déficits de precipitaciones han superado el 30%. Sumado a esto, en el año 2019 se experimentó un déficit del 79% de las precipitaciones en la zona central ([2]), lo que va de la mano con que más del 50% de las comunas en Chile estén bajo el decreto de escasez hídrica ([3]), sumándose el año 2022 seis nuevas comunas de la Región Metropolitana ([4]).

Ello, sumado al cambio climático (se está en la década más cálida de los últimos 100 mil años [5]) y a políticas deficientes en el marco de la gestión del recurso hídrico (el 60% de escasez de agua en Chile es causada por una mala gestión del recurso, aumento de demanda y el sobreotorgamiento de derechos de agua [6]), han puesto de manifiesto que las estrategias hídricas han sido deficientes para gestionar óptimamente el recurso hídrico en el contexto actual.

Actualmente, el ente rector a cargo de generar nuevas políticas y desarrollar proyectos para la sustentabilidad y buen manejo del recurso hídrico es la Dirección General de Aguas, organismo del estado que se encarga de gestionar, verificar y difundir la información hídrica del país, dentro de un marco de sustentabilidad, prevalencia del interés público y eficiencia en la asignación del recurso hídrico ([7]). El manejo del recurso hídrico, así como lo han demostrado una cantidad de expertos y expertas ([8]), debe ser visto por cada cuenca de manera independiente. Dentro de este contexto, desde el año 2019 se han realizado distintos Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH), que han sido licitados desde la DGA y del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

Anteriores a los PEGH, existían (y existen en algunas zonas hasta el día de hoy) los Planes Estratégico o Planes Maestros, los cuales generaban un diagnóstico hídrico-organizacional por región o cuenca. Sin embargo, los Planes Maestros o Estratégicos no poseían un carácter normativo, así como tampoco eran los únicos reguladores hídrico-operacionales, habiendo otros planes y planificaciones en esta misma materia realizados por públicos (MOP, MINAGRI, CNR) y privados, lo que generaba una mala administración del recurso hídrico. Estos distintos planes no poseían coordinación unos con otros, lo que generaba una gestión del recurso

hídrico fragmentada.

Sumado a esto, el cambio climático y el nuevo contexto hídrico nacional golpearon a una ya deficiente política pública hídrica con eventos extremos como sequías, inundaciones, altas intensidades de precipitación y deshielo.

Así, los PEGH buscan solucionar de manera íntegra, sustentable, a largo plazo y en forma transparente los problemas de gestión hídrica en las distintas cuencas del país en donde la DGA define que ello es necesario. En concreto, la cuenca del Maule es una de las cuencas que ya cuentan con un PEGH completo, el cual fue analizado en esta Memoria de Título. Específicamente se analizó y evaluó las normas de operación de la Laguna del Maule, las cuales siguen al "Convenio ENDESA-Dirección de Riego del MOP para el Uso Compartido de los Recursos del Embalse Laguna del Maule" (desde ahora llamado como el Convenio de Riego, o simplemente Convenio).

Este Convenio, que data de 1947, posee 18 artículos y divide al embalse en tres colchones: colchón superior, colchón intermedio y el colchón inferior. También norma las cantidades de entrega en volumen para riego y para generación hidroeléctrica, así como los máximos caudales para las entregas de generación. Para el caso de las entregas de riego, define una estacionalidad por meses. Estas entregas las define la cota de pelo de agua en el primer día del año calendario, que, dependiendo en que colchón se encuentre, se aplicarán o no restricciones a los usos. En el punto (2.1) se discutirá y explicará de mejor forma el Convenio.

Se analizará también el Modelo Weap del sector cordillerano de la cuenca de estudio, ya que dentro del marco del PEGH se desarrollaron dos modelos de cuenca, debido a las diferencias geológicas e hidrológicas presentes. El primer modelo corresponde al ya mencionado, el cual modela solamente el agua superficial ya que los acuíferos del subsuelo son despreciables. El segundo modelo corresponde al del Maule Bajo, que posee un acople superficial-subterráneo (acople WEAP - ModFlow). El modelo de interés es el primero

El modelo cordillerano, también conocido como del Maule Alto, se rige por las normas de operación del embalse Laguna del Maule, las cuales se modificarán en base a distintas propuestas de operación para comparar cómo afectan a la disponibilidad del recurso hídrico, a las entregas de riego e hidroelectricidad, coberturas y seguridad de riego, y al volumen de generación hidroeléctrica, que está ligado al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), entre otros factores.

Así, se plantean mejoras en el Convenio HR que mejor aborden la brecha hídrica de la cuenca de estudio, así como mejoren la disponibilidad hídrica en un contexto de megasequía, priorizando fallas en las entregas (para riego y generación) de magnitudes menores pero de frecuencias mayores que fallas con poca frecuencia pero de magnitudes altas.

Por último, esta memoria no pretende generar un PEGH nuevo o extendido, sino que recomendaciones a cómo enfrentar las operaciones de embalses de multi-uso, en especial los de Laguna del Maule y de la Laguna la Invernada, con justificación técnica y una propuesta para la selección de alternativas.

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta memoria es evaluar el Convenio HR de operación de la Laguna del Maule y proponer y evaluar cambios en él para enfrentar la escasez hídrica del sector en un contexto de megasequía.

Los objetivos específicos de ella se presentan a continuación:

1. Evaluar desempeño de la Laguna del Maule bajo Convenio vigente en diversos escenarios climáticos.
2. Identificar y diseñar cambios al Convenio
3. Evaluar efecto de modificaciones bajo diversos escenarios climáticos.
4. Recomendar modificaciones al convenio.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Caracterización de la Cuenca

La cuenca del Maule posee una superficie de 21.054 [km²]. Dentro de esta, se puede identificar la subcuenca Maule Alto, que es la que fue analizada en esta memoria. Esta subcuenca contiene tres cuerpos de agua principales: Laguna del Maule, Embalse Melado y Laguna La Invernada. También, posee distintas estaciones fluviométricas, en donde Río Maule en Armerillo es la estación más influyente en el desarrollo de este trabajo. A nivel administrativo, esta cuenca se ubica en su mayoría en la Región del Maule, y en menor medida en la Región del Ñuble.

La Figura 2.1 presenta un mapa de la zona de estudio con distintos elementos importantes, elaborada en GRASS y QGIS con datos obtenidos desde la DGA y desde Google.

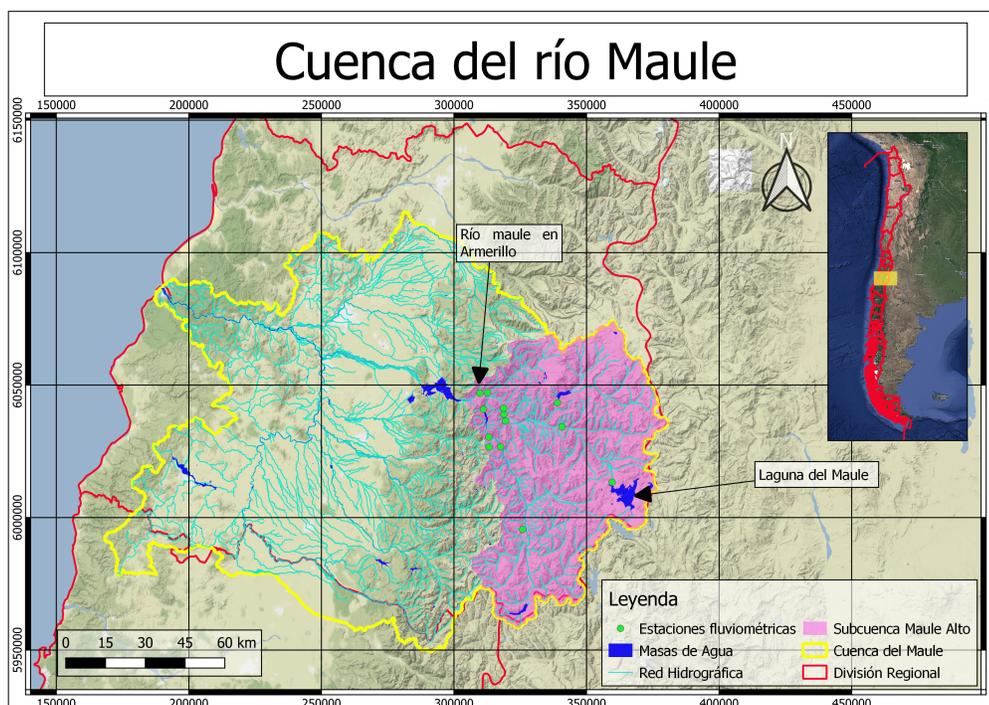


Figura 2.1: Cuenca del río Maule
Fuente: Elaboración Propia

En esta subcuenca, los cursos principales son los ríos Maule, Claro, Melado y Cipreses, los cuales se pueden apreciar en la Figura 2.2. Todos estos cursos confluyen hacia el río Maule, el que desemboca al norte de la ciudad de Constitución. Estos cursos de agua poseen sus mayores caudales en los meses de primavera-verano, que es cuando ocurren los deshielos, los cuales cada vez acontecen más temprano. ([9])

En la Figura 2.2, se presenta un diagrama unifilar de la zona de estudio, este se realizó en base a los diagramas unifilares del PEGH de la cuenca del Río Maule y de la Junta de Vigilancia del Río Maule, junto a la central proyectada de Los Cóndores.

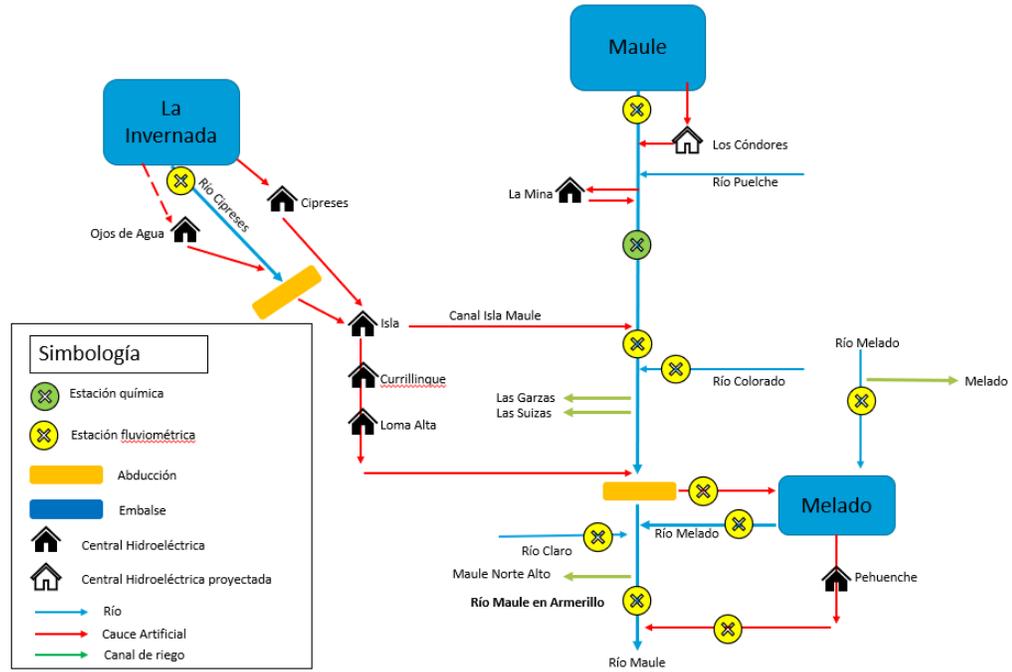


Figura 2.2: Diagrama unifilar de la zona de estudio
Fuente: Elaboración Propia basada en PEGH (2020) y JVRM ([22])

La subcuenca Maule en Armerillo posee muchas intervenciones en sus cauces, como se puede ver en la Figura 2.2. Varias hidroeléctricas, canales de riego, bocatomas y cauces artificiales hacen que el régimen natural se haya perdido en el río Maule. Debido a ello, el caudal del Maule en Armerillo debe ser procesado para obtener el caudal real, llamado Caudal Reconstituido en Armerillo (Q'_{RAR}). Según DGA y la Junta de Vigilancia del Río Maule este caudal se calcula de la siguiente manera:

$$Q'_{RAR} = Q_{Ar} + Q_{LG} + Q_{LS} + Q_M + Q_{MN} + \Delta EM + Q_{EP} \quad (2.1)$$

Donde:

Q_{AR} = Caudal medido en Armerillo [m^3/s].

Q_{LG} = Caudal canal Las Garzas [m^3/s].

Q_{LS} = Caudal canal Las Suizas [m^3/s].

Q_M = Caudal canal Melado [m^3/s].

Q_{MN} = Caudal canal Maule Norte Alto [m^3/s].

ΔEM = Variación diaria embalse Melado, dividido por 86.400 [m^3/s].

Q_{EP} = Caudal evacuación Pehuenche [m^3/s].

Las hidroeléctricas en la zona son las siguientes:

Tabla 2.1: Hidroeléctricas Zona de Estudio
Fuente: Elaboración Propia

Nombre Central	Pertenece a	Potencia [MW]	Tipo	Operación	Caudal [m^3/s]
Cipreses	ENEL	106	De cabecera de embalse	1955-presente	36
Currillinque	ENEL	90	De pasada	1993-presente	84
Isla	ENEL	70	De pasada	1963-presente	84
La Mina	Colbún	34	De pasada	2018-presente	60
Loma Alta	ENEL	40	De pasada	1997-presente	84
Los Cóndores	ENEL	150	De pasada	Proyectada 2023	25
Ojos de Agua	ENEL	9	De pasada	2008-presente	13
Pehuenche	ENEL	570	De cabecera de embalse	1991-presente	300

Luego, los canales de regadío son los siguientes:

Tabla 2.2: Canales de Regadío Zona de Estudio
Fuente: Elaboración Propia

Canal	Acciones	Porcentaje
Las Garzas	250	0,18 %
Las Suizas	150	0,11 %
Maule Norte	37.766	26,5 %
Melado	18	12,6 %

El total de acciones en porcentaje de estos cuatro canales totalizan casi un 40%. Este porcentaje y sus respectivas acciones asociadas a los canales de regadío son en base al máximo de caudal disponible para riego en la cuenca, que corresponde a 200 [m^3/s] según lo explicitado en el Convenio de ENDESA-Riego (1947) y por la Junta de Vigilancia del Río Maule.

Por último, cabe destacar que casi el 98% de la demanda física de usos consuntivos en la cuenca del Maule es del sector agrícola, seguido del consumo humano que posee una demanda levemente superior al 1%. La Figura 2.3 extraída desde el PEGH del Maule entrega el detalle.

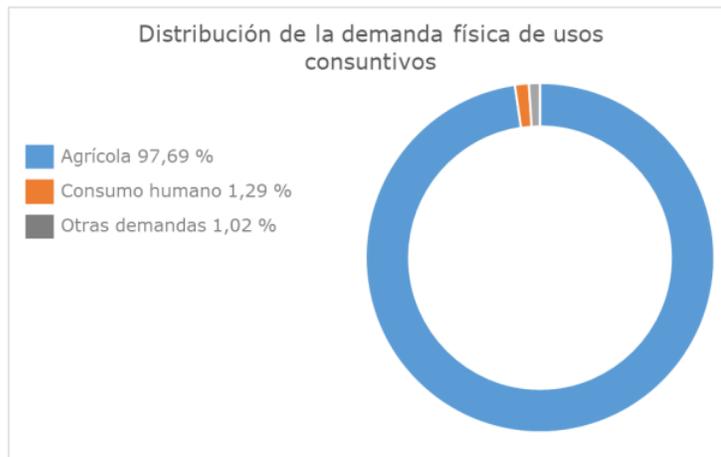


Figura 2.3: Distribución de la demanda física de usos consuntivos
Fuente: PEGH Maule (2020)

2.2. Convenio de ENDESA-Riego

Este convenio fue suscrito en 1947 entre la Dirección de Riego (hoy DOH) y ENDESA (hoy Colbún y Enel), que establece las normas de operación del embalse de Laguna del Maule y la explotación del recurso por parte de ambas entidades. Este embalse natural tiene por objetivo dar seguridad hídrica al riego en la cuenca y alterar el régimen hidrológico de este río, debido a que se encuentra en la parte alta de la cuenca (embalse de cabecera).

En el convenio, se establece que en función de la porción del embalse en que se encuentre la cota de pelo de agua al inicio del año calendario (ver Figura 2.4), se otorgan distintos caudales y volúmenes de explotación para el riego y para la generación hidroeléctrica. Según el *artículo 1*, en la porción superior la administración del agua se hará según el uso normal sin restricciones; para la porción intermedia se considerará como reserva ordinaria y se aplicarán ciertas restricciones en su uso; mientras que en la porción inferior, se constituirá como reserva especial, en donde el agua solo se podrá utilizar según acuerdo específico entre ambas partes. En la Figura 2.4 se detallan los tres colchones del embalse en que se divide, así como se muestran los principales aportantes a este (precipitación líquida y sólida) y los usos que se le da al recurso hídrico (regadío y generación hidroeléctrica).

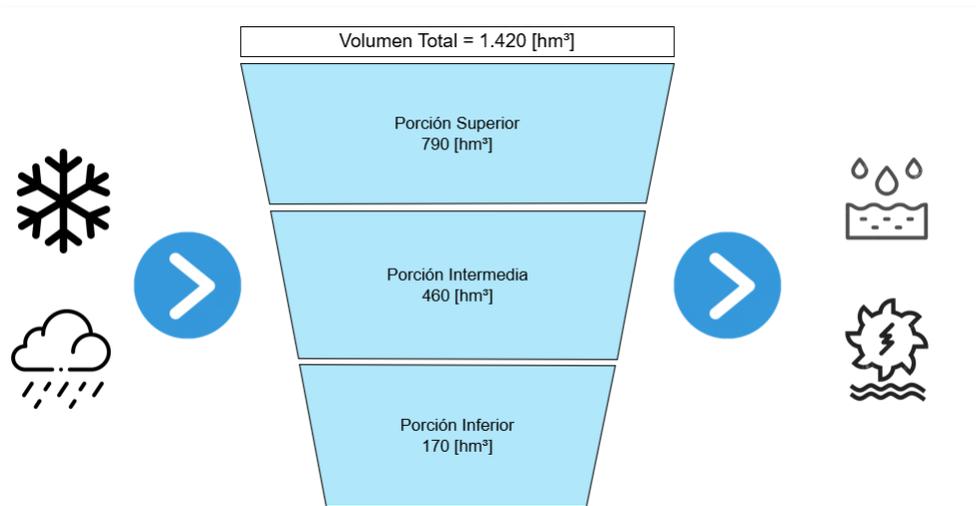


Figura 2.4: Porciones embalse Laguna del Maule
Fuente: Elaboración Propia

Para el uso de riego, se tiene un volumen máximo de uso por temporada de 800 [hm³/año], con un gasto máximo estacional de 200 [m³/s], en donde la entrega mensual varía según la Figura 2.5, donde los porcentajes son con respecto a los 200 [hm³] que corresponden al 100%.



Figura 2.5: Variación estacional riego
Fuente: Elaboración Propia basada en el Convenio (1947)

De la Figura 2.5 se puede apreciar que la temporada de riego va desde septiembre hasta mayo.

Por el lado de la generación hidroeléctrica, se tiene un uso anual máximo de 250 [hm³/año], más el uso de los gastos deficitarios de riego. Los gastos deficitarios de riego se definen en el Convenio como la resta entre el régimen natural del río Maule y el caudal otorgado para riego según sus DDAA, definido negativamente. Así, los gastos deficitarios de riego son las entregas para riego. Adicionalmente, se tiene un volumen de compensación máximo de 350 [hm³/año], que corresponde a un pozo acumulado que va sumando cada temporada el agua

que no se utiliza de los 250 [$hm^3/año$] otorgados a ENDESA. Este volumen de compensación solo se puede utilizar cuando la cota de pelo de agua se encuentra en la porción superior del embalse al inicio del año calendario. Por último, se definen los caudales máximos de extracción, los cuales son el gasto máximo medio mensual, de 25 [m^3/s], y el máximo medio diario, correspondiente a 30 [m^3/s]. Todo esto para la generación de hidroelectricidad cuando la cota de pelo de agua se encuentra en la porción superior al inicio del año calendario.

Para el colchón intermedio, se tienen ciertas restricciones para ambos usos del agua. Estas restricciones corresponden a que el uso máximo del recurso hídrico para riego corresponde al 80 % del volumen de la reserva ordinaria más el 80 % de las aguas afluentes a la laguna, desde el momento que comenzó el uso de la reserva. Por el lado de las hidroeléctricas, se puede usar el 20 % de ambas partidas para la generación, siendo computado solamente una vez por año calendario. Se reitera que la reserva corresponde al volumen de la porción intermedia de la laguna.

Por último, para el caso de ex ENDESA, puede utilizar una cuota suplementaria, previa autorización del MOP, de 50 [hm^3], siempre y cuando no sea superior al 50 % de la reserva ordinaria (correspondiente al volumen del colchón intermedio) y que se compruebe que el deshielo producirá por lo menos 500 [hm^3] en su temporada. La comprobación de la cantidad de volumen de agua que escurrirá por efecto de los deshielos hacia la Laguna queda en manos de la JVRM y de ENEL.

Otro punto importante son las economías de agua, existentes gracias a la operación de multi-embalse Laguna del Maule y Laguna La Invernada. Esto supone un 'swap' en la entrega de aguas para riego de parte de ex ENDESA, en donde las aguas serán entregadas desde La Invernada. Estas aguas en exceso del agua entrante (afluentes) a Invernada serán catalogadas como economías de aguas, y quedarán a disposición de ex ENDESA para ser usadas desde la Laguna Maule. Este volumen se castigará cuando haya que evacuar agua de este embalse debido a falta de capacidad, y solo se podrá usar en la porción superior.

Finalmente, para la parte inferior, las aguas solo podrán ser utilizadas según acuerdo de ambas partes.

A modo de resumen, se presenta una figura para un mejor entendimiento de las porciones y de los volúmenes aprovechables de ambas partes en función de la porción del embalse en el que se encuentra la cota de pelo de agua, en forma descendente.



Figura 2.6: Resumen usos de agua
Fuente: Elaboración Propia en base al Convenio (1947)

Es necesario indicar que en esta figura no se toman en cuenta dos volúmenes adicionales otorgados a la generación hidroeléctrica. El primero es el volumen suplementario máximo de 50 [hm³] por deshielo, y el segundo son las economías de aguas, ambos explicados en este capítulo.

Para saber en que colchón está ubicada la cota de pelo de agua de la Laguna, y así obtener los volúmenes de entregas máximas disponibles, se realiza una medición en la misma el primer día del año calendario por parte de la Junta de Vigilancia del Río Maule y de la DOH (quien administra el embalse). Así, se obtienen las normas y directrices que definirán las entregas durante el año.

2.3. Modelo Operacional de la cuenca Maule Cordillerano

Este plan, desarrollado en el marco del PEGH, realizado por la consultora Hidrogestión S.A. y UTP Everis S.A. y publicado el 2020, viene a intentar combatir la escasez hídrica en la cuenca (PEGH 2020) proponiendo distintos paquetes de soluciones, siguiendo un plan de acción de corto, mediano y largo plazo. Estas soluciones, según el plan, pueden ser del tipo obras hidráulicas (construcción o mantenimiento), medidas de gestión, nuevas fuentes (perforaciones de pozos o tratamiento de aguas) y otras medidas.

Para su desarrollo, se utilizó el programa computacional WEAP, que genera modelos hidrológicos-operacionales de alta complejidad con muchas variables de entrada y de salida. Este programa lee series de variables hidro climáticas para generar hidrologías futuras y pasadas y así obtener la disponibilidad hídrica en los distintos cauces y fuentes de agua. También, al modelo WEAP se le introducen variables de entrada como lo son demandas (uso

humano, riego, hidroeléctricas, industriales, etc.), parámetros característicos de los distintos actores (embalses, canales, hidroeléctricas, etc.), usos de suelo, bandas de elevación, etc. para que así pueda generar demandas hídricas y pérdidas hídricas, así como también logre simular el comportamiento de la cuenca.

En cuanto a las hidrologías pasadas, sirve para poder calibrar el modelo con los datos observados de volumen embalsado en Laguna del Maule e hidrologías en la zona. Esta calibración fue hecha en un primer lugar por la consultora a cargo del PEGH (2020) y en un segundo lugar por el tesista de magíster Eugenio Fuentes (2022).

Así, cuando se ejecuta este programa, se entrega una gran cantidad de información que se relaciona a la gestión hídrica de la cuenca de estudio, en donde se puede acoplar con el programa MODFLOW, que trabaja en aguas subterráneas. Parámetros y variables como caudales, volúmenes almacenados, tasas de reparto en riego, caudales turbinados, etc. son entregados en una serie de tiempo que va desde el año hidrológico 2021 hasta el año hidrológico 2046, teniendo una frecuencia semanal para este modelo en particular (el programa WEAP puede trabajar con distintas frecuencias).

Específicamente para este caso, se generaron dos modelos en la cuenca del Maule: uno para la parte alta de la cuenca (ver Figura 2.1) y otra para la parte media-baja. Para el modelo cordillerano (parte alta), no se acopló WEAP con MODFLOW debido a la poca capacidad de almacenar aguas en las napas subterráneas de esa zona.

Para el Convenio HR de 1947, se modela el sistema que define las entregas de agua destinadas a riego y las entregas de agua destinadas a hidroelectricidad. Estas, dependen meramente del volumen embalsado en el embalse, en donde para cada variable se debe poner los límites de cada porción y sus respectivas entregas para riego e hidroelectricidad, modeladas por separado.

