

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**Análisis de Disponibilidad de Recurso Hídrico en una  
Cuenca Agrícola de la Región de O'Higgins Bajo  
Efectos del Cambio Climático**

**Por:**

**Néstor Ignacio Ramírez Aspée**

**Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en  
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil**

**Profesor Guía: Yerel Morales Pino**

**Mayo, 2020**

## **Dedicatoria**

El presente trabajo está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

A mi abuelita marta que me cuida y guía desde el cielo.

## **Agradecimientos**

En estas líneas quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible este trabajo de título y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, alegres, y tristes. Estas palabras son para ustedes. A mis padres por todo su amor, comprensión y apoyo, pero sobre todo gracias infinitas por la paciencia que me han tenido. Gracias por darme la libertad de desenvolverme como ser humano

A mi hermana por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento, gracias.

Gracias a mi profesora guía Yerel por su paciencia y entrega para sacar este trabajo de título adelante.

A mis amigos. Con todos los que compartí dentro y fuera de las aulas. Aquellos amigos del colegio, que se convierten en amigos de vida y aquellos que serán mis colegas, gracias por todo su apoyo y diversión.

## Tabla de Contenidos

1.	Introducción .....	1
1.1	Motivación .....	1
1.2	Objetivos.....	4
1.2.1	Objetivo General .....	4
1.2.2	Objetivos Específicos .....	4
1.2.3	Resultados Esperados .....	4
1.3	Organización del documento.....	4
2.	Revisión Bibliográfica .....	5
2.1	Cambio climático y la agricultura .....	5
2.1.1	Cambio climático en Chile .....	7
2.1.2	Efectos del cambio climático en la agricultura chilena.....	8
2.2	Escenarios del cambio climático .....	10
2.3	Modelación climática: Modelos de circulación general .....	12
2.3.1	Descripción general.....	12
2.4	Escalamiento de variables climáticas .....	13
2.4.1	Escalamiento estadístico.....	14
2.4.2	Escalamiento dinámico .....	14
2.4.3	Plataforma de simulaciones climáticas CR2 .....	15
2.5	Modelación hidrológica.....	16
2.6	Modelo WEAP .....	18
2.6.1	Generalidades .....	18
2.5.2	Modelo hidrológico .....	18
2.5.3	Evaluación del desempeño del modelo .....	20
3.	Metodología.....	22
4.	Zona de estudio.....	23
4.1	Cuenca del Río Claro .....	23
4.1.1	Clima .....	24
4.1.2	Uso de suelo.....	24
4.1.3	Tipos de cultivos presentes en la cuenca .....	26
4.2	Embalse Los Cristales.....	27
4.3	Información disponible .....	28
4.3.1	Temperatura .....	29
4.3.2	Precipitaciones .....	29
4.3.3	Registro de Caudales .....	31
5.	Relleno estadístico de variables meteorológicas .....	32
5.1	Precipitación .....	32

5.2 Temperatura .....	33
6. Modelación hidrológica.....	34
6.1 Construcción del modelo.....	34
6.2 Distribución espacial de variables .....	36
6.2.1 Precipitación .....	36
6.2.2 Temperatura .....	38
6.2.3 Humedad relativa .....	38
6.2.4 Viento .....	38
6.2.5 Demanda de agua.....	39
6.2.6 Distribución de cultivos.....	40
6.2 Calibración de modelos.....	40
6.2.1 Modelo Hacienda Las Nieves.....	40
6.2.2 Modelo Cuenca Río Claro en Tunca .....	46
7. Proyecciones del cambio climático .....	51
7.1 Elección de modelos .....	51
7.1.2 Comparación de temperaturas.....	52
7.1.3 Comparación de precipitaciones .....	53
7.2 Proyección de forzantes.....	56
7.3 Resultado de proyecciones .....	59
7.3.1 Cuenca Hacienda Las Nieves .....	59
7.3.2 Cuenca Río Claro en Tunca.....	66
8. Recomendaciones y posibles medidas de adaptación al cambio climático en la cuenca .....	74
8.1 Limitar la expansión del terreno agrícola .....	74
8.2 Rotación de cultivos permanentes en la cuenca .....	78
8.3 Aumento en la eficiencia de riego .....	80
8.4 Mejorar la implementación predial .....	80
9. Conclusiones .....	82

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Emisiones de GEI total (Gg CO <sub>2</sub> eq) por gas en Chile, serie 1990-2013 [2].	1
<b>Figura 1-2:</b> Superficie y producción de manzanas 2008-2013 [7].	2
<b>Figura 1-3:</b> Evolución de la superficie nacional de vides viníferas. Zona central de Chile [9].	2
<b>Figura 1-4:</b> Concentración de CO <sub>2</sub> para los distintos escenarios de cambio climático [1].	3
<b>Figura 2-1 :</b> Comparación de las anomalías observadas en la temperatura media global de tres conjuntos de datos observados en los experimentos históricos del modelo climático CMIP5: a) Forzamientos antropogénicos y naturales combinados b) Forzamiento naturales. [12]	5
<b>Figura 2-2:</b> Variación de temperatura promedio anual global. [1].	6
<b>Figura 2-3:</b> Variación del nivel medio del mar con relación al promedio. [1]	6
<b>Figura 2-4:</b> Concentraciones de gases de efecto invernadero CO <sub>2</sub> (Verde), metano CH <sub>4</sub> (Naranja) y óxido de nitrógeno (rojo).[1].	6
<b>Figura 2-5:</b> Variación de la temperatura en diversas estaciones de Chile central [15].	7
<b>Figura 2-6:</b> Tendencias de la precipitación total anual en Chile. La cifra al lado del título indica el cambio experimentado por la precipitación durante el siglo XX [16].	8
<b>Figura 2-7:</b> Esquema explicativo de los escenarios SRES [19].	10
<b>Figura 2-8:</b> Aumento de la temperatura para cada RCP hasta el 2100 [1].	11
<b>Figura 2-9:</b> Esquema general de un GCM [20].	12
<b>Figura 2-10:</b> Esquema de representación de escalas [21].	14
<b>Figura 2-11:</b> Dominios utilizados por la plataforma de simulaciones climáticas CR2 [24].	15
<b>Figura 2-12:</b> Clasificación de modelos hidrológicos [28].	17
<b>Figura 2-13:</b> Esquema de método de humedad del suelo [30].	19
<b>Figura 3-1:</b> Metodología de trabajo.	22
<b>Figura 4-1:</b> Estación fluviométrica Río Claro en Tunca.	23
<b>Figura 4-2:</b> Delimitación de Cuenca del Río Claro en Tunca.	23
<b>Figura 4-3:</b> Diagrama ombrotérmico del periodo 1971-2018. Estación meteorológica Rengo.	24
<b>Figura 4-4:</b> Uso de suelo de la Cuenca Río Claro en Tunca.	25
<b>Figura 4-5:</b> Coeficientes de Cultivos mensual por tipo Cuenca Río Claro en Tunca.	26
<b>Figura 4-6:</b> Curva de Embalse Los Cristales [39].	27
<b>Figura 4-7:</b> Evaporación de Embalse Los Cristales [39].	28
<b>Figura 4-8:</b> Estaciones disponible en la cuenca del Río Claro en Tunca.	28
<b>Figura 4-9:</b> Temperatura promedio de las estaciones meteorológicas en el periodo 1970-2005. ..	29
<b>Figura 4-10:</b> Precipitación promedio de las estaciones meteorológicas.	30
<b>Figura 4-11:</b> Caudales promedio de las estaciones fluviométricas.	31
<b>Figura 5-1:</b> Doble acumulada de Precipitaciones entre los años 1990-2004.	32
<b>Figura 5-2:</b> Correlación lineal de precipitación anual.	33
<b>Figura 6-1:</b> Delimitación de modelos.	34
<b>Figura 6-2:</b> Bandas de elevación Cuenca Río Claro en Tunca.	35
<b>Figura 6-3:</b> Isoyetas Cuenca Río Claro en Tunca [43].	37
<b>Figura 6-4:</b> Humedad relativa promedio mensual.	38
<b>Figura 6-5:</b> Esquema WEAP de modelo Embalse Central Las Nieves.	41
<b>Figura 6-6:</b> Curva de entrega mensual Embalse Los Cristales [26].	41
<b>Figura 6-7:</b> Serie de tiempo mensual de caudales para el periodo de calibración 1991-2007.	42
<b>Figura 6-8:</b> Promedio de caudales mensuales para el periodo de calibración.	42
<b>Figura 6-9:</b> Curva de duración de caudales para el periodo de calibración.	42
<b>Figura 6-10:</b> Correlación entre caudales mensuales para el periodo de calibración.	43
<b>Figura 6-11:</b> Serie de tiempo mensual de caudales para el periodo de validación 2008-2016.	44
<b>Figura 6-12:</b> Promedio de caudales mensuales para el periodo de validación.	44
<b>Figura 6-13:</b> Curva de duración de caudales para el periodo de validación.	45
<b>Figura 6-14:</b> Correlación entre caudales mensuales para el periodo de validación.	45
<b>Figura 6-15:</b> Esquema WEAP de modelo Cuenca Río Claro en Tunca.	46

<b>Figura 6-16:</b> Serie de tiempo mensual de caudales para el periodo de calibración 1995-2008.....	47
<b>Figura 6-17:</b> Promedio de caudales mensuales para el periodo de calibración. ....	48
<b>Figura 6-18:</b> Curva de duración de caudales para el periodo de calibración.....	48
<b>Figura 6-19:</b> Correlación entre caudales mensuales para el periodo de calibración. ....	48
<b>Figura 6-20:</b> Serie de tiempo mensual de caudales para el periodo de validación 2009-2016.....	49
<b>Figura 6-21:</b> Curva de duración de caudales para el periodo de validación.....	49
<b>Figura 6-22:</b> Correlación entre caudales mensuales para el periodo de calibración.....	50
<b>Figura 7-1:</b> Comparación de temperatura de estación Rengo para el periodo histórico 1985-2005. .....	52
Figura 7-2: Elección de modelos en base a la temperatura de Rengo.....	53
<b>Figura 7-3:</b> Distribución de precipitaciones para la estación Popeta en el periodo histórico 1985-2005.....	54
<b>Figura 7-4:</b> Comparación de modelos con la precipitación en la estación Popeta para el periodo histórico. ....	55
<b>Figura 7-5:</b> Elección final de modelos de simulación para la estación de Popeta.....	56
Figura 7-6: Tendencia de modelos seleccionados.....	59
<b>Figura 7-7:</b> Comparación caudales mensuales promedio históricos y futuros para Cuenca embalse Los Cristales.....	60
<b>Figura 7-8:</b> Banda de resultados para Futuro Cercano e Intermedio en Cuenca embalse Los Cristales.....	60
<b>Figura 7-9:</b> Comparación curva de duración de caudales promedios, Cuenca embalse Los Cristales.....	62
<b>Figura 7-10:</b> Comparación de acumulación de nieve en los periodos histórico y futuro para Cuenca embalse Los Cristales. ....	62
<b>Figura 7-11:</b> Banda de resultados para Futuro Cercano e Intermedio en Cuenca embalse Los Cristales.....	63
<b>Figura 7-12:</b> Comparación del nivel de almacenamiento del embalse Los Cristales en los periodos histórico y futuro. ....	64
<b>Figura 7-13:</b> Banda de resultados de los 13 modelos para Futuro Cercano e Intermedio en embalse Los Cristales. ....	65
<b>Figura 7-14:</b> Comparación caudales mensuales promedio históricos y futuros para Cuenca del Río Claro en Tunca.....	67
<b>Figura 7-15:</b> Banda de resultados de los 13 modelos para Futuro Cercano e Intermedio en Cuenca del Río Claro en Tunca. ....	67
<b>Figura 7-16:</b> Comparación curva de duración de caudales promedios, Cuenca Río Claro en Tunca. .....	69
<b>Figura 7-17:</b> Cobertura de demanda para la banda 1 para los periodos: a) Histórico (1994-2016), b) Futuro cercano (2020-2042) y c) Futuro intermedio (2043-2064). ....	72
<b>Figura 7-18:</b> Cobertura de demanda para la banda 9 para los periodos: a) Histórico (1994-2016), b) Futuro cercano (2020-2042) y c) Futuro intermedio (2043-2064). ....	73
<b>Figura 8-1:</b> Comparación de meses de no cobertura para los 5 modelos de simulación en los escenarios normal y aumento en área de cultivo.....	76
<b>Figura 8-2:</b> Comparación de cantidad de demanda no cubierta para los 5 modelos de simulación en los escenarios normal y aumento en área de cultivo. ....	77

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Proyección de la producción por cultivo antes nuevo escenario climático [8].	9
<b>Tabla 2-2:</b> Características y comportamiento de los escenarios RCP [4].	11
<b>Tabla 2-3:</b> Instituciones vigentes en el desarrollo de modelos climáticos para escenarios RCP. ...	13
<b>Tabla 2-4:</b> Criterio para la evaluación de la bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe [25].	21
<b>Tabla 2-5:</b> Criterio para la evaluación de la bondad de ajuste de PBIAS [26].	21
<b>Tabla 4-1:</b> Clasificación de uso de suelo.	25
<b>Tabla 4-2:</b> Distribución de cultivos en la Cuenca Río Claro en Tunca.	26
<b>Tabla 4-3:</b> Estaciones de temperatura consideradas en el análisis.	29
<b>Tabla 4-4:</b> Estaciones de precipitación consideradas en el análisis	29
<b>Tabla 4-5:</b> Estaciones pluviométricas consideradas en el análisis.	31
<b>Tabla 6-1:</b> división de bandas de elevación.	35
<b>Tabla 6-2:</b> Gradientes de precipitación mensual.	36
<b>Tabla 6-3:</b> Factor de reducción de precipitación.	36
<b>Tabla 6-4:</b> Demanda por banda de elevación.	39
<b>Tabla 6-5:</b> Distribución de cultivos por banda de elevación.	40
<b>Tabla 6-6:</b> Parámetros de modelo Embalse los Cristales.	42
<b>Tabla 6-7:</b> Indicadores de eficiencia para el periodo de calibración de modelo del Embalse los Cristales.	44
<b>Tabla 6-8:</b> Indicadores de eficiencia para el periodo de validación de modelo del Embalse los Cristales.	45
<b>Tabla 6-9:</b> Comparación de criterios de eficiencia, calibración - validación.	46
<b>Tabla 6-10:</b> Parámetros de modelo Cuenca Río Claro en Tunca.	47
<b>Tabla 6-11:</b> Indicadores de eficiencia para el periodo de calibración de modelo Cuenca Río Claro en Tunca.	49
<b>Tabla 6-12:</b> Indicadores de eficiencia para el periodo de validación de modelo de la Cuenca Río Claro en Tunca.	50
<b>Tabla 6-13:</b> Comparación de criterios de eficiencia, calibración - validación.	50
<b>Tabla 7-1:</b> Modelos de simulación climática.	51
<b>Tabla 7-2:</b> Modelos seleccionados a partir de la temperatura de estación Rengo.	53
<b>Tabla 7-3:</b> Modelos de simulación seleccionados para la proyección.	55
<b>Tabla 7-4:</b> Intervalo de tiempo de escenarios.	56
<b>Tabla 7-5:</b> Valor de Factor de precipitación para el periodo de Futuro Cercano (2020-2044).	57
<b>Tabla 7-6:</b> Valor de Factor de precipitación para el periodo de Futuro Intermedio (2020-2044).	58
<b>Tabla 7-7:</b> Proyecciones de caudal mensual para el periodo Futuro Cercano en Cuenca embalse Los Cristales.	61
<b>Tabla 7-8:</b> Proyecciones de caudal mensual para el periodo Futuro Intermedio en Cuenca embalse Los Cristales.	61
<b>Tabla 7-9:</b> Proyecciones de acumulación de nieve para el periodo Futuro Cercano en Cuenca embalse Los Cristales.	63
<b>Tabla 7-10:</b> Proyecciones de acumulación de nieve para el periodo Futuro Intermedio en Cuenca embalse Los Cristales	64
<b>Tabla 7-11:</b> Proyecciones de almacenamiento en embalse Los Cristales para el escenario futuro cercano.	65
<b>Tabla 7-12:</b> Proyecciones de almacenamiento en embalse Los Cristales para el escenario futuro intermedio.	66
<b>Tabla 7-13:</b> Proyecciones de caudal medio mensual para la Cuenca del Río Claro en Tunca en futuro cercano.	68
<b>Tabla 7-14:</b> Proyecciones de caudal medio mensual para la Cuenca del Río Claro en Tunca en futuro intermedio.	68
<b>Tabla 7-15:</b> Cantidad de meses de no cobertura para la Banda 1.	70

<b>Tabla 7-16:</b> Resumen de resultados sobre meses de no cobertura. ....	70
<b>Tabla 7-17:</b> Cantidad de demanda no cubierta para la Banda 1.....	71
<b>Tabla 7-18:</b> Resumen de resultados sobre demanda no cubierta. ....	71
<b>Tabla 8-1:</b> Variaciones de exportaciones y superficie plantada 2015-2018 según censo frutícola 2018 en la región de O'higgins [40]. ....	79
<b>Tabla 8-2:</b> Cultivos con menor consumo anual [40]. ....	79
<b>Tabla 8-3:</b> Distribución porcentual de la superficie de frutales por método de riego en la región de O'Higgins [40]. ....	80

# 1. Introducción

## 1.1 Motivación

Debido al gran crecimiento económico y demográfico a nivel mundial en las últimas décadas, las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado considerablemente desde la época preindustrial, incrementando las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). A pesar del creciente número de políticas de mitigación del cambio climático en las últimas décadas, los GEI han experimentado un aumento considerable entre 2000 y 2010 [1] (Ver Figura 1).

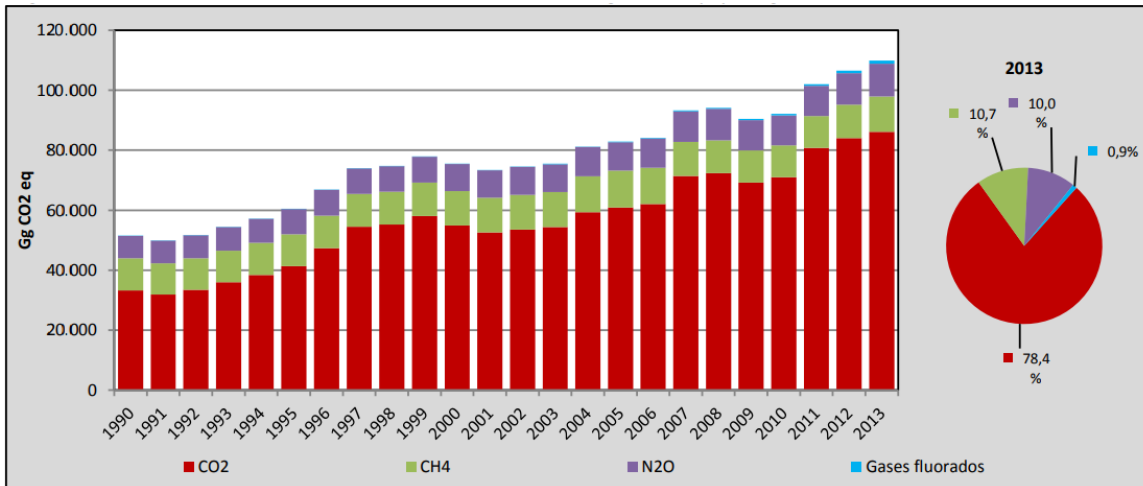


Figura 1-1: Emisiones de GEI total (Gg CO<sub>2</sub> eq) por gas en Chile, serie 1990-2013 [2].

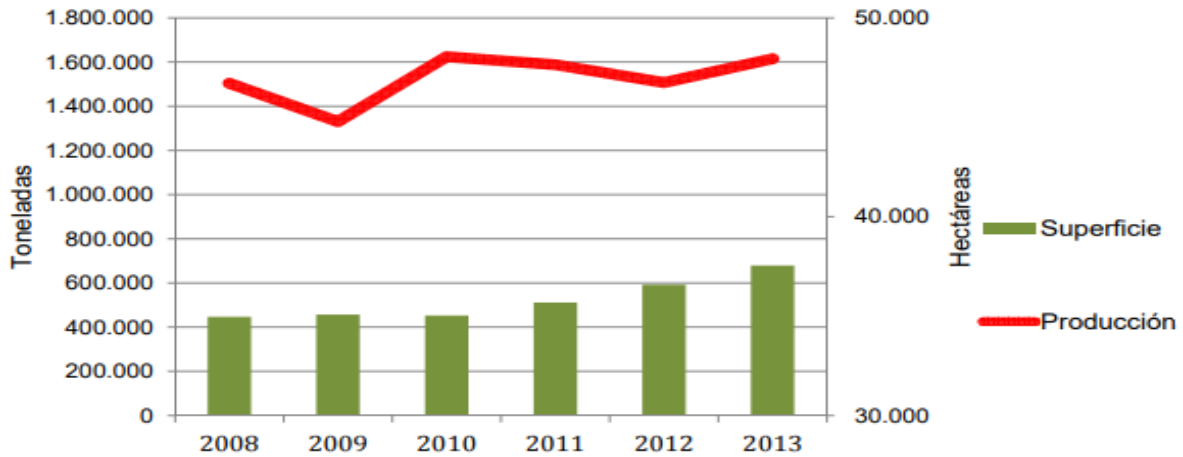
Los sistemas naturales son los principales afectados por este fenómeno dado que, como consecuencia de las variaciones de precipitaciones, aumento de la temperatura promedio del aire y el deshielo acelerado de glaciares, se están modificando los sistemas hidrológicos, repercutiendo en el recurso hídrico tanto en su calidad como su cantidad [1].

En este escenario la agricultura puede ser uno de los sectores más afectados por este fenómeno ya que la disponibilidad de agua es un factor limitante en la producción agrícola y una sequía puede causar irremediables cuadros de estrés que pueden afectar de manera negativa la productividad a nivel mundial. Es por esto que conocer el uso actual y futuro del agua es de gran importancia para facilitar la toma de decisiones al momento de dirigir la asignación de este recurso [3].

Esta situación se vuelve más preocupante cuando se habla del territorio nacional, ya que el sector productivo formado por las actividades agrícolas, forestales y ganaderas representa un 73% de las extracciones nacionales de agua, esto permite el riego de 1,1 millones de hectáreas ubicadas principalmente en la zona centro y sur del país [4]. La agricultura genera exportaciones que en el año 2011 significaron un 22% del total nacional. Esto deja en evidencia la importancia que significa en Chile el recurso hídrico en la agricultura [4].

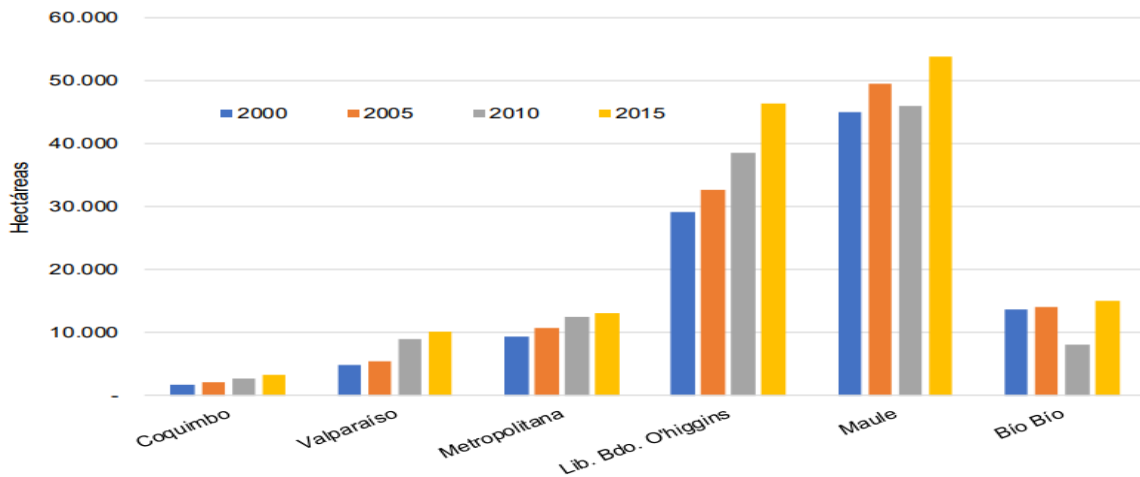
El valle central de Chile destaca por la riqueza de sus suelos y presenta un clima favorable para el desarrollo de actividades agrícolas [5]. Sin embargo, el desarrollo de estas prácticas puede verse limitado por la disponibilidad del recurso hídrico. Cuantificar el fenómeno toma importancia en lugares donde existe una gran demanda de agua, tal es el caso de la cuenca del Río Claro en Tunca, ya que según el Censo Agropecuario 2007 realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) [6], el terreno agrícola alcanza un 42% de la superficie de la cuenca. Los cultivos permanentes representan

el 50% del terreno cultivado siendo éstos principalmente la vid vinífera y el manzano. El cultivo rotativo o anual predominante en la cuenca es maíz [5,6].



**Figura 1-2:** Superficie y producción de manzanas 2008-2013 [7].

A nivel nacional, tanto la producción como la superficie plantada de manzanos y vides están en alza, alcanzando en los últimos años sus máximos valores, tal como se muestra en las Figuras 1-2 y 1-3. En cambio, los cultivos rotativos como el maíz están estancando su producción dado que los agricultores han notado los efectos del cambio climático permitiendo anteponerse a las limitaciones del recurso hídrico [8].