Así, se crean las variables de volúmenes para riego y para hidroelectricidad, las cuales se transforman en demandas de caudales separadas por semanas. También, es importante notar que la demanda de riego sigue la estacionalidad que define el Convenio.

Otro punto sustancial es que el inicio de operación de la central Los Cóndores (aún en fase de construcción) se proyecta en el 2023 en el modelo WEAP, por lo que existen dos tipos de variables asociadas a la generación hidroeléctrica: una con la central Los Cóndores y otra sin la central Los Cóndores. Así, para evaluar estas entregas, se deben acoplar los resultados para tenerlos en todo el horizonte de modelación.

Importante notar que, en las definiciones de entregas, se consideran los caudales de los afluentes como cero. Esto se ve plasmado en el modelo ya que, cuando se define la suma entre el porcentaje del volumen de reserva y el porcentaje del afluente, este último se multiplica por cero. Tampoco se modela el switch entre Laguna Invernada y Laguna del Maule, quedando las economías de agua fuera del análisis. El volumen de compensación y el volumen extra en caso de deshielo tampoco entran al modelo.

Para las soluciones, el PEGH del Maule no generó medidas correctivas en las normas de

operación de embalses, sino que se realizaron escenarios de gestión, en donde se crearon nuevos embalses en el modelo, guiados por ciertos estudios de prefactibilidad y el Plan Nacional de Embalses 2019, así como también un escenario de gestión de aguas subterráneas, en donde se extraen un mayor volumen de agua desde pozos subterráneos. Un tercer escenario hace alusión a la mejora en la eficiencia de riego, en una cuenca donde casi el 98 % del agua es usada en riego, y donde la eficiencia de este ronda el 50 % ¹.

Sin embargo, en el contexto de esta memoria, el modelo WEAP cordillerano modificado resulta fundamental. Fue el tesista de magíster de la Universidad de Chile, Eugenio Fuentes, quien realizó las modificaciones pertinentes para mejorar la calibración del comportamiento del modelo, en particular, en lo que respecta al volumen embalsado de la Laguna del Maule. Estas modificaciones resultaron en una mejora sustancial del modelo WEAP. Entre los cambios mas importantes están las variables de entrada de los caudales afluentes al modelo, los que se obtuvieron directamente de DGA (2018), y las demandas hidroeléctricas, obtenidas del modelo de optimización AMEBA, desarrollada por la consultora SPEC Energy Consulting. Estos cambios generaron una baja al tiempo que le lleva el modelo hacer las simulaciones, comparado al modelo desarrollado por la consultora en el PEGH. Así, se trabaja con este modelo WEAP mejorado para, en un primer lugar, generar un diagnóstico en la parte alta de la cuenca y, en segundo lugar, modelar paquetes de soluciones para generar sus propios diagnósticos y luego compararlos con la situación actual. (ver ANEXO 1)

2.4. Reglas de Operación de Embalses

En las últimas décadas, abunda la literatura sobre la gestión óptima de los embalses (Giuliani et al. 2021), debido a la creciente preocupación sobre la correcta distribución del recurso hídrico a lo largo de los años, donde las sequías han aumentado de magnitud y se han generado con mayor frecuencia ([23]). Por ello, es que se ha llegado a distintas maneras de abordar este problema, con el siempre importante componente local, que hace que cada problema sea distinto.

Las reglas de operación de los embalses son un conjunto de procedimientos y criterios que sirven para poder gestionar el almacenamiento y las entregas de agua para los distintos usuarios. Estas tienen como objetivo el poder satisfacer las demandas sin llegar a secar el embalse ni llegar a los niveles de inundación. Estas reglas varían bastante según los usos del embalse, el clima y la hidrología del lugar, entre otros factores. Específicamente, existe la regla estándar de operación (SOP por sus siglas en inglés), que se puede apreciar en la Figura 2.7. Esta regla controla las entregas de agua basada en una entrega objetivo. Esta entrega objetivo es, por lo general, la demanda del embalse, y cuando se tiene una disponibilidad de agua igual o mayor a esta entrega objetivo, se entrega esta. Cuando la disponibilidad de agua supera a la cota del embalse, se hace uso de los vertederos. Por otro lado, cuando la disponibilidad de agua es menor a la entrega objetivo, se entregará toda el agua que se tenga en el embalse.

Debido a los problemas que la SOP ha tenido, se ha instruido en esta disciplina el término de "Hedging Rules". Este es un término en inglés que se refiere al problema de cuanta agua

¹ PEGH Maule, 2019

entregar y cuánta agua reservar en el reservorio (embalse). Un buen manejo de embalses debe tener un “set de procedimientos operacionales, reglas, variabilidad temporal o planes que mejor cumplan una serie de objetivos” (USACE 1991).

Es así como mediante el "hedging", la decisión de cuánta agua entregar para usar en beneficio y de cuanta retener para algún potencial uso futuro se hace más fácil y da una hoja de ruta para lograrlo. Este, reduce los riesgos y costos de una sequía prolongada a costa de tener sequías de menores magnitudes, pero con mayor frecuencia (Luud and Reed, 1995). El Hedging es una función convexa y no lineal (ver Figura 2.7, en línea negra) que modifica la función original (ver Figura 2.7, en línea roja) dentro del gráfico de entregas v/s disponibilidad de agua. Para que el efecto sea el esperado, se debe aplicar a reservorios en donde existan altas probabilidades de sequías prolongadas ([21]). En la Figura 2.7, se entrega una imagen de la función SOP con la función Hedging para un mejor entendimiento:

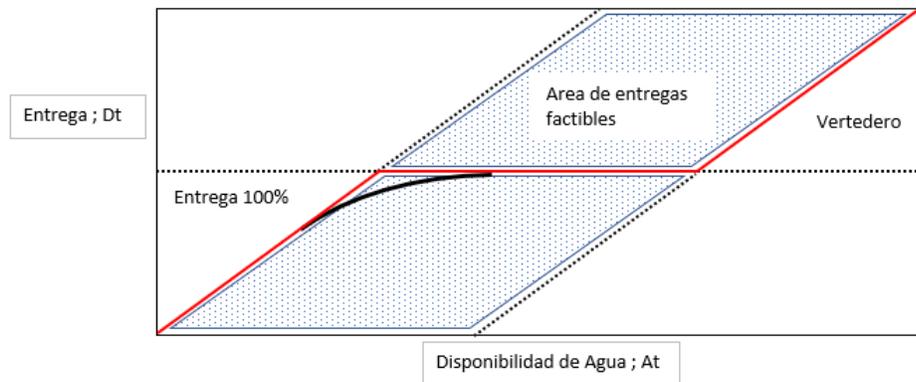


Figura 2.7: Standard Operating Policy (SOP) y Hedging Rule
Fuente: Elaboración Propia basada en Draper and Lund (2004)

En la Figura 2.7 se muestra cómo la Standard Operating Policy (política operativa estándar en español), que sigue la línea roja, no posee ninguna restricción en el almacenamiento para futuros usos, ya que entrega como demanda toda el agua disponible para la demanda en el primer tramo de la curva. Luego, entrega la demanda objetivo y, cuando el almacenamiento es mayor y puede desbordar el reservorio, se hace uso de los vertederos para impedir aquello.

Por su parte, la hedging rule es la curva convexa, destacada en color negro y que en general se ubica por debajo de la SOP. Con ella es que se supone no entregar todo el volumen disponible para la demanda y dejar cierta cantidad de agua almacenada para futuros usos. Cabe destacar que esta es a modo de ejemplo y que para cada caso, región y usos de los embalses se deberá buscar una nueva curva.

El punto de partida de la función hedging es la función de beneficio/utilidad de cada sistema de reservorio, sin embargo, estas son muy complejas de obtener, más aún cuando se posee un reservorio de multi propósito como lo es la Laguna del Maule. La experiencia indica que se debe aminorar la pendiente de la curva del SOP en su primera fase, que es cuando se llega a la demanda requerida en el eje de la Entrega ([21]). Esta primera fase del SOP

hace referencia a las instancias finales en donde el volumen equipara a la demanda neta, es decir, cuando se está cercano a la entrega del 100 % de la demanda objetivo. Así se busca almacenar agua cuando la entrega es sustancial y cuando el déficit no es tan importante.

Así, con la función de utilidad, se debe hacer un balance económico entre el beneficio de la liberación de agua y el almacenamiento de esta. Con ello se lleva a generar una función óptima del "hedging rule" ([21]).

Para los embalses multi propósito, los cuales pueden ser para riego, generación hidroeléctrica, control de inundaciones, funciones ecosistémicas, riego, consumo humano, entre otros, las hedging rules tienden a ser más complicadas y difíciles de analizar debido a las distintas funciones de utilidad que posee cada propósito, por lo que se dificulta mucho la formulación de una única función para todo el sistema ([20]). En la Figura 2.8, se presenta una imagen con las curvas de regla de un embalse de este tipo, genéricas:

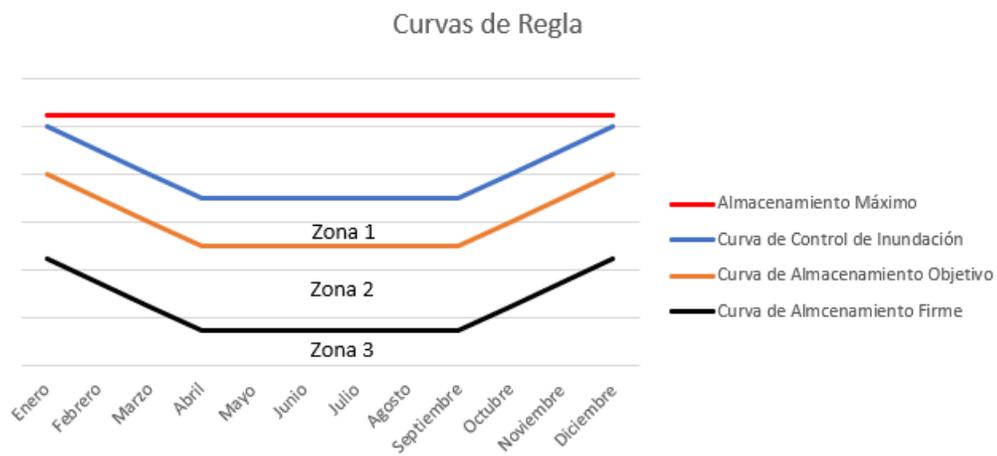


Figura 2.8: Curvas de regla de embalse

Fuente: Elaboración Propia basada en Ming-Yen Tu et al. (2003)

Si en el inicio del período, el volumen embalsado está en la zona 1, la demanda objetivo es paliada al 100 %. Si es que se está en la zona 2, se disminuye en algún porcentaje, por ejemplo, un 20 % menos. Por último, si se está en la zona 3, se reduce aún más, por ejemplo, un 50 %. Así, se busca que en períodos con escasez de agua se pueda retener mayor cantidad de agua para un futuro con menos agua todavía, y que así no se seque el embalse.

Con ello se introduce también a los factores de racionamiento α , los cuales son constantes menores a 1 y mayores a 0 ([20]). Estos factores lo que hacen es disminuir la demanda a cubrir dependiendo de la zona en la que se encuentre el volumen almacenado según la figura anterior. También, puede depender del tipo de demanda y su prioridad entre los usos. Por lo general, estos factores se calculan en la etapa de formulación del proyecto, pero se pueden ir cambiando con el paso de los años, lo que es recomendado. Estos caudales entregados desde los o el embalse constituyen variables de decisión.

Las hedging rules, así como también los factores de racionamiento, se recomienda que vayan siendo actualizadas con el tiempo. Esto, debido a que variables como el almacenamiento,

población, crecimiento económico, normas de conservación ambiental, diferencias en los niveles freáticos, clima, entre otros, pueden ir cambiando con los años en que un reservorio esté en funcionamiento ([18]).

Otra forma de analizar estos casos es con un criterio mediante la confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad ([19]). Este criterio es útil para encontrar demandas objetivo, capacidad del sistema y normas de uso (descargas). Como en los métodos anteriores, también se debe encontrar la función de utilidad en base a las descargas y al almacenamiento para uso futuro. También, es imprescindible la aversión frente al riesgo que se quiere tener desde una posición de tomador/a de decisiones.

Así, se describe la operación del sistema con tres indicadores: la confiabilidad, que es con cuanta frecuencia el sistema falla; la resiliencia, que es con cuanta rapidez el sistema vuelve a un estado satisfactorio luego de una falla; y la vulnerabilidad; que describe a cuan catastrófica es la falla ([19]).

Es preferible unir esfuerzos para minimizar la frecuencia y gravedad de las fallas en lugar de buscar sistemas que nunca fallen. Un aumento excesivo en la resiliencia y confiabilidad de un sistema puede, de hecho, aumentar su vulnerabilidad. Según Kitson (1979), la normativa de uso y las políticas de operación definen los tres indicadores que caracterizan un sistema operativo de recursos hídricos: vulnerabilidad, resiliencia y confiabilidad.

Capítulo 3

Diagnóstico Situación Actual y Futura Proyectada sin Cambios al Convenio

3.1. Datos Observados Situación Actual Período Histórico

La Laguna del Maule es el embalse de cabecera del río Maule, uno de los ríos más importantes de nuestro país debido a su caudal y al valor energético y agrícola de la cuenca hidrográfica que forma parte. En ella, se genera más de 1.500 [MW] para abastecer al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), así como permite el desarrollo de una agricultura intensiva muy necesaria para el país (PEGH 2020). Así, el embalse en estudio toma un alto valor al alterar el régimen hidrológico del río.

Luego, se presentan gráficos de la evolución histórica de estas variables, comenzando con la serie de Volumen Embalsado en la Laguna en la Figura 3.1.

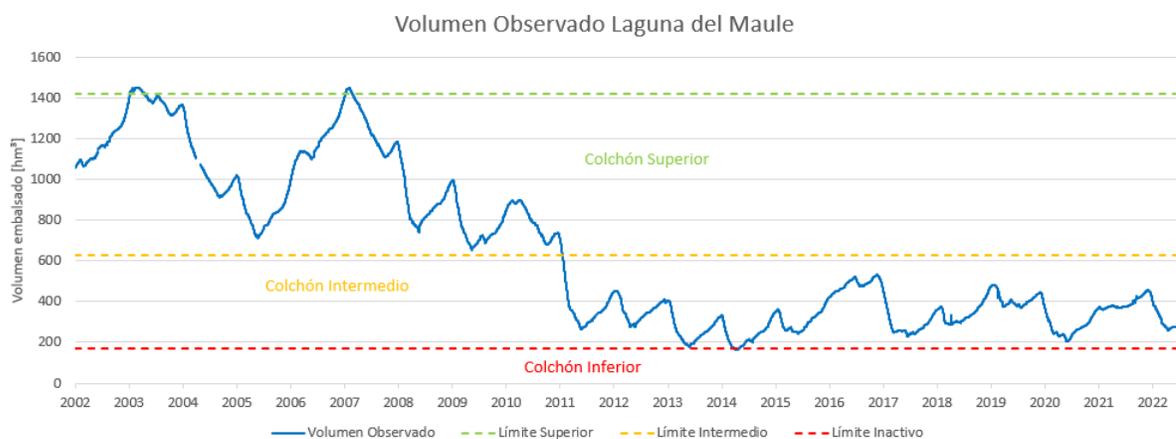


Figura 3.1: Volumen embalsado Laguna del Maule histórico 2002-2022
Fuente: Elaboración Propia basada en información DGA en período 2002-2022

La evolución de la cota del embalse se presenta en la Figura 3.2.

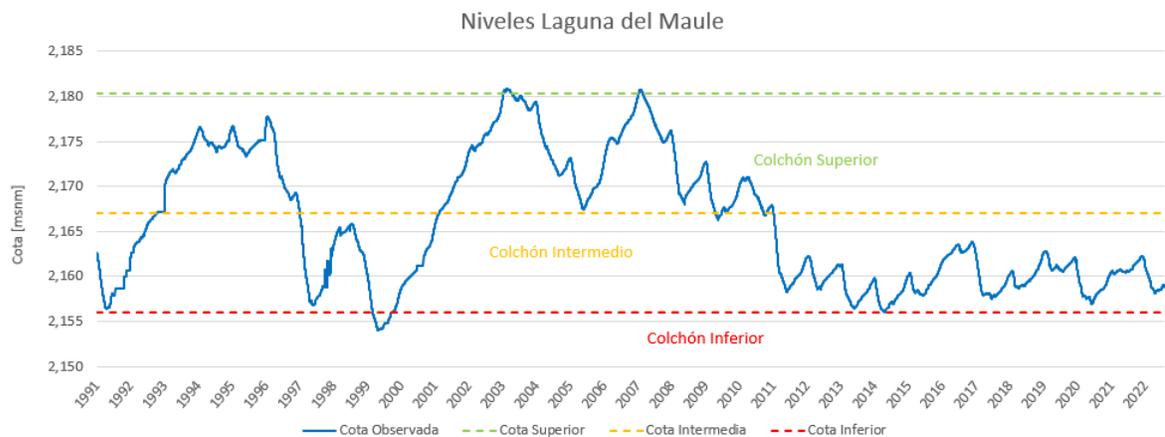


Figura 3.2: Cota de Laguna del Maule histórico 1991-2022
Fuente: Elaboración Propia con datos suministrados por Colbún S.A.

En la Figura 3.2 se muestra información desde 1991, y se puede apreciar la sequía de finales de los 90's y su posterior recuperación, luego de haber caído incluso hacia la porción inactiva. A rasgos generales, se aprecia como se ha mantenido estos últimos años en el colchón intermedio con ocasiones en las cuales se tiende a sobrepasar el límite inferior.

Debido a la permanencia en este colchón y sus restricciones correspondientes, se abre la necesidad de generar un cambio en el sistema operacional para que el volumen embalsado pueda alcanzar el colchón superior, así como también generar mayor seguridad para que este no caiga al colchón inferior. Junto a esto, se debe tener especial precaución a que las entregas de riego e hidroelectricidad no decaigan demasiado, ya que un cambio abrupto en una de ellas podría desencadenar una crisis en el funcionamiento del sistema agrícola y/o hidroeléctrico en la zona de estudio.

Para ello, se extrajo desde la DOH datos sobre las extracciones históricas desde Laguna del Maule, los cuales no estaban completos en el horizonte de tiempo (2007-2020), por lo que se pidieron los datos a Colbún S.A., los cuales se verificaron con los caudales extraídos desde la DOH. Las extracciones se presentan en la Figura 3.3.

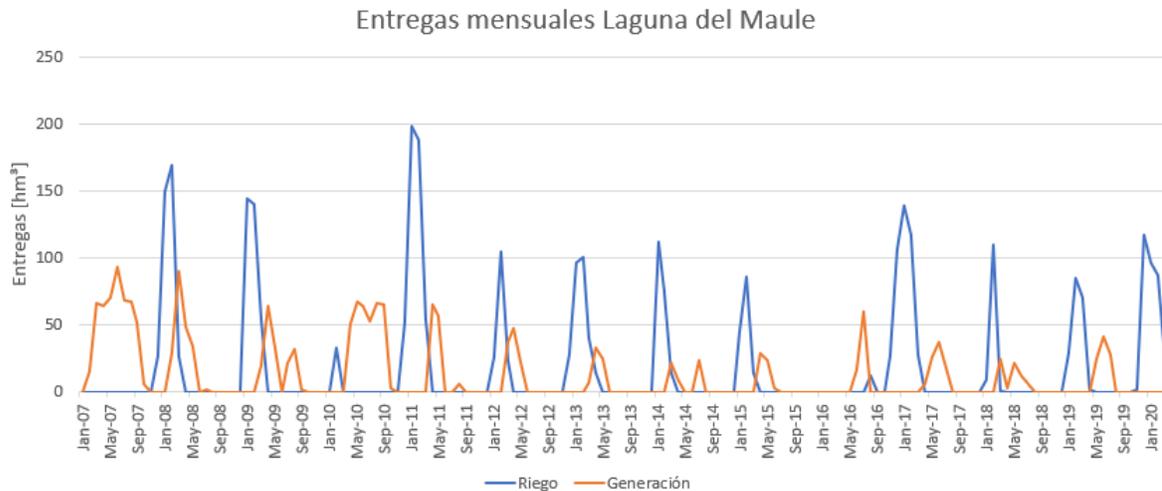


Figura 3.3: Entregas Mensuales Laguna del Maule histórico 2007-2020
 Fuente: Elaboración Propia con datos suministrados por Colbún S.A.

En la Figura 3.4 se presenta un gráfico con las extracciones anuales que se presentan en la Figura 3.4.

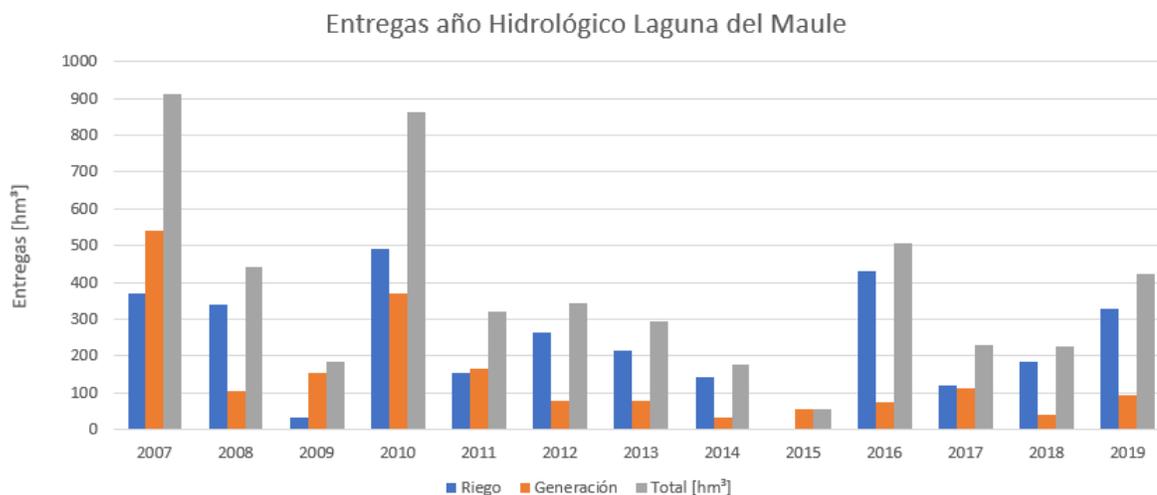


Figura 3.4: Entregas Históricas Laguna del Maule histórico 2007-2020
 Fuente: Elaboración Propia con datos suministrados por Colbún S.A.

De las Figuras 3.3 y 3.4 se confirma que la temporada de riego está muy marcada estacionalmente, que coincide con lo estipulado en el Convenio HR, así como también con un nuevo Convenio firmado por los regantes y Colbún, en el cual se retrasa la extracción de recursos desde la Laguna hasta enero. Así, Colbún libera agua desde el embalse del mismo nombre, ubicado aguas abajo de la estación Río Maule en Armerillo. Con este convenio se almacena agua crucial para riego para ser usada durante el verano, período en el cual se posee mayor déficit de riego.

Otro factor importante que se observa es la poca superposición de las entregas para riego e hidroelectricidad (ver Figura 3.3, lo que muestra la importancia de la colaboración entre los actores de ambos intereses (riego y generación). También, esto obedece a que toda el agua

que sale desde el embalse será turbinada, sin perjuicio de si ella está siendo entregada para riego, por lo que no se necesita gastar agua para generación cuando se genera con agua para riego.

En la temporada 2015-2016, se observa que la laguna estuvo mayormente cerrada y se utilizó levemente para la generación de energía hidroeléctrica. Esta decisión fue tomada por la Junta de Vigilancia del Río Maule y Enel, quienes son los encargados de su administración, debido a su preocupación por el estado de la laguna. La Memoria Anual 2015-2016 de la JVM registra el cierre de la laguna durante ese periodo.

Para la temporada de 2010-2011, en la Figura 3.4 se ve como las entregas para generación son mayores a su máximo anual de 250 [hm^3]. Pero, siguiendo con el Convenio HR, existe un volumen de compensación (ver Figura 2.6) cuando se está en el colchón superior, y viendo la Figura 3.1, esto coincide. Esta temporada fue la última en que se sobrepasó el límite de extracciones para generación sin considerar el volumen de compensación, lo que también coincide con la última vez que se mantuvo la cota de pelo de agua en el colchón superior.

Por último, cabe mencionar que las extracciones de riego nunca alcanzan el máximo por temporada definido en el Convenio HR (ver Figura 2.6) para la porción superior. Esto se puede haber debido a que el déficit de riego durante esos años (2002-2011) fue menor, siendo paliado de cierta forma por el caudal natural del río Maule.

3.2. Comportamiento de Modelos GCM en Período Histórico y Futuro

Para los caudales afluentes de Laguna del Maule, Eugenio Fuentes (2023) trabajó con los datos del Balance Hídrico (DGA 2018), dando como resultado los caudales afluentes en la cuenca Río Maule en Armerillo para el período entre los años 1979 y 2060 en las 83 bandas de elevación que se usaron en el modelo WEAP, para los cuatro modelos climáticos. Para el caso de la subcuenca Laguna del Maule, el modelo WEAP posee cuatro bandas de elevación. Así, el caudal afluente a la Laguna corresponde a la suma de los caudales en estas cuatro bandas.

Como datos de entrada para el modelo WEAP, se usaron los caudales afluentes a Laguna del Maule de los cuatro GCM, los que se muestran en la Figura 3.5 para el período entre 2022 y 2047.

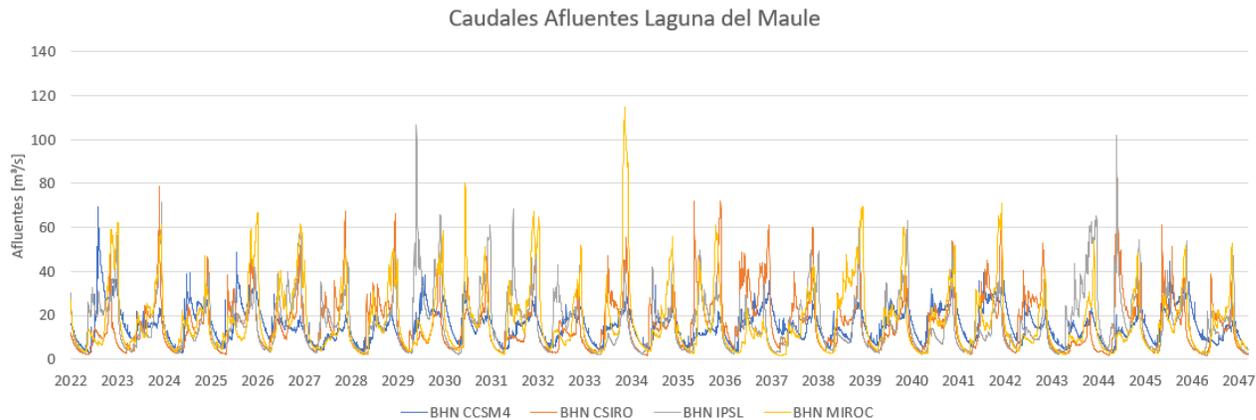


Figura 3.5: Caudales Afluentes Laguna del Maule período 2022-2047
Fuente: Elaboración Propia

También, se muestran los estadísticos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Estadísticos afluentes Laguna del Maule período 2022-2047
Fuente: Elaboración Propia

Estadístico	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Promedio [m^3/s]	15,2	16,0	16,8	17,3
Máximo [m^3/s]	53,2	71,0	92,5	110,5
Mínimo [m^3/s]	3,0	1,8	2,0	1,5

Por otro lado, se muestra la Figura 3.6 con las series de los caudales afluentes en el período histórico entre 1991 y 2021 para los cuatro GCM.

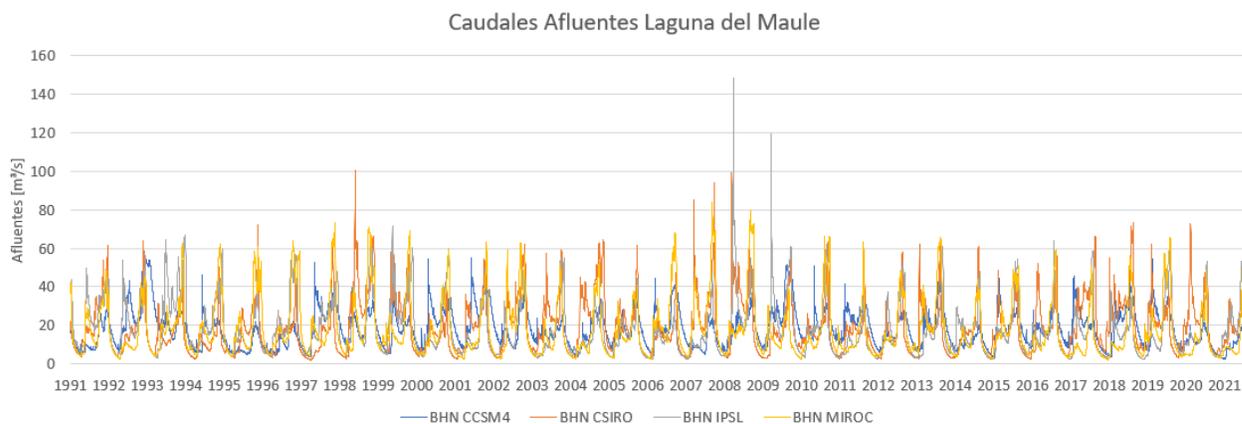


Figura 3.6: Caudales Afluentes Laguna del Maule período 1991-2021
Fuente: Elaboración Propia

Los estadísticos de los afluentes del período 1991-2021 se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Estadísticos afluentes Laguna del Maule período 1991-2021
Fuente: Elaboración Propia

Estadístico	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Promedio [m ³ /s]	17,9	19,1	18,0	17,8
Máximo [m ³ /s]	58,4	100,4	148,3	83,8
Mínimo [m ³ /s]	2,4	2,1	2,2	2,0

Finalmente, en la Figura 3.7 se muestra para el total del período (1991-2047) los promedios diarios de los afluentes a la Laguna del Maule.

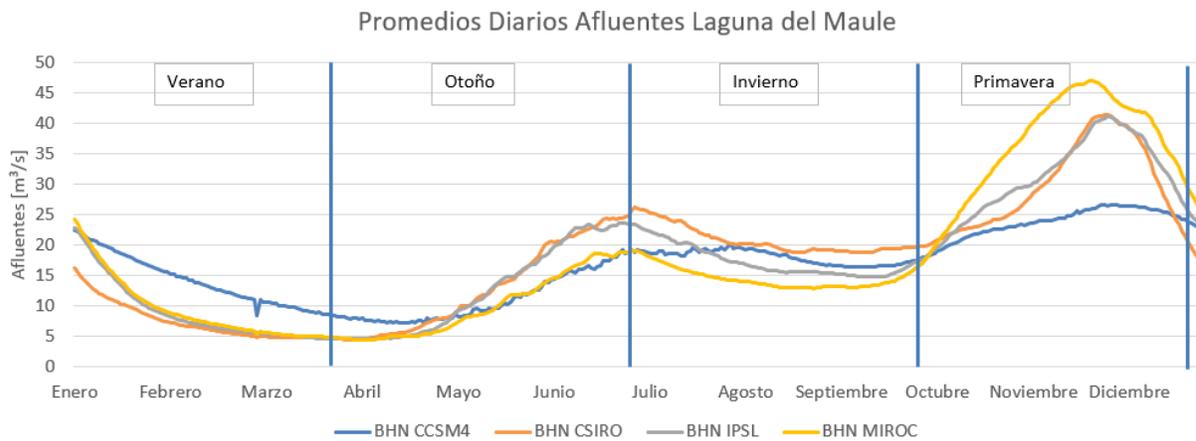


Figura 3.7: Promedios diarios caudales afluentes Laguna del Maule período 1991-2047
Fuente: Elaboración Propia

Así, se puede concluir que el régimen de los caudales afluentes a Laguna del Maule es nival, siendo los deshielos en la época primavera-verano el principal y mayor contribuyente a aumentar el volumen de la Laguna. Por otro lado, se observa que los cuatro modelos climáticos poseen un comportamiento distinto, con valores de caudales máximos que difieren bastante el uno del otro. Se ven diferencias en ese estadístico de más del 100 % entre los GCM CCSM4 y MIROC para el período del 2022-2047, que es el período en el cual se modela. Para el mismo estadístico del valor máximo en el período 1991-2021, las diferencias superan con creces el 100 %.

Para los valores mínimos hay menores diferencias en el período 1991-2021, pero en el período futuro las diferencias porcentuales llegan al 100 % entre los modelos anteriormente citados, CCSM4 y MIROC. En cuanto a los promedios, se ve una disminución en el período futuro (2020-2047) con respecto al período histórico (1991-2021), en especial en los GCM CCSM4, CSIRO e IPSL. Estas disminuciones van del 10 % al 16 %.

En cuanto a la variabilidad de cada GCM, con los máximos y mínimos y con las Figuras 3.5 y 3.6 se observa como el modelo CCSM4 posee una menor variabilidad en ambos períodos. También, con la Figura 3.7 se aprecia como los cuatro GCM siguen una estacionalidad muy similar, con peaks en primavera y mínimos en el período verano-otoño. Es en primavera donde

los GCM se diferencia más, con el modelo CCSM4 siendo el que menor caudal modela con respecto a los demás.

Finalmente, se puede decir que al usar estos cuatro GCM se están evaluando distintos escenarios posibles de caudales afluentes a la Laguna del Maule, con una mayor variabilidad de resultados.

3.3. Modelación de la Situación sin Cambios en Período Futuro

Para esta sección, se utilizó el modelo WEAP entregado en la realización del PEGH de la cuenca del Maule. Ese modelo es una actualización y mejora de un modelo WEAP más antiguo que la consultora HIDROGESTIÓN tomó como base. Luego, el modelo ya actualizado lo calibró el tesista Eugenio Fuentes (2023).

Estos cambios hicieron que tanto el tiempo de ejecución sea menor, así como la complejidad para cambiar condiciones iniciales y normas de operación sean menores. Este modelo, se ejecutó sin cambios para comparar variables de interés como volumen embalsado, entregas y tasas de reparto en el tiempo de modelación. El tiempo de modelación se divide en semanas, que van desde la semana 14 del año 2021 hasta la semana 13 del año 2047.

Los modelos climáticos que siguen esta memoria son cuatro, que se pueden identificar como CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC (DGA, 2017). Los cuatro modelos poseen igual grado de validez y confianza, por lo que para cada gráfico y variable se identificará una curva para cada modelo climático. Sin embargo, cabe mencionar que para el análisis actual y futuro de los recursos hídricos en la cuenca de estudio por parte del PEGH, el escenario de cambio climático usado fue el CSIRO.

En la Figura 3.8, se muestra la evolución del volumen embalsado en la Laguna para este período futuro.

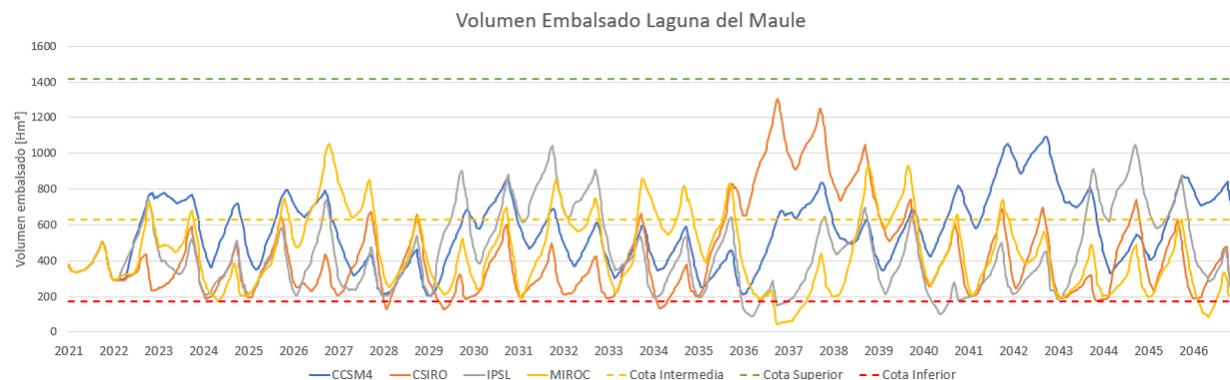


Figura 3.8: Volúmenes Futuros
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 3.8, se observa cómo en tres de los cuatro modelos climáticos (todos excepto

el CCSM4) existen al menos dos temporadas en que el volumen baja al colchón inferior del embalse. Estas caídas podrían generar colapsos en los sistemas de cultivo del Maule Alto si es que no se obtiene el recurso hídrico de otra manera, como lo puede ser la Laguna Invernada, el Embalse Melado o del propio colchón inferior, que como se ha visto en la Figura 2.6, se requiere que ambas partes autoricen su uso de manera especial. Dentro de este punto, es importante notar que un buen indicador de falla del sistema es la caída del volumen almacenado a la porción inactiva del embalse, que es donde no se puede usar el recurso hídrico.

Otro aspecto claro para identificar es la tendencia con los años a permanecer en el colchón intermedio, para los cuatro modelos climáticos, con algunos breves saltos a los colchones inferior y superior. Esto supone que el centro de los cambios debe ser enfocado en las normas de operación dentro del colchón intermedio.

En cuanto a la estacionalidad, que está definido en el Convenio HR, la Figura 3.9 muestra los promedios semanales.

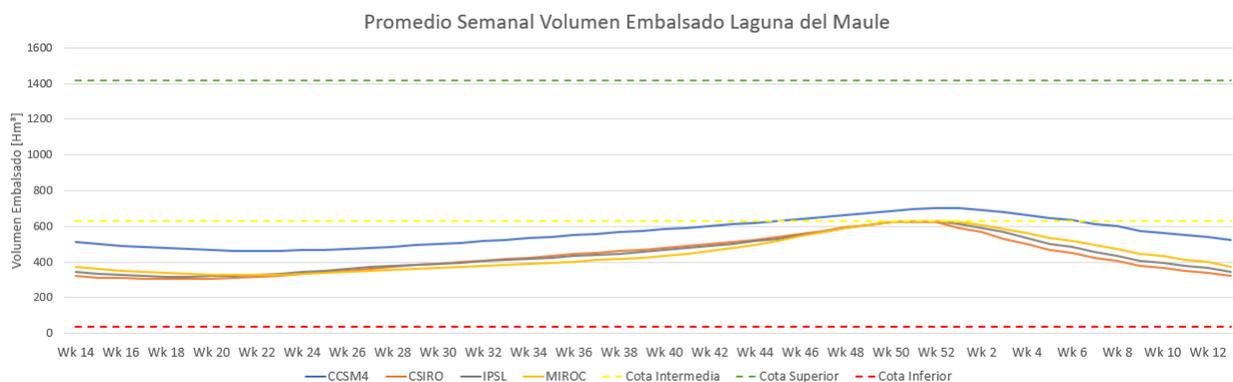


Figura 3.9: Promedio Semanal Volumen Embalsado
Fuente: Elaboración Propia

Esta visualización permite observar el peak del volumen embalsado, que ocurre en el verano, aproximadamente en el mes de diciembre. Esto ocurre por dos factores: el primero es ya que al ser una cuenca con un marcado régimen nival, en esa estación ocurren los derretimientos de las nieves por lo que el caudal afluente aumenta considerablemente, el segundo factor es debido a las extracciones de riego (mayor magnitud que las de generación hidroeléctrica) desde la Laguna, las cuales comienzan generalmente a darse en los meses de diciembre-enero. Esta estacionalidad es importante por dos cosas; primero para verificar que la tendencia en los cuatro modelos climáticos es a mantenerse en el colchón intermedio; y segundo porque el Convenio HR define una estacionalidad en las entregas para riego (ver Figura 2.5), donde entres los meses de noviembre y febrero se puede usar una mayor cantidad de agua.

Por ejemplo, se puede inferir que la temporada de recuperación del embalse va desde junio hasta diciembre, que es donde el caudal de entrada al embalse es mayor al de salida, mientras que la temporada de uso intensivo va desde diciembre hasta junio, que es cuando el caudal de salida es mayor al de entrada al embalse. Sin embargo, el Convenio HR dice que las extracciones para riego comienzan en Septiembre, y ya en Octubre y Noviembre toman

magnitudes importantes (ver Figura 2.5). Esto no se ve muy reflejado en la Figura 3.9 lo que puede atribuirse a dos factores: que el caudal de entrada por los afluentes sea mayor o debido al Convenio firmado con Colbún por los regantes en donde se retrasa la extracción del embalse Laguna del Maule hasta Enero para tener agua para la temporada de verano.

Otras variables a analizar son las que tienen que ver con los déficit de riego y las entregas para riego. El déficit de riego hace alusión a la demanda de riego del embalse y las entregas posibles para riego son las entregas que el embalse hace a los regantes siguiendo las normas de operación del Convenio. Estas están muy relacionadas entre sí, así como las entregas están muy conectadas con el volumen embalsado (ver Figura 3.8). Estas variables se entregan a continuación en la serie modelada y, a modo de comparación, se visualizan separadas por modelo climático y se generan las sumatorias de los volúmenes de agua por año hidrológico.

En la Figura 4.3, se presenta para el modelo climático CCSM4 el déficit de riego y las entregas posibles para riego, las que se definen en base al Convenio (dependen de la cota de pelo de agua al inicio del año calendario).

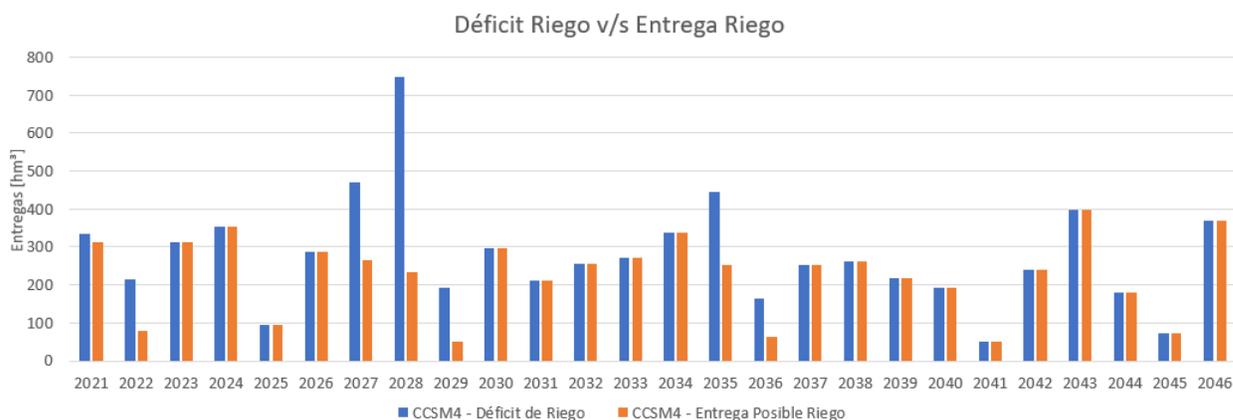


Figura 3.10: Déficit Riego v/s Entrega Riego CCSM4
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.4, se presenta para el modelo climático CSIRO.

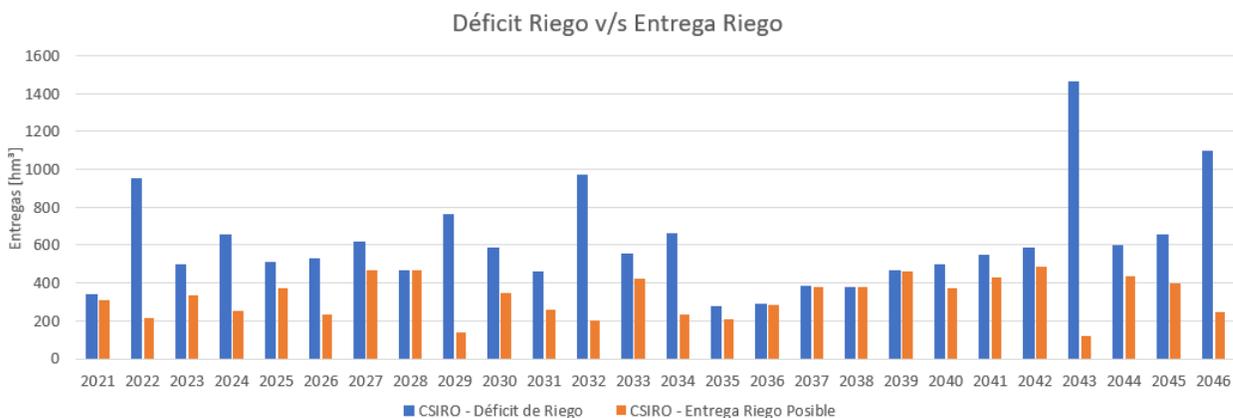


Figura 3.11: Déficit Riego v/s Entrega Riego CSIRO
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.5, se presenta para el modelo climático IPSL.

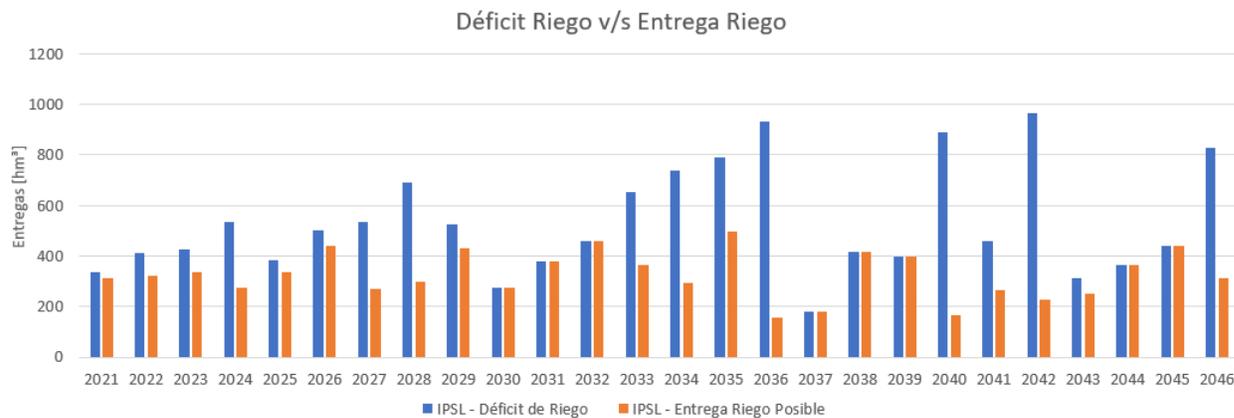


Figura 3.12: Déficit Riego v/s Entrega Riego IPSL
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.6, se presenta para el modelo climático MIROC.

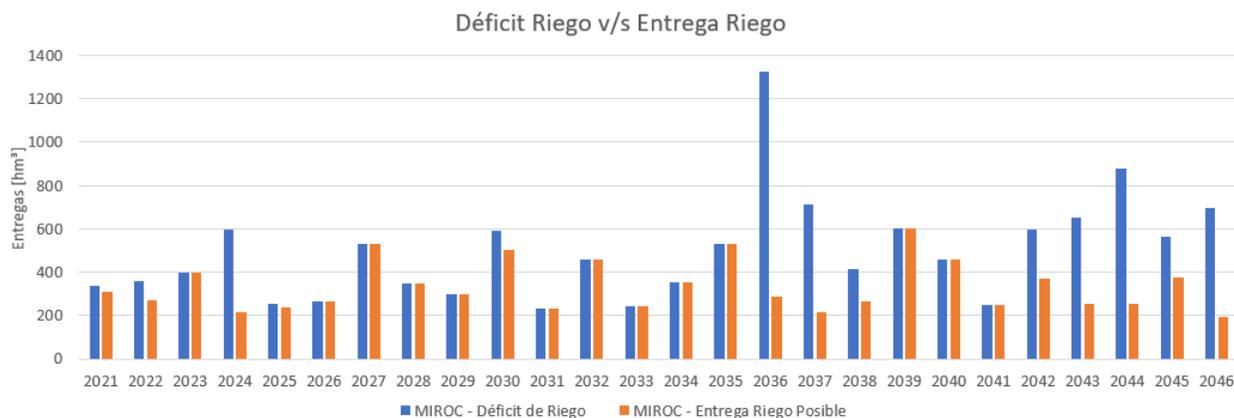


Figura 3.13: Déficit Riego v/s Entrega Riego MIROC
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 3.3 se presenta el número y porcentajes de temporadas con déficit para cada modelo climático.

Tabla 3.3: Temporadas con Déficit de Riego
Fuente: Elaboración Propia

Modelo climático	Temporadas con déficit	% temporadas con déficit
CCSM4	7	27 %
CSIRO	24	92 %
IPSL	18	69 %
MIROC	13	50 %

Con ello, se evidencia la diferencia entre los cuatro modelos climáticos, con variaciones muy importantes de más de tres veces el valor entre la menor y la que mayor déficit presenta.

Otra variable importante a analizar que se obtiene desde el modelo WEAP es la tasa de reparto, medida en hectáreas regadas sobre hectáreas cultivadas. Esta variable no trabaja con los derechos de agua de los regantes para medir las entregas totales, sino que se trabaja con el porcentaje de riego entregado sobre el total de riego que se necesita para cubrir los sectores agrícolas, definido en el modelo como superficies agrícolas permanentes y superficies agrícolas potenciales. Para las superficies permanentes, el riego ocurre durante todo el año. En cambio, las superficies agrícolas potenciales solo presentan riego durante parte de la temporada, por lo que afecta disminuyendo las magnitudes de la variable tasa de reparto durante las semanas en que no se riega esta superficie. Es así como en el modelo WEAP se introducen las áreas agrícolas junto con su cultivo y los coeficientes característicos de cada uno, para poder calcular las necesidades de riego de cada superficie.

A continuación, se muestra la frecuencia acumulada de la tasa de reparto en los años modelados, en donde el eje de las ordenadas hace mención al porcentaje de la tasa de reparto que al menos se está cumpliendo. Por otro lado, el eje de las abscisas hace mención a la cantidad de veces (en porcentaje) que esto pasa.

Se presenta la Figura 3.14 y un pequeño ejemplo para un mejor entendimiento de la tasa de reparto.