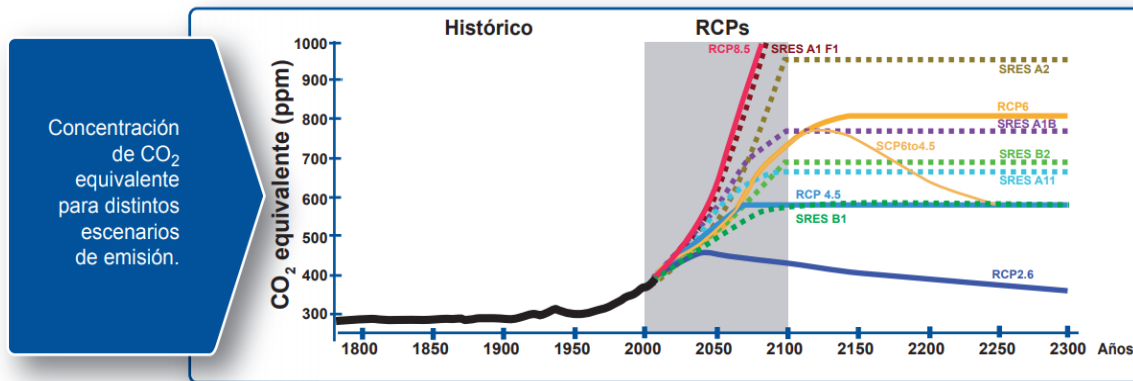


**Figura 1-3:** Evolución de la superficie nacional de vides viníferas. Zona central de Chile [9].

En base a las alzas en las producciones y en la superficie plantada de cultivos permanentes, la zona podría eventualmente incrementar su actividad agrícola y como consecuencia aumentar la demanda del recurso hídrico. Sin embargo, los efectos del cambio climático siguen aumentando y en esta problemática surgen las siguientes preguntas:

- ¿Existirá el recurso hídrico para satisfacer a una cuenca agrícola con posibilidades de expansión de sus áreas de cultivo?
- ¿Podrá la cuenca seguir basando su economía en la agricultura?

Para abordar estas interrogantes, es necesario analizar los efectos en el tiempo que puedan tener los GEI en la disponibilidad del recurso hídrico. Debido a esto el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su quinto informe han definido cuatro escenarios de cambio climático: RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5. Las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) representan el comportamiento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera hasta el año 2100. Cada RCP puede ser resultado de diferentes combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales. El número de RCP indica la variación de Forzamiento Radiativo (FR) que se espera al final del periodo. Siguiendo esta línea, el escenario RCP8.5 corresponde al más desfavorable, RCP2.5 habla de un escenario estricto de mitigación mientras que RCP4.5 y RCP6 son escenarios intermedios con respecto a los niveles de los gases de efecto invernadero tal como se ve en la figura 1-4 [1,10].



**Figura 1-4:** Concentración de CO<sub>2</sub> para los distintos escenarios de cambio climático [1].

Para realizar una simulación se utilizan Modelos de Circulación General (GCM) [11], los cuales en base a una parametrización de procesos físicos intenta representar el clima en la zona. Los GCM pueden tener variadas extensiones y pueden contener los escenarios RCP nombrados anteriormente. Hay varias instituciones desarrollando estos modelos. Por lo tanto, para una misma zona pueden existir distintos modelos de simulación [11].

Realizar una simulación en una cuenca agrícola del país con los casos más críticos del cambio climático, dejará en evidencia la disponibilidad del recurso hídrico y posible escasez de este, repercutiendo en la economía de esta zona debido a que se pueden ver afectados los cultivos tanto en su cantidad como calidad [3].

Bajo estos escenarios, la ingeniería civil se verá en una necesidad de aportar información para que los ministerios correspondientes puedan generar planes de adaptación de los efectos del cambio climático para evitar que éstos provoquen daños que afecten negativamente a la región. Tecnificar el riego para aumentar la eficiencia de su uso, obras de acumulación, sistemas que favorezcan la infiltración son algunas formas de abordar esta temática.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Analizar de disponibilidad del recurso hídrico para una cuenca agrícola bajo efectos del cambio climático en una cuenca de la región de O'Higgins.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Elección de la cuenca en base a la actividad agrícola
- Modelación y calibración de la cuenca.
- Análisis de uso del recurso hídrico para el cultivo en condiciones climáticas actuales.
- Realizar proyecciones de cambio climático en base a modelos de circulación globales para verificar disponibilidad de agua.
- Analizar la disponibilidad del recurso hídrico para los cultivos con la producción actual bajo efectos de cambio climático.

### **1.2.3 Resultados Esperados**

- Comprobar la factibilidad de ampliación de áreas de cultivo y aumentar la producción tanto de vinos como de manzanas según crecimiento evidenciado en los últimos años.

## **1.3 Organización del documento**

A continuación, se describe de forma breve cada capítulo que compone este informe

En el capítulo 2, se presenta una revisión bibliográfica, donde se muestra las consecuencias del cambio climático tanto de manera global como en Chile. También se dan a conocer la evolución de los escenarios del cambio climático elaborados por el IPCC y cuáles son los escenarios actuales. Se entrega además la descripción de los modelos de circulación general y la plataforma de descarga de seleccionada para este estudio. Por último, se describe del modelo hidrológico WEAP seleccionado para este estudio.

En el capítulo 3, se presenta la metodología, en la cual se realiza una descripción de pasos a seguir para llevar a cabo este trabajo.

En el capítulo 4, asociado a la zona de estudio, se selecciona la cuenca y se muestran las principales características del área analizada, como detalles físicos de la cuenca y su clima. Además, se indican las estaciones meteorológicas y fluviométricas con sus respectivos años de vigencia y registros disponibles para esta investigación.

En el capítulo 5, referente al relleno de estadísticas meteorológicas, donde se muestra el proceso de extensión de datos necesarios para la modelación hidrológica.

En el capítulo 6, asociado a la modelación hidrológica, se muestra la construcción de los modelos que componen el área de estudio y sus resultados en el periodo de calibración y el de validación.

En el capítulo 7, asociado a las proyecciones del cambio climático, donde se estudia el comportamiento de la cuenca frente a el escenario RCP 8.5 generado por distintos modelos de simulación. Se presenta primero la selección de modelos, luego la proyección de las forzantes meteorológicas y finalmente los resultados del obtenidos del análisis.

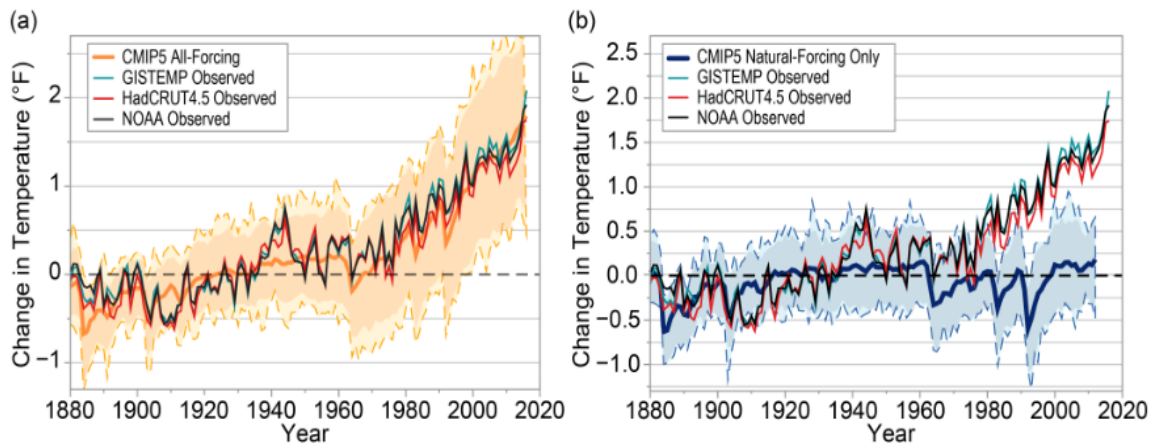
En el capítulo 8, referente a las posibles medidas de mitigación adaptación, donde se recomiendan varias alternativas para mitigar los posibles efectos a futuro del cambio climático en la cuenca.

En el capítulo 9, se presentan las conclusiones obtenidas del presente trabajo.

## 2. Revisión Bibliográfica

### 2.1 Cambio climático y la agricultura

El clima es algo que nunca ha sido estático y siempre está cambiando debido a factores naturales y antropogénicos [12]. Debido a la llegada de la era industrial es que las emisiones humanas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y otros gases de efectos invernadero (GEI) ahora superan la influencia del forzamiento natural en el clima de la Tierra [13] (Ver Figura 2-1). Debido a la gran concentración de GEI es que se está cambiando la composición química de la atmósfera permitiendo una mayor retención de la radiación, traduciéndose, entre otros efectos, en aumento de las temperaturas medias globales.

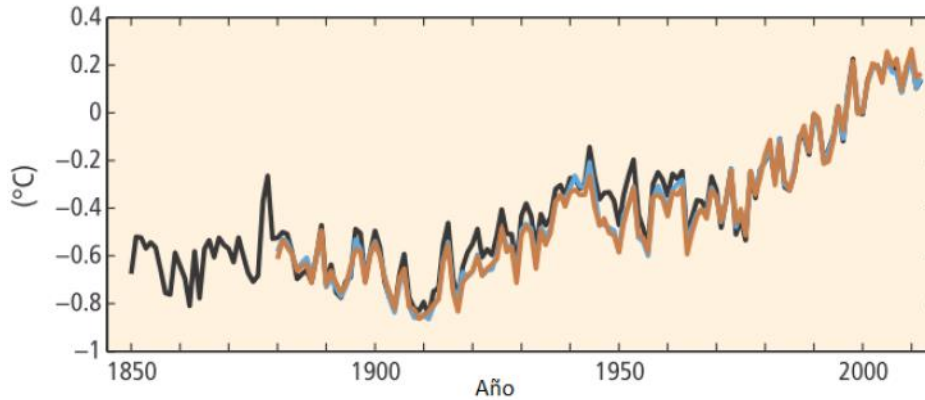


**Figura 2-1** : Comparación de las anomalías observadas en la temperatura media global de tres conjuntos de datos observados en los experimentos históricos del modelo climático CMIP5: a) Forzamientos antropogénicos y naturales combinados b) Forzamiento naturales. [13]

Si se deja de emitir GEI a la atmósfera, la temperatura continuaría aumentando aproximadamente 0.6 °C a lo largo de este siglo producto a la larga escala de tiempo en las cuales algunos climas cambian [12]. Sin embargo, esto es poco probable que suceda, dado que en los últimos 15 a 20 años, las emisiones de carbono en la atmósfera producto de las actividades humanas, se han incrementado de 1.5 a 2 partes por millón (ppm) al año [14]. Además, las proyecciones apuntan a un aumento de las emisiones futuras de GEI producto del crecimiento económico mundial [14].

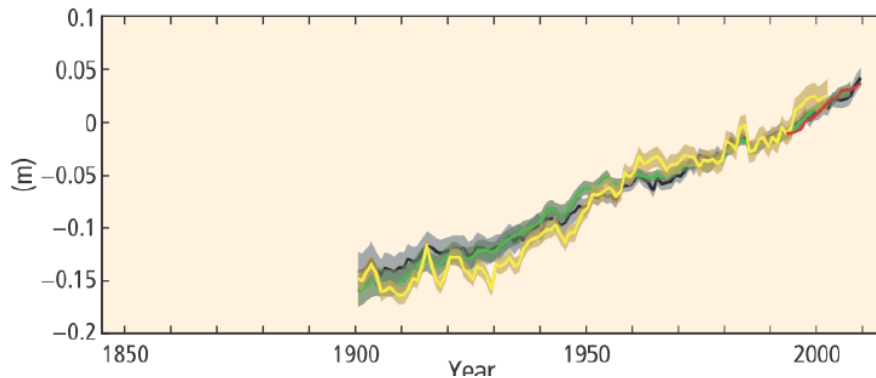
Según el quinto, y último reporte del IPCC<sup>1</sup> del año 2014 [1], las emisiones de GEI humanas han alcanzado sus máximos valores estos últimos años, dejando como consecuencia los evidentes efectos del cambio climático.

- **Temperatura:** La Figura 2-2 muestra la tendencia de temperatura promedio anual global durante los años 1986-2005. Esta figura deja en evidencia que, durante los últimos 50 años, la temperatura tiene su mayor crecimiento debido a la llegada de la industria.



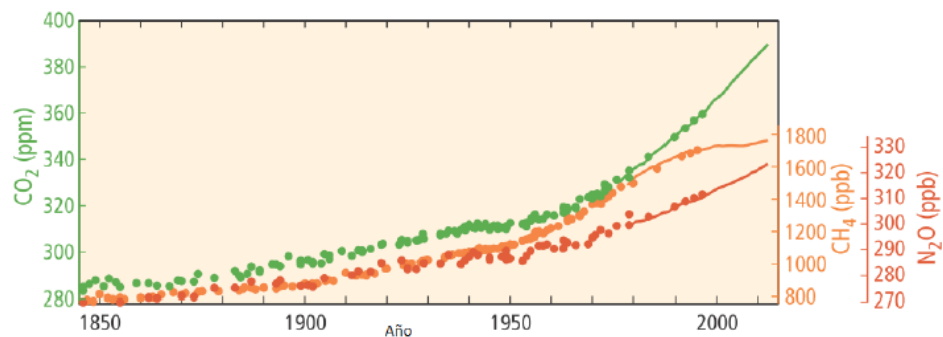
**Figura 2-2:** Variación de temperatura promedio anual global. [1]

- **Nivel del Mar:** Debido al aumento en la temperatura, el derretimiento de glaciares y hielo polar ha aumentado, dejando como consecuencia un incremento en el nivel medio del mar tal como se ve en la Figura 2-3.



**Figura 2-3:** Variación del nivel medio del mar con relación al promedio. [1]

- **Gases de efecto invernadero:** La Figura 2-4 muestra las concentraciones atmosféricas de GEI y como estas se ven incrementadas fuertemente en los últimos 50 años.



**Figura 2-4:** Concentraciones de gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub> (Verde), metano CH<sub>4</sub> (Naranja) y óxido de nitrógeno (rojo).[1]

### 2.1.1 Cambio climático en Chile

Chile se caracteriza por tener una extensa variedad de climas que se producen principalmente por el efecto de la latitud y la altura, dando origen a los sistemas climáticos desérticos, tropicales, subtropicales, templados y polares principalmente. En términos generales se puede definir que el territorio nacional presenta rasgos de clima templado [15].

Desde el punto de vista climático, los cambios observados durante el siglo XX y las proyecciones del siglo XXI dejan en evidencia que Chile se ubica en la transición entre condiciones continentales cálidas y condiciones oceánicas frías. Cuantificar estos cambios es complicado dado que muchas de las estaciones meteorológicas son relativamente nuevas y tienen una distribución dispar dentro del territorio nacional [15].

A lo largo de todo Chile el comportamiento de la temperatura es muy irregular. Mientras que en el océano y a lo largo de la costa las temperaturas han disminuido ( $-0.15^{\circ}\text{C}/\text{década}$ ), en el valle central las estaciones muestran un ligero aumento y las temperaturas cercanas a la cordillera señalan un incremento significativo ( $+0.25^{\circ}\text{C}/\text{década}$ ) [15]. “Este comportamiento irregular de enfriamiento costero y calentamiento cordillerano se verifican en la zona central y norte de Chile” [16] tal como se muestra en la Figura 2-5.

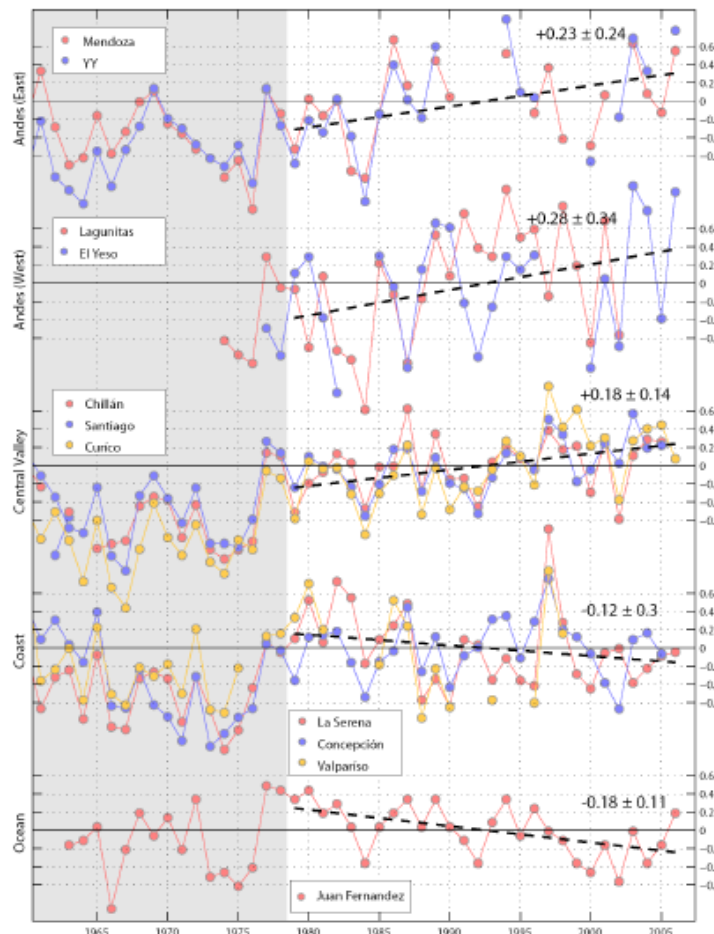
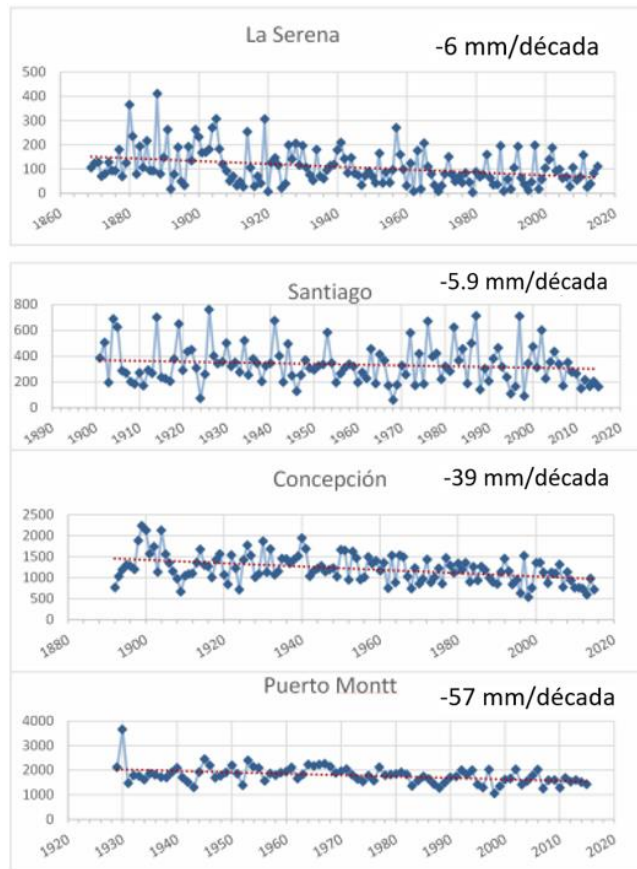


Figura 2-5: Variación de la temperatura en diversas estaciones de Chile central [16].

Similar es el caso de las precipitaciones, la distribución de ésta a lo largo de Chile es variada. En los últimos 100 años las precipitaciones en las zonas costeras han disminuido entre un 15% y 30%, mientras que en las zonas interiores es ligeramente perceptible este cambio (Ver Figura 2-6). “El hecho de que la disminución de las precipitaciones se haya concentrado mayormente en zonas costeras puede estar relacionado con un cambio en la trayectoria de los frentes debida a un cambio en la conducta del anticiclón del Pacífico” [17]. Esta nueva conducta del anticiclón también está repercutiendo en los días de lluvia, haciendo que éstos cada año disminuyan. Si esta tendencia a la disminución de precipitaciones se mantiene en el futuro, la estacionalidad del agua que escurre por los ríos puede verse amenazada [17].



**Figura 2-6:** Tendencias de la precipitación total anual en Chile. La cifra al lado del título indica el cambio experimentado por la precipitación durante el siglo XX [17].

### 2.1.2 Efectos del cambio climático en la agricultura chilena

Conocer los efectos del cambio climático en la agricultura es de suma importancia para los agricultores, la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) menciona que “El efecto del cambio climático en la agricultura está relacionado con variaciones en los climas locales más que en patrones mundiales. El aumento en la temperatura promedio de la superficie de la tierra ha traído como consecuencia que las distintas zonas geográficas se vean afectadas de manera diferente” [18].

Las relaciones causa/efecto que se establecen entre las plantas y el clima hacen que sea difícil predecir los efectos que tiene la variabilidad climática en la productividad de los cultivos. Sin

embargo, la ODEPA dice que “*Un alza de la temperatura en climas fríos contribuirá a mejorar las tasas de crecimiento y acumulación de biomasa*” [19]. Si a este fenómeno se le acompaña de una disminución en las precipitaciones, el efecto negativo podría anular al cambio positivo producto del aumento en las temperaturas. El equilibrio de los impactos negativos y positivos determinará la productividad del cultivo [19].

En base a esto la ODEPA [18] ha realizado una proyección de la producción de los cultivos más importantes del territorio nacional ante el cambio climático, como muestra la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Proyección de la producción por cultivo antes nuevo escenario climático [18].

Cultivo	Proyección
Trigo	Bajo riego, el aumento de las temperaturas aceleraría ciclo productivo y una reducción del rendimiento. Mayor impacto en zonas costeras que en zonas interiores.
	Secano, disminución (10%-20%) en el rendimiento en norte y centro del país debido a mayores sequías. En tanto, de la precordillera del Bío-Bío al sur habría un aumento gradual entre el 30% y 100% respecto a los rendimientos actuales.
Maíz	El potencial productivo se expandiría dado las exigencias de temperatura del cultivo. Desde Coquimbo al Bío-Bío, se estima una disminución productiva entre 10 y 20% en el valle central. Inversamente en la costa y precordillera, aumentaría el rendimiento hasta un 50%. En la zona sur los rendimientos aumentarían entre un 60% y 200%
Papa	Zona norte presentaría una reducción entre 10 y 20% del rendimiento.
	Zona centro-norte, el rendimiento disminuiría hasta un 30%
	Entre Talca y Temuco, la disminución se presenta sólo en el valle central, ya que en la costa y precordillera habría aumentos de hasta un 50%.
	Desde la Región de la Araucanía al sur, los rendimientos aumentan hasta llegar a 150% y 200% en la Región de los Lagos.
	En secano, los aumentos se producirían en la costa del Bío-Bío y desde Valdivia hasta Coyhaique.
Frejol	Zona norte y centro, se espera que el rendimiento se mantenga bajo la condición de clima futuro.
	Región de la Araucanía al sur, aumentaría la productividad entre 10% y 20%, llegando hasta 100% en la Región de Los Lagos.
Remolacha	Entre Valparaíso y Talca, por el valle central, habría aumento de rendimiento de hasta un 50% en algunos lugares.
	En la costa y precordillera de la zona centro, habría una reducción en el rendimiento.
	Región de la Araucanía al sur, el aumento térmico invernal incrementaría el potencial productivo, incluso con menor pluviometría.
Frutales	Extensión del área del cultivo hacia el sur, abarcando las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.
	Aceleración de la fenología de los cultivos, reducción del tiempo de desarrollo y aumento de la precocidad de la madurez.
	Probables aumentos de la incidencia de plagas y enfermedades dado por el aumento de las temperaturas

## 2.2 Escenarios del cambio climático

Producto del cambio climático, es que el IPCC ha definido desde la década de 1990 varios escenarios futuros. Estos conjuntos de escenarios se han vuelto más completos cada nueva generación, partiendo de los escenarios originales SA90 que fueron reemplazados por los escenarios de emisiones IS92, éstos a su vez fueron seguidos por el Informe Especial sobre Emisiones en 2000 (SRES) y actualmente por Trayectorias de Concentración Representativas en 2010 (RCP) [14].

Los escenarios SA90 y IS92 se generan en base a las emisiones antropogénicas de GEI que mediante una proyección del Banco Mundial sobre crecimiento de la población se obtienen los parámetros futuros. Los SRES buscan generar familias de escenarios futuros, los cuales basan sus supuestos de evolución de la población mundial en aspectos sociales, demográficos, en el comercio internacional, flujo de información y tecnología, características tecnológicas y económicas de los mundos futuros [14].

Tomando en cuenta lo anterior, en los escenarios SRES se generan dos sets de tendencias divergentes. Un set formado por los escenarios A y B, los cuales dan cuenta si se prioriza el desarrollo económico o la preocupación en temas medio ambientales y el otro set donde se enfatiza un crecimiento a nivel local o en contraposición un desarrollo global, siendo estos los escenarios 1 y 2 [20] (Ver Figura 2-7).