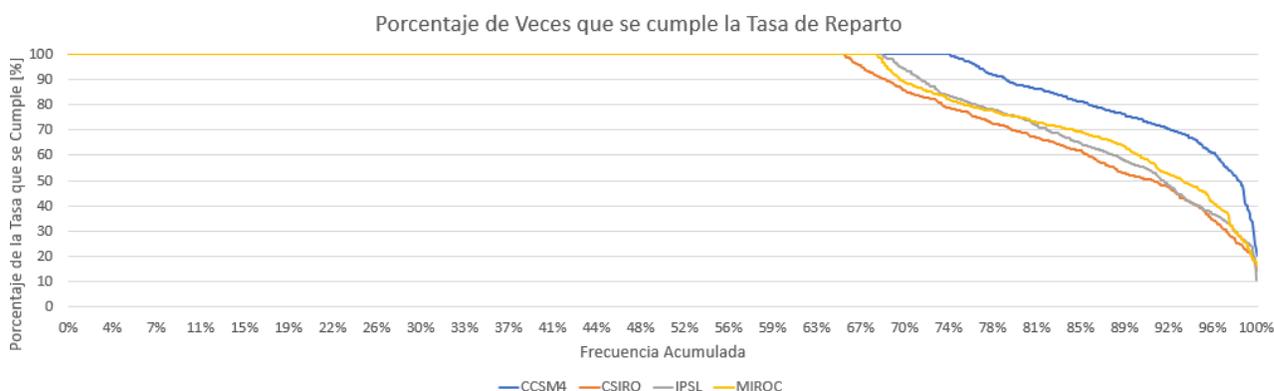


Figura 3.14: Tasa de Reparto en Frecuencia Acumulada
Fuente: Elaboración Propia

Por Ejemplo: Se toma entonces, para el modelo CCSM4 (curva de color azul), el punto en que se cruza con la línea horizontal del 80%. Si se interseca ese punto con el eje de las abscisas, se tiene aproximadamente 86%. Por ende, el gráfico indica que para el 86% de las veces, se tiene que la tasa de reparto se cumple en, al menos, un 80%. Así, si se toma un número cada vez mayor de la cantidad de veces que se debe regar (eje de las abscisas) se tendrá cada vez un número menor del cumplimiento de la tasa de reparto.

Ahora bien, observando la Figura 3.14, se puede apreciar que para el modelo climático CCSM4 se tiene un futuro más prometedor en cuanto a la disponibilidad de agua para riego, que puede ser desencadenado por un futuro más húmedo. En cuanto a los otros tres modelos, se puede decir que su comportamiento es similar, con leves diferencias.

Ahora bien, en Chile se utiliza la definición de seguridad de riego con estadística respecto a la simulación de un registro histórico de caudales, en donde si el suministro de agua para

una demanda objetivo es menor o igual al 90% en dos meses consecutivos se considera un año fallado. También, se considera un año fallado si en un mes determinado las entregas completan un 85% o menos con respecto a la demanda objetivo. Esta definición de seguridad de riego hace alusión a la confiabilidad del sistema, siendo un muy buen indicador de ella.

Con ello, se puede realizar un análisis de la seguridad de riego con el modelo actual para los cuatro escenarios climáticos usados en esta memoria. Así, como el modelo WEAP es de intervalo semanal, se genera un programa en PYTHON que transforma las tasas de reparto semanales a mensuales, asignándoles fecha AA-MM-DD a cada semana para luego generar un promedio por mes, el cual es usado como la tasa de reparto específica para cada mes. (ver Anexo 2)

Con esa metodología, se obtiene la seguridad de riego para la serie modelada proyectada para los cuatro modelos climáticos, las que se presentan en la Tabla 3.4 y se resumen en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4: Años Fallos Caso Base
Fuente: Elaboración Propia

Año	Fallo No Fallo			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
2021	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2022	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2023	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2024	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2025	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2026	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2027	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2028	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2029	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2030	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2031	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2032	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2033	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2034	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2035	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2036	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2037	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2038	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2039	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2040	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2041	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2042	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2043	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2044	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2045	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2046	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2047	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo

Tabla 3.5: Seguridad de Riego Caso Base
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	Seguridad de Riego
CCSM4	41 %
CSIRO	0 %
IPSL	0 %
MIROC	0 %

Luego, se da inicio al capítulo 4, en donde se desarrollan tres paquetes de alternativas con cambios en el Convenio con el objetivo de aumentar la seguridad de riego en la zona de estudio. También, se dará una explicación del porque la seguridad de riego es tan baja para la situación actual.

Capítulo 4

Propuesta de Soluciones y Modelación de Alternativas

En este capítulo se abordan las tres alternativas de soluciones para cambiar el Convenio HR y se muestran y analizan las series de variables que resultan del modelo WEAP para cada una. Es importante mencionar que las propuestas de soluciones se hacen en base al nuevo Convenio de Recuperación del Lago Laja (2017), el cual se centra en la creación de un nuevo colchón de transición y en la asignación de porcentajes de entregas a la recuperación de la laguna (que finalmente no son entregas en sí, sino que hace referencia a agua que se mantiene almacenada).

Este colchón de transición se crea entre el colchón inferior e intermedio y tiene por finalidad acelerar la recuperación del lago Laja ([13]). Las extracciones en este colchón son menores al 50 % en la actualización del Convenio, donde se le asigna un gran porcentaje del volumen a la recuperación del Lago (o embalse). Este mismo proceso se intenta replicar, para que cuando la cota de pelo de agua del embalse Laguna del Maule esté bajo se pueda volver a valores dentro del próximo colchón (colchón intermedio) rápidamente.

Los otros colchones también tienen asignados porcentajes a las extracciones que corresponden a regeneración del lago, lo que es equivalente a las extracciones que no se hacen desde el lago, sino que al volumen que será reservado durante esa temporada dentro del mismo reservorio. Así, en todos los colchones se tiene un porcentaje asociado a la mantención del embalse para que sus niveles de volumen embalsado no decaigan hacia la porción inferior. Esto se hace con el objetivo de mitigar los efectos de sequías de grandes magnitudes, prefiriendo correr el riesgo de un mayor número de sequías de menores magnitudes.

Por último, observando las extracciones históricas de la Laguna del Maule (ver Figura 3.4), se ve claramente como las extracciones para generación rara vez llegan o superan los 250 [hm^3], por lo que se propone acotar las entregas máximas para hidroelectricidad y se analizarán los cambios. En primer lugar se muestra un diagrama en la Figura 4.1 de como quedan los nuevos colchones y porciones del embalse, para luego pasar a la distribución de las extracciones y sus valores máximos.

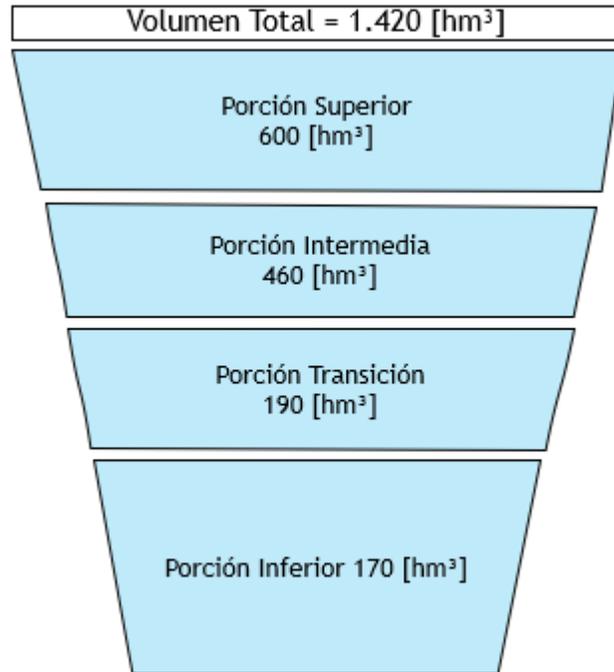


Figura 4.1: Diagrama Porciones de Embalse en Alternativas
Fuente: Elaboración Propia

La porción de transición, de 190[hm^3], se crea reduciendo el colchón superior de 790 [hm^3] a 600 [hm^3] y manteniendo los volúmenes de los otros colchones.

Alternativa 1:

- Colchón Superior - 600 [hm^3]
- Colchón Intermedio - 460 [hm^3]
- Colchón de Transición - 190 [hm^3]
 - 50 % Recuperación laguna
 - 10 % Generación
 - 40 % Riego
- Colchón Inferior - 170 [hm^3]

Para esta alternativa, los colchones superior, intermedio e inferior se mantienen con los usos descritos en el Convenio HR.

Alternativa 2:

- Colchón Superior - 600 [hm^3]
- Colchón Intermedio - 460 [hm^3]
 - 10 % Recuperación laguna

- 75 % Riego
- 15 % Generación
- Colchón de Transición - 190 [hm^3]
 - 50 % lago
 - 10 % generación
 - 40 % riego
- Colchón Inferior - 170 [hm^3]

Para esta alternativa, los colchones superior e inferior se mantienen con los usos descritos en el Convenio HR.

Alternativa 3:

- Colchón Superior - 600 [hm^3]
- Colchón Intermedio - 460 [hm^3]
 - 10 % Recuperación laguna
 - 75 % Riego
 - 15 % Generación
- Colchón de Transición - 190 [hm^3]
 - 50 % lago
 - 10 % generación
 - 40 % riego
- Colchón Inferior - 170 [hm^3]
- Máximas extracciones para generación de 200 [hm^3] por temporada

Para esta alternativa, los colchones superior e inferior se mantienen con los usos descritos en el Convenio HR.

Es importante recalcar que los porcentajes de uso en los colchones intermedios y de transición corresponden al volumen de reserva, que es el volumen perteneciente a la suma de ambos.

4.1. Alternativa 1

Con los cambios hechos en el modelo WEAP, se obtienen las variables de interés para esta alternativa. La primera a mostrar es el volumen embalsado, que se muestra en la Figura 4.2 con los cuatro modelos climáticos simulados. Se muestra también en la figura los límites de los colchones nuevos en líneas punteadas horizontales.

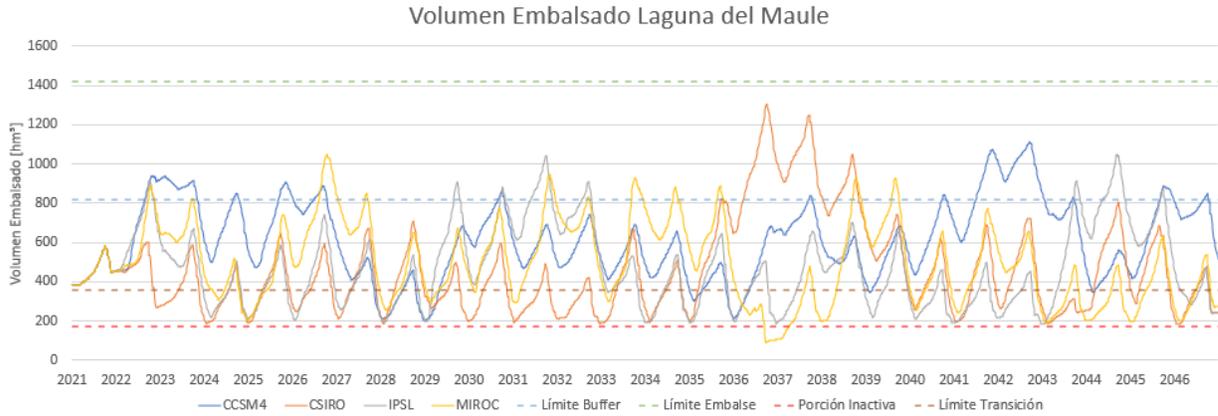


Figura 4.2: Volumen Embalsado Alternativa 1
Fuente: Elaboración Propia

Para el volumen embalsado, se aprecia claramente una mejora con respecto a la situación futura sin cambios en el Convenio (ver Figura 3.8), en donde se pasa a tener solamente un episodio en donde el volumen cae a la porción inactiva para el modelo climático MIROC. En términos de indicadores de falla, se muestra la Tabla 4.1 donde se ubducab los porcentajes de semanas en que el volumen embalsado cae bajo los 200 $[hm^3]$.

Tabla 4.1: Porcentaje de Semanas con Valores bajo los 200 $[hm^3]$
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	Sin cambios % semanas <200 $[hm^3]$	Alternativa 1 % semanas <200 $[hm^3]$
CCSM4	0 %	0 %
CSIRO	9 %	4 %
IPSL	8 %	3 %
MIROC	8 %	3 %

Claramente se observa un gran cambio positivo en tres de los cuatro modelos, en donde las semanas que bajan de los 200 $[hm^3]$ es un período de sequía para el modelo climático MIROC muy severo. Estas semanas ocurren durante la misma temporada de riego.

Otro factor importante es como permanece el volumen dentro del nuevo colchón intermedio, con algunas pocas variaciones hacia el colchón superior y con ningún evento en el que se ocupa el 100 % de la capacidad del embalse.

También se observa como el nuevo colchón de transición funciona de buena manera al ser una especie de barrera para que el volumen no decaiga a la porción inactiva. Este genera rápidamente la recuperación del embalse, excepto en el evento de la gran sequía en el modelo MIROC (temporada 2037, Figura 4.2). Sin embargo, muestra un muy buen comportamiento en la recuperación de la laguna en casi todo el horizonte de modelación.

Al comparar ambos gráficos de volumen embalsado (situación actual ver Figura 3.8; alternativa 1 ver Figura 4.2), se puede observar que las curvas de cada modelo climático presentan un comportamiento similar. Esto se debe a que tanto los déficit de riego como las hidrologías son similares para cada modelo climático, donde independiente de las entregas, las escorren-

tías que afectan al embalse son parecidas. En cambio, la variable de entrega varía bastante. Para ilustrar esto, se presentan estas variables separadas por modelo climático.

Por otro lado, en la Figura 4.3 se presenta para el modelo climático CCSM4 los déficit de riego y las entregas posibles para riego (definidas por el Convenio). Los déficit de riego se definen como la demanda del embalse para riego, que es lo que no se alcanza a cubrir con el caudal del río Maule. Por otro lado, las entregas posibles para riego siguen las definiciones del Convenio con las modificaciones de la alternativa 1, en donde se tiene un máximo de entregas anuales que depende del volumen embalsado al inicio del año calendario.

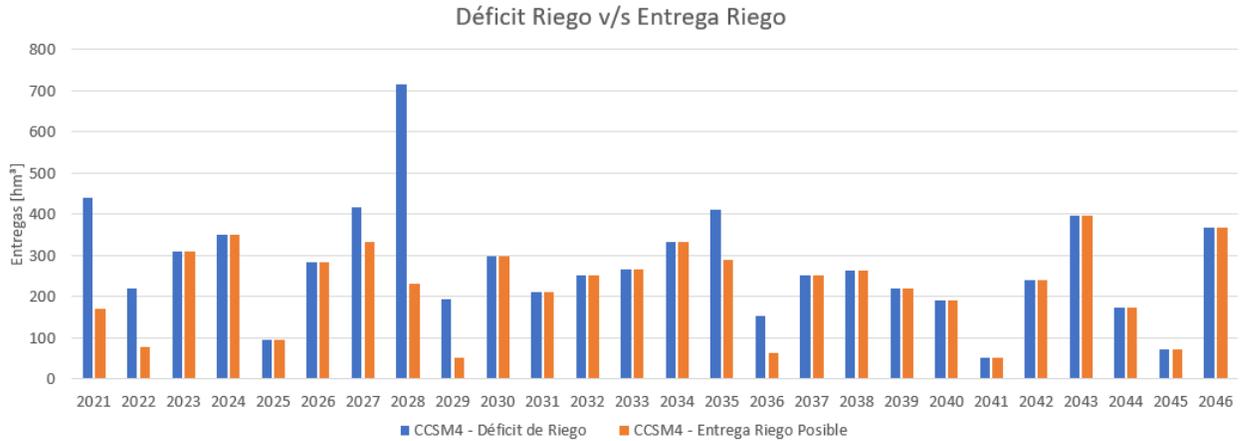


Figura 4.3: Déficit Riego v/s Entrega Riego CCSM4 Alternativa 1
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.4, se presenta para el modelo climático CSIRO.

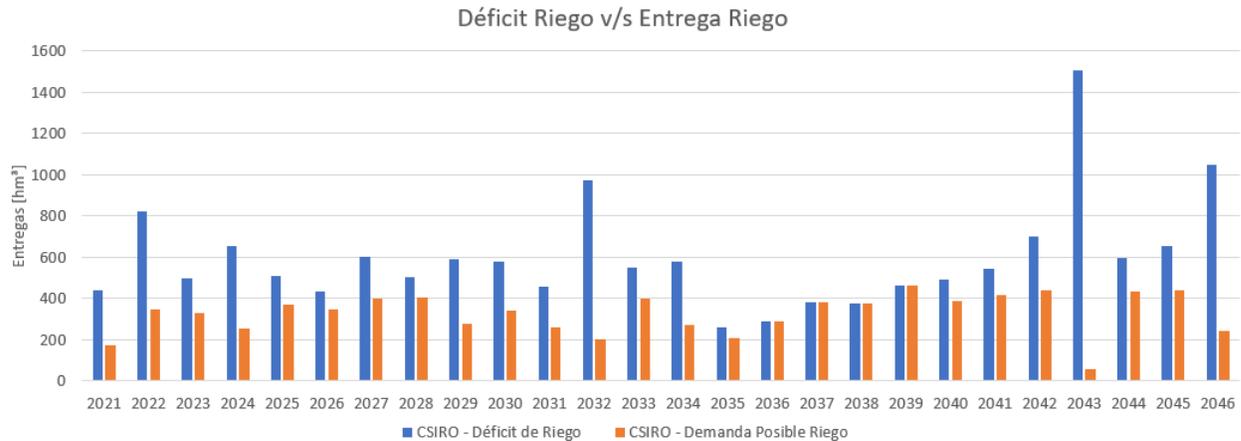


Figura 4.4: Déficit Riego v/s Entrega Riego CSIRO Alternativa 1
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.5, se presenta para el modelo climático IPSL.

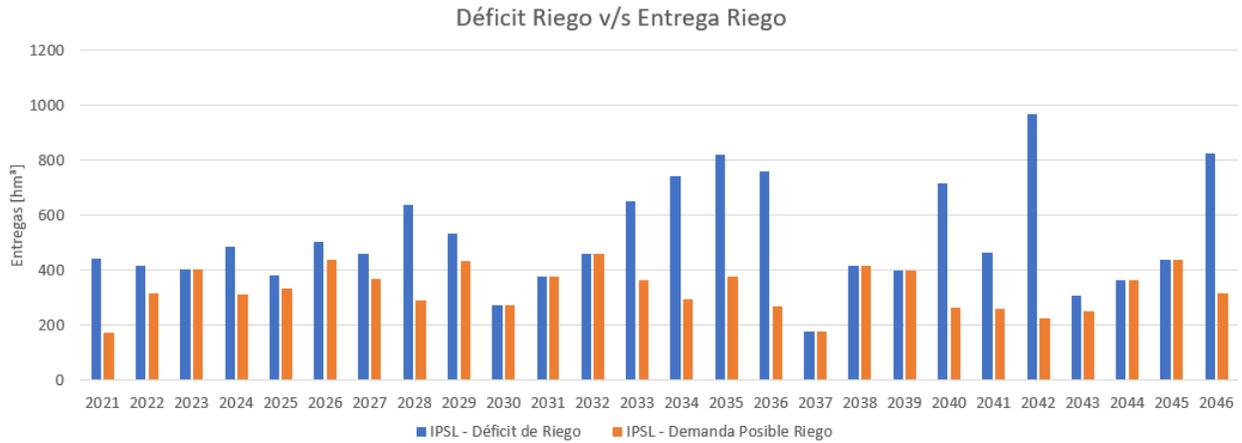


Figura 4.5: Déficit Riego v/s Entrega Riego IPSL Alternativa 1
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.6, se presenta para el modelo climático MIROC.

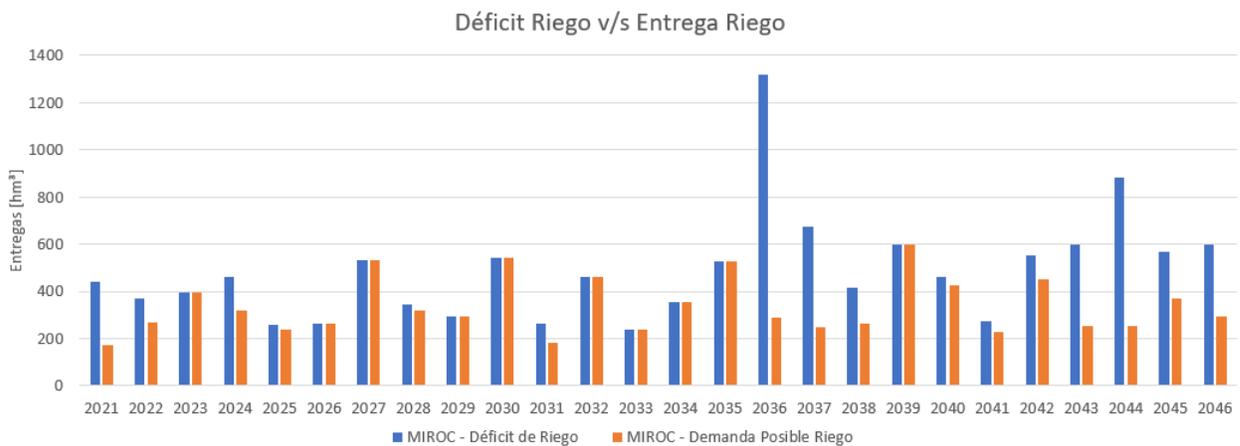


Figura 4.6: Déficit Riego v/s Entrega Riego MIROC Alternativa 1
Fuente: Elaboración Propia

De la Figura 4.3 a la Figura 4.6, se observa claramente que las modificaciones al Convenio no logran entregar la totalidad de los déficit de riego, quedando en varias temporadas (para todos los modelos climáticos) un déficit remanente de riego. Para ilustrar mejor aquello, se muestra la Tabla 4.2, donde se indica el número de temporadas en que queda este déficit remanente, así como el porcentaje de las temporadas con respecto al total de temporadas simuladas.

Tabla 4.2: Temporadas con Déficit de Riego con Alternativa 1
Fuente: Elaboración Propia

Modelo climático	Temporadas déficit	% Déficit
CCSM4	7	27%
CSIRO	22	85%
IPSL	17	65%
MIROC	16	62%

Los números que se muestran en la Tabla 4.2 son bastante altos para tres de los cuatro modelos climáticos, superando el 50 %. Esto, como se discute en el capítulo 5, es debido a las superficies de riego potenciales, que se definen en el PEGH y en el modelo WEAP asociado como superficies de regadío que se riegan solamente en algunos meses del año, así como hay temporadas donde las sequías no permiten su cultivo potencial. Así, las tasas de reparto de riego (variable que sale desde el programa WEAP), definidas en hectáreas regadas sobre hectáreas cultivadas, son bastante bajas, lo que se manifiesta en la Seguridad de Riego. Para calcular la seguridad de riego, se realiza el mismo método que en el capítulo anterior para los cuatro modelos, lo que se muestra en la Tabla 4.3 y se resumen en la Tabla 4.4.

Tabla 4.3: Años Fallos Alternativa 1
Fuente: Elaboración Propia

Año	Fallo No Fallo			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
2021	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2022	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2023	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2024	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2025	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2026	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2027	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2028	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2029	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2030	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2031	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2032	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2033	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2034	Fallo	Fallo	Fallo	No Fallo
2035	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2036	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2037	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2038	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2039	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2040	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2041	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2042	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2043	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2044	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2045	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2046	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2047	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo

Tabla 4.4: Seguridad de Riego Alternativa 1
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	Seguridad de Riego
CCSM4	47 %
CSIRO	0 %
IPSL	0 %
MIROC	6 %

4.2. Alternativa 2

Con los cambios hechos en el modelo WEAP, se obtienen las variables de interés para esta alternativa. La primera a mostrar es el volumen embalsado, que se muestra en la Figura 4.7.

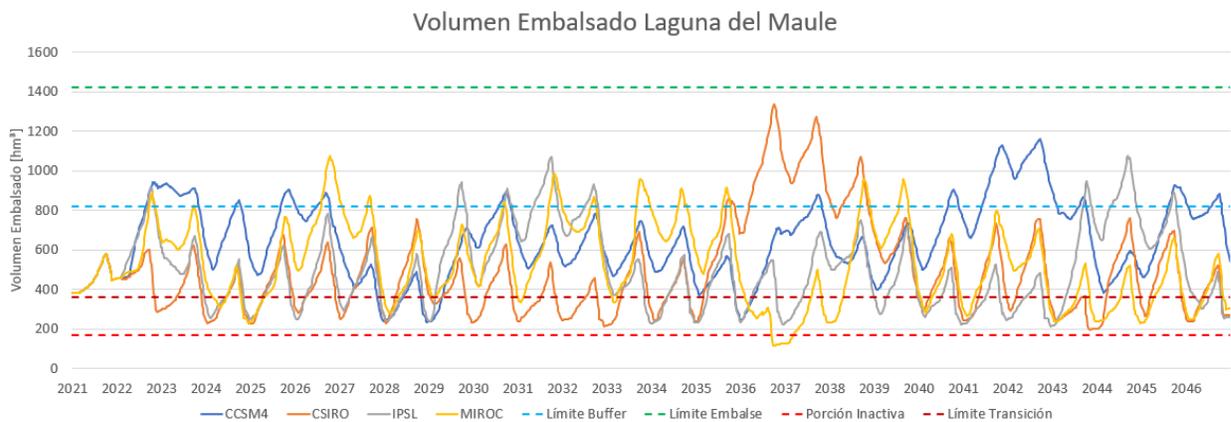


Figura 4.7: Volumen Embalsado Alternativa 2
Fuente: Elaboración Propia

Esta alternativa, al igual que la primera, posee solamente una temporada en el que el volumen cae a la porción inferior del embalse, que es para el mismo modelo y en la misma temporada que en la alternativa anterior. Sin embargo, se puede ver como los límites inferiores de los volúmenes embalsado entre temporadas de riego poseen magnitudes mayores que en la alternativa 1 (ver Figura 4.2). Las temporadas en que el volumen embalsado se encuentra más bajo que 200 $[hm^3]$ se muestra en la Figura 4.5.

Tabla 4.5: Porcentaje de Semanas con Valores bajo los 200 $[hm^3]$ Alternativa 2
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	% Semanas <200[hm3]
CCSM4	0,0 %
CSIRO	0,4 %
IPSL	0,0 %
MIROC	2,2 %

Estos números nuevamente son mejores a la situación actual, en donde la gran sequía del

año 2037 todavía no se puede controlar y nuevamente se baja en ese año a la porción inactiva. Por otro lado, en ningún momento se llega al límite superior de la capacidad del embalse, y la hidrología se ve muy similar a los dos gráficos de modelación (ver Figuras 4.2 y 3.8).

En cuanto al colchón de transición, nuevamente funciona casi a la perfección en detener la baja del volumen y poder reservar agua para la recuperación de la laguna y así poder salvar agua para futuras temporadas de riego y de generación. Ahora bien, a continuación se muestran los gráficos de déficit de riego y de entregas para ello separados por modelo climático.

En la Figura 4.8, se presenta para el modelo climático CCSM4 los déficit de riego y las entregas posibles para riego (definidas en el Convenio).

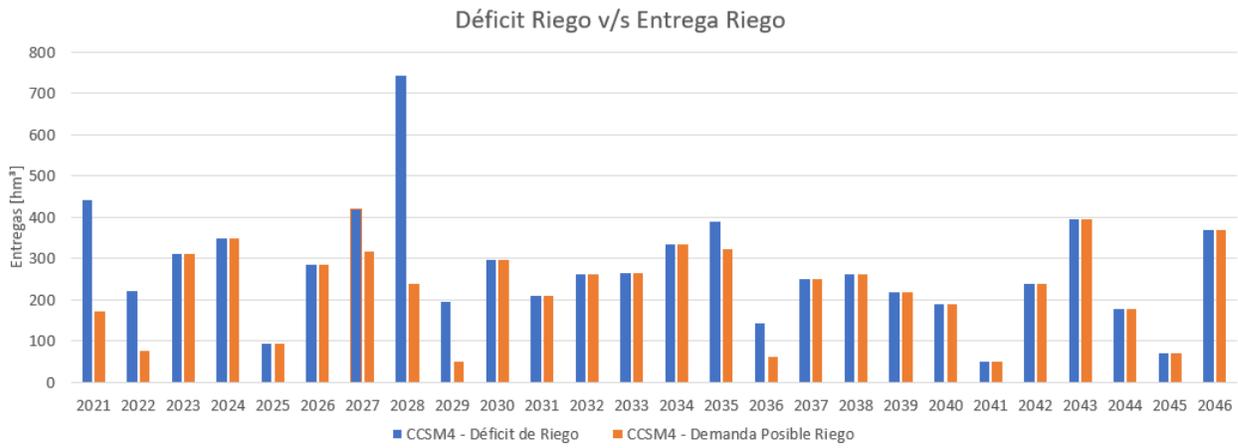


Figura 4.8: Déficit Riego v/s Entrega Riego CCSM4 Alternativa 2
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.9, se presenta para el modelo climático CSIRO.

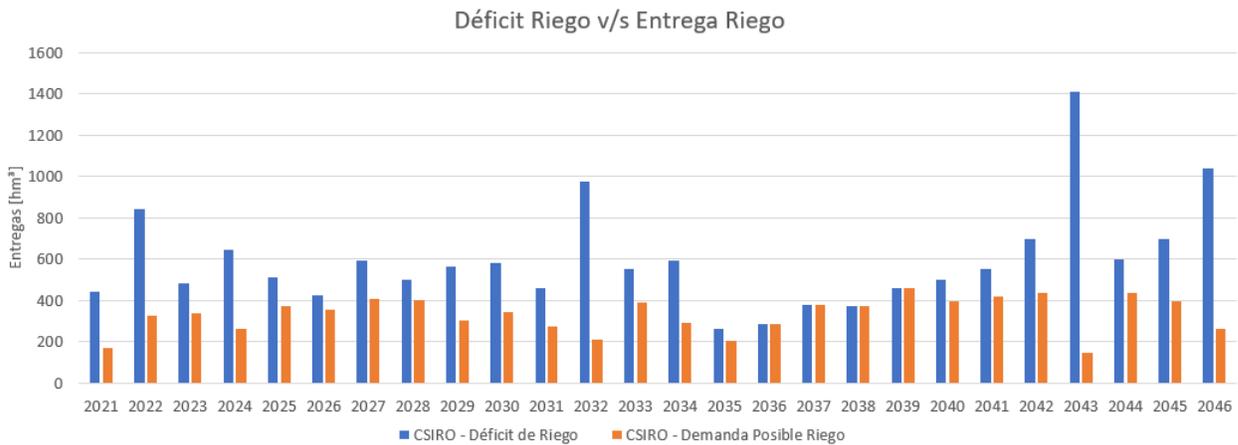


Figura 4.9: Déficit Riego v/s Entrega Riego CSIRO Alternativa 2
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.10, se presenta para el modelo climático IPSL.

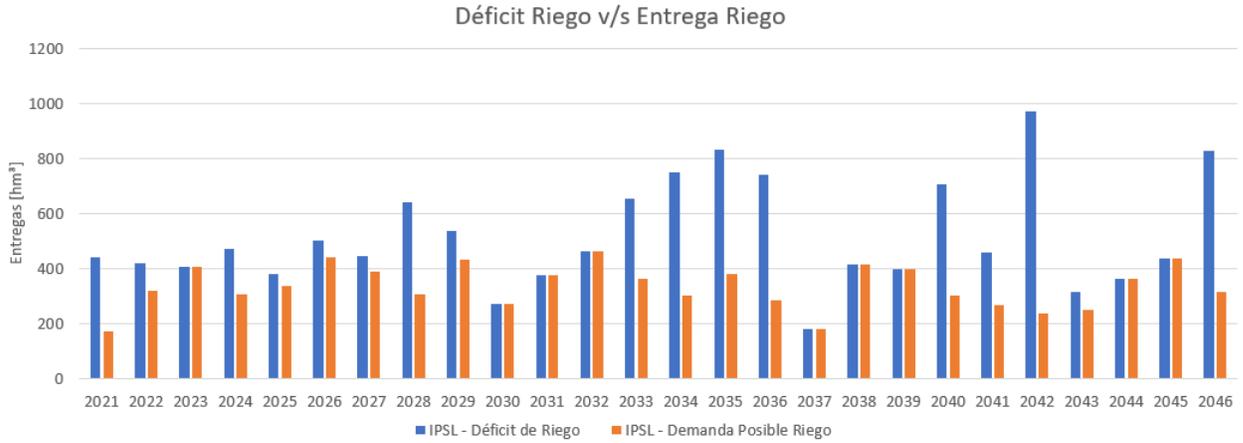


Figura 4.10: Déficit Riego v/s Entrega Riego IPSL Alternativa 2
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.11, se presenta para el modelo climático MIROC.

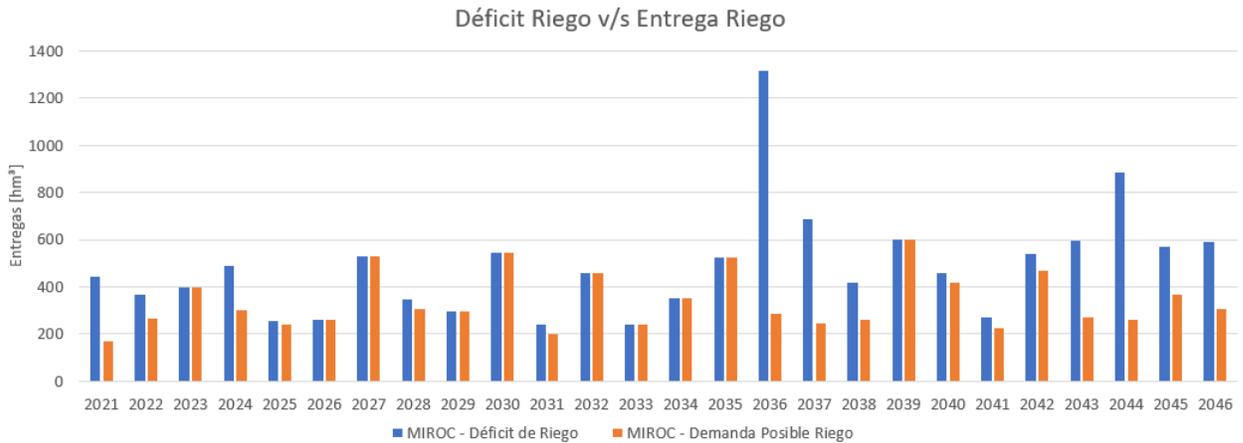


Figura 4.11: Déficit Riego v/s Entrega Riego MIROC Alternativa 2
Fuente: Elaboración Propia

Al igual que en la alternativa 1, se observan nuevamente varias temporadas en donde la barra de déficit de riego (barra azul) supera a la barra de demanda de riego posible (barra naranja). Para detallar esto, se presenta la Figura 4.6 que indica la cantidad de temporadas que poseen déficit remanente, así como el porcentaje que representa con relación al total de temporadas simuladas.

Tabla 4.6: Temporadas con Déficit de Riego con Alternativa 2
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	Temporadas Déficit	% Déficit
CCSM4	7	27 %
CSIRO	22	85 %
IPSL	17	65 %
MIROC	16	62 %

Al comparar estos números con los de la alternativa 1 (ver Tabla 4.2), son idénticos. Lo que se varía son las magnitudes de los déficit remanentes, que se pueden apreciar en las Figuras de Déficit Riego v/s Entregas de Riego. Esto se evidencia en los números de seguridad de riego, que se muestran en la Tabla 4.7 y se resumen en la Tabla 4.8.

Tabla 4.7: Años Fallo Alternativa 2
Fuente: Elaboración Propia

Año	Fallo No Fallo			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
2021	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2022	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2023	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2024	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2025	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2026	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2027	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2028	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2029	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2030	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2031	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2032	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2033	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2034	Fallo	Fallo	Fallo	No Fallo
2035	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2036	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2037	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2038	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2039	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2040	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2041	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2042	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2043	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2044	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2045	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2046	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2047	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo

Tabla 4.8: Seguridad de Riego Alternativa 2
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	Seguridad de Riego
CCSM4	59 %
CSIRO	0 %
IPSL	0 %
MIROC	6 %

4.3. Alternativa 3

Con los cambios hechos en el modelo WEAP, se obtienen las variables de interés para esta alternativa. Primero se muestra el volumen embalsado en la Figura 4.12.

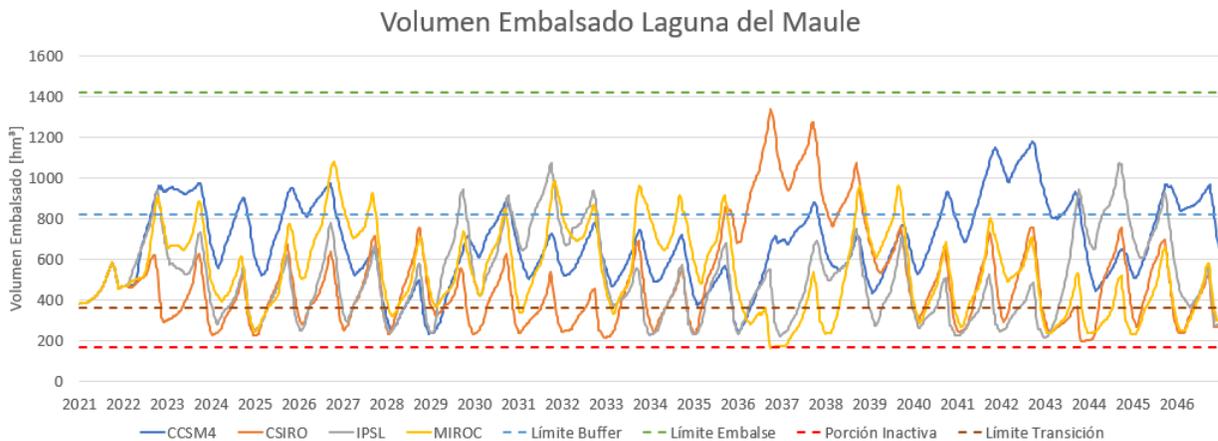


Figura 4.12: Volumen Embalsado Alternativa 3
Fuente: Elaboración Propia

En esta alternativa, se pudo sortear de mejor manera la sequía modelada del año 2037 del modelo MIROC. Durante esta, la cantidad de semanas en la porción inactiva es mínima y muy inferior si se comparan con la situación actual y con ambas alternativas (ver Figuras 3.8, 4.2 y 4.7). Como con las demás alternativas, se muestra en la Figura 4.9 los porcentajes de semanas en que se encuentra el volumen embalsado bajo los 200 $[hm^3]$:

Tabla 4.9: Porcentaje de Semanas con Valores bajo los 200 $[hm^3]$ Alternativa 3

Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	% Semanas <200[hm3]
CCSM4	0,0 %
CSIRO	0,4 %
IPSL	0,0 %
MIROC	1,7 %

Para esta alternativa se ve una mejora solamente para el modelo climático MIROC, quedando los otros tres iguales a la alternativa anterior. Como en los tres casos, la hidrología del volumen embalsado nuevamente posee un comportamiento muy similar a las otras tres simulaciones (situación actual y las otras dos alternativas).

Se aprecia como el colchón de transición es muy importante en la recuperación de la laguna, en donde solamente existe un caso, para los cuatro modelos, en que hay dos temporadas consecutivas donde el volumen permanece en este colchón (modelo MIROC temporadas 2036-2037 y 2037-2038). Dicho esto, se abre paso a los gráficos y curvas de déficits y entregas de riego para cada modelo climático.

En la Figura 4.13, se presenta para el modelo climático CCSM4 los déficits de riego y las entregas posibles para riego (definidas en el Convenio).

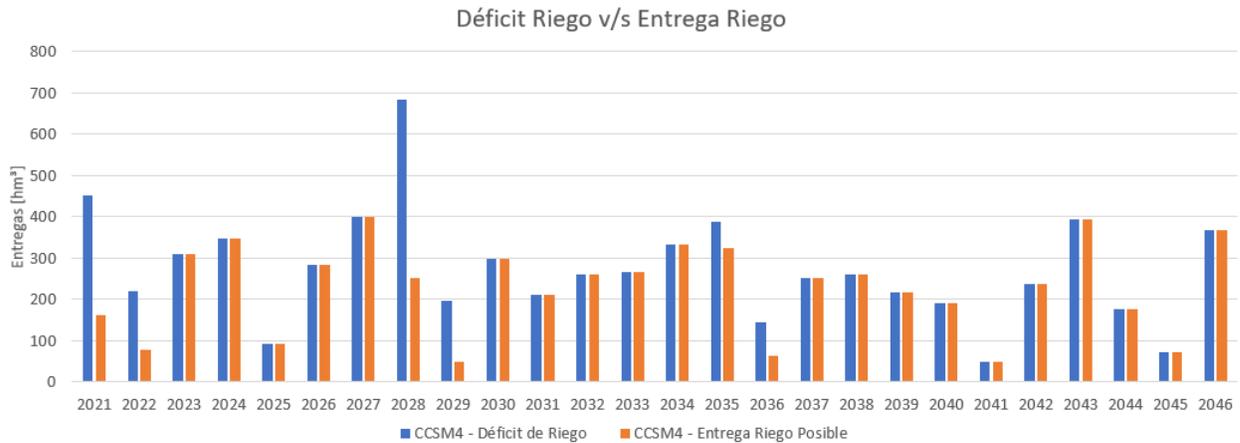


Figura 4.13: Déficit Riego v/s Entrega Riego CCSM4 Alternativa 3
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.14, se presenta para el modelo climático CSIRO.

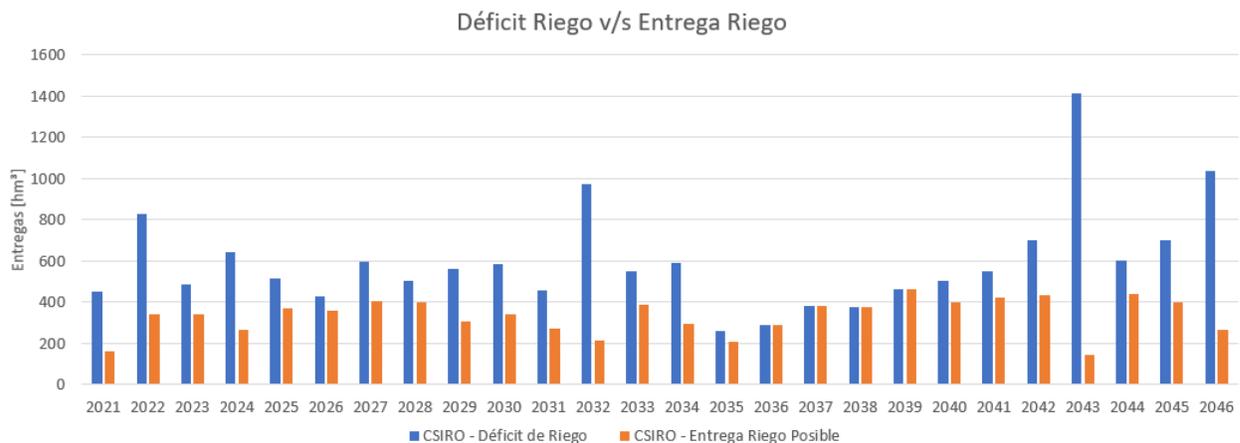


Figura 4.14: Déficit Riego v/s Entrega Riego CSIRO Alternativa 3
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.15, se presenta para el modelo climático IPSL.

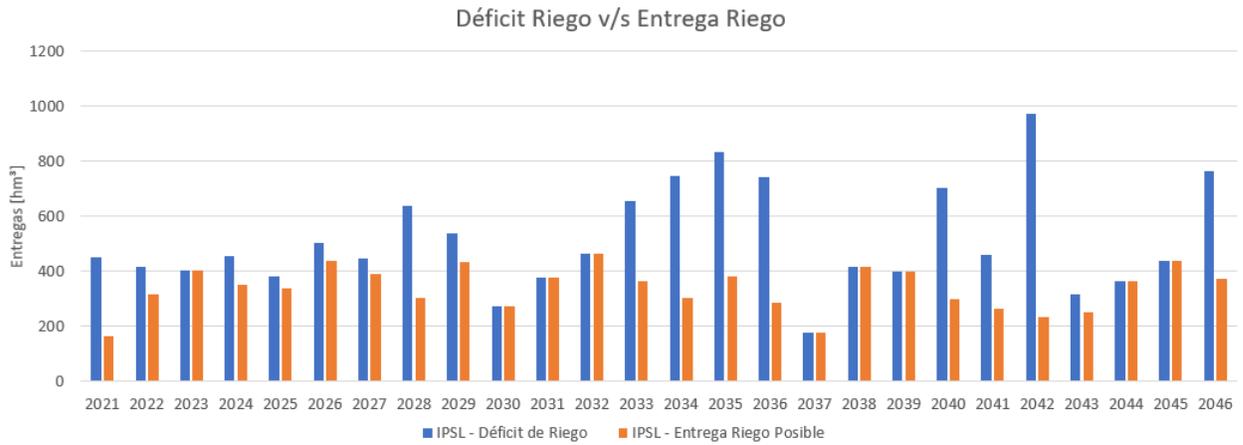


Figura 4.15: Déficit Riego v/s Entrega Riego IPSL Alternativa 3
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.16, se presenta para el modelo climático MIROC.

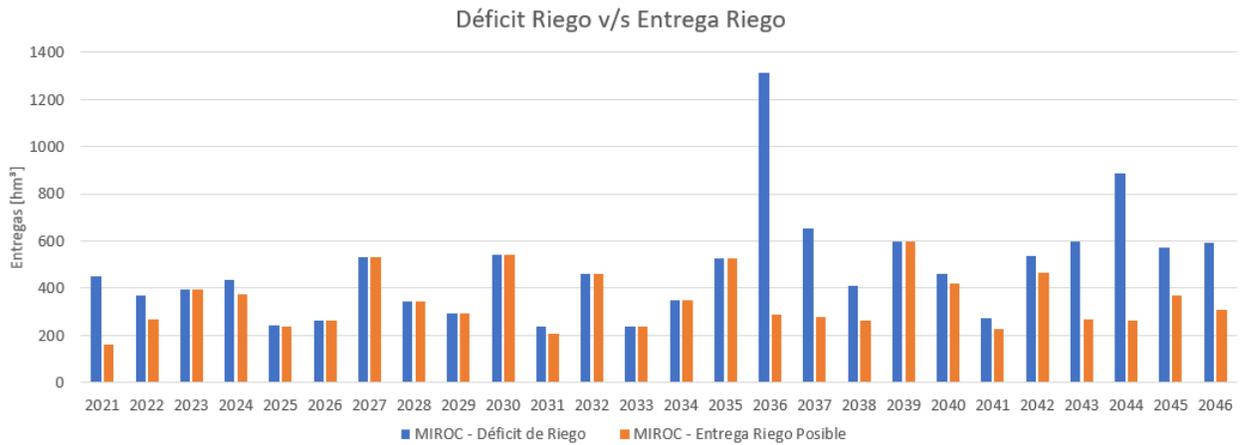


Figura 4.16: Déficit Riego v/s Entrega Riego MIROC Alternativa 3
Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a las temporadas que poseen déficit de riego, se muestra la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Temporadas con Déficit de Riego con Alternativa 3
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	Temporadas Déficit	% Déficit
CCSM4	6	23 %
CSIRO	22	85 %
IPSL	17	65 %
MIROC	15	58 %

Con ello, se da paso a la seguridad de riego, que se muestra en la Tabla 4.7 y se resume en la Tabla 4.12.

Tabla 4.11: Años Fallos Alternativa 3
Fuente: Elaboración Propia

Año	Fallo No Fallo			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
2021	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2022	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2023	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2024	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2025	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2026	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2027	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2028	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2029	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2030	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2031	Fallo	Fallo	No Fallo	Fallo
2032	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2033	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2034	No Fallo	Fallo	Fallo	No Fallo
2035	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2036	Fallo	No Fallo	Fallo	Fallo
2037	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2038	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2039	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2040	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2041	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2042	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2043	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2044	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2045	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2046	No Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
2047	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo

Tabla 4.12: Seguridad de Riego Alternativa 3
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	Seguridad de Riego
CCSM4	76 %
CSIRO	6 %
IPSL	6 %
MIROC	6 %

Capítulo 5

Análisis y Discusión de Soluciones

A partir de los resultados presentados en el capítulo anterior se procede a compararlas y analizarlas para poder saber cual de ellas genera un mejor comportamiento hídrico-operacional en el embalse, en términos de usos del agua y almacenamiento de ella en la cuenca. Así, se puede dar paso a recomendaciones de trabajos futuros que tengan énfasis en la o las soluciones que se presentan en esta memoria.

Lo primero a comparar son los volúmenes almacenados en la Laguna del Maule. Para generar una buena comparación de estos, se realizan de manera separada por modelo climático, en donde se grafican las tres alternativas y la situación actual en conjunto. Así, se presenta en la Figura 5.1 el gráfico de la evolución del volumen embalsado para el modelo climático CCSM4.

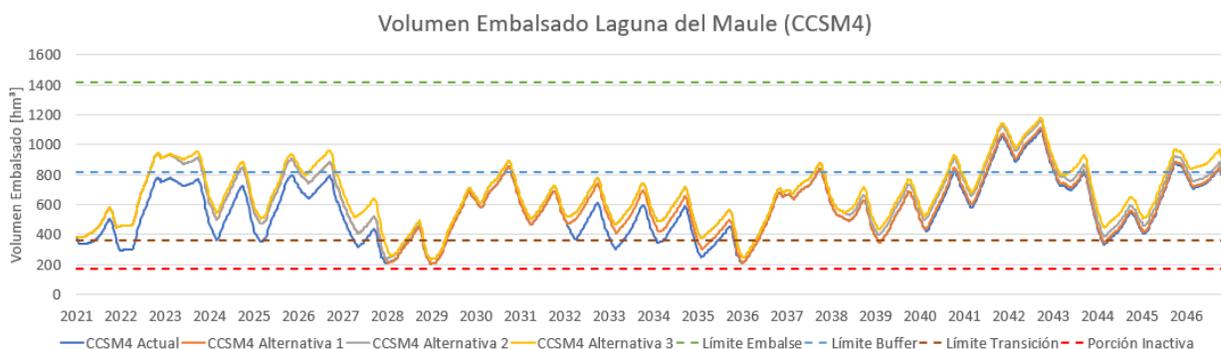


Figura 5.1: Volumen Almacenado Laguna del Maule CCSM4

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 5.2, se presenta el gráfico para el modelo climático CSIRO.

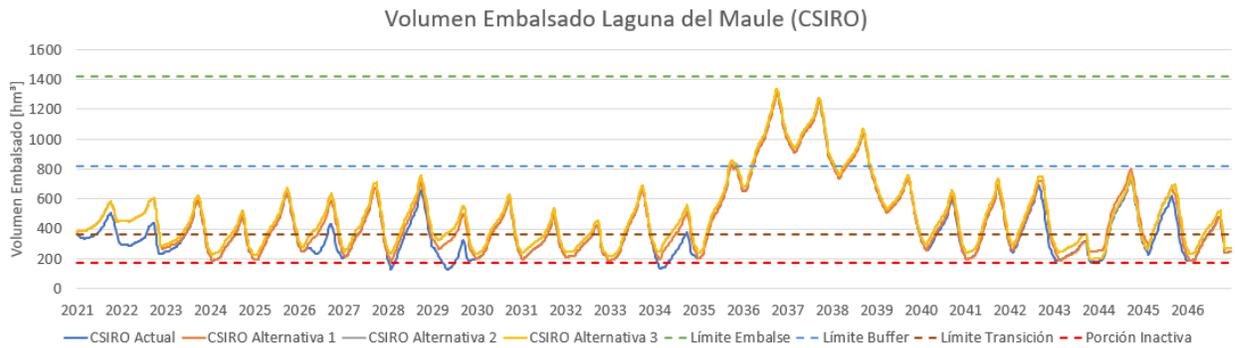


Figura 5.2: Volumen Almacenado Laguna del Maule CSIRO
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 5.3, se presenta el gráfico para el modelo climático IPSL.