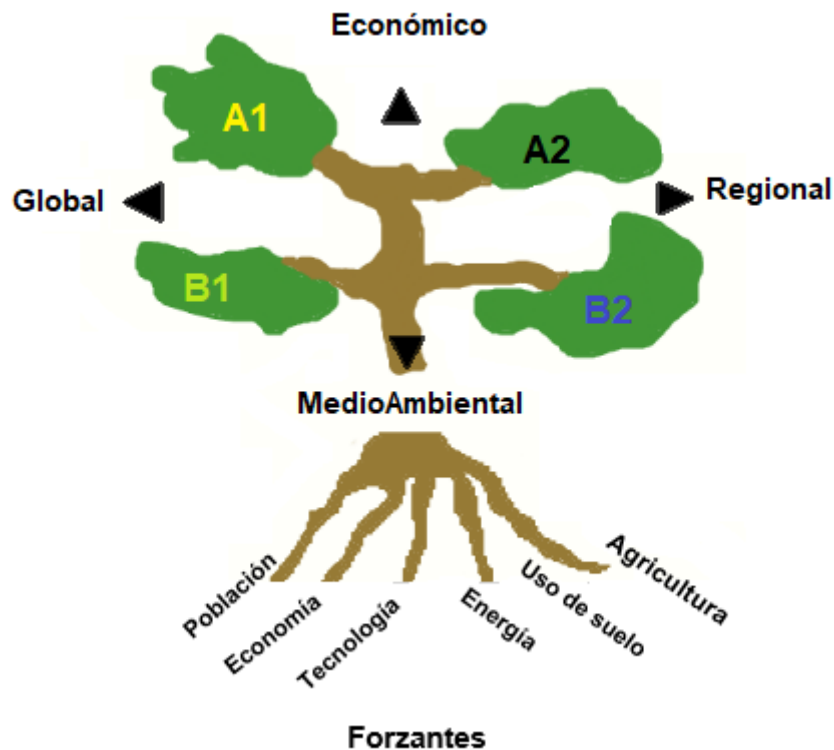


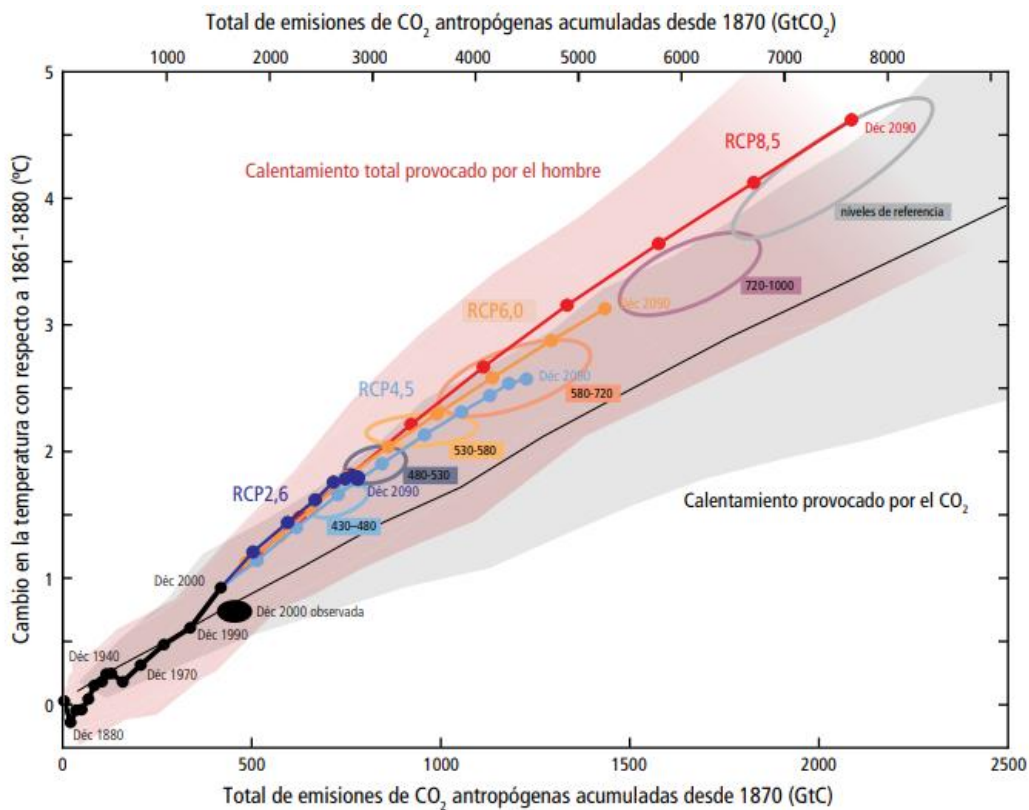
Figura 2-7: Esquema explicativo de los escenarios SRES [20].

Actualmente los escenarios vigentes son los RCP. En estos escenarios en vez de considerarse ciertos niveles futuros de emisiones de GEI, como se hacían anteriormente, se fijan valores de forzantes radiativas hacia el año 2100. La forzante radiativa (FR) se define como la diferencia entre la radiación absorbida por la Tierra y la radiación que se entrega de vuelta al espacio. Una diferencia positiva favorece a la acumulación de energía en la superficie terrestre obteniendo como resultado un calentamiento [1].

En el presente trabajo se utilizarán los escenarios RCP. Cada RCP puede ser resultado de diferentes combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales, los cuales se diferencian por la cantidad de radiación que queda atrapada en la atmósfera producto de los gases emitidos [1].

**Tabla 2-2:** Características y comportamiento de los escenarios RCP [1].

Escenario	Forzante Radiativa [W/m <sup>2</sup> ]	Concentración de CO <sub>2</sub> [ppm]	Comportamiento
RCP 8.5	> 8.5	> 1370 al 2100	Creciente
RCP 6	6 en la estabilización al 2100	850 en la estabilización al 2100	Estabilización sin peaks
RCP 4.5	4.5 en la estabilización al 2100	650 en la estabilización al 2100	Estabilización sin peaks
RCP 2.6	3 en el peak, posterior descenso	490 en el peak, posterior descenso	Peak y disminución



**Figura 2-8:** Aumento de la temperatura para cada RCP hasta el 2100 [1].

De acuerdo con lo anterior, se puede ver tanto en la Tabla 2-2 como en la Figura 8-2 que los escenarios del cambio climático pueden comprender desde escenarios de estricta mitigación de emisiones RCP 2.6, escenarios más desfavorables del calentamiento global RCP 8.5 y escenarios intermedios tales como RCP 4.5 y 6.

## 2.3 Modelación climática: Modelos de circulación general

### 2.3.1 Descripción general

Los modelos de circulación general o GCM corresponden a una idealización del sistema climático de la Tierra, que mediante modelos numéricos se realizan simulaciones a largos periodos de tiempo tomando en cuenta la parametrización de los principales procesos físicos presentes en el clima (Ver Figura 2-9). Como resultado se tienen series de tiempo con variables meteorológicas tales como la temperatura, precipitación, radiación, entre otras [11].

Los modelos que acoplan los procesos ocurridos en la atmósfera y en el océano que frente a al incremento de las concentraciones de GEI son la herramienta más avanzada para simular la respuesta de un sistema global, representando el clima mediante una grilla tridimensional sobre el globo, con resoluciones horizontales típicas de entre 250 a 600 km y de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera, pudiendo llegar hasta 30 capas en el Océano [11].

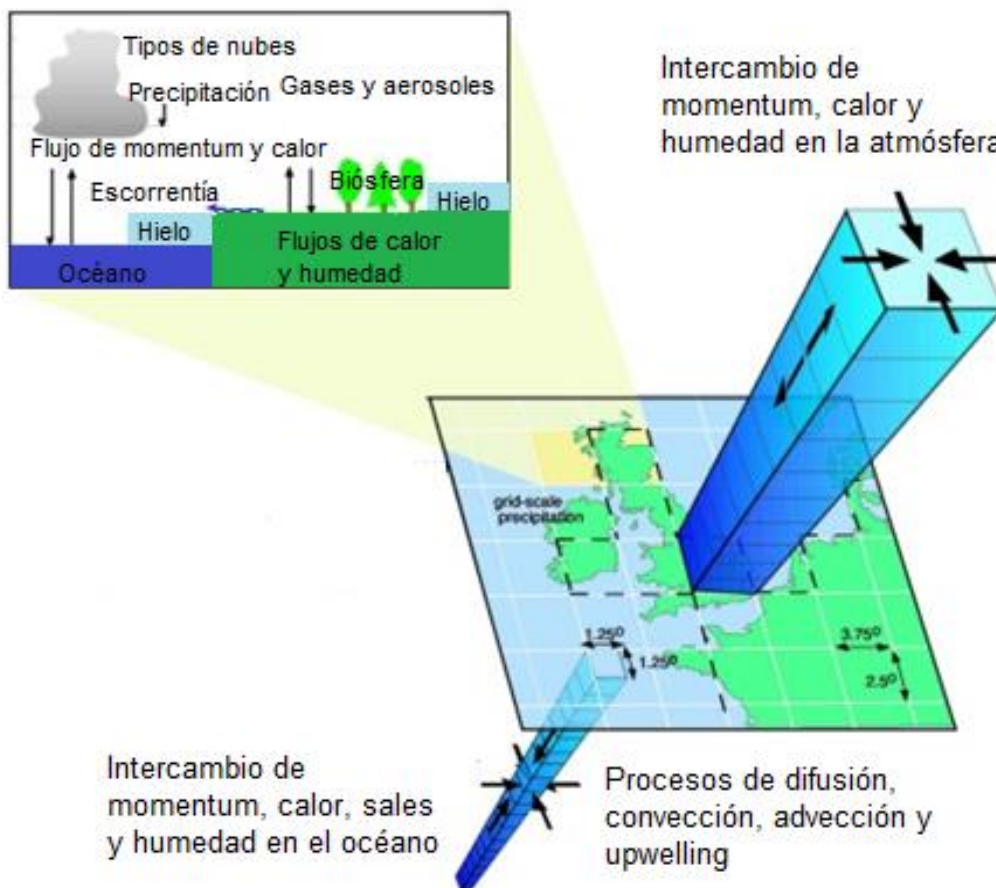


Figura 2-9: Esquema general de un GCM [11].

Si bien los GCMs son una herramienta para describir y representar el clima, tienen exigentes requerimientos computacionales para la simulación. Por otro lado, las grillas de gran extensión que utilizan no permiten una buena modelación de los procesos físicos locales. Estos problemas se pueden solucionar simplificando y parametrizando los procesos. Por lo tanto, cada modelo debe realizar una etapa de calibración con fenómenos locales ya observados.

En la tabla 2-3, se presentan las principales instituciones dedicadas al desarrollo de modelos climáticos en la actualidad. Estos datos están a disposición del público general<sup>1</sup>.

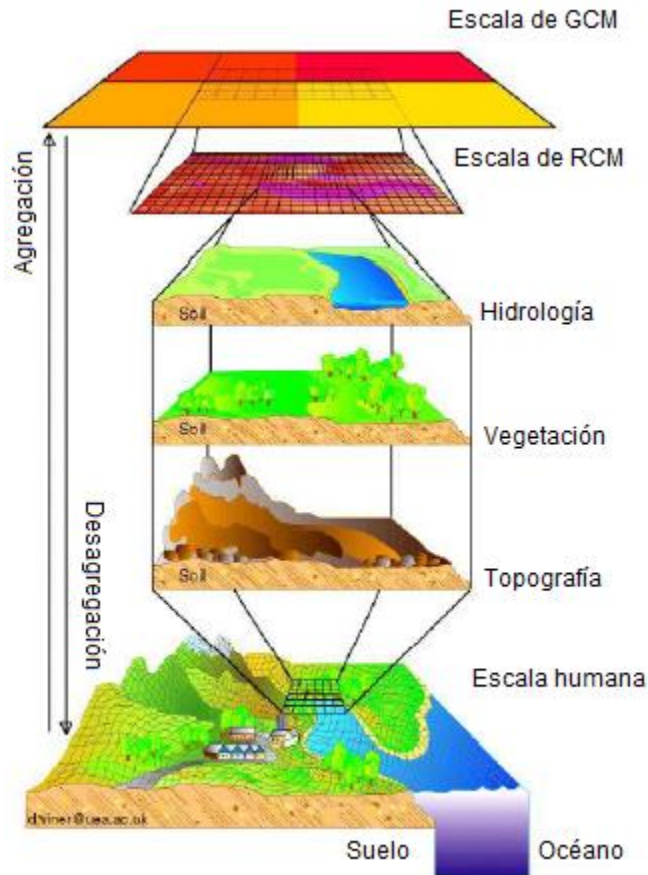
**Tabla 2-3:** Instituciones vigentes en el desarrollo de modelos climáticos para escenarios RCP.

<b>Sigla Institución</b>	<b>País</b>
<i>BCC</i>	China
<i>BNU</i>	China
<i>CCCma</i>	Canadá
<i>CMCC</i>	Italia
<i>CSIRO-BOM</i>	Australia
<i>CSIRO-QCCCE</i>	Australia
<i>FIO</i>	China
<i>ICHEC</i>	Holanda/Irlanda
<i>INM</i>	Rusia
<i>INPE</i>	Brasil
<i>IPSL</i>	Francia
<i>LASG-CESS</i>	China
<i>LASG-IAP</i>	China
<i>MIROC</i>	Japón
<i>MOHC</i>	Reino Unido
<i>MPI-M</i>	Alemania
<i>MRI</i>	Japón
<i>NASA-GISS</i>	Estados Unidos
<i>NSF-DOE-NCAR</i>	Estados Unidos
<i>NCC, NMI</i>	Noruega
<i>NIMR, KMA</i>	Corea del Sur
<i>NOAA-GFDL</i>	Estados Unidos

## 2.4 Escalamiento de variables climáticas

La extensa grilla de los GCMs impide dar a conocer la heterogeneidad a una escala más pequeñas de la variabilidad climática debido a su baja resolución. Numerosas características que definen los climas locales no pueden ser del todo representadas tales como la topografía, la vegetación y la hidrología (Ver Figura 2-10). Estas heterogeneidades son importantes a la hora de tomar decisiones que requieren de información sobre los posibles impactos en la agricultura, hidrología, distribución de especies, etc. [21]

<sup>1</sup> Se puede encontrar en el sitio web: [https://www.ipcc-data.org/sim/gcm\\_monthly/AR5/Reference-Archive.html](https://www.ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/AR5/Reference-Archive.html)



**Figura 2-10:** Esquema de representación de escalas [21].

A consecuencia de esto, se hace necesario añadir un paso que consiste en un escalamiento o *downscaling* de las variables climáticas, con el objetivo de corregir los datos gruesos de los GCMs y llevarlos a una escala más fina. Esta derivación de información climática a escala inferior se basa en la suposición de que el clima local está condicionado por las interacciones entre las características a gran escala y las características locales [21]. Se distinguen dos tipos de escalamiento. El primero es el escalamiento estadístico, el cual plantea distintos tipos de relaciones estadísticas entre las variables a gran y pequeña escala. Mientras que el segundo, resuelve el mismo problema computacional en una grilla más pequeña asociada a un lugar terrestre específico, mediante la compatibilización de sus bordes con los resultados de un modelo global. A este procedimiento se le llama escalamiento dinámico [21].

#### 2.4.1 Escalamiento estadístico

El escalamiento estadístico se basa en relaciones estadísticas entre las variables locales medidas y las variables a gran escala en un periodo base. Una vez que la relación ha sido determinada y validada, futuras variables climáticas de los GCM pueden ser utilizadas para predecirlas a escala local. Este enfoque se basa en la suposición fundamental de que la relación entre las variables globales actuales y el clima local siguen siendo válidas en diferentes condiciones de forzamiento de posibles climas futuros [22].

#### 2.4.2 Escalamiento dinámico

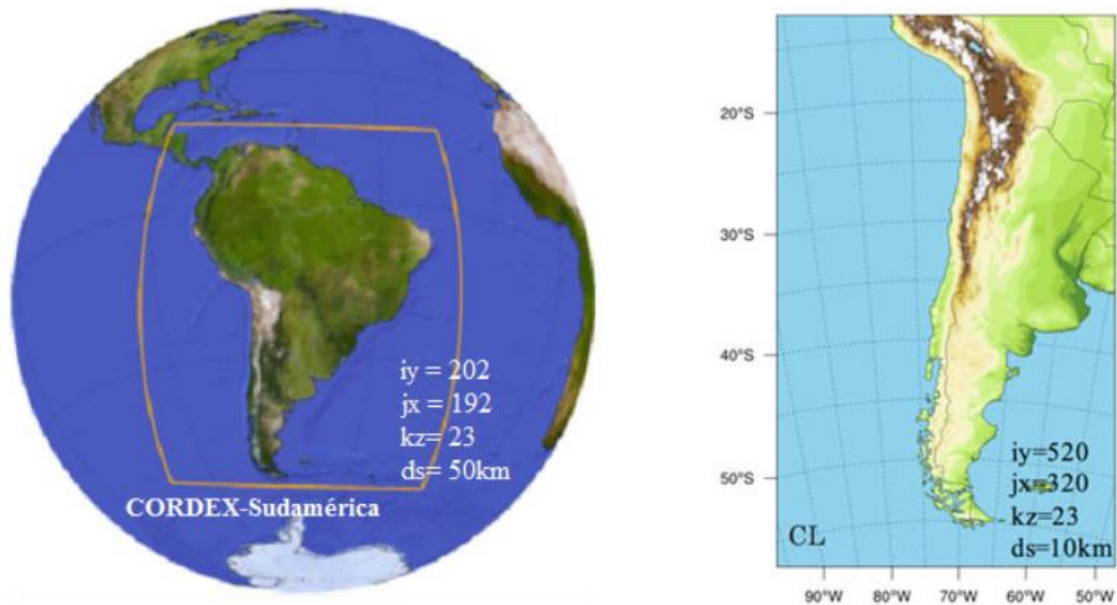
El escalamiento dinámico se basa en el uso de modelos climáticos regionales o de área limitada (RCM). Para aumentar la resolución de los GCM se acoge un modelo regional de mayor resolución

dentro del modelo global, utilizando solo la zona de interés. Este modelo regional toma como condiciones de borde los valores del modelo global a lo largo de toda la integración. Estas técnicas dinámicas tienen la ventaja de ser consistentes con las variables climáticas y la desventaja de necesitar una gran capacidad de cálculo [23].

### 2.4.3 Plataforma de simulaciones climáticas CR2.

La plataforma tiene como objetivo proveer información de proyecciones climáticas a distintos sectores de interés que lo requieran, ofreciendo simulaciones climáticas disponibles para un dominio global (simulaciones globales), para Sudamérica (regional) y para Chile continental (local), realizadas por grupos en Chile y el extranjero, así como datos observacionales en formato grilla desarrollados por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) y otros grupos e instituciones [24].

Como se dijo anteriormente se consideran tres conjuntos de simulaciones climáticas según su contexto de realización y resolución espacial: globales, para América del Sur y para Chile continental. En la plataforma se consideran dos dominios: CORDEX-Sudamérica y CL (Chile). En la Figura 2-11 se indica la cantidad de grillas en el eje de las latitudes ( $iy$ ), eje longitudes ( $jx$ ) y los niveles de presión ( $kz$ ). Esta configuración de lugar a la resolución espacial ( $ds$ ), 50km en el caso de CORDEX, 10km en el caso del dominio CL. Las simulaciones globales se encuentran recortadas al dominio CORDEX-Sudamérica [24].



**Figura 2-11:** Dominios utilizados por la plataforma de simulaciones climáticas CR2 [24].

Las simulaciones climáticas globales (GCM) tienen aproximadamente 100 a 200 km de resolución las cuales fueron realizadas mediante múltiples modelos climáticos acoplados.

Las simulaciones climáticas regionales (RCM) tienen aproximadamente 48 km de resolución. Las simulaciones son obtenidas mediante un escalamiento dinámico mediante los GCM. El objetivo de estas simulaciones es valorar las condiciones más probables del sistema climático regional dado su mejor resolución.

Por otro lado, las simulaciones climáticas locales cuentan con una resolución de entre aproximadamente 10 a 15 km. En rigor son simulaciones regionales, pero acotadas por un dominio menor

Estas simulaciones corresponden a datos grillados para diferentes extensiones a nivel geográfico que se han generado a partir de modelos globales o regionales o en base a técnicas estadísticas o, en algunos casos, combinados con observaciones.

Este producto grillado contiene información meteorológica a nivel mensual (precipitación, temperatura, humedad relativa, nubosidad, entre otros) para cada modelo de simulación en un periodo histórico (1985-2005) y para los escenarios RCP 8.5 y 2.6 en los periodos de futuro cercano (2020-2044), futuro intermedio (2045-2069) y futuro lejano (2070-2094) [24].

Es posible encontrar las simulaciones para cualquier punto en el territorio nacional ya que la plataforma utiliza condiciones de borde laterales distintas para cada modelo (debido a las diferencias de extensión de la grilla) para determinar la información meteorológica en dicho punto.

En este trabajo se utiliza esta plataforma para obtener las series de tiempos de precipitaciones y temperaturas futuras. Los datos que entrega la plataforma vienen normalizados, lo cual permite ajustar los valores de las simulaciones que provienen de los distintos modelos respecto a un período de referencia común (1985-2005). Esto sirve para observar las tendencias de cada variable en el tiempo, en lugar de mirar su valor absoluto para cada escenario.

Existe dos tipos de normalización en la plataforma uno para la precipitación y otro para la temperatura. Para la precipitación la plataforma utiliza el tipo de normalización denominada Factor, el cual se determina mediante el cambio relativo de la variable. Mediante este valor del Factor se puede obtener la precipitación futura mediante la siguiente ecuación:

$$Factor = 100(Pp_{futura}/Pp_{presente} - 1) \quad (2-1)$$

Donde:

$Pp_{presente}$ : Precipitación mensual en el periodo histórico o línea base medida en el punto de interés en (mm/mes).

$Pp_{futura}$ : Precipitación mensual obtenida para los periodos de futuros en (mm/mes).

Para la temperatura se aplica la normalización de Sesgo. Este valor se obtiene en el punto de interés mediante un escalamiento estadístico que permite en base a la densidad de probabilidades del periodo histórico obtener el valor de la temperatura futuro mediante la siguiente ecuación:

$$Factor = T_{futura} - T_{presente} \quad (2-2)$$

$T_{presente}$ : Temperatura promedio mensual en el periodo histórico o línea base medida en el punto de interés en (°C).

$T_{futura}$ : Temperatura promedio mensual obtenida para los periodos de futuros en (°C).

## 2.5 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica permite describir los procesos de transporte de agua que ocurren dentro de una cuenca, esto se realiza mediante el uso modelos matemáticos conceptuales. Estos modelos pueden basar su simulación en ecuaciones físicas para determinar el comportamiento de las variables dentro de la cuenca a través de esquemas y algoritmos simplificados [25].

Un modelo hidrológico busca representar de manera simplificada un sistema real, su objetivo es predecir la salida de las operaciones del sistema. Las variables de entradas son generalmente de tipo hidrometeorológicas y sus salidas son variables hidrológicas medibles. La estructura de estos modelos son ecuaciones que conectan las variables de entradas con las salidas [26].

“Los modelos hidrológicos se pueden clasificar de múltiples maneras, teniendo en cuenta criterios como el enfoque matemático que realizan, el grado de representación espacial de sus componentes, etc” [27]. En la mayoría de los casos, los modelos se clasifican según la forma en que representan la superficie de la cuenca y la forma de representar los procesos de entradas y salidas de agua [27]. Existen dos grandes tipos de modelos, tal como se muestra en la Figura 2-12.

- **Modelos materiales:** Un modelo material es la representación del sistema por otro sistema. Donde el nuevo comparte similares características con el modelo real. La ventaja de este modelo es trabajar a escalas de un tamaño asequible mediante una maqueta la cual se experimenta en el laboratorio. Sin embargo, la representación del sistema real debe realizarse con mucho detalle para poder simular los procesos hidrológicos de la cuenca, esta es la principal limitante del modelo.
- **Modelo simbólico:** “Es una expresión simbólica en términos lógicos de una situación idealizada, relativamente sencilla que comparte las propiedades estructurales del sistema original”. Estos modelos utilizan su base matemática para describir el comportamiento de los procesos físicos de la cuenca. Tal es el caso de WEAP, modelo utilizado en este trabajo de título [28].

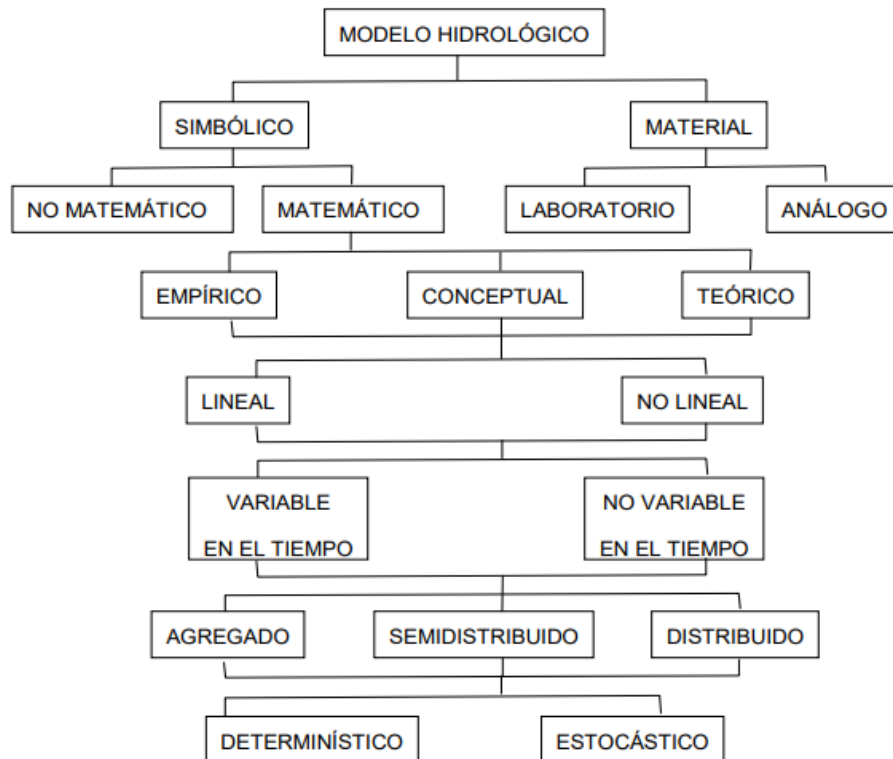


Figura 2-12: Clasificación de modelos hidrológicos [28].