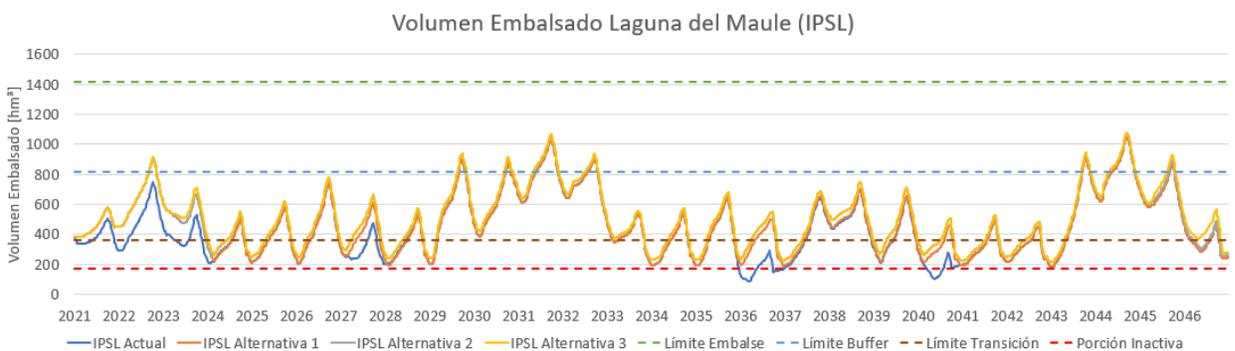


Figura 5.3: Volumen Almacenado Laguna del Maule IPSL
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 5.4, se presenta el gráfico para el modelo climático MIROC.

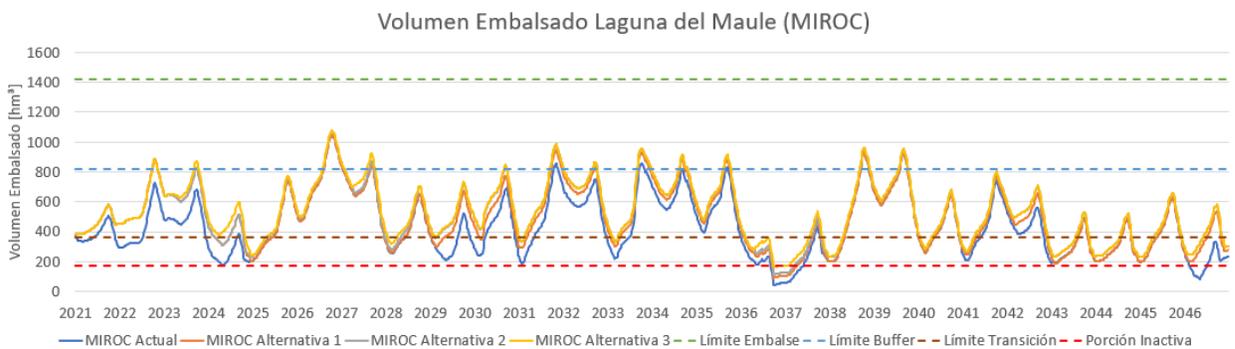


Figura 5.4: Volumen Almacenado Laguna del Maule MIROC
Fuente: Elaboración Propia

De las Figuras 5.1 a 5.4, se puede segmentar el análisis en dos: las diferencias de los cuatro modelos climáticos y las diferencias de cada uno según la alternativa que se elige en base al caso actual (desde ahora se le llamará caso base). Así, en primer lugar se dará paso al análisis de las diferencias entre los modelos climáticos, de forma breve, ya que no es el foco de la memoria.

En primer lugar, para el modelo CCSM4, se puede ver que en ningún momento se baja a la porción inactiva, ni en el caso base ni en las alternativas de cambio para el Convenio HR. Este modelo posee un futuro más o menos húmedo, ya que son varias las temporadas en las que alcanza el nuevo colchón superior, y si se dirime según las actuales divisiones del embalse, existen muchas más temporadas en las que el volumen queda en la nueva porción superior. Para el colchón inferior, hay pocas temporadas en las que decae, y son decaimientos que no duran mucho.

El segundo modelo climático, el CSIRO, presenta un comportamiento más bien repetitivo en casi todo el horizonte de modelación, exceptuando las temporadas entre el 2036 y el 2038, en donde la cota de pelo de agua alcanza por casi tres temporadas al hilo el nuevo colchón superior. Fuera de esos años, el modelo climático va alternando períodos de relleno de la laguna con períodos de uso, en donde los años de sequía y húmedos son muy parecidos. Es más bien un comportamiento simétrico.

En tercer lugar, el modelo climático IPSL se mantiene dentro de los nuevos colchones intermedios y de transición, con períodos de sequía y años húmedos bien identificados, en donde se sube y baja a los colchones superior e inferior de manera intermitente. En este modelo se aprecian varias sequías importantes, tocando y a veces traspasando el límite de la porción inactiva.

Finalmente, para el modelo MIROC, es un comportamiento parecido al IPSL, en donde en varias ocasiones se llega al límite de la porción inactiva, donde también se tienen varias ocasiones en que se alcanza el colchón superior. Es importante notar que para ningún modelo climático se alcanza el límite superior del embalse.

Dicho esto, se pasa al análisis de las alternativas con respecto al caso base. En los gráficos (ver Figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4), el caso base está en color azul, la alternativa 1 en naranja, la alternativa 2 en color gris, y la alternativa 3 en amarillo.

En los cuatro modelos, se ve claramente como en el colchón de transición, y en menor medida en el intermedio, el color azul (correspondiente al caso base) es el que se mantiene en el nivel más bajo. De hecho, en todos los modelos excepto en el CCSM4, este sobrepasa el límite inferior y llega hasta la porción inactiva, que es, según el Convenio HR, cuando no se puede usar agua para riego ni para hidroelectricidad. Esto es justo lo que se quiere evitar.

Siguiendo con el punto anterior, se puede apreciar como en el modelo CSIRO, en las temporadas 2029-2030 y 2034-2035 se llega a la porción inferior en el caso base, y las tres alternativas propuestas lo evitan. Es más, para el modelo IPSL también ocurre en las temporadas 2036-2037 y 2040-2041 de manera clara. Por último, para el modelo climático MIROC, en la temporada 2046-2047 también ocurre. En este último modelo, para la temporada 2036-2037, que es un año muy seco, solamente la alternativa 3 evita el decaimiento del volumen almacenado hacia la porción inactiva.

En los cuatro modelos ocurre este efecto, que es clara consecuencia de los cambios en los usos del agua en los colchones intermedios y de transición, que es que justo en esos colchones la cota de pelo de agua se separa notoriamente entre el caso base y las tres alternativas

propuestas. Esto ya que parte de esa agua será utilizada para la recuperación de la Laguna. Sin embargo, hay temporadas en las que en los colchones superior e intermedio las tres alternativas se solapan con el caso base, en los que se ve como solo una curva. Esto ocurre, por ejemplo, en el modelo climático CSIRO entre los años 2036 y 2040.

Dicho todo esto, se puede decir con seguridad que las alternativas propuestas evitan en gran medida que la cota de pelo de agua del embalse caiga a la porción inactiva. Para la alternativa 3, esto se cumple al 100 %, evitando su decaimiento hasta en la gran sequía que se modela con el modelo climático MIROC para la temporada 2036-2037. Sin embargo, se deben analizar más variables para ver si el agua que se está dejando de usar no afecta drásticamente a los dos usuarios de esta: los regantes y las empresas de electricidad Colbún y ENEL.

Por ello, es que se procede a analizar y comparar las entregas de riego y sus respectivos déficit. Así, se entrega esta información de la misma manera que el volumen: separadas por modelo y graficadas en simultáneo para el caso base y para las tres alternativas.

En la Figura 5.5, se presentan los déficit de riego, comenzando con el modelo climático CCSM4.

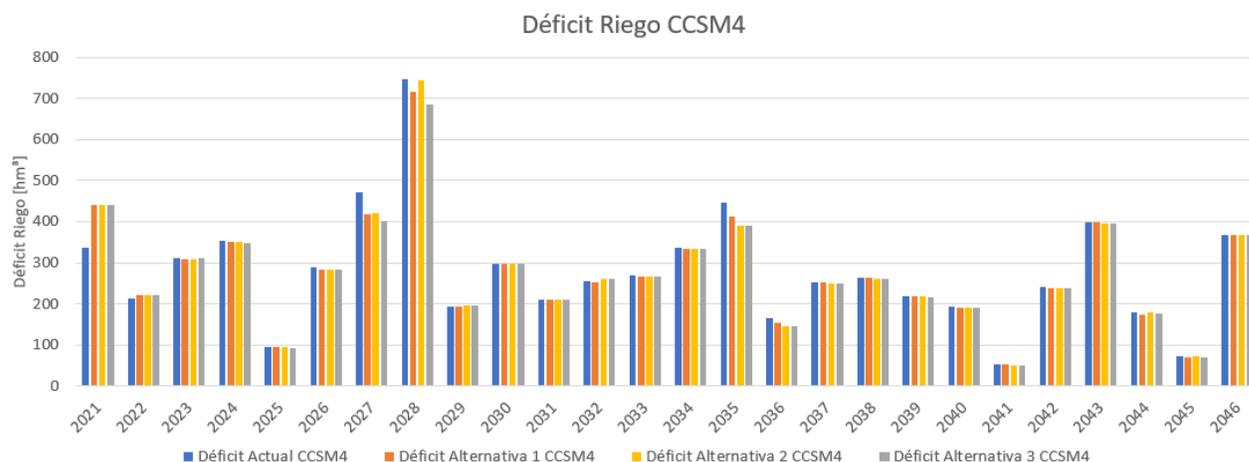


Figura 5.5: Déficit de Riego CCSM4
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 5.6, se presenta el modelo climático CSIRO.

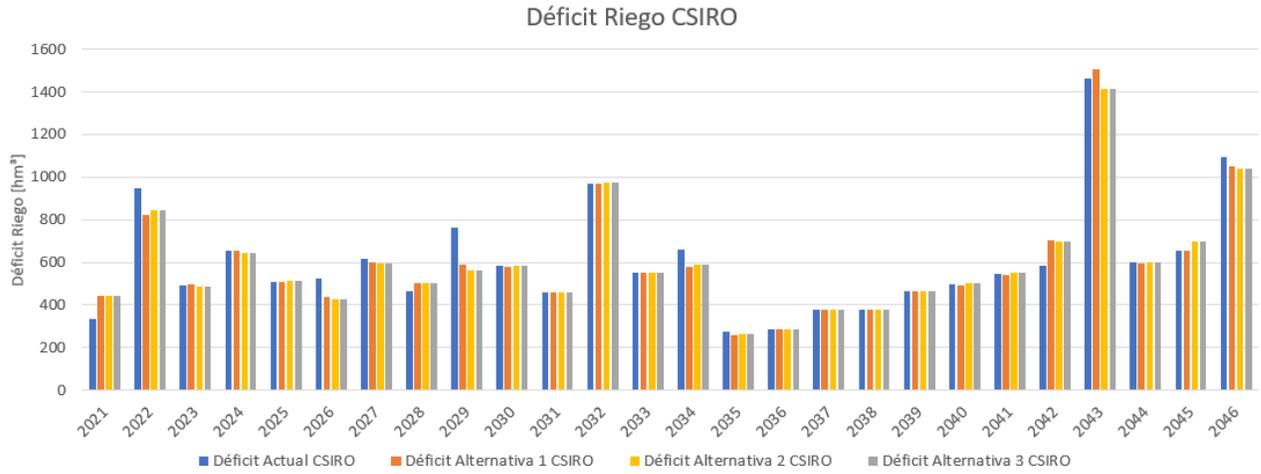


Figura 5.6: Déficit de Riego CSIRO
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 5.7, se presenta el modelo climático IPSL.

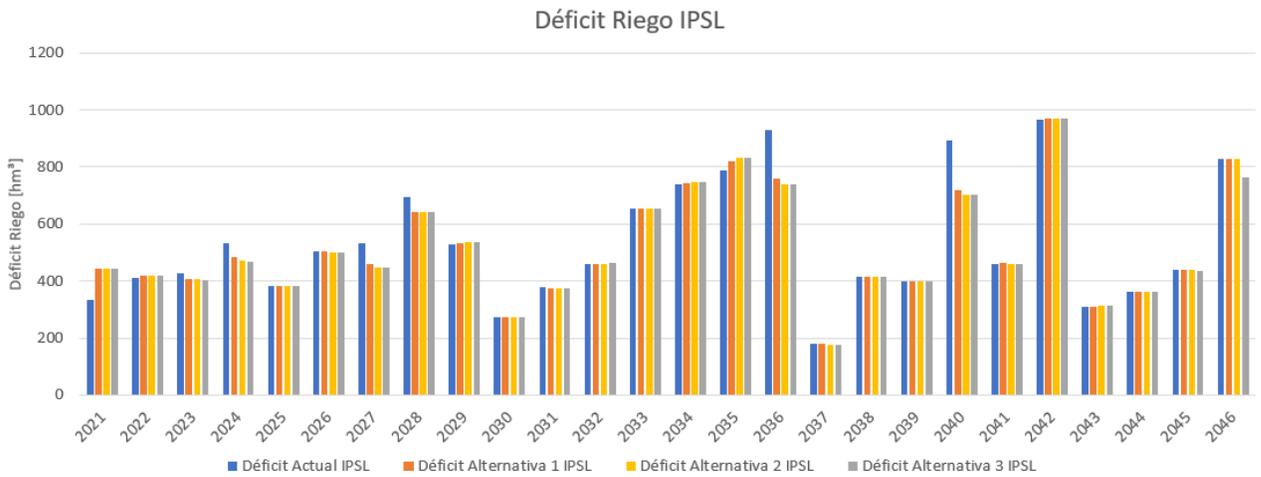


Figura 5.7: Déficit de Riego IPSL
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 5.8, se presenta el modelo climático MIROC.

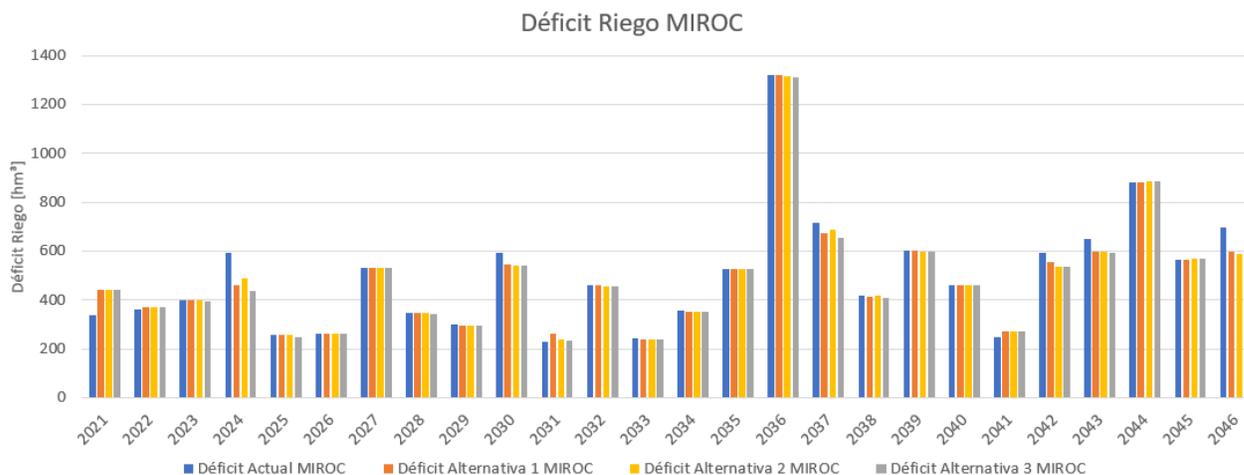


Figura 5.8: Déficit de Riego MIROC
Fuente: Elaboración Propia

Para los déficit, se puede observar que son casi idénticos para casi todo el horizonte de modelación, con excepción en algunos casos para cada modelo climático. Sin embargo, para efectos de esta memoria, las diferencias no se consideran importantes dentro del análisis de esta. Lo que si se puede apreciar y verifica lo dicho anteriormente, es como para el modelo climático CCSM4 los déficit son menores, debido a que se modela un futuro más húmedo. Esto se evidencia con la suma de los déficit de riego totales (caso base más las tres alternativas, o sea, el déficit sumado de los cuatro casos analizados en esta memoria) para cada modelo climático, presentadas a continuación:

Tabla 5.1: Déficit Totales de Riego
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	Déficit Total [hm^3]
CCSM4	28.690
CSIRO	62.125
IPSL	53.995
MIROC	50.849

Así, se pasa al análisis y comparación de las entregas de riego. Estas, corresponden a indicadores de vulnerabilidad, que hacen referencia a la magnitud de la falla y del déficit remanente, que es cuanta agua falta para poder saciar al 100% la demanda de riego. En primer lugar se presenta la Figura 5.9 para el modelo climático CCSM4, que muestra las entregas de riego.

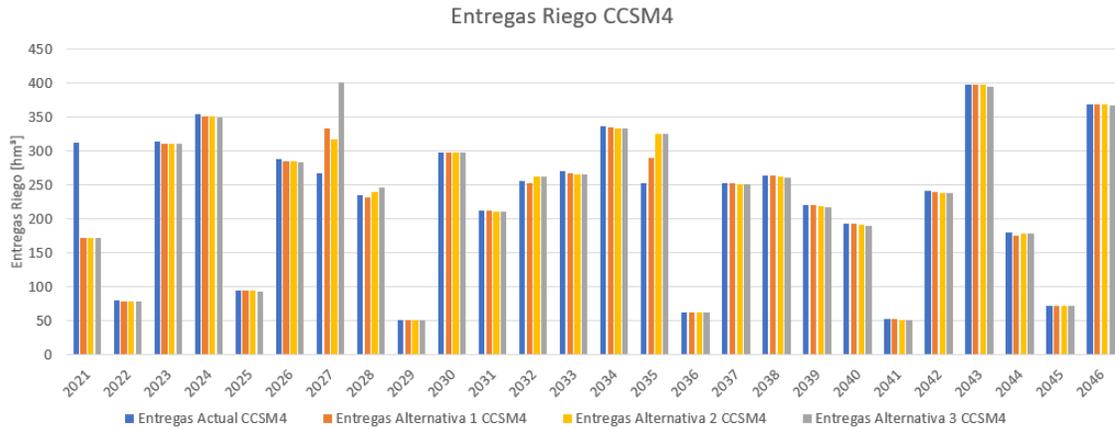


Figura 5.9: Entregas Riego CCSM4
Fuente: Elaboración Propia

En segundo lugar, se tienen las entregas de riego para el modelo CSIRO en la Figura 5.10.

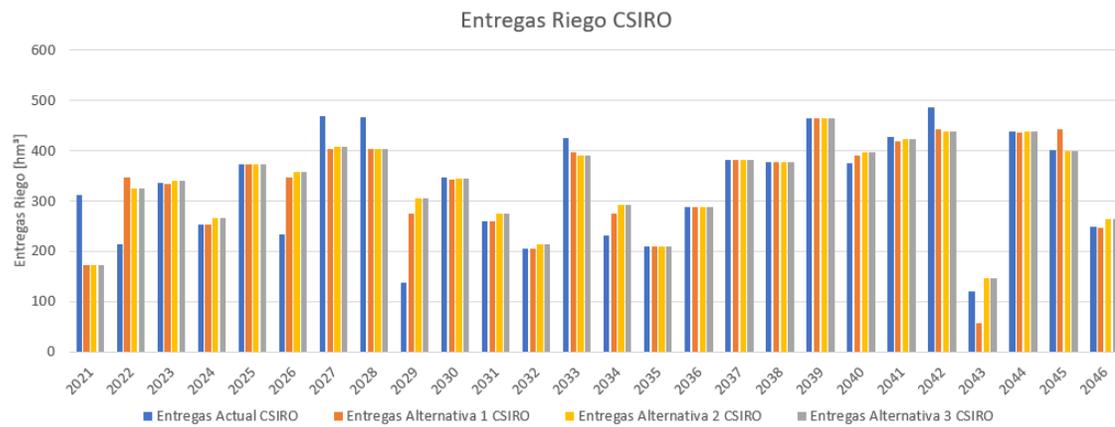


Figura 5.10: Entregas Riego CSIRO
Fuente: Elaboración Propia

En tercer lugar se presenta la Figura 5.11 para el modelo climático IPSL.

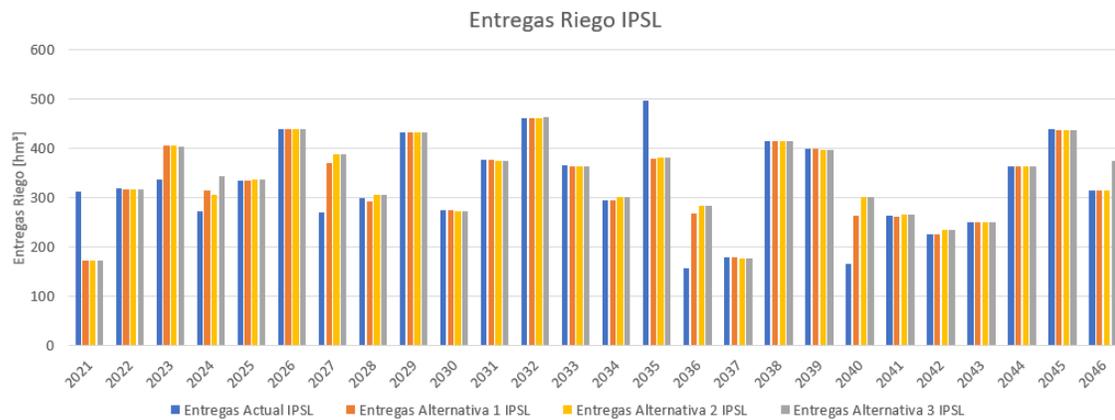


Figura 5.11: Entregas Riego IPSL
Fuente: Elaboración Propia

Por último, se presenta la Figura 5.12 para las entregas de riego para el modelo climático MIROC.

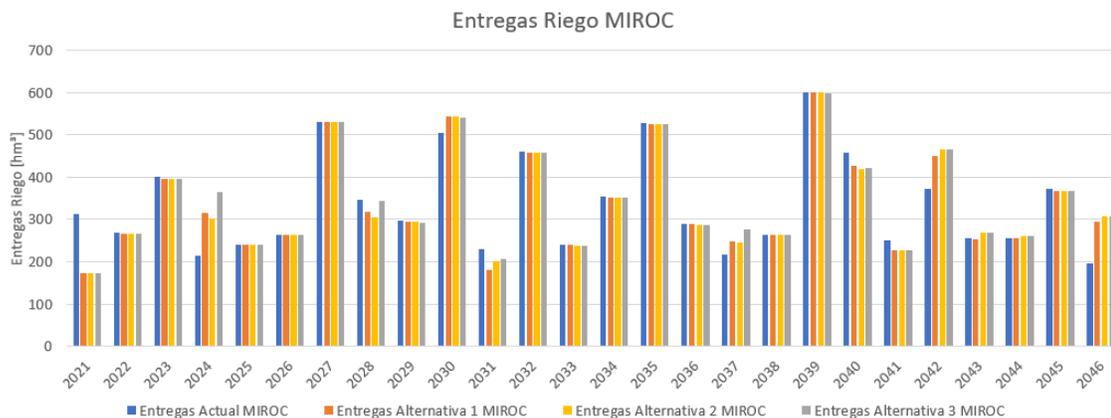


Figura 5.12: Entregas Riego MIROC
Fuente: Elaboración Propia

Estos cuatro gráficos si poseen diferencias significativas entre las alternativas y la situación actual, para los cuatro modelos climáticos. Sin embargo, estas diferencias no se ven en todas las temporadas de riego, ya que hay varias en las que las entregas son las mismas. Esto está condicionado en su mayoría por el nuevo colchón de transición y los nuevos límites de los colchones, en donde para las tres alternativas cambia con respecto a la situación actual.

Para una mejor visualización, se entrega a continuación cuatro gráficos, separados por modelo climático, con la resta entre el déficit de riego y las entregas, resultando una nueva variable que hace mención a la magnitud de la falla. Esta, corresponde al agua que falta para poder satisfacer el 100 % del déficit de riego (o, en otros términos, a la demanda de riego del embalse), a ella se le da el nombre de Déficit Remanente. Este se muestra a continuación, comenzando con el modelo climático CCSM4 en la Figura 5.13.