## 2.6 Modelo WEAP

### 2.6.1 Generalidades

WEAP (Water Evaluation and Planning) corresponde a un modelo semidistribuido desarrollado por el Instituto del Medio Ambiente Stockholm Environment Institute (SEI). Este modelo es una herramienta computacional de modelación para la planificación y distribución de aguas y funciona usando el principio básico de balance de masa. WEAP es un modelo forzado por variables climáticas y además incluye la interacción en la distribución del agua entre la perspectiva humana y el ecosistema. Tales características hacen que este modelo sea ideal para generar estudios sobre el cambio climático [29,30].

### 2.5.2 Modelo hidrológico

Para la realización del balance hídrico, WEAP deja a disposición cuatro métodos:

- **Demanda de riego:** este método se basa en el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos para cuantificar la demanda del recurso hídrico dejando de lado los procesos de infiltración y escorrentía.
- **Precipitación y escorrentía:** se calcula la demanda de riego y la precipitación que no es consumida por los cultivos se modela como escorrentía.
- **Método MABIA:** Este método separa las demandas generadas por la evapotranspiración de los cultivos y la evaporación del suelo.
- **Humedad del suelo:** corresponde al método más complejo de los cuatro y es el utilizado para hacer el modelamiento en la cuenca de estudio, el cual se detalla en la sección 2.5.2.1.

#### 2.5.2.1 Método de la humedad del suelo

Este método es el más completo de los cuatro dado que modela conceptualmente el suelo como dos estanques, que representan la zona de raíces y la zona profunda del suelo. Entre estos dos estanques existe una interacción que simula la percolación desde el primer estanque hacia la zona profunda. Las variables forzantes y los parámetros que representan el suelo, son los que definen las entradas y salidas de flujo que tiene cada estanque, esto se puede ver representado de mejor manera en la Figura 2-13, donde se presenta el esquema del método y los flujos con los cuales se realiza el balance de masa [31].

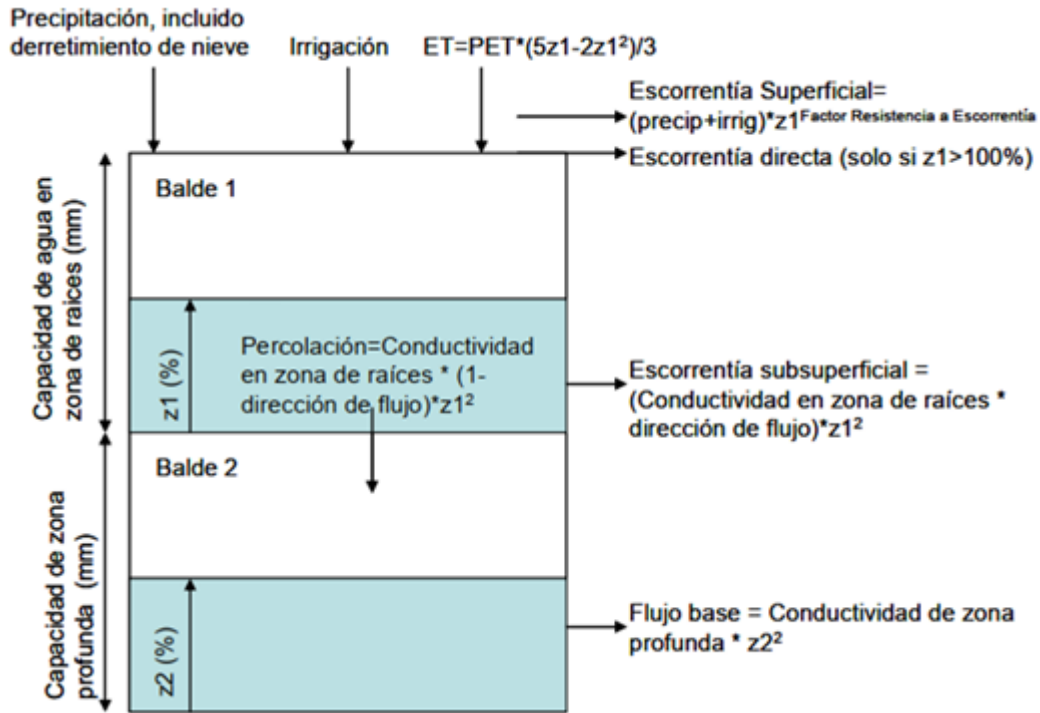


Figura 2-13: Esquema de método de humedad del suelo [30].

Cada par de estanques representa un sitio de demanda, los cuales pueden ser una cuenca, subcuenca o bien un área agrícola. En cada uno de estos se ingresa la información de uso de suelo y variables climáticas. Si la superficie total se divide en N sitios de demanda, las ecuaciones que rigen el método en los estanques son:

**Estanque superior:**

$$Sw_j \frac{dZ_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left( \frac{5Z_{1,j} - 2Z_{1,j}^2}{3} \right) - Pe(t)Z_{1,j}^{0,5RRF_j} - f_j k_s Z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_s Z_{1,j}^2 \quad (2-3)$$

Donde:

$Sw_j$  : Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces [mm].

$Z_{1,j}$  : Nivel de humedad inicial de la zona de raíces [%].

$P_e$  : Precipitación efectiva, incluyendo derretimiento y riego.

PET : Evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia (Penman-Montieth).

$k_{c,j}$  : Coeficiente de cultivo para cada porción diferente de cubierta de suelo.

$k_{s,j}$  : Conductividad en la zona de raíces.

RRF<sub>j</sub> : Índice de resistencia a la escorrentía por cada capa de suelo.

$f_j$  : Dirección preferida del flujo que fluctúa entre horizontal y vertical.

**Estanque inferior:**

$$Dw_j \frac{dZ_{2,j}}{dt} = -k_d Z_{1,j}^2 + (1 - f_j) k_s Z_{2,j}^2 \quad (2-4)$$

Donde:

$Dw_j$  : Capacidad de almacenamiento en la zona profunda [mm].

$Z_{2,j}$  : Nivel de humedad inicial de la zona profunda [%].

$k_d$  : Conductividad en la zona de raíces.

### 2.5.3 Evaluación del desempeño del modelo

Con el fin de evaluar el desempeño de los modelos de simulación de fenómenos naturales, existen una amplia gama de indicadores y criterios que evalúan la similitud de las estimaciones obtenidas mediante modelación con las observaciones. En el caso de modelos hidrológicos, los criterios se aplican a las series de caudales del modelo y los caudales observados para determinar factores que cuantifiquen la eficiencia [32].

A continuación, se presentan criterios para la evaluación del desempeño del modelo WEAP

- **Coefficiente de determinación ( $R^2$ ):** Describe la cantidad de dispersión que existe entre las variables observadas y las modeladas. Un valor de cero significa que no hay correlación en absoluto mientras que un valor de 1 significa que la dispersión de la predicción es igual a la de la observación, sin embargo, este coeficiente no da cuenta de los sesgos sistemáticos que puedan existir, como sobre estimaciones o subestimaciones mantenidas en el tiempo.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mod_i} - \overline{Q_{mod}}) (Q_{mod_i} - \overline{Q_{mod}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{mod_i} - \overline{Q_{mod}})^2}} \right)^2 \quad (2-5)$$

Donde:

$Q_{mod_i}$  : Caudal modelado en el mes i.

$Q_{obs_i}$  : Caudal observado en el mes i.

- **Nash-Sutcliffe (NS):** La normalización de la varianza de la serie observada se traduce en valores relativamente altos de NS, sin embargo, para cuencas con alta dinámica de caudales, se obtiene bajos valores para NS. El rango de valores para NS se encuentra entre 1 (ajuste perfecto) y menos infinito [33].

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{mod_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (2-6)$$

- **Nash-Sutcliffe con valores logarítmicos (LOG NS):** Para calcular este criterio, se utiliza la ecuación (2-6) pero con los logaritmos de los caudales. Con este criterio, se consigue disminuir el problema de las cuencas con alto dinamismo de caudales, lo que se traduce en dejar los caudales altos a un nivel comparables con los bajos y así mejora el valor del indicador de eficiencia [33].

$$Log NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left( \log(Q_{obs_i}) - \log(Q_{mod_i}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left( \log(Q_{obs_i}) - \log(\overline{Q_{obs}}) \right)^2} \quad (2-7)$$

**Tabla 2-4:** Criterio para la evaluación de la bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe [34].

Indicador	Excelente	Muy Bueno	Bueno	Satisfactorio	Insuficiente
NSE	>0.8	0.6-0.8	0.4-0.6	0.2-0.4	<0.2

- **Sesgo porcentual (PBIAS):** Este criterio mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grande o pequeña que los datos observados. Un valor de PBIAS=0 es la representación de un ajuste perfecto, valores positivos PBIAS>0 indican subestimación del modelo, valores negativos 0<PBIAS indican una sobrestimación.

$$PBIAS = \left( \frac{\sum_i^n (Q_{obs_i} - Q_{mod_i}) \times 100}{\sum_i^n Q_{obs_i}} \right) \quad (2-8)$$

**Tabla 2-5:** Criterio para la evaluación de la bondad de ajuste de PBIAS [35].

Indicador	Muy Bueno	Bueno	Satisfactorio	Insuficiente
PBIAS (%)	< ±10	±10 - ±15	±15 - ±25	> ±25

- **Kling-Gupta efficiency (KGE):** Corresponde a una mejora del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) donde los componentes de correlación, desviación y variabilidad están ponderados de igual manera, esto permite disminuir los problemas sistemáticos de subestimación en los valores máximos y de poca variabilidad identificados en la función NS [36]. El valor del coeficiente KGE varía desde  $-\infty$  hasta 1, donde el valor más cercano a 1 indica que el modelo es más preciso.

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + \left(\frac{cd}{rd} - 1\right)^2 + \left(\frac{cm}{rm} - 1\right)^2} \quad (2-9)$$

Donde:

*CC* : Valor del coeficiente de Pearson.

*rm* : Promedio de valores observados.

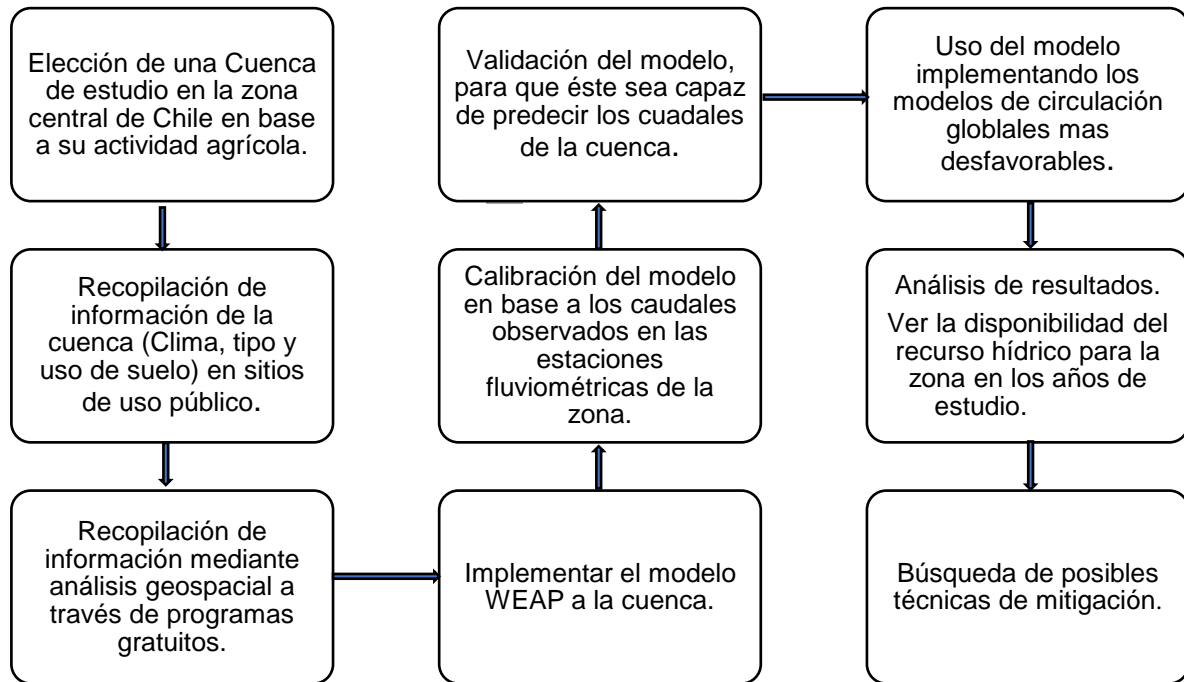
*cm*: Promedio de valores modelados.

*rd*: Desviación estándar de valores observados.

cd: Desviación estándar de valores modelados.

### 3. Metodología

En la Figura 3-1 se expone la estructura general de la metodología a utilizar en el presente trabajo.



**Figura 3-1:** Metodología de trabajo.

Primero se escoge en base a la información del tipo y suelo de la región, una cuenca que presenta una alta cantidad de sector agrícola y para esta zona se recopila información histórica de variables meteorológicas para realizar su respectivo análisis estadístico para luego extender información faltante. Posteriormente, se realiza una modelación hidrológica, llevando a cabo un proceso de calibración y validación con datos históricos, considerando para ambos procesos los indicadores de bondad de ajuste. Una vez definido el modelo (calibrado y validado), se escogen los modelos de circulación globales de la plataforma de simulación climática CR2MET presentada en 2.4.3, con estos modelos se generan en base a las ecuaciones (2-1) y (2-2) las proyecciones de las forzantes para posteriormente incorporarlas en el modelo hidrológico y analizar la respuesta de la cuenca a el escenario RCP 8.5. Finalmente, en función de la información obtenida a través del modelo, analizar la disponibilidad del recurso hídrico y proponer medidas de adaptación.

## 4. Zona de estudio

La zona de estudio se enfoca en la Región Libertador Bernardo O'Higgins, donde la cuenca queda definida por la estación fluviométrica Río Claro en Tunca que se ubica a 4 kilómetros de la unión del río Claro con el río Cachapoal. La estación fluviométrica se encuentra aproximadamente a 41 km al suroeste de la ciudad de Rancagua. La principal razón de la elección de esta cuenca radica en su extensa actividad agrícola que presenta en el valle, por lo cual es ideal para estudiar los efectos que podrá tener el cambio climático en el recurso hídrico.



Figura 4-1: Estación fluviométrica Río Claro en Tunca.

### 4.1 Cuenca del Río Claro

La cuenca cuenta con un área aportante de 930.84 Km<sup>2</sup>, altura mínima de 272.404 msnm y altura máxima de 3244.74 msnm. Se encuentra controlada fluviométricamente por la estación Río Claro en Tunca (Ver Figura 4-2), vigente desde el año 1900. La estación se ubica a 34° 23' 08" S y 71° 06' 06" W.

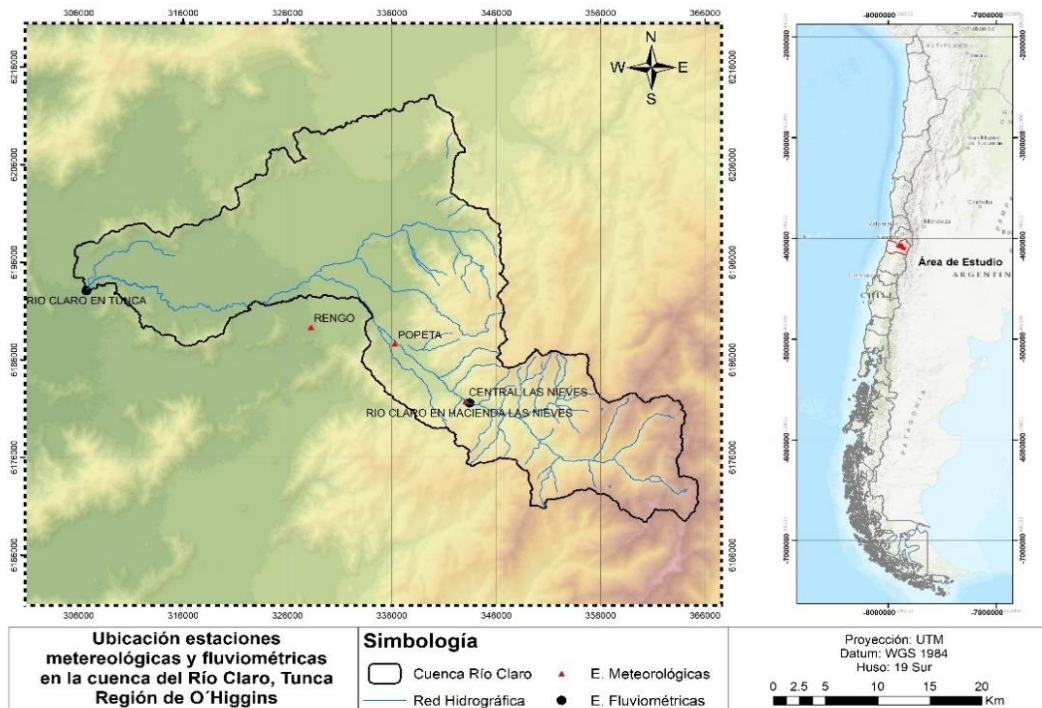


Figura 4-2: Delimitación de Cuenca del Río Claro en Tunca.

### 4.1.1 Clima

Según la dirección Meteorológica de Chile la diferencia de cotas que existe entre el punto más alto y el punto de salida de la cuenca influye en la distribución de las precipitaciones, provocando variaciones significativas en el clima a lo largo de toda la extensión de la cuenca. Las precipitaciones se concentran en las laderas occidentales de la cordillera de los Andes debido a que la cordillera de la Costa dificulta la entrada de los sistemas frontales hacia el valle central. El valle longitudinal, presenta un clima templado cálido con estación seca prolongada, por lo que la zona se caracteriza por veranos cálidos y secos e inviernos lluviosos [37].

Para caracterizar el clima local de la cuenca. La Figura 4-3 muestra un diagrama ombrotérmico de la estación de Rengo ubicada en el valle de la cuenca.

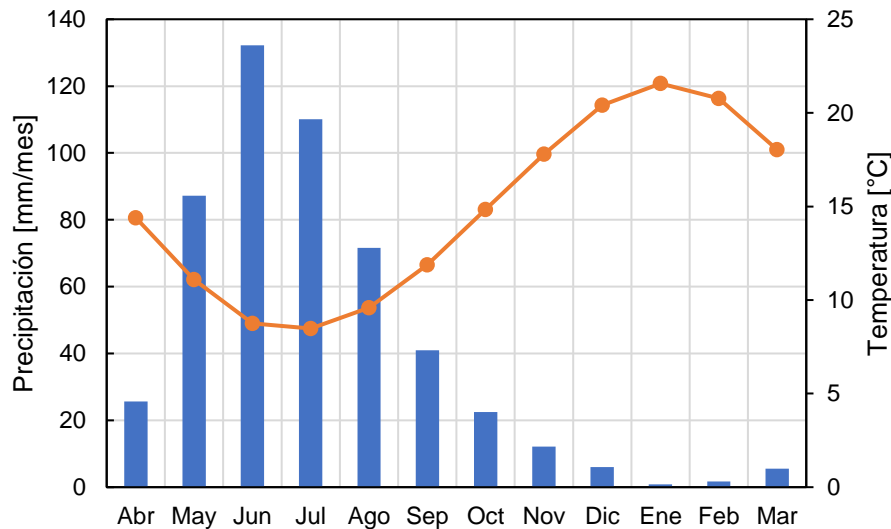
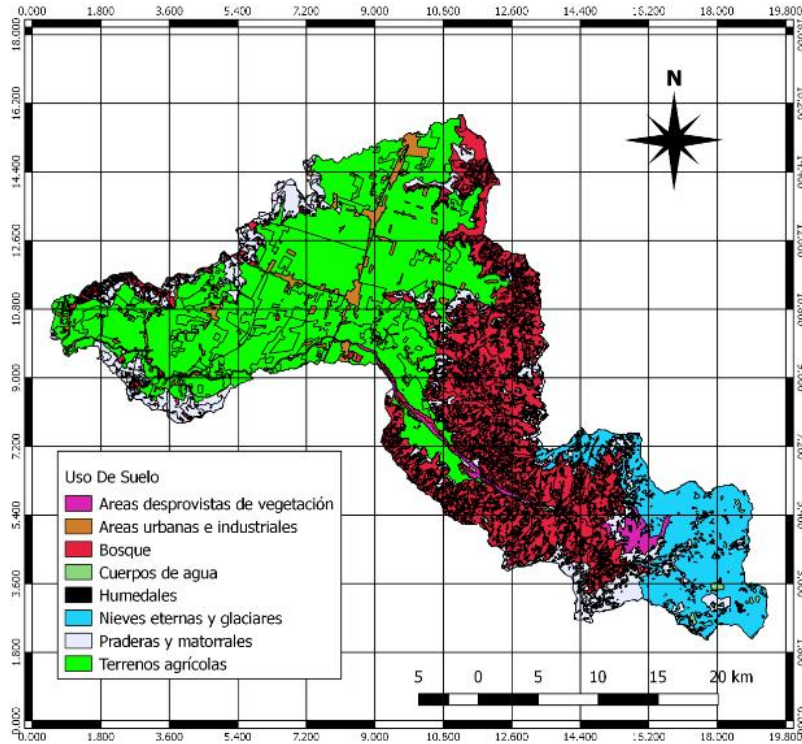


Figura 4-3: Diagrama ombrotérmico del periodo 1971-2018. Estación meteorológica Rengo.

### 4.1.2 Uso de suelo

Debido a la morfología de la cuenca el uso de suelo en ella es variado. Sin embargo, en el valle, la parte más baja de la cuenca, cuenta con terrenos agrícolas de gran extensión. A medida que la altitud de la cuenca va aumentando, las zonas agrícolas disminuyen y dan paso a extensiones de bosques y a pequeñas áreas de matorrales. En la parte alta de la cuenca predomina las nieves eternas y glaciares. En la cuenca no existen grandes ciudades, solo pequeños pueblos cerca de las rutas principales.

Los principales usos de suelo de la cuenca se muestran en la Figura 4-4 y detallados en la Tabla 4-1, todo esto basado en el catastro de uso de suelo y vegetación 2013 realizado por la Corporación Nacional Forestal.



**Figura 4-4:** Uso de suelo de la Cuenca Río Claro en Tunca.

**Tabla 4-1:** Clasificación de uso de suelo.

Uso de suelo	Área[km <sup>2</sup> ]	Porcentaje de cubrimiento [%]
Áreas desprovistas de vegetación	16.58	1.78
Áreas urbanas e industria	28.55	3.07
Bosque	280.61	30.15
Cuerpos de agua	1.57	0.17
Humedales	0.64	0.07
Nieves eternas y glaciares	107.42	11.54
Matorrales	118.72	12.75
Terrenos agrícolas	376.77	40.48
<b>Total</b>	<b>930.84</b>	<b>100</b>

### 4.1.3 Tipos de cultivos presentes en la cuenca

El valle de la cuenca cuenta con una variedad bien extensa de cultivos donde predominan los cultivos de tipo permanentes tales como la manzana y la uva de mesa. Por otro lado, el trigo es el cultivo rotativo de mayor extensión.

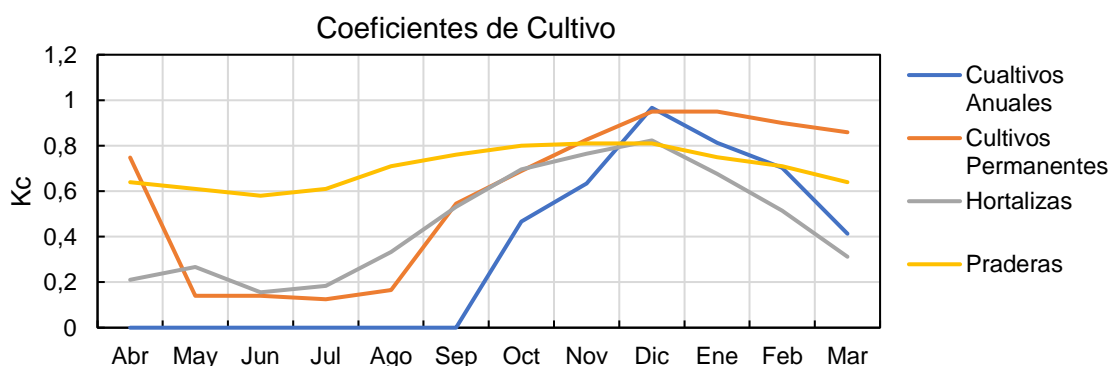
En base al Censo Agropecuario y Forestal 2007 [6], es que se puede determinar, de manera aproximada, los porcentajes de tipo de cultivo presente en toda la extensión de la cuenca según muestra la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Distribución de cultivos en la Cuenca Rio Claro en Tunca.