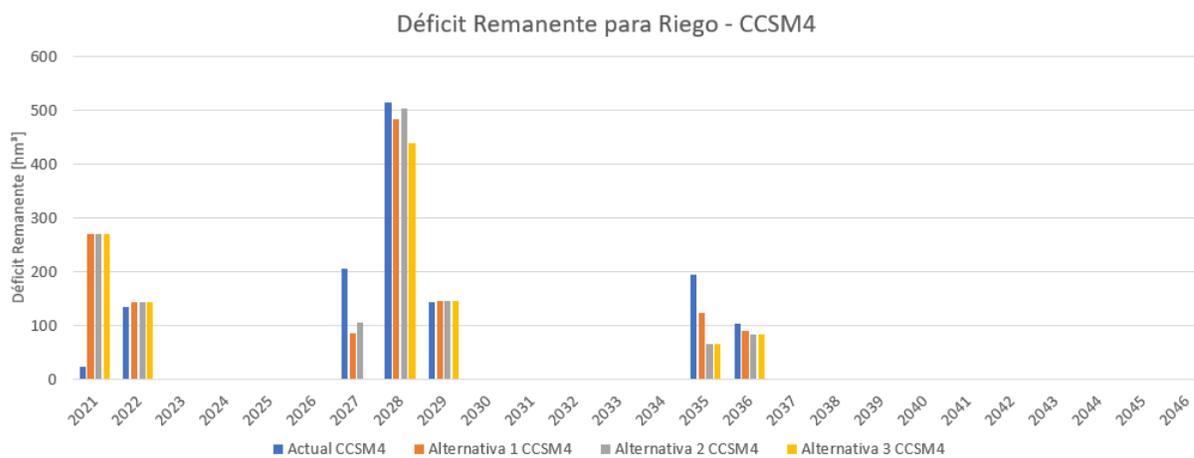


Figura 5.13: Déficit Remanente de Riego - CCSM4
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 5.14, el modelo climático CSIRO.

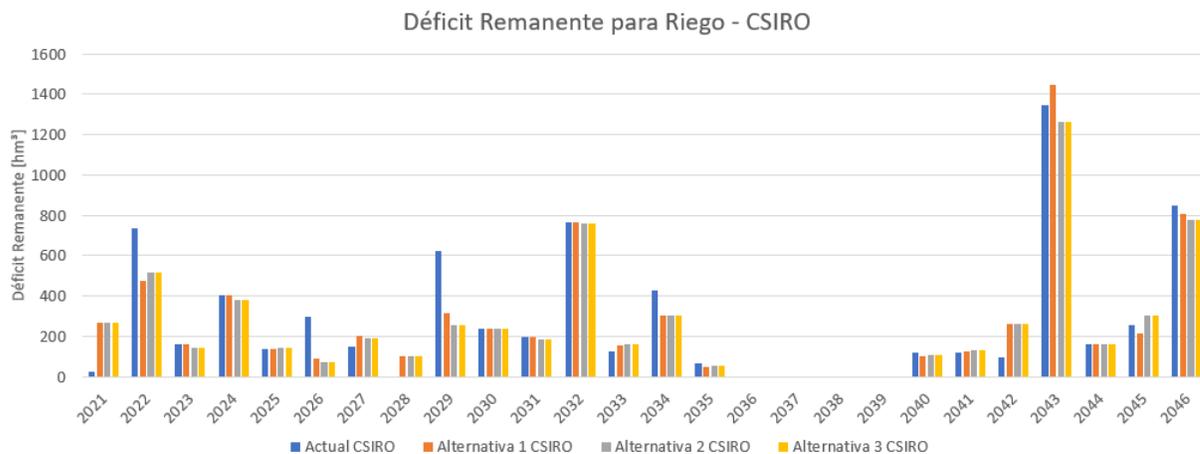


Figura 5.14: Déficit Remanente de Riego - CSIRO
Fuente: Elaboración Propia

En tercer lugar, se presentan los resultados del modelo IPSL en la Figura 5.15.

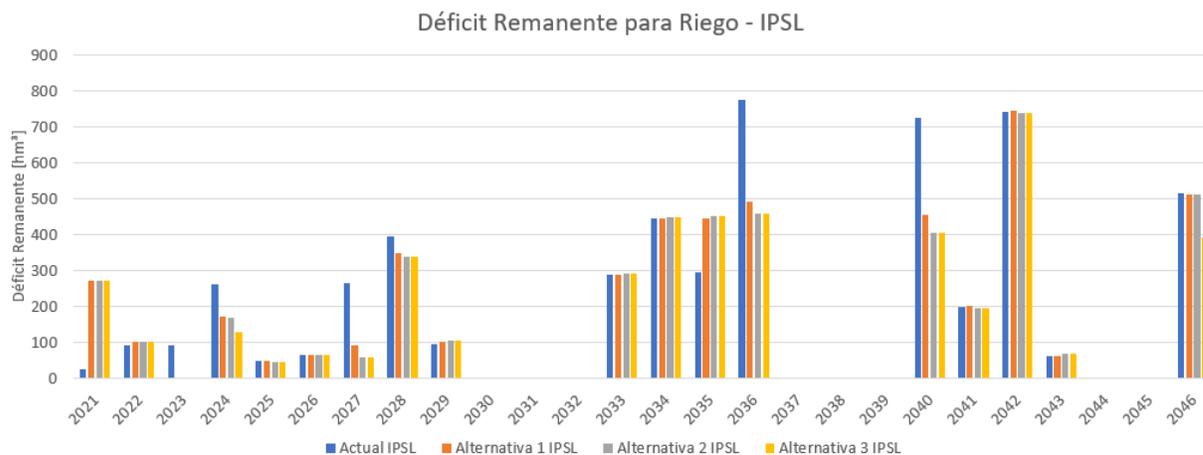


Figura 5.15: Déficit Remanente de Riego - IPSL
Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se tienen los resultados de MIROC en la Figura 5.16.

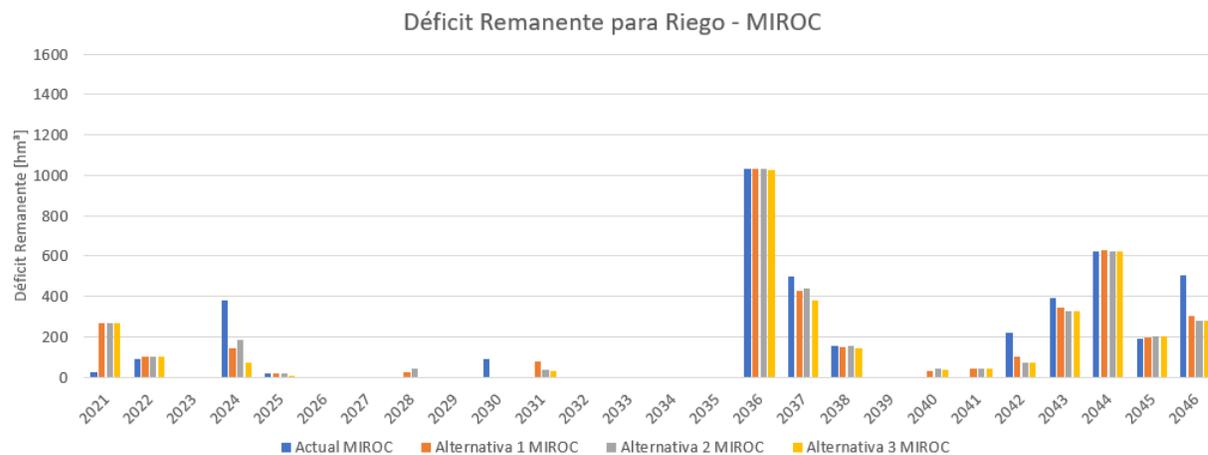


Figura 5.16: Déficit Remanente de Riego - MIROC

Fuente: Elaboración Propia

Junto con esto, se presenta la Tabla 5.2 con las cantidades totales de Déficit Remanente de Riego.

Tabla 5.2: Déficit Remanente de Riego Totales

Fuente: Elaboración Propia

Caso	Modelo Climático	Déficit Remanente de Riego [hm^3]
Actual	CCSM4	1.317
	CSIRO	7.299
	IPSL	5.365
	MIROC	4.220
Alternativa 1	CCSM4	1.337
	CSIRO	6.975
	IPSL	4.831
	MIROC	3.899
Alternativa 2	CCSM4	1.314
	CSIRO	6.771
	IPSL	4.694
	MIROC	3.868
Alternativa 3	CCSM4	1.144
	CSIRO	6.771
	IPSL	4.534
	MIROC	3.614

Luego, se presentan los estadísticos de estos números en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Estadísticos Déficit Remanente de Riego
Fuente: Elaboración Propia

Caso	Estadístico	Déficit Remanente de Riego [hm^3]
Actual	Promedio	4.550
	Máximo	7.299
	Mínimo	1.317
Alternativa 1	Promedio	4.260
	Máximo	6.975
	Mínimo	1.337
Alternativa 2	Promedio	4.162
	Máximo	6.771
	Mínimo	1.314
Alternativa 3	Promedio	4.016
	Máximo	6.771
	Mínimo	1.144

Se puede apreciar que la alternativa 1 representa una mejora significativa para tres de los cuatro modelos climáticos en comparación con el caso base, con una disminución en el déficit remanente de riego de entre 300 y 500 [hm^3]. Únicamente en el modelo CCSM4 se mantiene casi igual este déficit remanente. Esta mejora se refleja en la disminución del promedio del déficit remanente de riego total en casi 300 [hm^3]. Las Figuras 5.13 a 5.16 también muestran este hecho, donde la primera temporada modelada indica que la situación actual es mucho más favorable que las tres alternativas. Sin embargo, con el tiempo, se equipara para varias temporadas y en muchas otras, el caso base resulta ser el que tiene peor rendimiento.

También, en tres de los cuatro modelos climáticos, el valor máximo del déficit remanente de riego corresponde al caso base, lo que podría evidenciar un peor rendimiento luego de períodos de sequía. Por ejemplo, para el modelo IPSL (Figura 5.15), hay cuatro temporadas seguidas (desde el 2033-2034 hasta el 2036-2037) con déficit remanente de riego, en donde para la última temporada con falta, el caso base es el de peor rendimiento. Otro casi similar pasa en el modelo climático CSIRO (Figura 5.14), en donde existen 15 temporadas con falta de riego seguidas. En estas, se tiene que la primera temporada el caso base es el de mejor rendimiento, pero al seguir avanzando, tenemos cuatro temporadas con un notorio peor rendimiento del caso base (diferencias entre 200 y 300 [hm^3]), y solo una en que el caso base es mejor (2028-2029, en donde el déficit remanente del caso base es cero), donde la diferencia es de 100 [hm^3].

Finalmente, para el modelo MIROC (Figura 5.16), en las últimas siete temporadas ocurre lo mismo pero más evidente: las primeras temporadas de sequía ocurre un mejor comportamiento del caso base (2040-2041 y 2041-2042), pero con el paso de más años secos, se muestra que las tres alternativas responden de mejor manera a las entregas de agua para riego, teniendo tres temporadas con mejores rendimientos (dos de ellas con diferencias superiores a los 100 [hm^3]) y dos temporadas similares, donde se equiparan las entregas debido al mayor almacenamiento en la Laguna en el caso base debido a la menor entrega para riego en la temporada que las anteceden.

En el caso del Déficit Remanente de Riego total, las diferencias de los promedios (ver Tabla 5.3) entre el caso base y las tres alternativas son mayores. Para la alternativa 1, la baja del déficit remanente de riego es de un 6,4 %, para la alternativa 2 es un 8,5 %, y para la alternativa 3, de un 11,7 %. Esta última es mayor al 10 %, una diferencia significativa. Pero, si se hace el análisis por modelo climático es distinto. Por ejemplo, para el modelo IPSL, las tres alternativas superan el 10 % de diferencia con respecto al caso base, todas de mejor rendimiento.

Así, no solo el volumen almacenado presenta mejoras con respecto a la situación actual, sino que las nuevas entregas de riego también se ven favorecidas, con un mejor comportamiento a largo plazo en sequías en años seguidos. Esto se ve sin importar el modelo climático, donde hay mejoras en todos los casos, exceptuando para el modelo CCSM4 para la alternativa 1, en donde existe una diferencia negativa del 1,5 %.

Así, se pasa a analizar y comparar la variable de seguridad de riego en los cuatro casos descritos en esta memoria. Estas se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Comparación Seguridad de Riego
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Climático	Caso Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
CCSM4	41 %	47 %	59 %	76 %
CSIRO	0 %	0 %	0 %	6 %
IPSL	0 %	0 %	0 %	6 %
MIROC	0 %	6 %	6 %	6 %

De la Tabla 5.4, se aprecia como a mayores medidas que evitan la baja del volumen embalsado hacia la porción inferior (porcentajes asociados a la recuperación de la laguna), la seguridad de riego va aumentando, así como también como cuando se limita el límite superior de extracción para la generación hidroeléctrica. En este último caso, la mejora es en todos los modelos climáticos, con una notoria mejoría para el modelo CCSM4.

Lo que genera preocupación, es la baja seguridad de riego en el caso base, en donde en tres de los cuatro modelos climáticos se posee una seguridad de riego del 0 %, lo que es inquietante y debería encender las alarmas. Por el lado del modelo, la forma en la que se calculan las hectáreas de cultivos puede suscitar dudas y, de alguna u otra forma, desencadenar en los números tan bajos que se tienen para la seguridad de riego.

La manera en que se calcula la tasa de reparto tiene que ver con las superficies totales cultivadas, que según el Anexo F2 del PEGH del Maule (ver Anexo 3), es aquella superficie que contiene la llamada superficie potencial: una superficie variable que no es regada durante toda la temporada estival. Por ello, es que la tasa de reparto es tan baja para algunos meses, especialmente en la temporada estival, lo que conlleva la baja en seguridad de riego anual, plasmada en la Tabla 5.4. Sin embargo, al aumentar la seguridad de riego con las alternativas modeladas en el modelo, es un claro indicador de como aumenta la confiabilidad en el sistema de riego.

Por el lado de la Generación Hidroeléctrica también se tiene un análisis paralelo. Para este análisis, es importante hacer notar que se posee una demanda muy diferente en naturaleza y funcionamiento, así como en las reglas que definen a la demanda hidroeléctrica. Esta demanda está definida por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) (que posee más de 38.000 MW instaladas al año 2002,) quien, a través del Coordinador Eléctrico Nacional, programa y define la generación de energía hidroeléctrica por parte del embalse Laguna del Maule, así como de las demás centrales generadoras de energía.

Esta decisión debe minimizar los costos marginales asociados a la distribución de requerimientos de generación de energía, donde, por ejemplo, la generación hidroeléctrica es más económica que la generación termoeléctrica. Así, en un escenario ideal, se pretende poseer suficientes recursos hídricos en los embalses del país para poder transformar energía a bajos costos. En este embalse en particular, se observa algo muy interesante en cuanto a su demanda histórica.

Si se observa la Figura 3.4 de las entregas históricas desde la Laguna, se notan dos temporadas en que la demanda supera los 250 [hm^3]: 2007-2008 y 2010-2011. Esto es importante ya que en esos años (2007 y 2010) se tuvo que la cota de pelo de agua al primer día de este estuvo dentro del colchón superior, lo que gatilla el uso por parte de la generación al volumen de conservación (ver Figura 2.6) que tiene un máximo de 350 [hm^3] por temporada. Así, cuando se está dentro de ese volumen, la generación posee un máximo de uso de 600 [hm^3] por temporada, lo que coincide con las entregas anuales.

Así, un escenario en donde la Laguna del Maule posee su cota de pelo de agua en el colchón intermedio es desfavorable comparado con un escenario en donde la cota se encuentre en el superior. Se busca poseer más agua para usar más, pero se debe pensar también en el ahorro de esta para suplir demandas en temporadas de sequía, las cuales afectan a más de solo una cuenca, afectando así de manera global al SEN.

Los cambios de operación y entregas que afectan a la generación en Laguna del Maule afectarán en la función de costos esperados para el SEN. La disminución de la máxima extracción por temporada en la alternativa 3 es, quizás, la mayor preocupante que enciende las alarmas para crear costos esperados mucho mayores en relación al caso base. Sin embargo, en la memoria de Juan Manuel Puertas (FCFM, UCHILE 2016) se obtiene que un cambio en la operación del Sistema Hidroeléctrico del Laja, de más de 1.000 MW de potencia instalada (muy similar al total de potencia instalada en la zona de estudio de esta memoria), no afecta en los costos futuros esperados del SEN, ya que "... este es tan grande que una restricción que afecte sólo a una de sus centrales de embalse no altera considerablemente la operación de otras centrales de embalse", en tiempos en que el SEN no existía y era llamado Sistema Interconectado Central (SIC), que no contenía al Sistema Interconectado del Norte Grande (SEING).

De igual manera, cambios sustantivos en la operación y entregas hacia la generación hidroeléctrica desde la Laguna se deben analizar con modelos de Programación a Largo Plazo (PLP). La alternativa 3 es la que más supone cambios, ya que se le disminuye el límite de extracción superior por temporada, así como disminuye sus entregas en los colchones intermedio y de transición. Estos cambios se traducen en menores volúmenes anuales de extracción para

generación eléctrica desde la Laguna. Gráficos de comparación de volúmenes de extracción posibles se muestran en la Figura 5.17 para el modelo climático CCSM4, la Figura 5.18 para el modelo climático CSIRO, la Figura 5.19 para el modelo climático IPSL y la Figura 5.20 para el modelo climático MIROC.

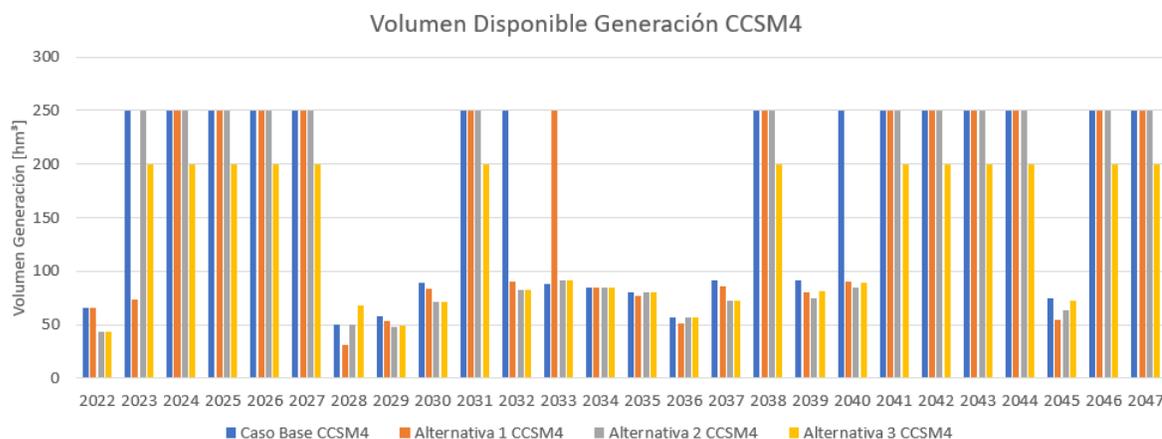


Figura 5.17: Volumen Generación Modelo CCSM4
Fuente: Elaboración Propia

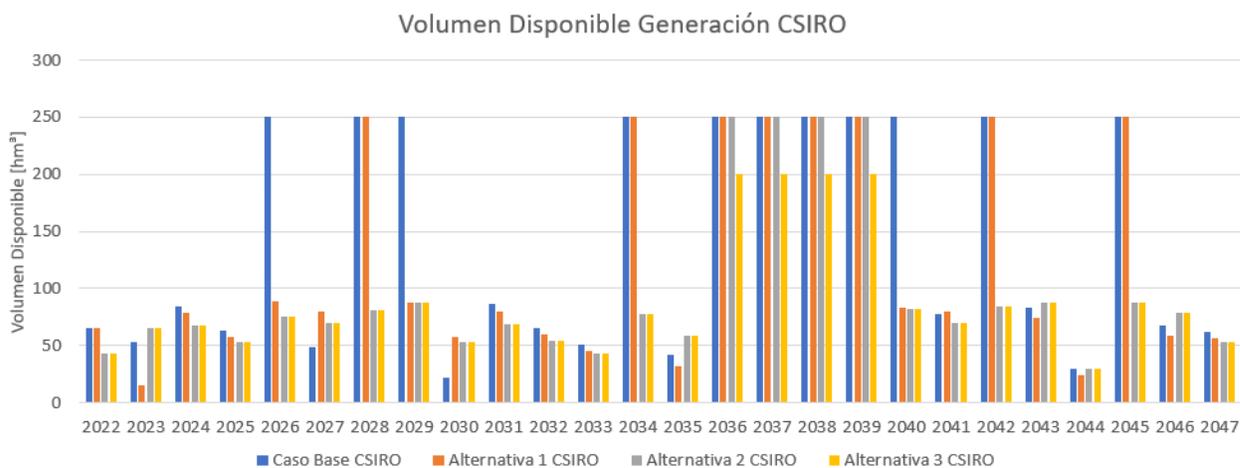


Figura 5.18: Volumen Generación Modelo CSIRO
Fuente: Elaboración Propia

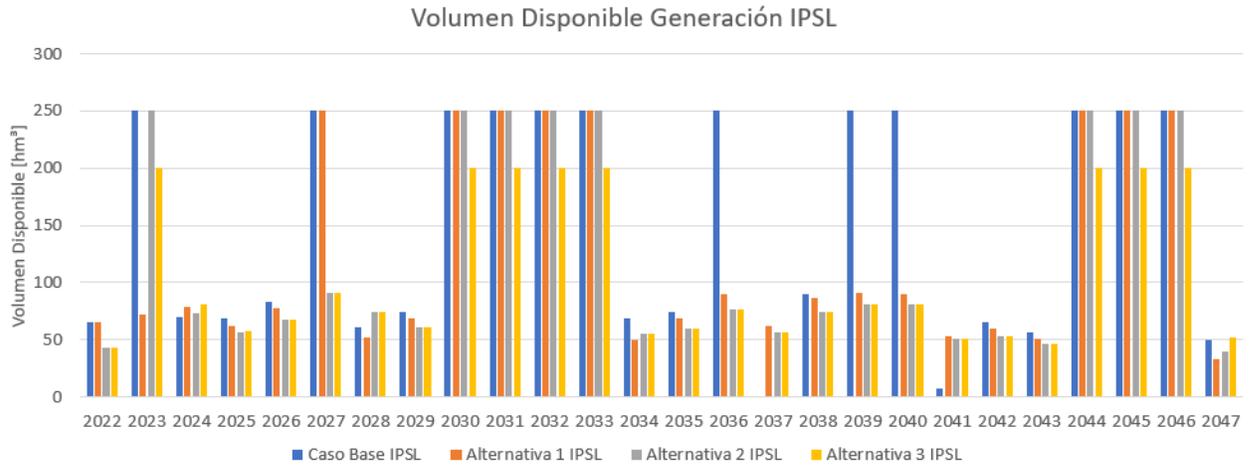


Figura 5.19: Volumen Generación Modelo IPSL
Fuente: Elaboración Propia

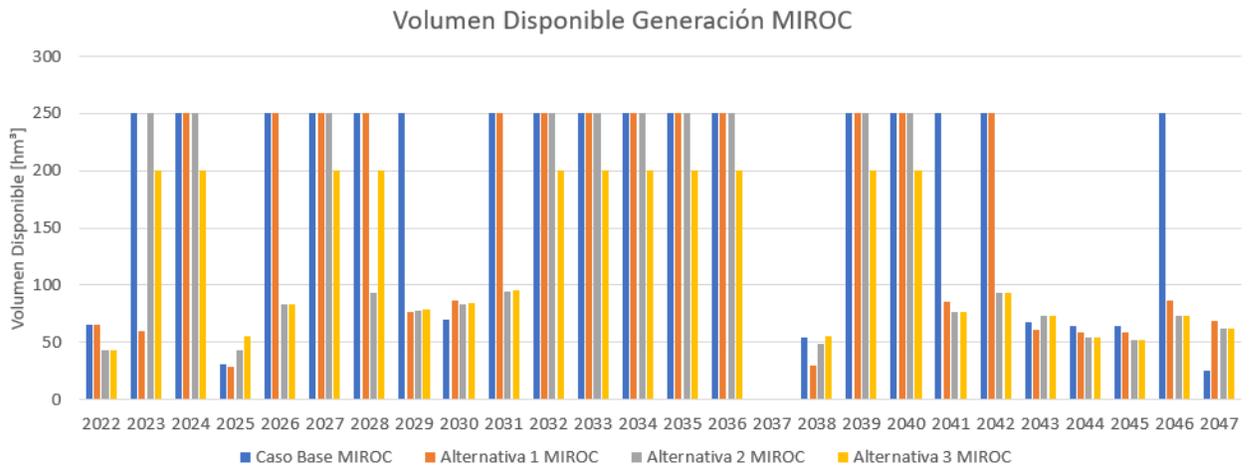


Figura 5.20: Volumen Generación Modelo MIROC
Fuente: Elaboración Propia

Junto con ello, se presenta la Tabla 5.5 con la cantidad total de volumen destinado a generación para cada caso.

Tabla 5.5: Volúmenes Generación Totales
Fuente: Elaboración Propia

Caso	Modelo Climático	Volumen Generación [hm^3]
Actual	CCSM4	4.583
	CSIRO	3.652
	IPSL	3.835
	MIROC	4.691
Alternativa 1	CCSM4	4.172
	CSIRO	3.125
	IPSL	3.215
	MIROC	4.016
Alternativa 2	CCSM4	4.154
	CSIRO	2.472
	IPSL	3.143
	MIROC	3.550
Alternativa 3	CCSM4	3.543
	CSIRO	2.272
	IPSL	2.762
	MIROC	3.181

Luego, se presenta la Tabla 5.6 con los estadísticos.