Rotativo	[%]	Permanente	[%]	Hortalizas	[%]	Praderas	[%]
Trigo	1	Almendro	3	Alcachofa	0	Alfalfa	9
Cebada	0	Cerezo	4	Apio	0	Trébol	7
Avena	0	Ciruelo	8	Ajo	1	----	----
Centeno	0	Damasco	0	Arveja	0	----	----
Maíz	27	Durazno	9	Cebolla	2	----	----
Otro Cereal	0	Kiwi	2	Choclo	1	----	----
----	----	Manzana	8	Ají	0	----	----
----	----	Naranja	1	Tomate	1	----	----
----	----	Nectarín	3	Otras Hortalizas	0	----	----
----	----	Nogal	4	----	----	----	----
----	----	Olivo	1	----	----	----	----
----	----	Palto	1	----	----	----	----
----	----	Uva de mesa	9	----	----	----	----
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>Total</b>	<b>50</b>	<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>Total</b>	<b>16</b>

Los coeficientes de cultivo mensuales fueron obtenidos de FAO [38] para cada cultivo presente en la cuenca. En base a esto, se llevó a cabo un promedio del valor de kc agrupados según tipo de cultivo (Rotativo, permanente, hortalizas y praderas). Esto se realizó con el fin de caracterizar con una sola curva de kc mensual cada tipo de cultivo.

En la Figura 4-5 representa la variación mensual del coeficiente de cultivo para cada tipo.



**Figura 4-5:** Coeficientes de Cultivos mensuales por tipo Cuenca Rio Claro en Tunca.

## 4.2 Embalse Los Cristales

Sobre la base de la cantidad de fondos disponibles por el gobierno alemán y considerando las dificultades en el normal abastecimiento de agua de riego que sufría el valle del río Claro de Rengo, ubicado aproximadamente a 110 Km al sur de Santiago, el Gobierno Chileno optó por desarrollar el área de este valle que cubría alrededor de 8.000 hectáreas cultivables. Durante este período se perforaron pozos profundos, se instalaron bombas y suministros de energía eléctrica mediante extensión de líneas, se planificó y ejecutó el camino de acceso a la Laguna de los Cristales, se confeccionó un plan de desarrollo agropecuario y se planificó la distribución del agua. La parte fundamental del proyecto fue, sin duda, la construcción del embalse Laguna de Los Cristales, cuyo proyecto fue desarrollado en Alemania y aprobado por la Dirección de Riego en Chile [39].

La altura máxima del muro principal es de 31 metros sobre la vaguada del río original, esto permite un almacenamiento de 8.5 Hm<sup>3</sup>. Mientras que su coronamiento tiene una longitud de 315 metros y un ancho de 14 metros. En el centro de la presa se ubica un vertedero de tipo frontal, cuya capacidad de evacuación es de 41.5 m<sup>3</sup>/s, con una carga de 1.5 metros. Se ha previsto un gasto máximo de entrega de 4.5 m<sup>3</sup>/s por cada tubo [39].

Con la construcción de este embalse ubicado en la cabecera de la cuenca, aseguró el riego en los periodos de verano de todo el valle.

Cabe destacar que en la actualidad se encuentra vigente el plan de pequeños embalses de riego realizado por la Dirección de Obras Hidráulicas, el cual contempla un proyecto de rehabilitación para el embalse Los Cristales<sup>2</sup>, que mediante el cierre de vertedero mediante Ruber Dam se logra peraltar el agua, aumentando la capacidad del embalse en 780000 m<sup>3</sup>.

La curva del embalse junto a la curva de evaporación se presentan en las figuras 4-6 y 4-7 respectivamente:

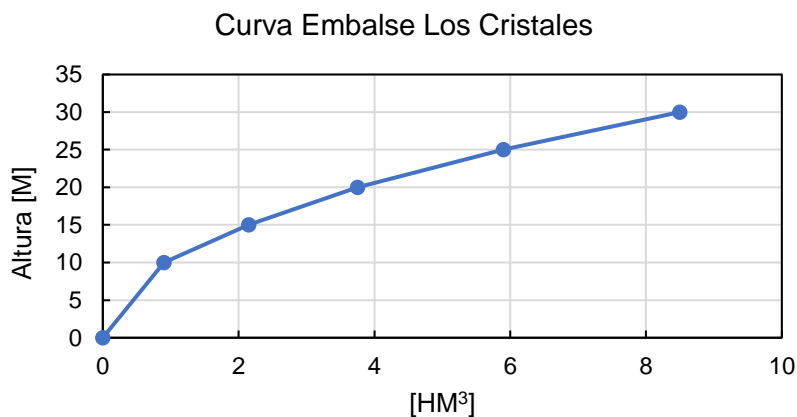


Figura 4-6: Curva de Embalse Los Cristales [39].

<sup>2</sup> Fuente: <https://slideplayer.es/slide/7102148/>.

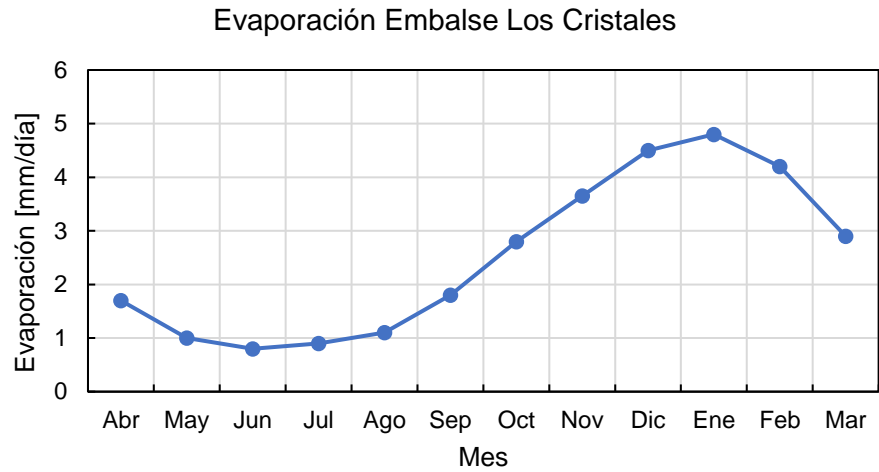


Figura 4-7: Evaporación de Embalse Los Cristales [39].

### 4.3 Información disponible

Para el análisis estadístico es necesario contar con la mayor información histórica tanto meteorológica como fluviométrica. Sin embargo, un inconveniente habitual es la ausencia de información en las partes montañosas, lo cual aumenta la incertidumbre y dificulta el análisis.

En la Figura 4-8 se presentan las estaciones disponibles en la zona de estudio.

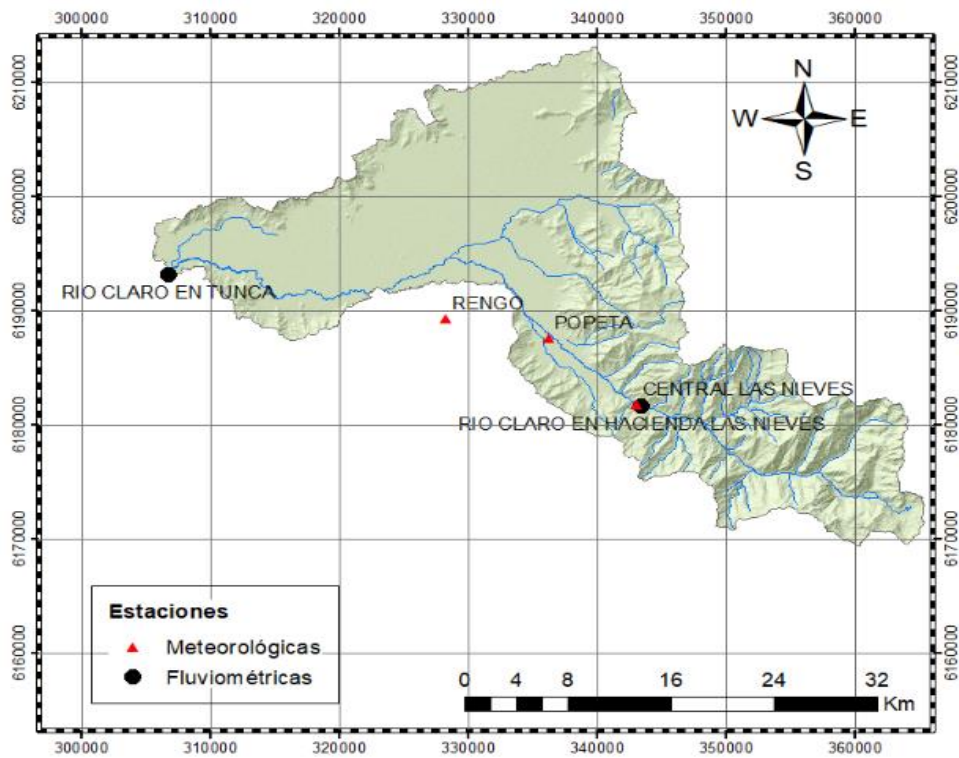


Figura 4-8: Estaciones disponible en la cuenca del Río Claro en Tunca.

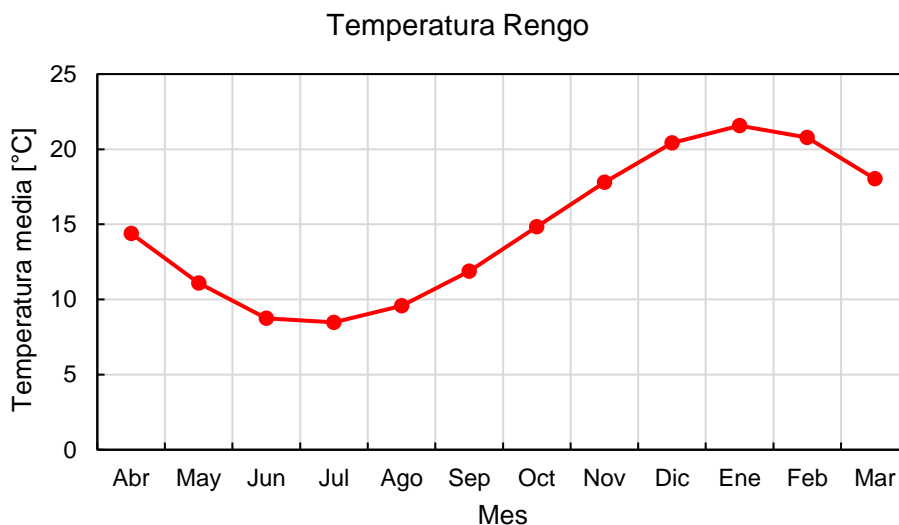
### 4.3.1 Temperatura

La información de temperatura disponible para el análisis se obtiene de los registros de las estaciones meteorológicas por la Dirección General de Aguas. Los detalles se presentan en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Estaciones de temperatura consideradas en el análisis.

Código	Nombre	Periodo de Instal.	Registro Suspen.	Altura [msnm]	UTM N [m]	UTM E [m]
06015003-6	Rengo	01/01/1970	/	310	6193990	330355

Si bien existen 3 estaciones meteorológicas en la cuenca, sólo la estación Rengo cuenta con registros de temperatura y su extensión va desde los años 1970 hasta el 2005. Esto es un inconveniente dado que, si se quiere evaluar los impactos del cambio climático frente a escenarios futuros, es necesario contar la información más actualizada posible.



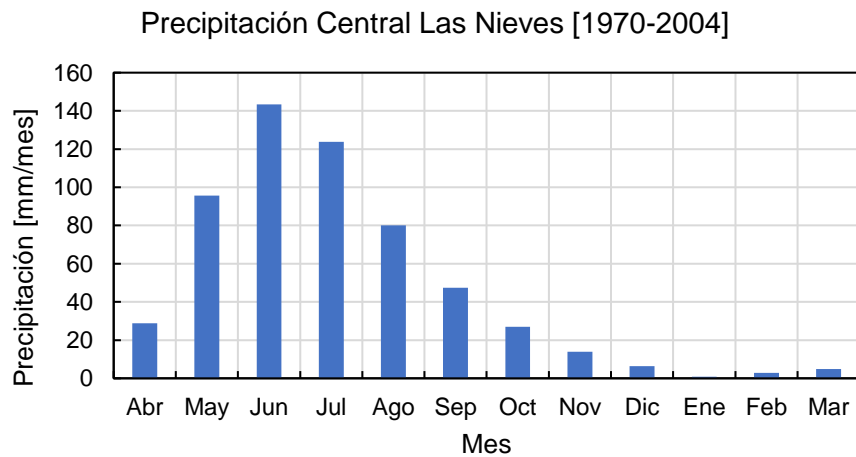
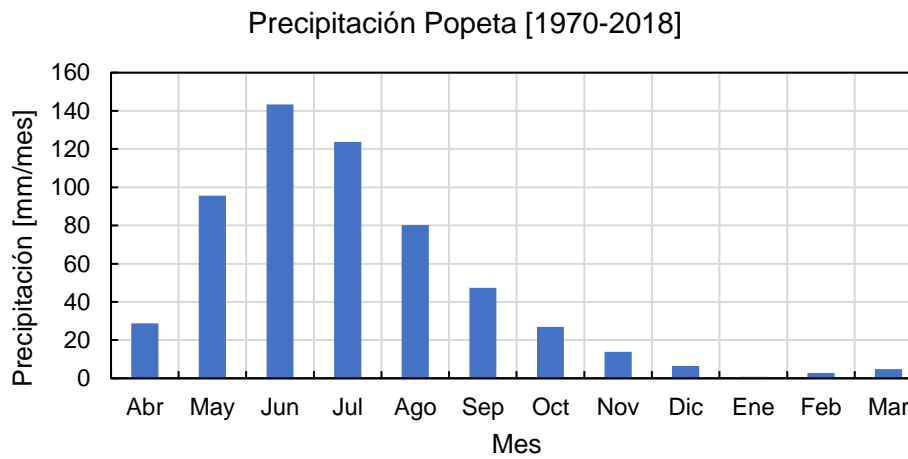
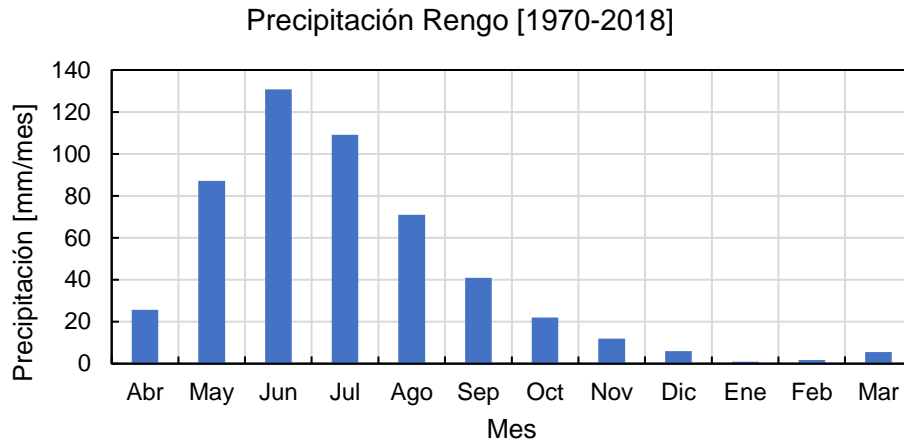
**Figura 4-9:** Temperatura promedio de las estaciones meteorológicas en el periodo 1970-2005.

### 4.3.2 Precipitaciones

La información de series de precipitaciones se obtiene de las estaciones controladas por la Dirección General de Aguas. Para el análisis es necesario tener un registro mensual de precipitaciones para la construcción del modelo. Tal como se puede ver en la Figura 4-8, la cuenca de estudio cuenta con 3 estaciones meteorológicas, todas las cuales tienen registros de precipitaciones. En la tabla 4-4 se presenta la información disponible en cada una de estas y en la Figura 4-10 se muestran los promedios mensuales de precipitaciones.

**Tabla 4-4:** Estaciones de precipitación consideradas en el análisis

Código	Nombre	Periodo de Instal.	Registro Suspen.	Altura [msnm]	UTM N [m]	UTM E [m]
06015003-6	Rengo	01/01/1970	/	310	6193990	330355
06013005-1	Popeta	01/03/1970	/	480	6187593	336355
06013006-K	Central Las Nieves	01/01/1971	14/12/2006	700	6181879	343037



**Figura 4-10:** Precipitación promedio de las estaciones meteorológicas.

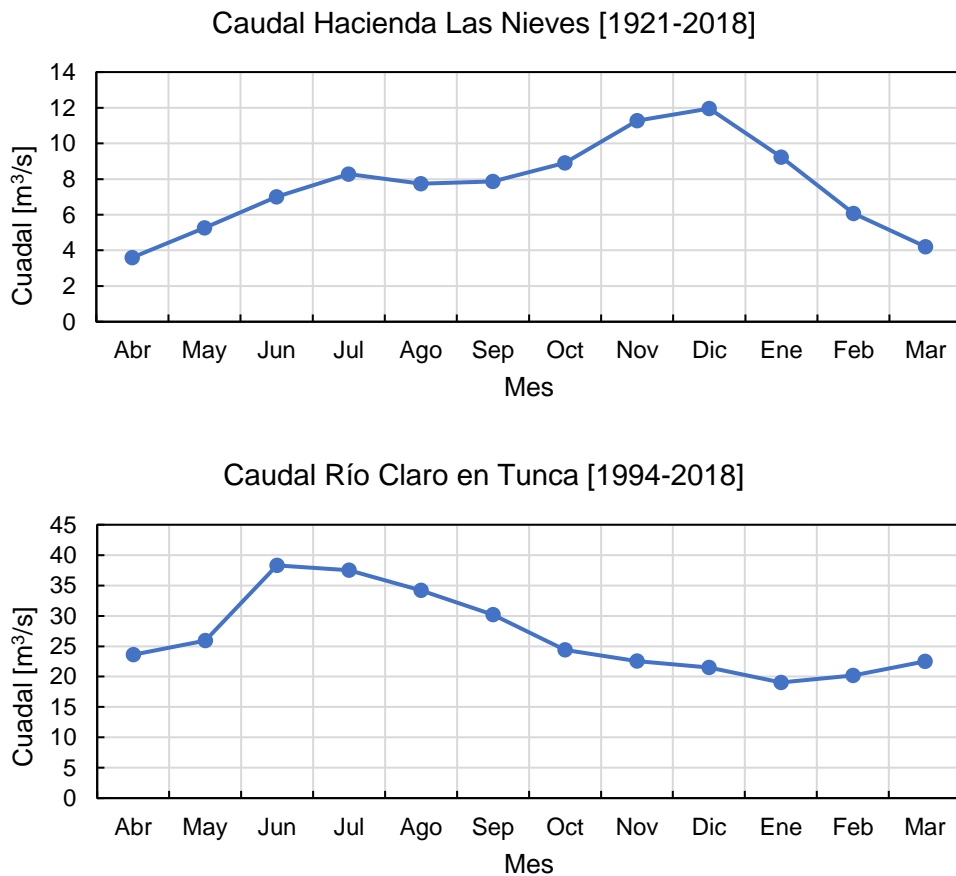
### 4.3.3 Registro de Caudales

Los caudales registrados por las estaciones son fundamentales para determinar la confiabilidad en las predicciones del modelo. La cuenca de estudio cuenta con dos estaciones fluviométricas una a la salida del embalse Los Cristales y la otra a la salida de la cuenca. En la Tabla 4-5 se muestra la información de estas estaciones.

**Tabla 4-5:** Estaciones fluviométricas consideradas en el análisis.

Código	Nombre	Periodo de Instal.	Registro Suspen.	Altura [msnm]	UTM N [m]	UTM E [m]
06015001-K	Río Claro en Tunca	01/01/1900	/	480	6193073	306756
06013001-9	Río Claro en Hacienda Las Nieves	01/03/1997	/	720	6181505	343485

En la Figura 4-11 se puede observar el cambio de régimen que existe producto al gran desnivel que hay entre el punto de salida y la parte más alta de la cuenca, pasando desde un régimen nivo-pluvial en la zona alta a un régimen pluvial en el valle de cuenca.



**Figura 4-11:** Caudales promedio de las estaciones fluviométricas.

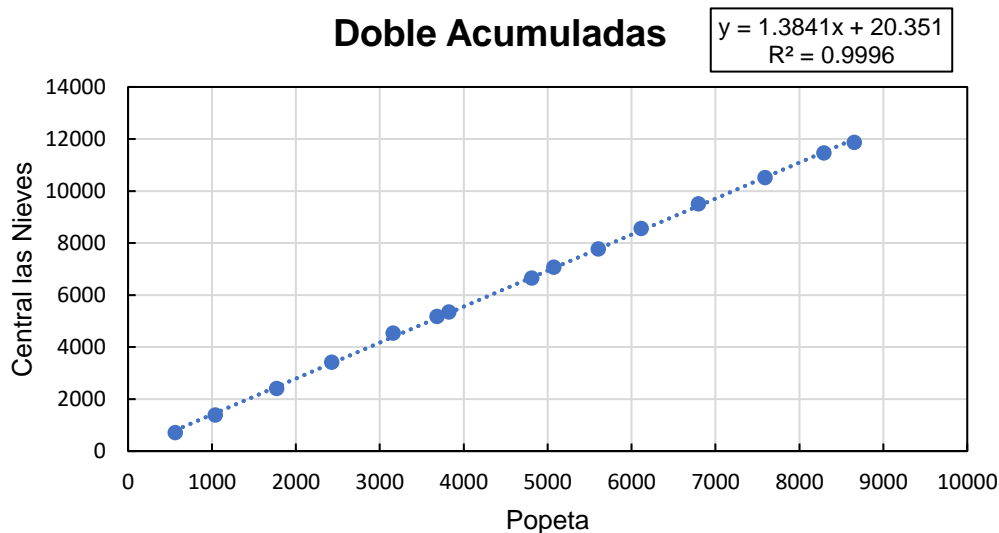
## 5. Relleno estadístico de variables meteorológicas

### 5.1 Precipitación

La estación meteorológica Central Las Nieves solo cuenta con datos de precipitación hasta el año 2004, es por esto que se utilizó la estación de Popeta para la extensión de datos hasta el año 2016.

Para precipitaciones anuales, la extensión de serie faltante de la estación Central Las Nieves se realizó mediante la expresión de la curva doble acumulada que se muestra en la Figura 5-1.

Como se muestra en la Figura 5-1, los valores de precipitación anual de ambas estaciones siguen un comportamiento casi lineal. Esta buena correlación muestra que ambas estaciones meteorológicas están situadas en una zona pluviométricamente homogénea, es decir, que se encuentran sometidas al mismo régimen de precipitaciones.



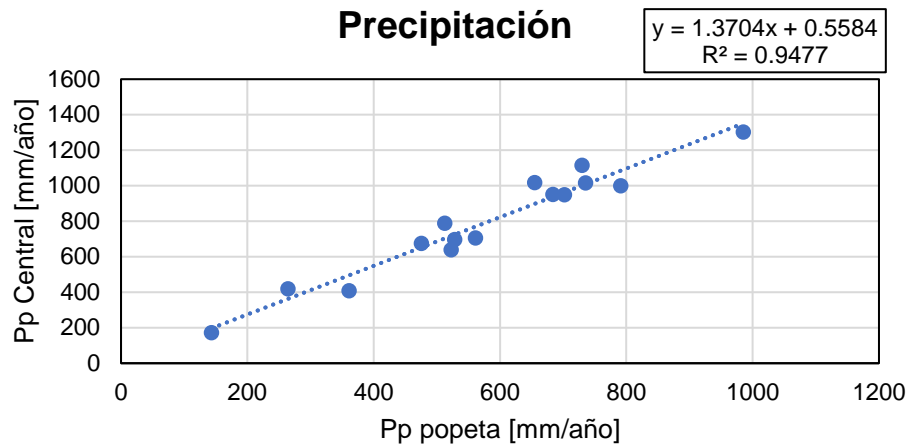
**Figura 5-1:** Doble acumulada de Precipitaciones entre los años 1990-2004.

Esto se confirma cuando se analiza los días en los cuales no ocurre el mismo evento para ambas estaciones. En el periodo 1990-2004 con un total de 5479 días analizados, solo 160 días no hubo consistencia en las precipitaciones, representado esto un 3% de las veces dentro del periodo analizado.

Para la ampliación de la estadística se utilizó lo sugerido en Taller de Hidrología Aplicada de la DGA [40] donde uno de los métodos que entrega los mejores resultados para el relleno y extensión de precipitaciones para una estadística corta (15 o menos años) es efectuar una correlación lineal entre las estaciones.

Como se ve en la Figura 5-2, el valor del coeficiente de determinación  $R^2=0.9477$  y el intercepto es muy pequeño siendo un reflejo de homogeneidad de ambas estaciones.

Con la pendiente de la curva de correlación se rellena los años faltantes de la estación Central Las Nieves.



**Figura 5-2:** Correlación lineal de precipitación anual.

Una vez efectuado la extensión anual de las precipitaciones de la estación Central Las Nieves para los años 2005-2016, se utilizó el mismo método de correlación lineal para la extensión mensual.

Cabe destacar que utilizar este método para la extensión mensual de precipitaciones, la dispersión aumenta al disminuir el tiempo de observación. Sin embargo, las correlaciones mensuales son bastante altas, caracterizadas por valores de  $R^2$  que van entre 0.65 hasta 0.99.

Realizada la extensión de los meses de la estación Central Las Nieves para el periodo 2005-2016, se realiza un ajuste en las precipitaciones mensuales para que estas coincidan con los valores de precipitaciones anuales obtenidos en la extensión anual.

## 5.2 Temperatura

En el caso de la temperatura, la cuenca solo cuenta con la estación meteorológica Rengo. Sin embargo, los registros de esta estación llegan hasta el año 2010.

En las cercanías de la cuenca no se encuentran estaciones meteorológicas con datos actuales de temperatura para efectuar la extensión de la serie de tiempo de la estación Rengo.

Es por esto que se utilizó la plataforma CAMELS-CL [41], la cual cuenta con una base de datos que contiene información sobre la hidrología, meteorología y una serie de atributos integrados para cerca de 531 cuencas a lo largo del país.

Para la cuenca del Río Claro en Tunca, Camels utiliza la base de datos de la plataforma CR2met<sup>3</sup> [41] la cual utiliza para generar una modelación de temperatura hasta el año 2016. Sin embargo, Camels distribuye esta variable meteorológica de manera que sea uniforme en toda la extensión de la cuenca, siendo imposible obtener la temperatura para una altura determinada.

No obstante, se utiliza la temperatura de esta plataforma para la extensión de la serie de tiempo de la estación de Rengo suponiendo que esta puede representar de buena manera los eventos de temperatura presentes en la zona.

Para el relleno se utilizó una correlación lineal entre los datos de Camels y la estación Rengo, obteniendo valores de  $R^2$  que van desde 0.55 hasta 0.7.

<sup>3</sup> Plataforma que contiene información meteorológica (precipitación y temperatura) mediante una grilla rectangular para el territorio de Chile en el periodo 1979-2016 [42].

## 6. Modelación hidrológica

### 6.1 Construcción del modelo

Para la modelación de la cuenca en estudio se utilizó el programa WEAP en su versión 2019.1.

De modo de representar la cuenca se construyen un total de tres modelos; dos contruidos a partir de las estaciones fluviométricas y uno que representa el caudal proveniente de las quebradas de la cuenca.

La estación fluviométrica Río Claro en Hacienda Las Nieves, dará origen al primer modelo el cual delimita la cuenca cabecera del Embalse los Cristales. El proceso de calibración se extenderá entre los años 1990 y 2008, mientras que el proceso de validación del modelo contempla el periodo 2009 a 2016.

El segundo modelo se llevó a cabo sobre la cuenca generada por la estación Río Claro en Tunca, considerando como entrada el caudal de llegada obtenido en el modelo de la cuenca de cabecera. Los años de calibración del modelo van desde el año 1994 hasta 2009 y la validación del modelo entre los años 2010 y 2016.

Para representar de mejor manera la configuración de flujo presente en la cuenca (Ver Figura 6-1), se crea el tercer modelo denominado Subcuenca del Estero Tipaume. Este modelo tiene como fin representar el flujo que aportan las quebradas de la cuenca para posteriormente ser incorporados al cauce principal. Por otro lado, la creación de este modelo también permite caracterizar de mejor manera la distribución de derechos de agua que existe para los canales presentes en la cuenca.

Este modelo no cuenta con un periodo de calibración ni validación, dado que no cuenta con una estación que registre el caudal proveniente de las quebradas.

En la Figura 6-1 se muestra la división de los tres modelos empleados.

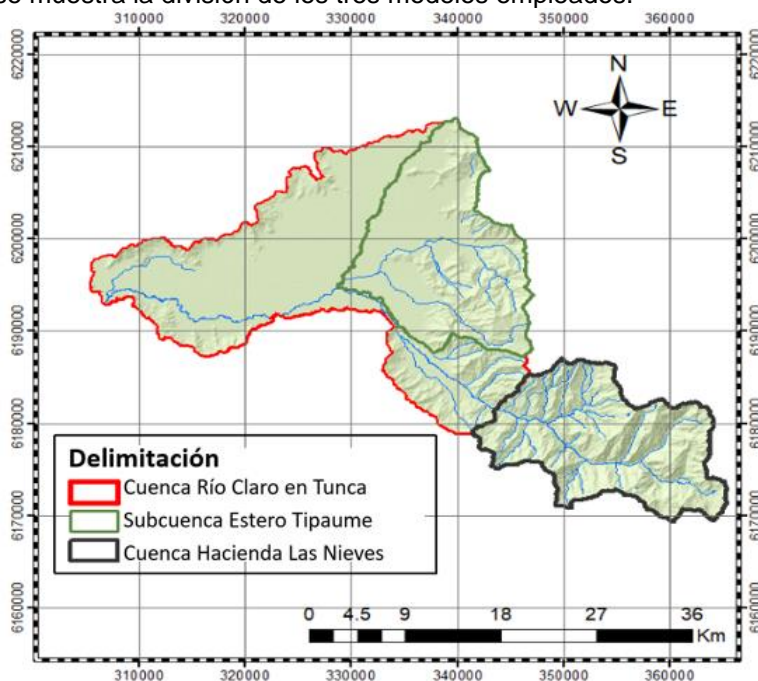


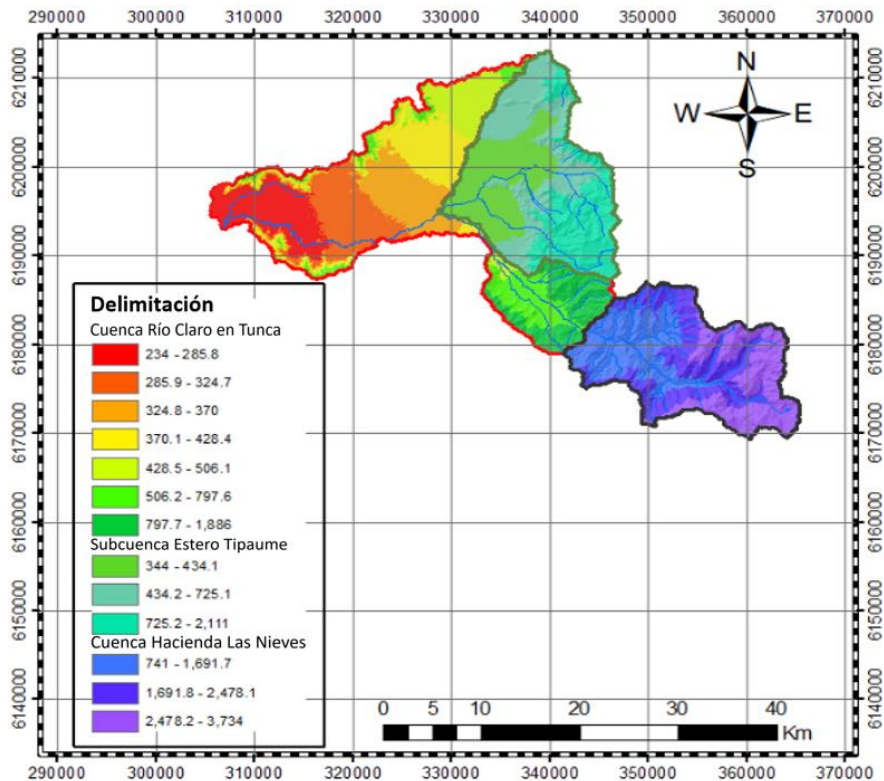
Figura 6-1: Delimitación de modelos.

Para caracterizar cada modelo, se divide la cuenca entera en un total de 13 bandas de elevación, a las cuales se les asignan características meteorológicas y de uso de suelo.

En la Tabla 6-1 se presentan las características de cada banda y en la Figura 6-2 la distribución de estas.

**Tabla 6-1:** división de bandas de elevación.

Modelo	Banda	Elevación banda [msnm]	Elevación media [msnm]	Área [Km <sup>2</sup> ]
Río Claro en Tunca	1	234-286	256	58.7
	2	286-325	205	65.5
	3	325-370	347	63.6
	4	370-428	399	60.2
	5	428-506	467	56.9
	6	506-798	652	55.7
	7	798-1886	1342	54.1
Subcuenca Estero Tipaume	8	334-434	384	88.5
	9	434-725	580	94.2
	10	725-2111	1418	88.3
Cuenca Hacienda Las Nieves	11	741-1692	1216	80.9
	12	1692-2478	2085	82.7
	13	2478-3734	3106	81.4



**Figura 6-2:** Bandas de elevación Cuenca Río Claro en Tunca.

## 6.2 Distribución espacial de variables

### 6.2.1 Precipitación

Para la distribución de la precipitación en la cuenca Hacienda Las Nieves, se obtuvo un gradiente mensual a partir de las estaciones Popeta y Central las Nieves (Ver Tabla 6-2). Por lo tanto, la precipitación en cada banda en dicha cuenca queda determinada por la Ecuación (6-1).

$$Pp_{banda} = Pp_{Central} + G * h \quad (6-1)$$

Donde  $h$  es la altura media de cada banda de elevación.

**Tabla 6-2:** Gradientes de precipitación mensual.

<b>Altitud [msnm]</b>	480	700	<b>G</b> [mm/msnm]
<b>Estación</b>	<b>Popeta</b>	<b>Central</b>	
<b>Ene</b>	1.2	1.8	0.003
<b>Feb</b>	4.1	4.5	0.001
<b>Mar</b>	4.6	4.7	0.000
<b>Abr</b>	36.0	47.8	0.054
<b>May</b>	82.8	112.3	0.134
<b>Jun</b>	137.6	195.6	0.264
<b>Jul</b>	90.3	127.5	0.169
<b>Ago</b>	78.7	105.6	0.122
<b>Sep</b>	46.4	65.9	0.089
<b>Oct</b>	25.4	26.9	0.007
<b>Nov</b>	9.7	15.1	0.024
<b>Dic</b>	7.1	10.2	0.014

Dado que, la precipitación no aumenta linealmente con la altura, se consideró un factor de reducción para las bandas 11 12 y 13 de manera de equiparar el volumen de salida de agua de la cuenca, dando como resultado las siguientes precipitaciones anuales (Ver Tabla 6-3).

**Tabla 6-3:** Factor de reducción de precipitación.

<b>Banda</b>	<b>F</b>	<b>Pp Anual [mm/año]</b>
13	0.77	1635
12	0.82	1296
11	0.86	896

Para tener una comparación se realizó un análisis de las isoyetas obtenidas en el Balance Hídrico Nacional [43] en el año 1987, donde en la Figura 6-3 se pueden observar los valores de la precipitación anual promedio.

En la actualidad, la región de O'Higgins lleva más de diez años consecutivos con una pérdida del 25% de las lluvias para el sector agrícola [44]. Con esto se espera que los valores de las isoyetas hayan disminuido, lo cual hace necesario ajustar la distribución de precipitación en la cuenca con los

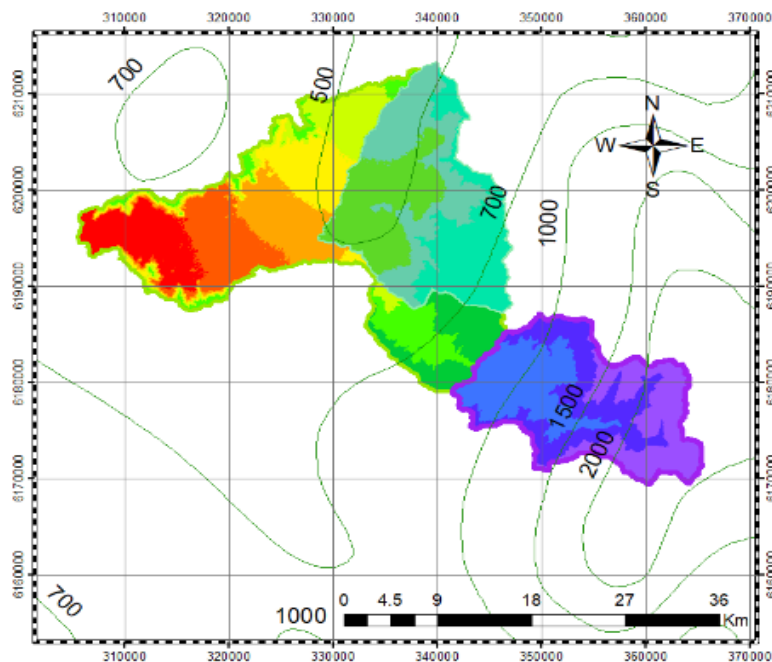
factores F de Tabla 6-3 para representar de mejor manera un escenario más actual de precipitaciones en la zona.

Para las bandas de la Cuenca Río Claro en Tunca y su Subcuenca, dado que la diferencia de altura que hay entre las bandas y la altura que tienen las estaciones meteorológicas no es tan amplia, se distribuye la precipitación en base a la influencia que tienen las estaciones en cada banda excepto para las bandas 7 y 10 donde se utiliza el gradiente presentado en la Tabla 6-2.

En la Tabla 6-4 se muestra la distribución de precipitaciones de este modelo.

**Tabla 6-4:** Distribución de precipitaciones para modelos: Río Claro en Tunca y Espero Tipaume

Modelo	Banda	Elevación media [msnm]	Estación	Gradiente
Río Claro en Tunca	1	256	Rengo	No
	2	205	Rengo	No
	3	347	Rengo	No
	4	399	Rengo	No
	5	467	Popeta	No
	6	652	Central	No
	7	1342	Central	Si
Subcuenca Estero Tipaume	8	384	Rengo	No
	9	580	Popeta	No
	10	1418	Central	Si



**Figura 6-3:** Isoyetas Cuenca Río Claro en Tunca [43].

### 6.2.2 Temperatura

La distribución de la temperatura a lo largo de toda la extensión de cuenca se hace realmente algo necesario dado que el desnivel que existe entre el punto más alto y el punto de salida de la cuenca es bastante grande.

Figuroa en el año 2008 [45] logra caracterizar el comportamiento de la temperatura en respuesta a la variación de altura en la zona de Cachapoal mediante gradientes térmicos. Siendo estos gradientes  $-5.4$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ ] para días sin lluvia y  $-2.1$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ ] para días con lluvia.

Por lo tanto, la distribución de la temperatura queda definida para cada banda mediante la siguiente ecuación:

$$T_{banda} = T_{rengo} + G * h \quad (6-2)$$

### 6.2.3 Humedad relativa

La estación meteorológica de Rengo es la única estación que cuenta con datos de humedad relativa en la zona de estudio, es por esto que este parámetro se considera constante a lo largo de toda la extensión de la cuenca.

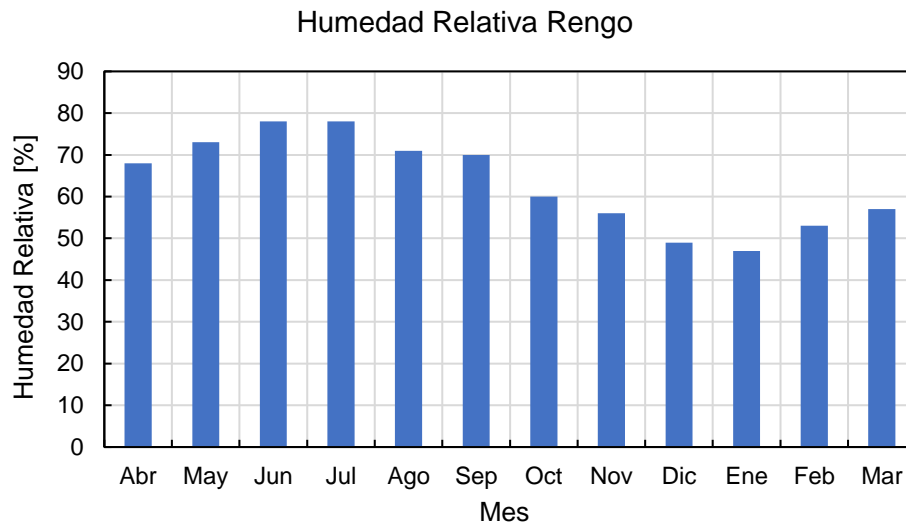


Figura 6-4: Humedad relativa promedio mensual.

### 6.2.4 Viento

Al no contar con una estación cercana con datos de velocidad de viento, estos se obtienen a partir del Explorador de Energía Eólica, plataforma desarrollada por la Universidad de Chile.

Este Explorador presenta un mapa de viento de todo Chile, realizado a partir de simulaciones numéricas por el modelo WRF (Weather Research and Forecasting). La información que entrega esta plataforma permite determinar la velocidad del viento promedio en cualquier punto de Chile [46].

En el caso de la zona de estudio, se obtienen las velocidades promedio mensual de cada banda de elevación mediante sus respectivas coordenadas.

## 6.2.5 Demanda de agua

La junta de vigilancia de la Primera y Segunda sección de Río Claro en Rengo se encarga de distribuir el recurso hídrico a través de canales para abastecer las demandas de riego que tienen los agricultores de la zona. Los derechos de agua son entregados en acciones, la cual equivale a 1.6 l/s [26].

Para efectos de modelación, se identifican los canales que están presentes en cada banda y se toma como un solo gran canal llevando agua del río hacia los sitios de demanda, este procedimiento se lleva a cabo mediante los unifilares [47] de cada sección del río los cuales se pueden ver en el Anexo 1.

La Tabla 6-4 muestra la demanda de agua que tiene cada banda y sus canales asociados. Se asume una demanda constante a lo largo del año

**Tabla 6-5:** Demanda por banda de elevación.

Banda 1			Banda 5		
Fuente	Acciones	Caudal (m3/s)	Fuente	Acciones	Caudal (m3/s)
Estero Paso de Piedra	-	2.3	C. Córdova	30	0.1
Estero Guacarhue	-	11.9	C. Mira	30	0.1
C. del Cerro	185.5	0.3	C. el Peñón	763	1.2
C. Palmino	109.4	0.2	C. Lorenzoni	146.7	0.2
C. Carrizal	58.6	0.1	C. Pedregal	150	0.2
C. Alegría	46.7	0.1	C. Judas	20	0
C. Farías Machuca	84.7	0.1	C. Petril	150	0.2
C. Punta de Tunca	895.7	1.4	<b>Total</b>	<b>1289.7</b>	<b>2.1</b>
C. Molino de Tunca	245.6	0.4	Banda 6		
<b>Total</b>	<b>1626.2</b>	<b>16.8</b>	Fuente	Acciones	Caudal (m3/s)
Banda 2			C. Bollenar	20	0
Fuente	Acciones	Caudal (m3/s)	C. Las Islas	26	0
C. Panquehue	465.2	0.7	C. Popeta	784	1.3
C. San Pedro	327.7	0.5	C. Molina	81	0.1
<b>Total</b>	<b>792.9</b>	<b>1.3</b>	C. Talhuén	4	0
Banda 3			C. Bisquert	150	0.2
Fuente	Acciones	Caudal (m3/s)	C el Ricón	153.1	0.2
C. Santa Rita	37.1	0.1	<b>Total</b>	<b>1218.1</b>	<b>2</b>
C. Lo Cartagena	38.4	0.1	Banda 8		
C. San Luis	649.5	1	Fuente	Acciones	Caudal (m3/s)
C. Bisquertt	66	0.1	Estero Tipaume Bajo		1
C. Besoain	242.3	0.4	C. Molino	288	0.5
C. Manchenes	624.9	1	C. Molino Chico	71.9	0.1
C. San Alberto	1016.9	1.6	Estero Pichiguao	-	0.4
<b>Total</b>	<b>2675.1</b>	<b>4.3</b>	C Lo de Lobos	240	0.4
Banda 4			C. Mendoza	160	0.3
Fuente	Acciones	Caudal (m3/s)	<b>Total</b>	<b>759.9</b>	<b>2.6</b>
Agua Potable	146.7	0.2	Banda 9		
C. Población	1082.7	1.7	Fuente	Acciones	Caudal (m3/s)
C. Sta. Margarita	215.3	0.3	C. Chanqueahue	555.1	0.9
C. Urbina	40	0.1	Estero Tipaume Alto	-	1.9
C. Saavedra	30	0.1	C. Rominario	645.9	1
<b>Total</b>	<b>1514.6</b>	<b>2.4</b>	<b>Total</b>	<b>1201</b>	<b>3.8</b>

### 6.2.6 Distribución de cultivos

En la plataforma de Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE) del Gobierno de Chile, se encuentra disponible la información del Censo Agropecuario y Forestal 2007 [6], la cual se puede descargar en forma de capa vectorial.

En base a esta información se obtiene de manera aproximada la distribución de cultivos asociados a los derechos de agua de cada banda de elevación (Ver Tabla 6-6).

**Tabla 6-6:** Distribución de cultivos por banda de elevación.

Banda	Rotativo [%]	Permanente [%]	Hortalizas [%]	Praderas [%]	Otros [%]
1	35	45	8	6	6
2	38	43	7	6	6
3	31	50	6	6	7
4	28	52	5	8	7
5	22	58	6	7	7
6	20	59	3	12	6
8	20	60	6	7	7
9	21	58	2	13	6

## 6.2 Calibración de modelos

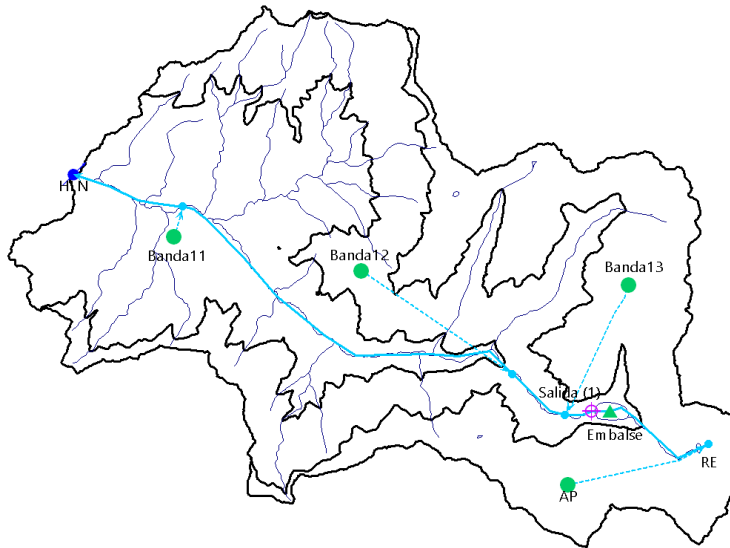
El objetivo principal que tiene el proceso de calibración es encontrar un conjunto de parámetros del modelo, para los cuales la serie de datos de caudal simulado se ajusta de la mejor manera a la información de caudal registrada en las estaciones fluviométricas. Este proceso de elección de parámetros se llevó a cabo de manera manual e iterativa.

Para aceptar los parámetros mostrados en la Tabla 6-7, se llevó a cabo un criterio de selección multiobjetivo de modo que los resultados de los criterios utilizados para evaluar el desempeño del modelo se encuentren en el rango de muy bueno y teniendo el cuidado de los valores que toman los parámetros del modelo para que estos sean físicamente posibles.

Cabe destacar que, para la calibración de los modelos, se tomó el año inicial como de calentamiento, es decir que este año de simulación se descartó del análisis para eliminar la influencia de los valores de partida sobre los resultados.

### 6.2.1 Modelo Hacienda Las Nieves

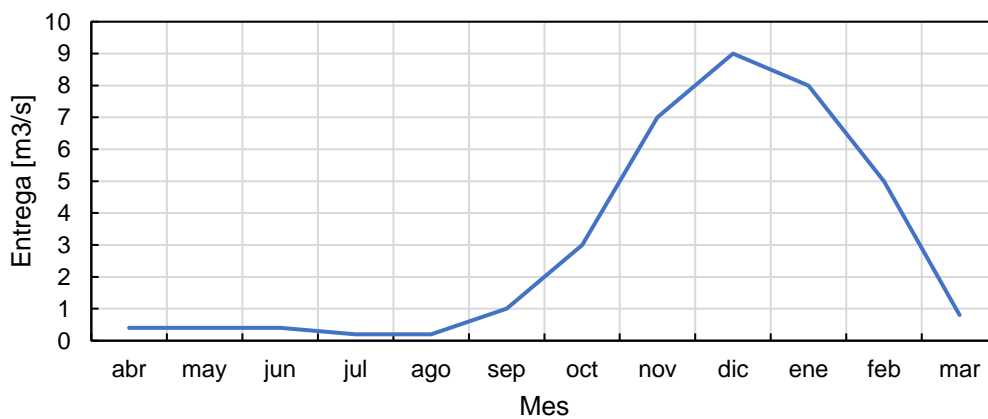
Como se mencionó anteriormente, el primer modelo queda delimitado por la estación fluviométrica Río Claro en Hacienda Las Nieves. Este modelo cuenta con 3 bandas de elevación (Bandas 11,12 y 13), donde cada una de estas bandas se caracteriza por Unidades Hidrológicas, las cuales tienen el objetivo de representar los parámetros meteorológicos y de uso de suelo de cada banda. La Unidad Hidrológica AP es la que representa el área aportante al embalse la cual es aproximadamente 28 km<sup>2</sup> y tiene los mismos parámetros que la unidad hidrológica Banda13(Ver Figura 6-5).



**Figura 6-5:** Esquema WEAP de modelo Hacienda Las Nieves.

El flujo de la cuenca se ve influenciado de gran manera por el embalse Los Cristales que como se mencionó en 3.2, permite un almacenamiento de  $8.5 \text{ Hm}^3$ . Cabe destacar que no se cuenta con la información sobre las entregas de caudal mensual a la salida del embalse, por lo que se supone una curva de entrega de caudal [26], donde para los meses de mayor demanda de agua por parte de los cultivos, se alcanza la capacidad máxima de entrega del embalse tal como se muestra en la Figura 6-6.