Tabla 5.6: Estadísticos Volúmenes Generación Totales
Fuente: Elaboración Propia

Caso	Estadístico	Volumen Generación [hm^3]
Actual	Promedio	4.190
	Máximo	4.691
	Mínimo	3.652
Alternativa 1	Promedio	3.632
	Máximo	4.172
	Mínimo	3.125
Alternativa 2	Promedio	3.330
	Máximo	4.154
	Mínimo	2.472
Alternativa 3	Promedio	2.940
	Máximo	3.543
	Mínimo	2.272

Claramente se observa como las alternativas van disminuyendo los volúmenes de generación, en donde la alternativa 3, que pone un límite máximo anual inferior al actual, tiene casi un 30% menos de volumen, lo que significaría mucho menos generación hidroeléctrica

y posibles pérdidas de las empresas que poseen potencias instaladas en la cuenca. Sin embargo, hay que tener claro que toda agua que sale del embalse es turbinada, no solamente la adjudicada en este ítem. Esta agua adjudicada es la que está presente en el Convenio, y hace mención a la libre disposición de parte de ENDESA en cuanto al momento para ser liberada y turbinada.

Si se fija en la Tabla 5.2, se aprecia como la falta de riego va disminuyendo a medida que se modelan las alternativas (de la 1 a la 3). Con ello en mente, se puede obtener las entregas totales de riego desde la Laguna, para poder comparar las variaciones de ella con respecto a las alternativas y al caso base, para poder comparar esos cambios en los volúmenes entregados con los volúmenes de generación. Estas se presentan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Volúmenes Entregas Riego Totales
Fuente: Elaboración Propia

Caso	Modelo Climático	Entregas Riego Totales [hm^3]
Actual	CCSM4	5.912
	CSIRO	8.459
	IPSL	8.460
	MIROC	8.727
Alternativa 1	CCSM4	5.845
	CSIRO	8.520
	IPSL	8.607
	MIROC	8.781
Alternativa 2	CCSM4	5.872
	CSIRO	8.666
	IPSL	8.704
	MIROC	8.801
Alternativa 3	CCSM4	5.949
	CSIRO	8.666
	IPSL	8.801
	MIROC	8.938

Luego se entrega la Tabla 5.8 con los estadísticos.

Tabla 5.8: Estadísticos Volúmenes Entregas Riego Totales
Fuente: Elaboración Propia

Caso	Estadístico	Entregas Riego Totales [hm^3]
Actual	Promedio	7.890
	Máximo	8.727
	Mínimo	5.912
Alternativa 1	Promedio	7.938
	Máximo	8.781
	Mínimo	5.845
Alternativa 2	Promedio	8.011
	Máximo	8.801
	Mínimo	5.872
Alternativa 3	Promedio	8.088
	Máximo	8.938
	Mínimo	5.949

Con esta tabla, se observa como a medida que disminuye la entrega para generación, va aumentando las entregas para riego, pero con magnitudes muy distintas. Así, la generación posee menos volumen disponible. Sin embargo, al ver el gráfico de las entregas para generación históricas (ver Figura 3.4), se observa que en muy pocas ocasiones se ha tenido (o simplemente no se ha podido) que entregar el máximo que posee en derechos de agua la generación hidroeléctrica. Así, observando también de la Figuras 5.17 a la 5.20, se puede decir que quizás no siempre se necesitará el máximo ($250 [hm^3]$), el cual es el principal responsable de las grandes diferencias de entregas totales de volumen de generación (con la alternativa 3).

Otro factor importante, es la apertura de la Central Los Cóndores, proyectada para este año. Con ella, la potencia instalada aumenta considerablemente directamente desde la Laguna del Maule (ver Figura 2.2), lo que aumentaría la generación de ENDESA (hoy Colbún y ENEL). Con todo ello, también es importante recordar que estas tres alternativas disminuyen la extracción de la generación, pero en son de mantener la Laguna en volúmenes estables, evitando que se llegue a niveles muy bajos y, en especial, a los volúmenes dentro de la porción inactiva. Así, cuando se esté en alguna sequía, este embalse tendrá agua para poder paliar la demanda creciente que habrá debido a la sequía de embalses de generación en el país, ya que las sequías afectan de manera global y no puntual en solo una cuenca.

Para finalizar con la generación hidroeléctrica, se puede afirmar que su análisis es mucho más complejo que el tema del uso para riego, ya que considera un Sistema Interconectado gigante, en donde los cambios en la hidrología, en precios de combustibles, en la matriz renovable no convencional, etc. afectan directamente a la demanda a suplir por cada central y tipo de generación. Es por ello que un análisis más profundo requeriría de una investigación centrada en ella y en sus costos marginales futuros, con un modelo de Programación de Largo Plazo.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

En el presente trabajo de título se definieron y evaluaron posibles cambios al Convenio Endesa-Riego para la operación del embalse Laguna del Maule. Todas las alternativas estudiadas incorporan un colchón de recuperación, pero establecen distintas asignaciones para entregas de hidroelectricidad y riego en los distintos colchones del embalse. Los colchones del embalse son tres en el Convenio actual, el colchón superior, el colchón intermedio y el colchón inferior. El colchón de transición que se añade en las tres alternativas preliminares se ubica entre el colchón intermedio y el inferior. Por otro lado, las asignaciones de entregas en los colchones intermedio y de transición se hacen en base a porcentajes de volúmenes almacenados, lo que va de la mano con el Convenio actual, en donde se definen también volúmenes y porcentajes asociados a estos en el colchón intermedio. Para el colchón inferior no existen asignaciones a entregas.

Los resultados indican que se puede revertir y mejorar la tendencia del volumen embalsado, disminuyendo las caídas a la porción inactiva (colchón inferior). Por otro lado, las tres alternativas se parecen entre sí en los cambios en variables como volumen embalsado y extracciones de riego, pero difieren bastante en las entregas para la generación hidroeléctrica, en especial para la alternativa 3 debido al nuevo límite superior de sus entregas para hidroelectricidad de 200 [hm^3] por temporada, comparado al de los 250 [hm^3] del Convenio actual y al de las alternativas 1 y 2. Así, se cumple con uno de los objetivos de la memoria, al desarrollar y plantear tres mejoras al convenio que, del capítulo anterior, se ha demostrado que presentan mejorías en varias de las variables de interés.

Estas alternativas se evaluaron con distintas variables asociadas a entregas y a volumen embalsado. La primera de ellas añade el colchón de transición de 190 [hm^3], asignándole un 50 % de éste a la recuperación de la laguna, un 10 % a la generación hidroeléctrica y un 40 % al riego. La segunda alternativa posee este mismo colchón de transición con las mismas entregas asociadas a éste, pero le otorga a la recuperación de la laguna un 10 % en el colchón intermedio, el cual se obtiene de quitarle 5 % a las entregas de riego y un 5 % a las entregas de hidroelectricidad. Por último, la alternativa 3 replica a la alternativa 2 pero le añade un límite superior a la extracción máxima para la generación de electricidad, correspondiendo a 200 [hm^3]. Con ellas, se pudo evidenciar como indicadores de confiabilidad (seguridad de riego) y de vulnerabilidad o falla (temporadas que el volumen embalsado baja a porción inactiva y déficit remanente de riego) se pueden usar de manera relativamente sencilla, sin necesidad de recurrir mucho a literatura o estudios que compliquen y dificulten el análisis. Así, el análisis

queda casi completamente dentro de las variables que entrega el modelo WEAP, facilitando este y pudiendo entregar de una manera sencilla y standard los resultados.

Las tres alternativas propuestas mejoran notoriamente la evolución del volumen almacenado con respecto al caso base en los cuatro modelos climáticos, especialmente cuando se baja a volúmenes dentro del colchón de transición. También, dependiendo del modelo climático, se tienen temporadas en que los comportamientos entre el caso base y las alternativas propuestas se diferencian más. El colchón de transición, por su parte, opera muy bien al hacer de contención a las bajas en el volumen almacenado, haciendo que este no baje en la gran mayoría de los casos a la porción inferior en las tres alternativas. Otro factor importante en la evolución del volumen del embalse es que hay varias temporadas en que las curvas del caso base y de las propuestas de alternativas son equivalentes, en especial en el colchón superior y en el colchón intermedio.

Por otro lado, en la métrica de vulnerabilidad del embalse (entregas de riego versus demanda de riego), que se ve plasmado en la variable de déficit remanente de riego, se observa como los máximos de esta variable bajan su magnitud con respecto a la línea base a medida que se avanza en las alternativas. Para los modelos climáticos CSIRO, IPSL y MIROC se tienen valores totales de déficit remanente menores en las tres alternativas que en el caso del Convenio sin cambios. Para el caso del modelo CCSM4 las diferencias son muy menores y no se logra evidenciar una mejora notoria. Sin embargo, en los promedios del déficit remanente también hay mejoras, en donde el caso base (Convenio sin alterar) es el que posee el valor más alto, lo que coincide también con el valor máximo del déficit remanente en una temporada. Así, las tres alternativas presentan una menor vulnerabilidad que el caso base.

En el caso de la seguridad de riego, indicador de confiabilidad, en las tres alternativas aumentan considerablemente para el modelo climático CCSM4, siendo la seguridad de riego del caso base de un 41 %, para la alternativa 1 de un 47 %, para la alternativa 2 de un 59 % y para la tercera alternativa de un 76 %. No ocurre lo mismo en los otros tres modelos climáticos, donde esta variable se mantiene en niveles bastante bajos, pasando de un 0 % para los tres GCM en el caso base (Convenio sin alterar) a un 6 % para los tres GCM en la alternativa 3, que es la que obtiene los valores más altos y la única que no posee un 0 % para el modelo climático CSIRO. Con ello se cumple con otros dos objetivos de esta memoria, al evaluar el desempeño de la Laguna del Maule bajo el Convenio vigente y bajo las modificaciones a este en distintos escenarios climáticos.

Por ende, y en base a los resultados obtenidos, se recomienda la alternativa 2, pero al ser propuestas preliminares, se sugiere un trabajo posterior en ella. Esto, ya que, en especial para los cambios en los volúmenes de entregas en generación, no se pudo lograr una conclusión favorable para los intereses de ENEL y Colbún, que son quienes explotan el recurso hídrico para generación hidroeléctrica en esta zona. Sin embargo, el modelo WEAP actualizado añadido con la alternativa preliminar escogida, es un buen punto de partida para la gestión sostenible del agua en esta zona de estudio. Con ello, se cumple el cuarto objetivo específico de esta memoria.

Así, se revela la importancia de estos estudios, en donde se ha podido comprobar cómo cambiando variables operacionales de un embalse multi propósito se puede mejorar el desem-

peño de su volumen almacenado y de las entregas asociadas. También, el tener en cuenta los intereses de los diversos agentes que compiten en el uso del agua, así como las necesidades ambientales (que no se vieron en el trabajo de esta memoria) es clave para poder generar un análisis en donde se maximiza la utilidad y se minimizan los costos asociados.

Finalmente, se puede decir que la gestión del agua, vista en esta memoria desde un punto de vista de reglas de operación de un embalse multi-uso, proporciona una oportunidad para abordar nuevamente los desafíos y oportunidades que conlleva el uso eficiente del recurso hídrico en nuestro país. También, presenta una nueva oportunidad para mejorar el diálogo y la cooperación entre los distintos usuarios del agua (consuntivo y no consuntivo), y que se promuevan soluciones eficientes y pacíficas a los conflictos de usos de agua, muy presentes en el territorio nacional.

Bibliografía

- [1] CR2 (2019). Megasequía. <https://www.cr2.cl/megasequia/>
- [2] La Tercera (2021). <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/megasequia-la-nueva-normalidad-en-la-que-vivira-chile/TLW5IUCORRFHFMSRUAVHCGGKJQ/>
- [3] CÓDIGO DE AGUAS
- [4] El Mostrador (2022). <https://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2022/01/28/mop-declara-a-seis-comunas-de-la-region-metropolitana-con-escasez-hidrica/>
- [5] Maisa Rojas (2021). <https://www.cr2.cl/investigadoras-cr2-son-parte-del-reporte-ipcc-sobre-bases-fisicas-del-cambio-climatico/>
- [6] Fundación Chile (2019). Transición Hídrica: El Futuro del Agua en Chile.
- [7] DGA (2023). <https://dga.mop.gob.cl/acercadeladga/Paginas/default.aspx>
- [8] Banco Mundial: Departamento del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2011). Chile: Diagnóstico de la Gestión de los Recursos Hídricos. Página 60.
- [9] UTP Everis Chile S.A. e Hidrogestión S.A. (2020). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Maule.
- [10] ENDESA y Dirección de Riego (1947). Convenio Endesa-Dirección de Riego del MOP para el uso Compartido de los Recursos del Embalse Laguna del Maule.
- [11] Juan Manuel Puertas (2016). Efecto del Convenio de Riego del Sistema Hidroeléctrico Laja sobre la Programación de Largo Plazo del Sistema Interconectado Central de Chile.
- [12] Eugenio Fuentes (2023). Modelación para el Análisis de la Interferencia Operacional entre Hidroelectricidad y Riego en la Cuenca del Maule, Chile.
- [13] DOH y ENEL (2017). Acuerdo de Operación y Recuperación del Lago Laja Complementa Convenio de 1958.
- [14] Dirección de Riego y ENDESA (1958). Convenio Ad-Referendum sobre la Regulación del Río Laja.
- [15] Biblioteca del Congreso Nacional Hidrografía de la Región del Maule.
- [16] Ministerio de Energía, 2019.
- [17] Javiera Córdova (2017). Estudio del concepto de seguridad de riego, su relación con reglas de regulación de embalses y funciones de beneficio agrícola, caso embalse Las Palmas, V Región, Chile. 2017.
- [18] M. Tu, N. Hsu, F. Tsai, W. Yeh (2008). Optimization of Hedging Rules for Reservoir Operations.
- [19] T. Hashimoto (1982). Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Re-

source System Performance Evaluation.

- [20] M. Tu, N. Hsu, W. Yeh (2003). Optimization of Reservoir Management and Operation with hedging Rules.
- [21] A. Draper, J. Lund (2004). Optimal Hedging and Carryover Storage Value.
- [22] JUNTA DE VIGILANCIA MAULE NORTE *Memorias Anuales*, desde 2012-2013 hasta 2019-2020.
- [23] R. Garreaud, J. Boisier, R. Rondanelli, A. Montecinos, H. Sepúlveda, D. Veloso-Aguilar (2019). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective.

Anexos

Anexo A. Modelo WEAP

Adjunto al archivo pdf debido al tamaño de este.

Anexo B. Modelo PYTHON

A continuación se presenta el modelo PYTHON, que necesita los datos semanales de las tasas de reparto, en cuatro columnas, una para cada modelo climático. Luego, entrega un archivo con los datos mensuales de las tasas de reparto, donde manualmente se detalla si una temporada es fallo o no.

```
import pandas as pd

# Cargar los datos semanales en un dataframe de pandas
df = pd.read_csv('datos_semanales.csv')

# Crear una columna con las fechas
df['fecha'] = pd.date_range(start = '2021 - 04 - 01', end = '2047 - 03 - 01', freq = 'W')

# Establecer la columna 'fecha' como el índice del dataframe
df = df.set_index('fecha')

# Agrupar los datos semanales por mes y calcular el promedio
df_mensual = df.resample('M').mean()

# Guardar los datos mensuales en un archivo CSV
df_mensual.to_csv('datos_mensuales.csv')
```

Anexo C. Anexo F2 del PEGH

Antecedentes y fuentes Las demandas hídricas del sector agrícola son obtenidas en base a los datos y antecedentes disponibles:

- Censo agropecuario (1976, 1997 y 2007), Instituto Nacional de Estadística (INE, 1976-1997-2007): Superficie agrícola por distrito y grupo de cultivo perteneciente a la cuenca, para los años 1976, 1997 y 2007.
- Catastro frutícola CIREN, proyecciones en base a estadísticas de ODEPA. Superficie agrícola proyectada a los años 2015, 2020, 2030 y 2040.
- Publicación FAO, boletín 56 (FAO, 2006) para la determinación de las necesidades de riego: Coeficiente de cultivo por grupo de cultivo.
- Manual Técnico de presentación de proyectos de obras de tecnificación de riego, Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile, 2015 (CNR, 2015): Eficiencias de riego estimadas para los años 2015, 2020, 2030 y 2040.
- Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras, y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile, S.I.T.419, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, 2017. (DGA, 2017a): Metodologías y resultados.
- Entrevistas con usuarios del agua de la cuenca (Juntas de Vigilancia).

Adicionalmente, los datos de precipitación real mensual son presentados para cada distrito censal, es decir, para cada división administrativa utilizada en el censo agropecuario del 2007, esto debido a que los cultivos y superficie de riego son calculados de acuerdo a esa división. La precipitación real es presentada desde 1985 al 2018, y obtenida desde Center for Climate and Resilience Research (CR)².

La precipitación por distrito para el periodo histórico y futuro (1985-2050) es calculada a partir de la precipitación obtenida en el modelo de cambio climático IPSL-CM5A-LR (modelo de cambio climático más desfavorable). La precipitación por distrito para el periodo histórico y futuro (1985-2050) es calculada a partir de la precipitación obtenida en el modelo de cambio climático CSIRO-Mk3-6-0 (modelo de cambio climático más favorable).

Metodología cálculo de la superficie

Los últimos datos censales de la superficie de riego son del año 2007, esta información es complementada con el catastro frutícola de ODEPA, y recientemente la DGA realizó un estudio denominado “Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile” en el año 2017. Finalmente como fuente de información la experiencia de las Juntas de Vigilancia y otros usuarios de la cuenca.

Censo agropecuario del año 2007

El censo agropecuario señala que la superficie bajo riego a nivel regional es de 305.529,20 hectáreas, dato tomado por válido por ODEPA. Al seleccionar las comunas de la región del Maule comprendidas dentro de la cuenca, y agregando la comuna de Ñiquén (región del Biobío), se tiene que la superficie bajo riego es de 231.257,49 ha.

Se debe hacer notar que las preguntas N° 288 a 234 del VII Censo Agropecuario y Forestal señalan explícitamente que “En esta sección, se indicará la superficie en hectáreas efectivamente regada en el año agrícola, con cada uno de los sistemas indicados en la Cédula Censal, no importando el número de veces que se regó en el período señalado”, y clasifican el riego según sistema: tendido, surco, otro tradicional, aspersion tradicional, carrete o pivote, goteo y cinta, microaspersión y microjet.

En este punto es relevante considerar que la seguridad de riego, expresada en el número de veces en que cada cultivo se regó en la temporada, no es un elemento relevante en el momento de considerar la superficie bajo riego.

Organizaciones de usuarios de agua

Las organizaciones de usuarios de agua estiman la demanda de agua a partir del número de acciones que dispone la organización, y las equivalencias en caudal (en caso de estar disponibles). A partir de esta relación, infieren la superficie bajo riego, entendida como una medida potencial o maximalista de los terrenos que pudieran ser regados en caso de que se ejerciera la totalidad de los derechos de aprovechamiento, permanentes y eventuales. A esta superficie regada se le denominará “superficie potencial”, que es aquella declarada por los usuarios que contiene un porcentaje de superficie variable o no regada durante toda la temporada estival.

La superficie potencial total bajo riego alcanza las 335.670 hectáreas al año.

La seguridad de riego es un elemento implícito en esta demanda. Dado que las tasas de reparto varían según cada temporada, y al inicio y término de las mismas, los usuarios adoptan distintas estrategias adaptativas que pasan por adelantar o retrasar las siembras, priorizar cultivos, rezagar zonas sin riego, entre muchas otras. Esto resulta en que la superficie efectivamente regada varía ampliamente de una temporada a otra, tanto en extensión como en demanda hídrica.

Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile (DGA, 2017)

Este estudio realizado por la Dirección General de Aguas en el año 2017 determinó la demanda de riego sobre la base de los antecedentes aportados por el Censo Agropecuario y Forestal del año 2007, considerando los cultivos declarados por los usuarios en las preguntas 23 a la 83 del cuestionario. Es así que para el año 2007, se estimó una superficie regada de 185.334 hectáreas, y destinó el resto de los cultivos a secano, estimando una demanda agrícola por este concepto.

En este caso, se considera solo aquellas superficies con una seguridad de riego mayor, sin

incluir aquellos cultivos o siembras con seguridades de riego variables.

Los antecedentes recopilados evidencian una gran dispersión de la superficie bajo riego, y por consecuencia, de la demanda hídrica de los cultivos asociados. Por lo tanto dicha superficie la denominaremos como “superficie fija”, ya que relaciona la cantidad de superficie que siempre se considera que esta bajo riego.

Se sostuvo una serie de reuniones con las organizaciones de usuarios de agua, con empresas hidroeléctricas, y con la Comisión Nacional de Riego regional, con el propósito de disponer de criterios que permitan establecer una superficie de riego cercana a la realidad de la cuenca.

En lo principal, se tiene que la superficie de riego determinada por tipo de cultivo corresponde a un mínimo, con una seguridad de riego relativamente alta (superficie fija). Por el contrario, la superficie dada por los regantes, corresponde a un máximo (superficie potencia) dado en función de la disponibilidad legal de derechos de aprovechamiento de aguas.

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).

Para efectos de determinación de la demanda de agua para uso agrícola, se consideró un concepto de “superficie agrícola equivalente”, que corresponde a la diferencia entre la superficie potencial y la fija, ponderada por un factor de probabilidad, dado por la seguridad de riego estimada.

Ante la ausencia de fuentes adicionales, se aplicó como criterio para la estimación de la demanda de agua que esta superficie se riega en promedio con una seguridad de un 50 %, o lo que es similar, que se riega el 50 % de la diferencia en superficie (β). *Con esto, se llega a una superficie equivalente*

Esta solución concilia lo expresado por los distintos actores del territorio y los estudios precedentes, pero se hace patente que se requiere de un trabajo detallado para comprender y representar adecuadamente la demanda efectiva de agua para uso agrícola en la cuenca.

Otro aspecto relevante es la evolución de esta superficie en el tiempo, donde también se observan grandes diferencias entre las fuentes consultadas. Mientras que el estudio de demanda a nivel nacional estima que la superficie regada aumentó de 181.376 a 185.334 ha entre los años 1997 a 2007, para el mismo período el Censo agropecuario estimó que a nivel regional se perdieron 19.544,7 ha de riego.

Nuevamente, ante la ausencia de coincidencia entre las fuentes de referencia, se adoptó el criterio de mantener la superficie fija regada según el estudio de demanda del año 2017, y determinar la superficie equivalente considerando como fija la demanda potencial.

Estas variaciones globales a nivel de cuenca se replican a nivel de distritos agropecuarios, para describir adecuadamente la superficie en forma distribuida. Además, se mantuvo la

variación de cultivos reportada en el censo y recogida en el estudio de demanda, de manera que la superficie adicional de riego se agregó en su totalidad a la categoría de cereales.

A estos datos se le aplicó una tendencia lineal, usando el método de los mínimos cuadrados, para así obtener las superficies de riego según tipo de cultivo, entre los años 1985 y 2050.

Del mismo modo, las eficiencias de riego son calculadas con estimación lineal, donde la información base son las eficiencias estimadas y proyectadas en el estudio “Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras, y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile” (DGA, 2017a), para 2015, 2020, 2030 y 2040, más la eficiencia para el año 2007.

La eficiencia de riego calculada por la fuente base fue obtenida a partir de la eficiencia de aplicación en los proyectos postulantes a la Ley de Riego N° 18.450. La estimación de la eficiencia al año 2015 se realizó a partir de los registros del VII Censo Agrícola en conjunto a estadísticas de la Ley de riego antes citada, específicamente datos de superficie tecnificada entre 2005 y 2017 por comuna. También se obtuvo información a partir de los catastros frutícolas de ODEPA – CIREN al cruzar cada shapefile con cada distrito censal determinando así eficiencias promedio por distrito al considerar el peso de la superficie frutal en el área de estudio. Por último, para las zonas sin información se determinó la eficiencia en base a datos de los censos agropecuarios de 1997 y 2007.

La demanda hídrica es obtenida a partir de la multiplicación entre la evapotranspiración de referencia (disponible para cada distrito) y el coeficiente de cultivo para cada grupo de cultivos, obteniéndose un resultado en unidad mm/mes, el cual finalmente lo expresaremos en m³/ha. Este procedimiento se hace para cada mes, año y grupo de cultivo.

Luego, la demanda hídrica de cada mes es obtenida al considerar la superficie ocupada por cada grupo de cultivo en el respectivo distrito.

La precipitación efectiva es calculada según la precipitación mensual acumulada, usando la fórmula de la metodología de Blaney y Criddle modificada por Horacio Merlet y Fernando Santibáñez el año 1986. Es debido a los tres modelos de precipitación que se están trabajando, que para cada año hay tres escenarios de demanda.

Para el cálculo de la demanda neta mensual, se le resta la precipitación efectiva a la demanda hídrica mensual (igualando las unidades en metros cúbicos).

La demanda bruta es obtenida al dividir la demanda neta por el porcentaje de eficiencia de riego para cada año y distrito.

Finalmente, la demanda también se representó en hm³.

Para representar la demanda agrícola en las Zonas de Riego (ZR) que representan el área bajo riego en el programa WEAP, se utiliza la demanda neta en m³. Por lo tanto para distribuir dicha demanda se hace el cruce de la capa de distritos censales con la capa de Zonas de Riego, para así obtener el porcentaje que ocupan los distritos en las zonas de riego y pasar la información desde una unidad a la otra, sin que quede alguna fracción de la

demanda fuera de las ZR.

Por lo tanto como resultado final se obtiene la Estimación de la demanda de agua para Riego en las Zonas de Riego para cada mes y año (1985-2018). Este cálculo se hace igual forma para los escenarios de cambio climático comentados para un periodo de años entre 1985-2050.