### Entregas de Embalse



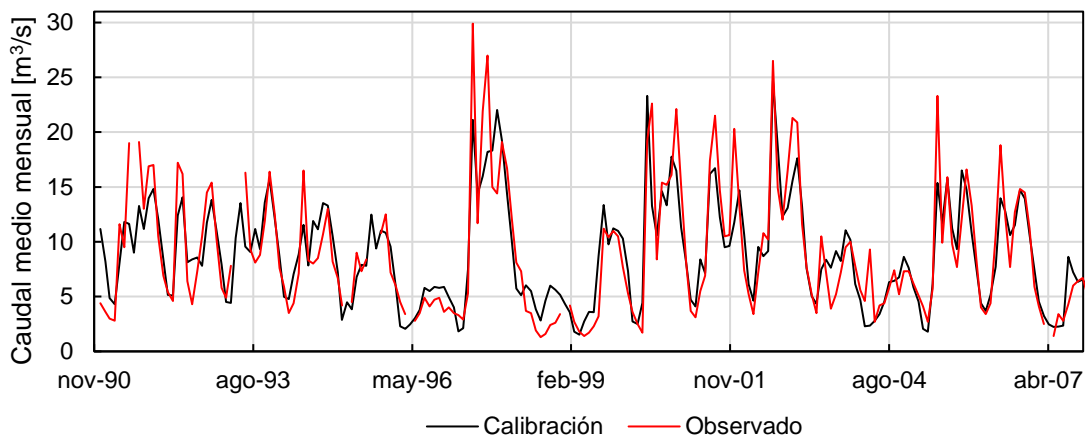
**Figura 6-6:** Curva de entrega mensual Embalse Los Cristales [26].

Los rangos de los parámetros utilizados para la calibración del modelo se muestran en la Tabla 6-7.

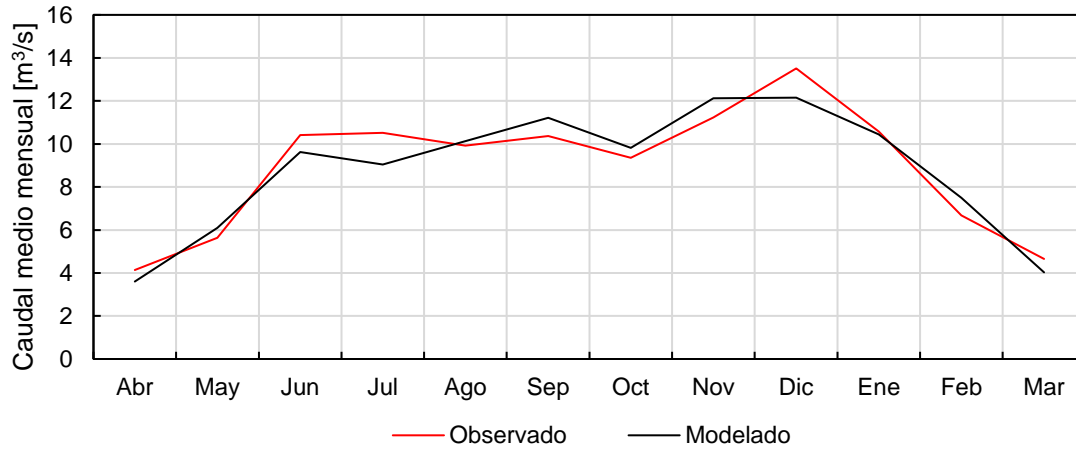
**Tabla 6-7:** Parámetros de modelo Hacienda Las Nieves.

Variable	Parámetro	Rango
<b>Meteorología</b>	Límite Superior Albedo [-]	0.6
	Límite inferior Albedo [-]	0.2
	Temperatura de congelamiento del agua [°C]	1.6
	Temperatura de derretimiento de nieve [°C]	8
<b>Uso de suelo</b>	Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces [mm]	100-1600
	Capacidad de almacenamiento en la zona profunda [mm]	2000-10000
	Factor de resistencia a la escorrentía [-]	1.7-2.75
	Conductividad de la zona de las raíces [mm/mes]	1000-1500
	Conductividad de la zona profunda [mm/mes]	8700-17400
	Dirección preferencial del flujo [-]	0.4-0.75
	Nivel de humedad inicial en la zona de raíces [%]	10
	Nivel de humedad inicial en la zona profunda [%]	10

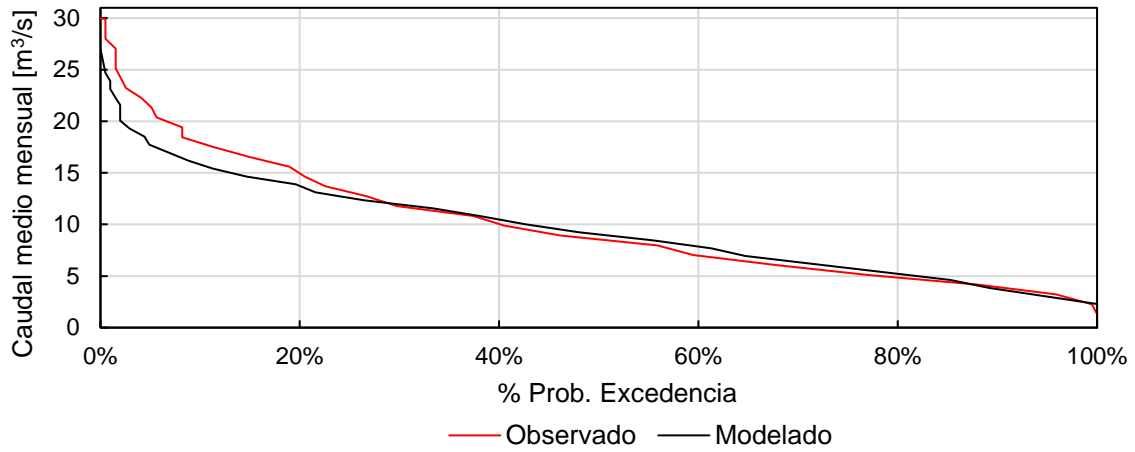
A continuación, en las Figuras 6-7 a 6-10 se presentan los resultados del proceso de calibración asociado a la estación pluviométrica Hacienda las Nieves. Se presenta en la primera figura, la serie de tiempo que incluye caudales simulados y observados en el periodo (1991-2007), luego el gráfico de caudales medios mensuales, la curva de duración de caudales y por último la correlación entre los valores de caudal durante todo el periodo de calibración. Las figuras permiten determinar de manera gráfica el desempeño del modelo y en la Tabla 6-8 se presentan los indicadores de eficiencia obtenidos.



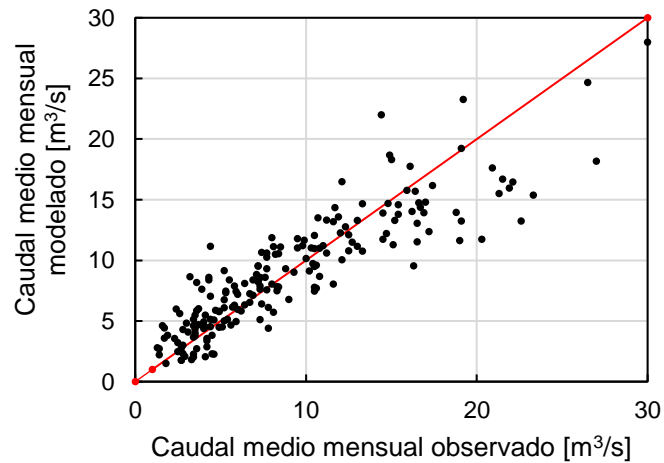
**Figura 6-7:** Serie de tiempo mensual de caudales para el periodo de calibración 1991-2007.



**Figura 6-8:** Promedio de caudales mensuales para el periodo de calibración.



**Figura 6-9:** Curva de duración de caudales para el periodo de calibración.



**Figura 6-10:** Correlación entre caudales mensuales para el periodo de calibración.

**Tabla 6-8:** Indicadores de desempeño para el periodo de calibración de modelo del Hacienda Las Nieves.

Periodo de calibración (1991-2007)					
Indicador	PBIAS	NS	Log NS	K-G	R2 mensual
Valor	1.01	0.79	0.76	0.71	0.77

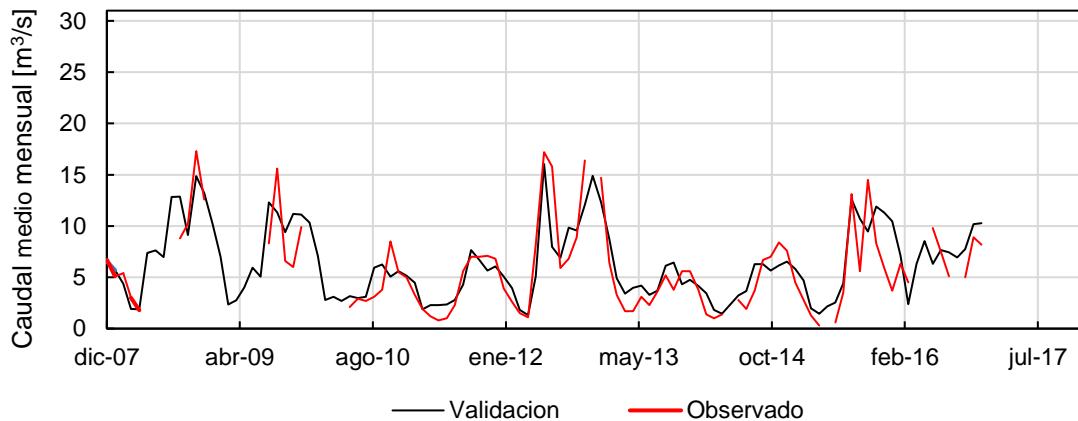
### 6.2.1.1 Comentarios de calibración

En base a los gráficos y el indicador PBIAS, se aprecia que existe una leve sub estimación en los caudales simulados. Si bien no hay un visible desfase en cuando a régimen de la cuenca (Ver Figura 6-8), existe una leve tendencia a disminuir los peaks tanto en periodo pluvial como deshielo. Esto se ve reflejado en la Figura 6-9 y 6-10, donde la mayor dispersión se encuentra en los caudales altos.

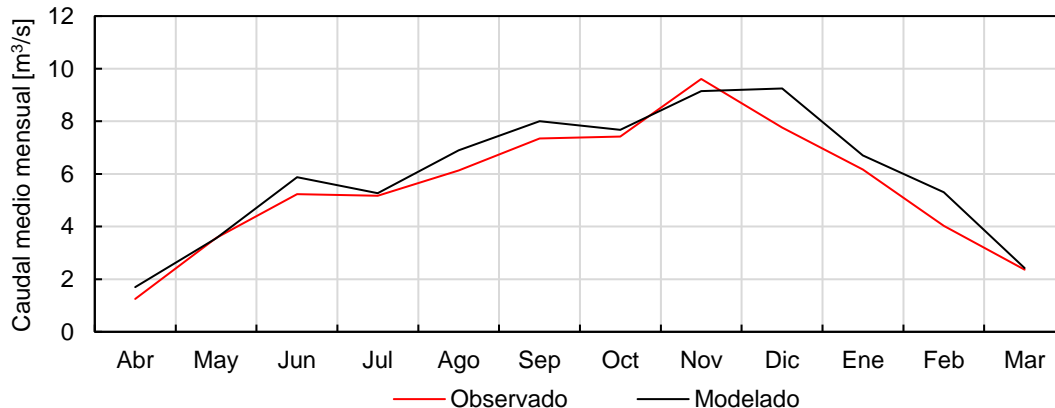
Esta dificultad que presenta el modelo se puede llegar a explicar en base a los parámetros de la Tabla 6-6, los cuales se mantienen constantes en todo el periodo lo que impide, por ejemplo, representar cambios que pueden suceder en las estaciones del año con respecto al uso de suelo.

### 6.2.1.2 Validación del modelo

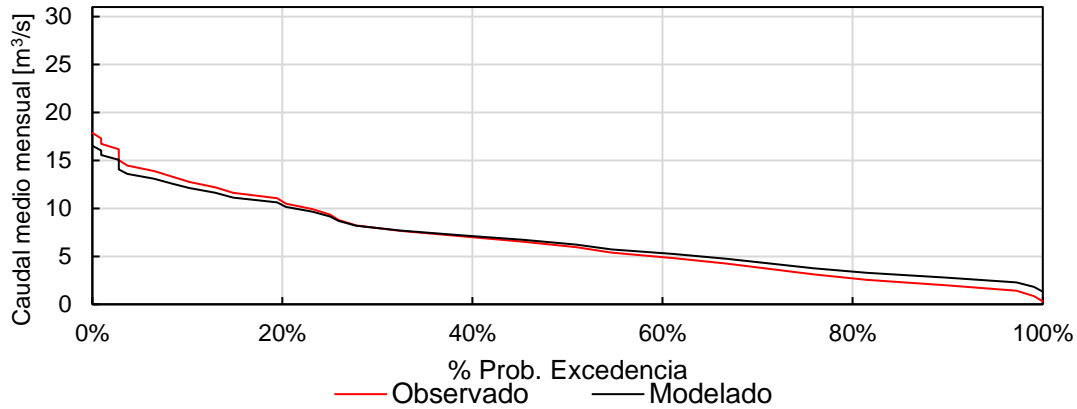
Para validar el modelo, se utilizan los parámetros finales de la calibración sin variar sus valores y una serie distinta de tiempo para las variables de entrada, que en este caso corresponden a las del periodo comprendido entre 2008 y 2016, los resultados obtenidos se presentan a partir la Figura 6-11 hasta la Figura 6-14 y en la Tabla 6-9.



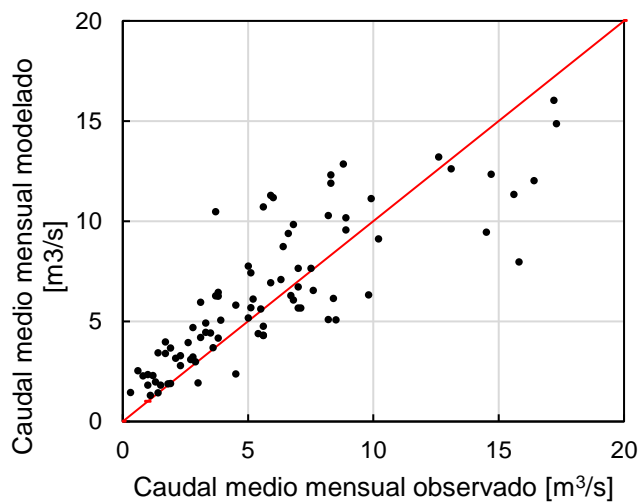
**Figura 6-11:** Serie de tiempo mensual de caudales para el periodo de validación 2008-2016.



**Figura 6-12:** Promedio de caudales mensuales para el periodo de validación.



**Figura 6-13:** Curva de duración de caudales para el periodo de validación.



**Figura 6-14:** Correlación entre caudales mensuales para el periodo de validación.

**Tabla 6-9:** Indicadores de eficiencia para el periodo de validación de modelo del Hacienda Las Nieves.

Periodo de validación (2008-2016)					
Indicador	PBIAS	NS	Log NS	K-G	R2 mensual
Valor	-7.8	0.71	0.67	0.7	0.7

### 6.2.1.3 Comentarios de validación

En los resultados se observa que, a diferencia de la calibración, existe una sobre estimación de caudales para los meses de verano, esto se puede ver de mejor manera en la Figura 6-12. Sin embargo, se alcanza de una mejor manera la representación de los peaks tanto en periodo pluvial como de deshielo.

El indicador Log NS es el que se ve más afectado en este periodo de validación (disminución), esto se ve reflejado en la Figura 6-14, donde para los caudales bajos existe una tendencia a la sobre estimación, pudiendo representar no de la mejor manera la disminución de caudal base que ha experimentado la cuenca en los últimos años.

Las Figuras 6-8 y 6-12 evidencia un cambio en el peak de deshielo en el periodo histórico, esto se justifica ya que entre ambos periodos (calibración y validación) hubo un aumento en la temperatura

promedio mensual, llegando a ser un 20% de aumento lo cual hace que el deshielo se produzca antes.

Estos pequeños cambios que ha experimentado la cuenca en su régimen de caudal no han sido representados de la mejor manera por el modelo y eso se ve reflejado en la disminución en los valores de los indicadores (Ver Tabla 6-10). Sin embargo, se logra un buen ajuste considerando la incertidumbre que añadió al modelo la extensión de datos meteorológicos.

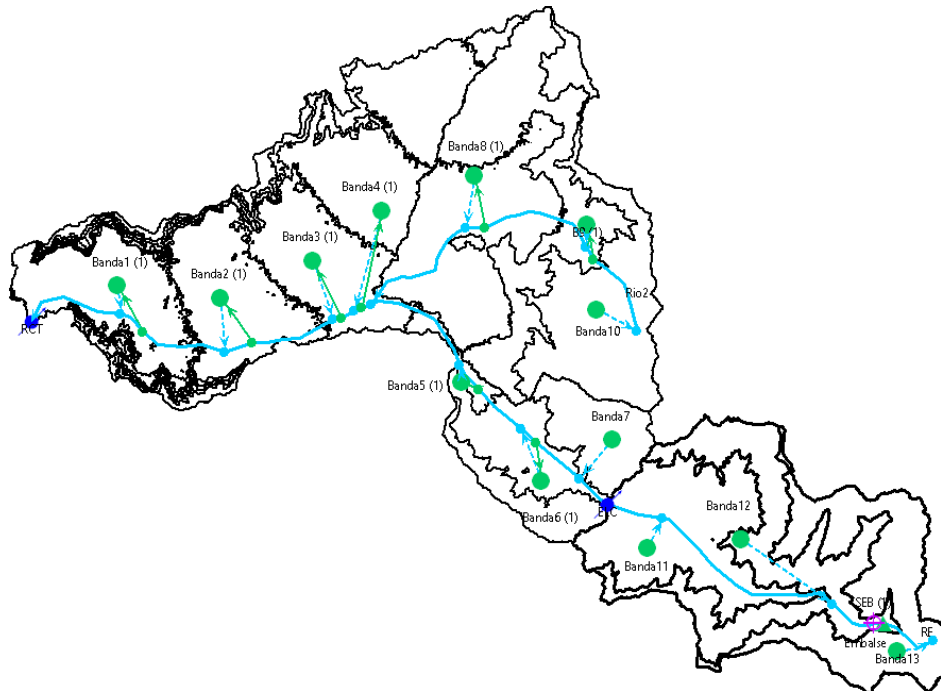
**Tabla 6-10:** Comparación de criterios de eficiencia, calibración - validación.

Indicador	Calibración	Validación
<b>PBIAS</b>	1.01	-7.8
<b>NS</b>	0.79	0.71
<b>Log NS</b>	0.76	0.67
<b>K-G</b>	0.71	0.7
<b>R2</b>	0.77	0.7

### 6.2.2 Modelo Cuenca Río Claro en Tunca

Este modelo cuenta con 13 bandas de elevación contando las bandas de la cuenca superior (Figura 6-15), cada banda de elevación se representa mediante una Unidad hidrológica y las bandas que poseen un derecho de agua (Ver Tabla 6-4), se le agrega una conducción de caudal la cual permite la extracción de dicho derecho del cauce, todas estas conducciones cuentan con la misma prioridad igual a 1.

Para este modelo se utilizó como entrada el caudal proveniente de la cuenca superior Hacienda Las Nieves, con los parámetros obtenidos en su respectivo proceso de calibración.



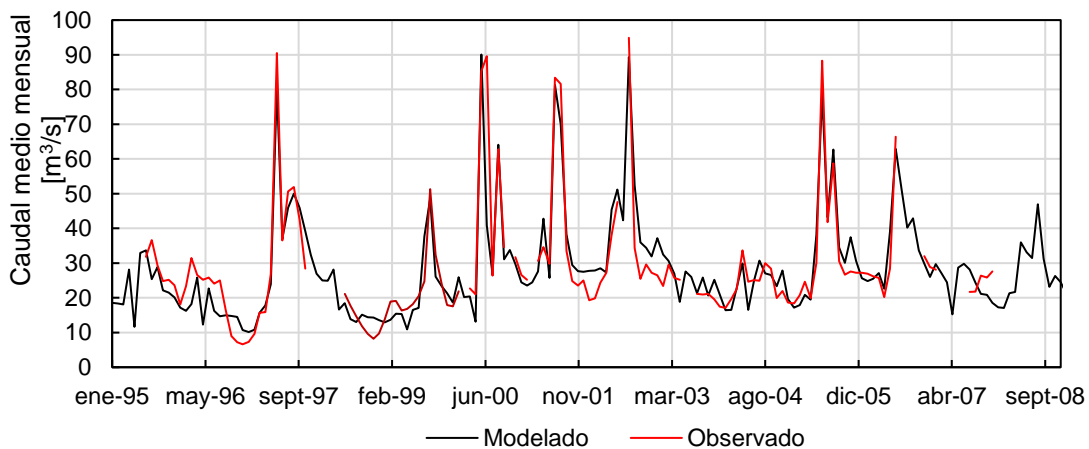
**Figura 6-15:** Esquema WEAP de modelo Cuenca Río Claro en Tunca.

**Tabla 6-11:** Parámetros de modelo Cuenca Río Claro en Tunca.

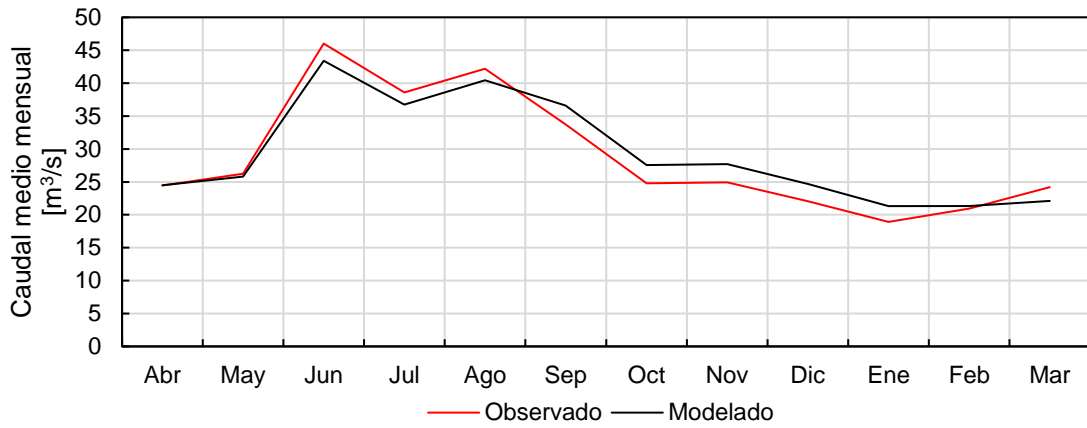
Variable	Parámetro	Rango
Meteorología	Límite Superior Albedo [-]	0.6
	Límite inferior Albedo [-]	0.2
	Temperatura de congelamiento del agua [°C]	1.6
	Temperatura de derretimiento de nieve [°C]	8
Uso de suelo	Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces [mm]	1000-8000
	Capacidad de almacenamiento en la zona profunda [mm]	5500-15000
	Factor de resistencia a la escorrentía [-]	2-3.5
	Conductividad de la zona de las raíces [mm/mes]	5000-18000
	Conductividad de la zona profunda [mm/mes]	13000-28400
	Dirección preferencial del flujo [-]	0.3-0.51
	Nivel de humedad inicial en la zona de raíces [%]	10
	Nivel de humedad inicial en la zona profunda [%]	10

Tanto la parte baja de la cuenca del Río Claro como la Subcuenca del Estero Tipaume (segundo y el tercer modelo) se construyen a partir de los parámetros que se muestran en la Tabla 6-11. Si bien el modelo del Estero Tipaume no se puede calibrar por la ausencia de estación fluviométrica, la asignación de los parámetros se realizó mediante la similitud que existe entre las elevaciones de las bandas que hay entre ambos modelos.

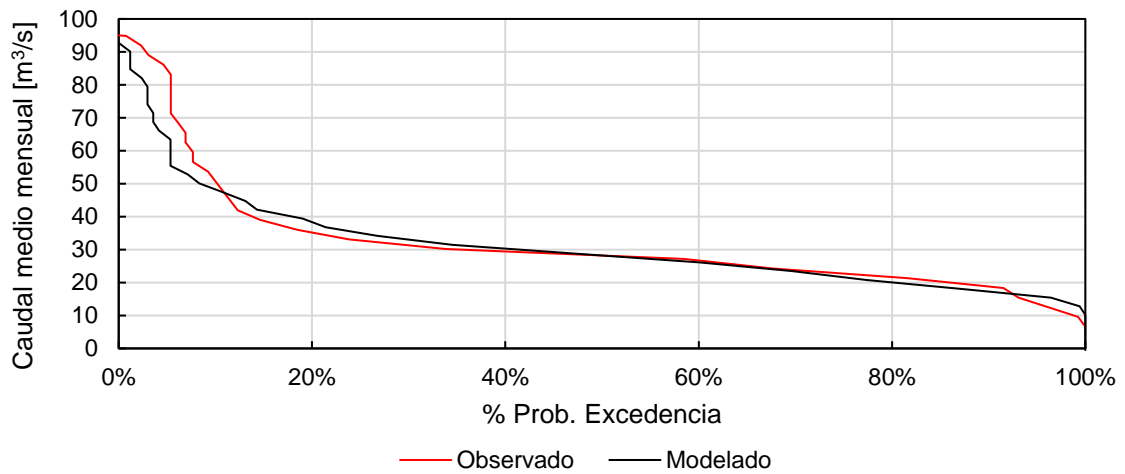
A continuación, se presentan los resultados del proceso de calibración asociado a la estación fluviométrica Río Claro en Tunca (Ver Figuras 6-16 a 6-19 y Tabla 6-12). El periodo de calibración contempla desde el año 1995 hasta el 2008.



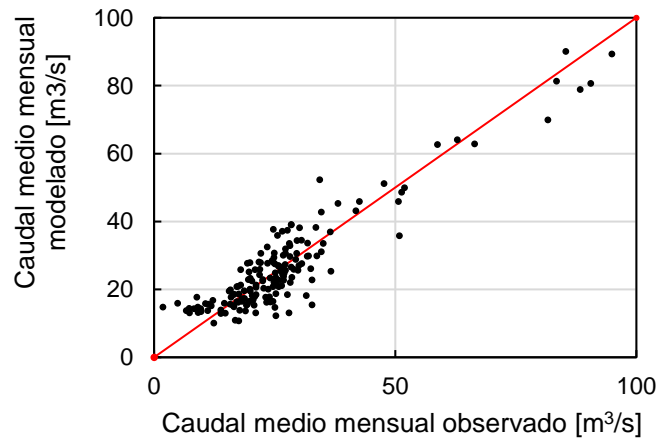
**Figura 6-16:** Serie de tiempo mensual de caudales para el periodo de calibración 1995-2008.



**Figura 6-17:** Promedio de caudales mensuales para el periodo de calibración.



**Figura 6-18:** Curva de duración de caudales para el periodo de calibración.



**Figura 6-19:** Correlación entre caudales mensuales para el periodo de calibración.

**Tabla 6-12:** Indicadores de eficiencia para el periodo de calibración de modelo Cuenca Río Claro en Tunca.

Periodo de calibración (1995-2008)					
Indicador	PBIAS	NS	Log NS	K-G	R2 mensual
Valor	0.19	0.84	0.76	0.83	0.84

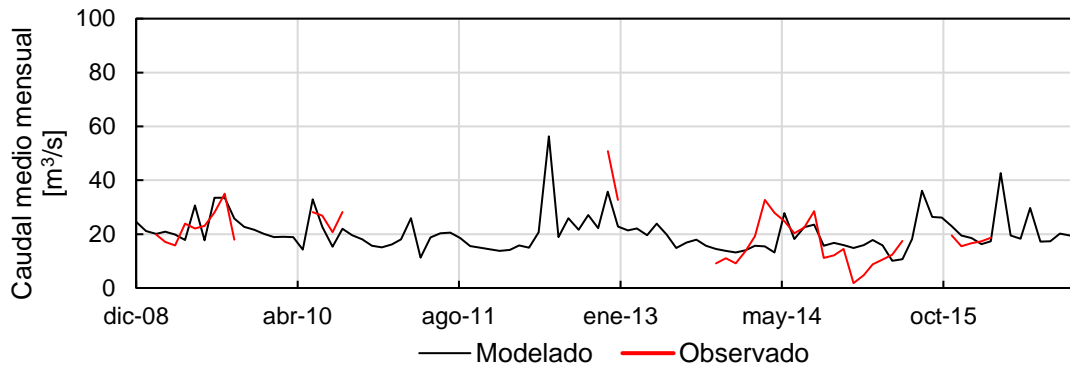
### 6.2.2.1 Comentarios de calibración

En el periodo de calibración, a nivel anual existe una mínima sub estimación de caudal mensual, reflejado en el bajo valor del indicador PBIAS. Se destaca el valor del indicador NS que tal como se ve en la Figura 6-16 y 6-19, los caudales peak son bien representados, mientras que en los caudales base hay una leve tendencia a la sobre estimación.

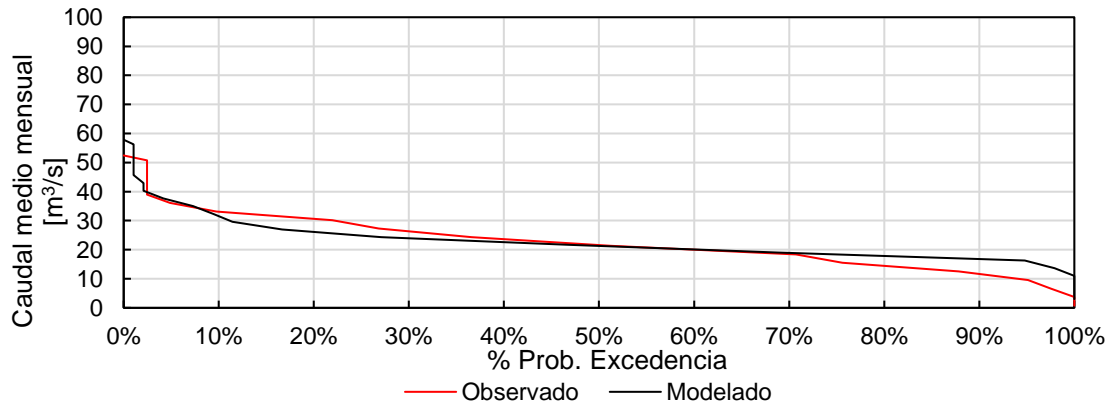
En general, el modelo es capaz de representar de buena manera los peak generados por el régimen pluvial de la cuenca. Sin embargo, el modelo sobre estima los caudales en los meses de verano, esto se puede apreciar claramente, en los meses de diciembre-enero del año 1996 en la serie de tiempo de la Figura 6-16.

### 6.2.2.2 Validación del modelo

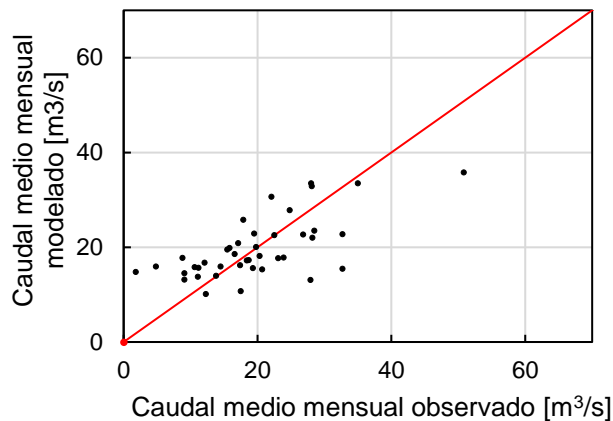
Para la validación del modelo se utiliza los parámetros finales ya calibrados para el periodo de tiempo comprendido entre 2009 y 2016, los resultados de la validación se presentan a continuación en las Figuras 6-20, 6-21 y 6-22, y en la Tabla 6-13. Cabe destacar que la ausencia de datos hace poco representativos los siguientes gráficos.



**Figura 6-20:** Serie de tiempo mensual de caudales para el periodo de validación 2009-2016.



**Figura 6-21:** Curva de duración de caudales para el periodo de validación.



**Figura 6-22:** Correlación entre caudales mensuales para el periodo de calibración.

**Tabla 6-13:** Indicadores de eficiencia para el periodo de validación de modelo de la Cuenca Río Claro en Tunca.

Periodo de validación (2009-2016)					
Indicador	PBIAS	NS	Log NS	K-G	R2 mensual
Valor	-0.04	0.751	0.63	0.59	0.5

### 6.2.2.3 Comentarios de validación

Tal como se muestra en la Figura 6-20, existe una evidente ausencia de registros por parte de la estación fluviométrica Río Claro en Tunca que hace muy difícil sacar conclusiones para este periodo de validación. Sin embargo, a nivel general existe sobre estimación de los caudales mensuales. Esto se evidencia con la bajada del indicador Log NS donde como se ve en la Figura 6-21 y 6-22, se sobre estiman los caudales base a partir de una probabilidad de excedencia de un 70%.

En la serie de tiempo (Ver Figura 6-20) se puede observar que las mayores diferencias entre lo observado y lo modelado se encuentran en los periodos sin precipitaciones, como es posible ver desde el año 2013 en adelante, donde los escasos datos disponibles presentan un bajo grado de ajuste con el modelo.

Considerando lo antes mencionado, el modelo tiende a representar la baja de caudal que ha tenido la cuenca en estos últimos años.

La variación tan grande que existe entre los indicadores de la Tabla 6-14, se explican netamente por la falta de información, ya que es bastante difícil solo representar de buena manera intervalos pequeños de caudal.

**Tabla 6-14:** Comparación de criterios de eficiencia, calibración - validación.

Indicador	Calibración	Validación
PBIAS	0.19	-0.04
NS	0.84	0.751
Log NS	0.76	0.63
K-G	0.83	0.59
R2	0.84	0.5

## 7. Proyecciones del cambio climático

En esta sección se estudia el comportamiento de la cuenca frente al escenario RCP 8.5 generado por distintos modelos de simulación obtenidos de la plataforma del CR2. Esta plataforma fue presentada en la sección 2.4.3 de la Revisión Bibliográfica.

### 7.1 Elección de modelos

El criterio de elección que se utilizó fue comparar el escenario histórico normalizado generados por los modelos en el periodo 1985-2005 con lo medido en las estaciones meteorológicas de la cuenca. La Tabla 7-1 muestra todos los modelos incorporados en la plataforma para la zona de estudio.

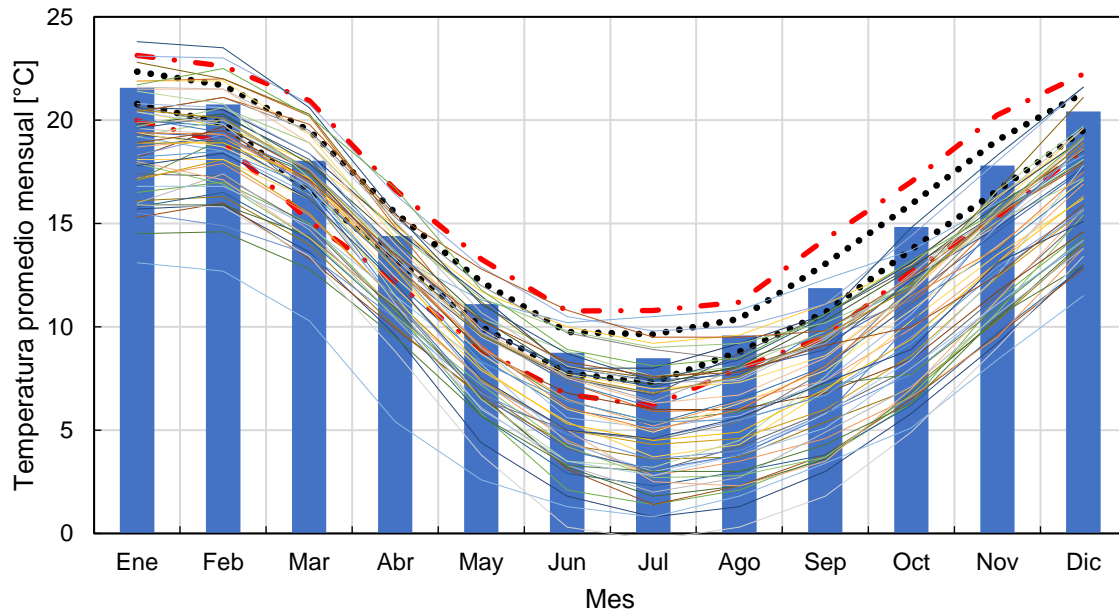
Tabla 7-1: Modelos de simulación climática.

Modelo	Tipo	Modelo	Tipo
SMHI-RCA4@IPSL-IPSL-CM5A-MR	regional	ACCESS1-0	global
SMHI-RCA4@CCCma-CanESM2	regional	bcc-csm1-1	global
SMHI-RCA4@ICHEC-EC-EARTH	regional	CESM1-WACCM	global
SMHI-RCA4@NCC-NorESM1-M	regional	HadGEM2-ES	global
SMHI-RCA4@MIROC-MIROC5	regional	MPI-ESM-LR	global
SMHI-RCA4@MPI-M-MPI-ESM-LR	regional	CMCC-CMS	global
SMHI-RCA4@CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	regional	CESM1-CAM5-1-FV2	global
CR2-RegCM4-50K@MPI-M-MPI-ESM-MR	regional	CESM1-CAM5	global
SMHI-RCA4@NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	regional	inmcm4	global
SMHI-RCA4@MOHC-HadGEM2-ES	regional	FIO-ESM	global
CR2-RegCM4-10K@MPI-M-MPI-ESM-MR	local	MIROC-ESM-CHEM	global
WRF3-4-1@MIROC5	local	GISS-E2-H	global
CNRM-CM5-2	global	CanESM2	global
MIROC5	global	NorESM1-M	global
BNU-ESM	global	CCSM4	global
GISS-E2-H-CC	global	IPSL-CM5A-MR	global
IPSL-CM5A-LR	global	bcc-csm1-1-m	global
HadGEM2-CC	global	GISS-E2-R	global
MRI-CGCM3	global	MIROC4h	global
CMCC-CESM	global	CESM1-FASTCHEM	global
CNRM-CM5	global	HadCM3	global
NorESM1-ME	global	CanCM4	global
GISS-E2-R-CC	global	CSIRO-Mk3-6-0	global
CMCC-CM	global	CESM1-BGC	global
MIROC-ESM	global	ACCESS1-3	global
HadGEM2-AO	global	MPI-ESM-MR	global
MRI-ESM1	global	FGOALS-g2	global
MPI-ESM-P	global	FGOALS-s2	global
IPSL-CM5B-LR	global	-	-

### 7.1.2 Comparación de temperaturas

El primer barrido de modelos se realizó a partir de la temperatura donde se generó el promedio y la desviación estándar de los datos de temperatura media mensual de la estación Rengo para el escenario histórico y luego se grafican el valor histórico de los 57 modelos (Ver Tabla 7-1).

En la Figura 7-1, las barras representan la media de temperatura, la línea punteada negra  $\pm 1$  vez la desviación estándar y la línea roja  $\pm 2$  veces la desviación estándar. Esto se hizo con el fin de caracterizar la tendencia central y dispersión de los datos.



**Figura 7-1:** Comparación de temperatura de estación Rengo para el periodo histórico 1985-2005.

La Figura 7-2 muestra la eliminación de modelos que no están dentro de los límites establecidos por la desviación estándar, esto asegura de cierta forma que los modelos seleccionados puedan representar la dispersión de la temperatura reflejado en eventos más extremos que han ocurrido en la zona.

La Tabla 7-2 muestra los 22 modelos que representan de buena manera la distribución de temperaturas de la estación Rengo y además fueron aceptados modelos que si bien se escapan de los límites entre los meses de agosto y diciembre, tienen un buen comportamiento en los otros meses. Cabe destacar que la mayoría de estos modelos son globales siendo esto algo inesperado, ya que se presumía una mejor representatividad tanto de los modelos regionales como locales. Sin embargo, estos modelos son los que más subestiman la temperatura en la zona a excepción de 2 modelos.

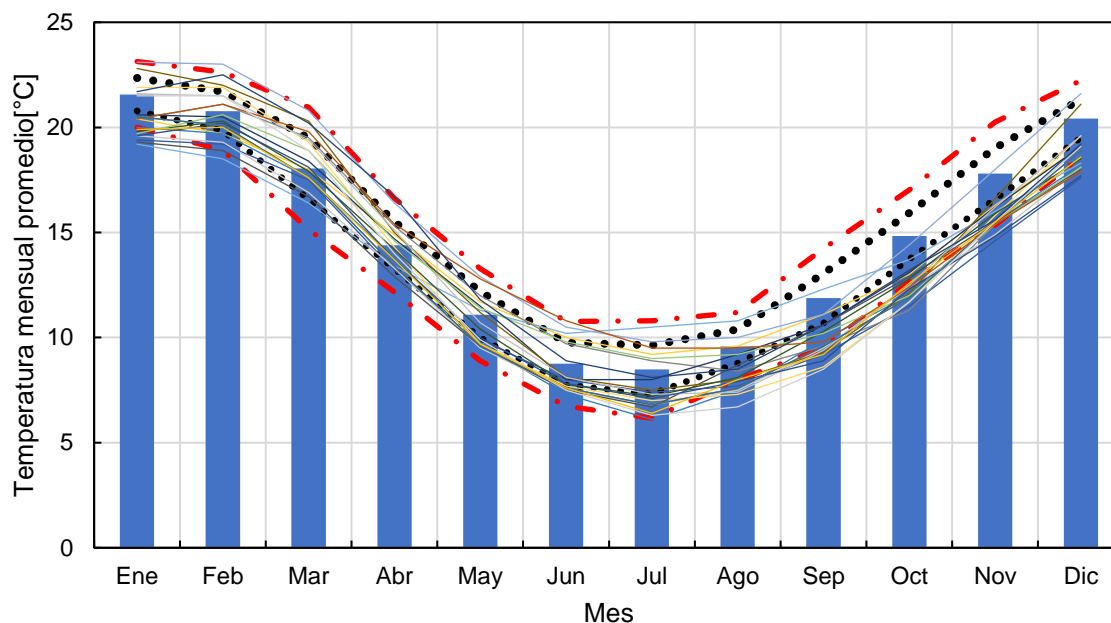


Figura 7-2: Elección de modelos en base a la temperatura de Rengo.

**Tabla 7-2:** Modelos seleccionados a partir de la temperatura de estación Rengo.

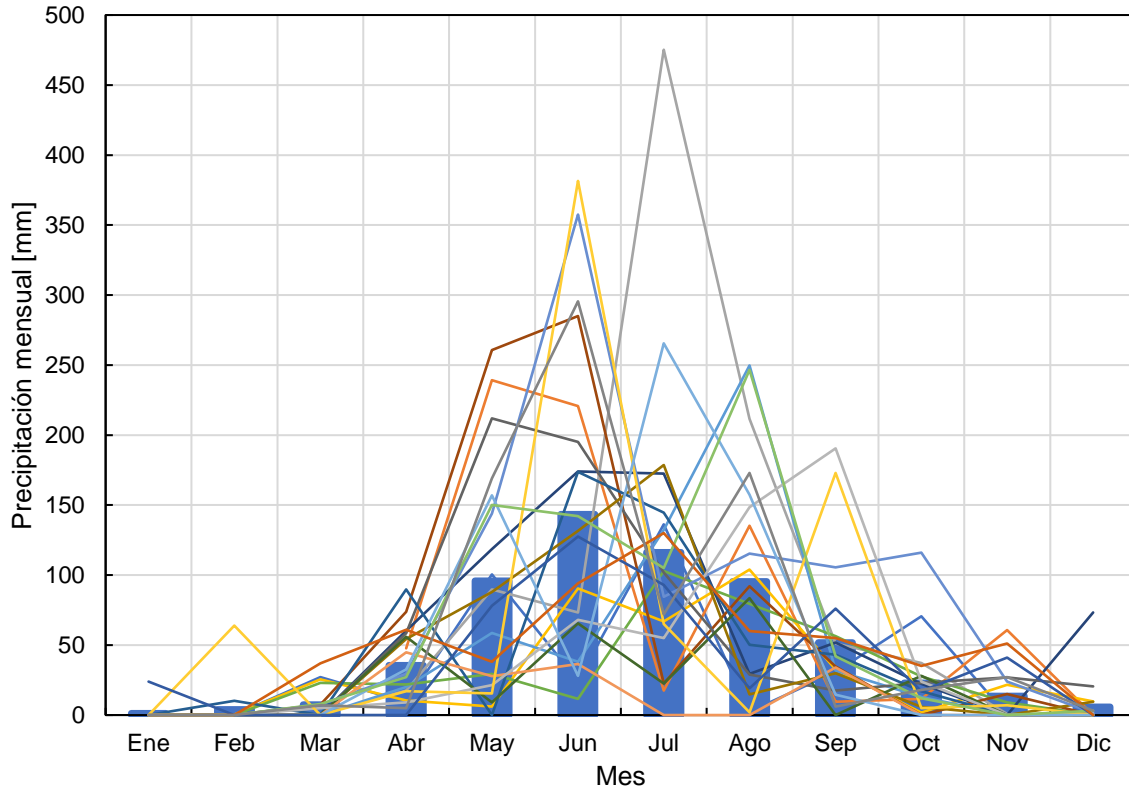
<b>Modelo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tipo</b>
CR2-RegCM4-50K@MPI-M-MPI-ESM-MR	regional	bcc-csm1-1	global
WRF3-4-1@MIROC5	local	HadGEM2-ES	global
MIROC5	global	CESM1-CAM5-1-FV2	global
GISS-E2-H-CC	global	FIO-ESM	global
HadGEM2-CC	global	MIROC-ESM-CHEM	global
CMCC-CESM	global	GISS-E2-H	global
NorESM1-ME	global	NorESM1-M	global
GISS-E2-R-CC	global	CCSM4	global
MIROC-ESM	global	GISS-E2-R	global
HadGEM2-AO	global	ACCESS1-3	global
ACCESS1-0	global	FGOALS-s2	global

### 7.1.3 Comparación de precipitaciones

La última selección de modelos se realizó mediante los datos de precipitación en la zona de estudio. Se descargan los datos de precipitación mensual para los puntos donde se encuentran las tres estaciones meteorológicas que tienen registros de precipitación.

A continuación, se presenta el criterio de selección para una estación meteorológica (Popeta), este proceso se repite con las otras dos estaciones y los respectivos gráficos se encuentran en los Anexo 2.

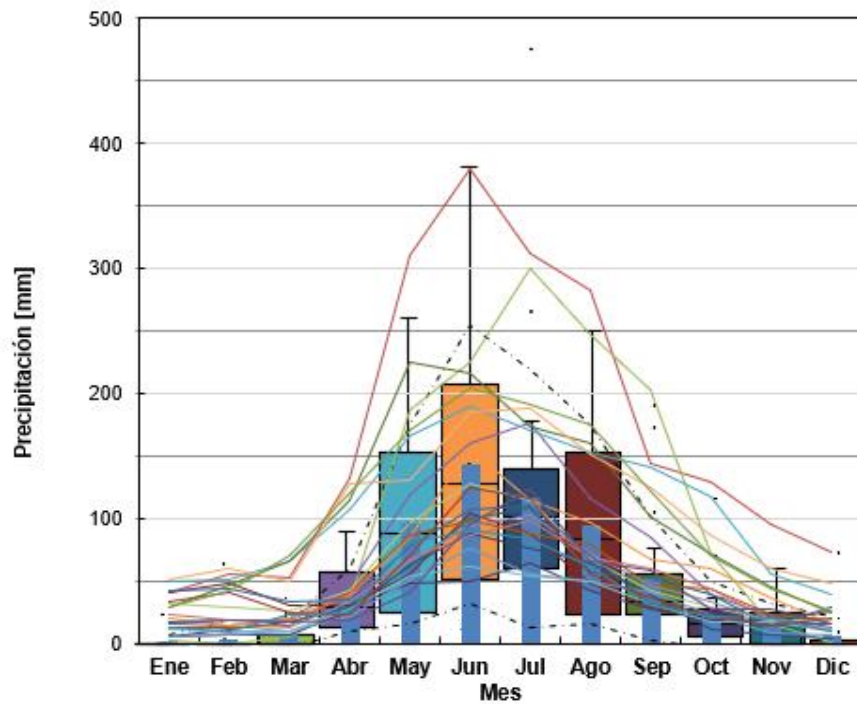
Para la elección de los modelos se generó en la Figura 7-3 la distribución de precipitaciones anuales en la estación Popeta en el periodo histórico 1985-2005, donde cada color de línea representa un año del periodo y las barras el promedio. Esto se hizo con el fin de visualizar de mejor manera el comportamiento anual de esta, ya que el promedio esconde la variabilidad que puede llegar a tener la precipitación a lo largo de los años.



**Figura 7-3:** Distribución de precipitaciones para la estación Popeta en el periodo histórico 1985-2005.

Con el fin de incorporar la información que entrega la Figura 7-3, se generó un diagrama de Caja y Bigotes (Boxplot) para cada mes del año que junto con la información del promedio (Barras azules) y la desviación estándar (líneas punteada negra) permite visualizar de una forma más sencilla los valores atípicos y comparar las distribuciones de precipitaciones para los datos observados.

Este criterio de selección permite seleccionar modelos que se escapan de la tendencia del promedio, esto significa que el peak de precipitaciones se encuentra en el mes de junio, pero como se ve en la Figura 7-3 hay varios años en que esto no ocurre y el peak se traslada julio u otros meses.



**Figura 7-4:** Comparación de modelos con la precipitación en la estación Popeta para el periodo histórico.

En base al criterio anteriormente descrito se llega a la Figura 7-5 donde se muestra el barrido final de los modelos de simulación para la estación de Popeta.

Para cada una de las tres estaciones meteorológicas se realiza el mismo criterio y se interceptan los modelos obtenidos, dando como resultado un total de 13 modelos (Ver Tabla 7-3) que en el periodo histórico (1985-2005) y según el criterio establecido, representan de una buena manera tanto la temperatura como la precipitación de la zona.

**Tabla 7-3:** Modelos de simulación seleccionados para la proyección.

Total de modelos		
1	MIROC5	global
2	HadGEM2-CC	global
3	CMCC-CESM	global
4	NorESM1-ME	global
5	HadGEM2-AO	global
6	ACCESS1-0	global
7	HadGEM2-ES	global
8	CESM1-CAM5-1-FV2	global
9	FIO-ESM	global
10	NorESM1-M	global
11	CCSM4	global
12	ACCESS1-3	global
13	FGOALS-s2	global

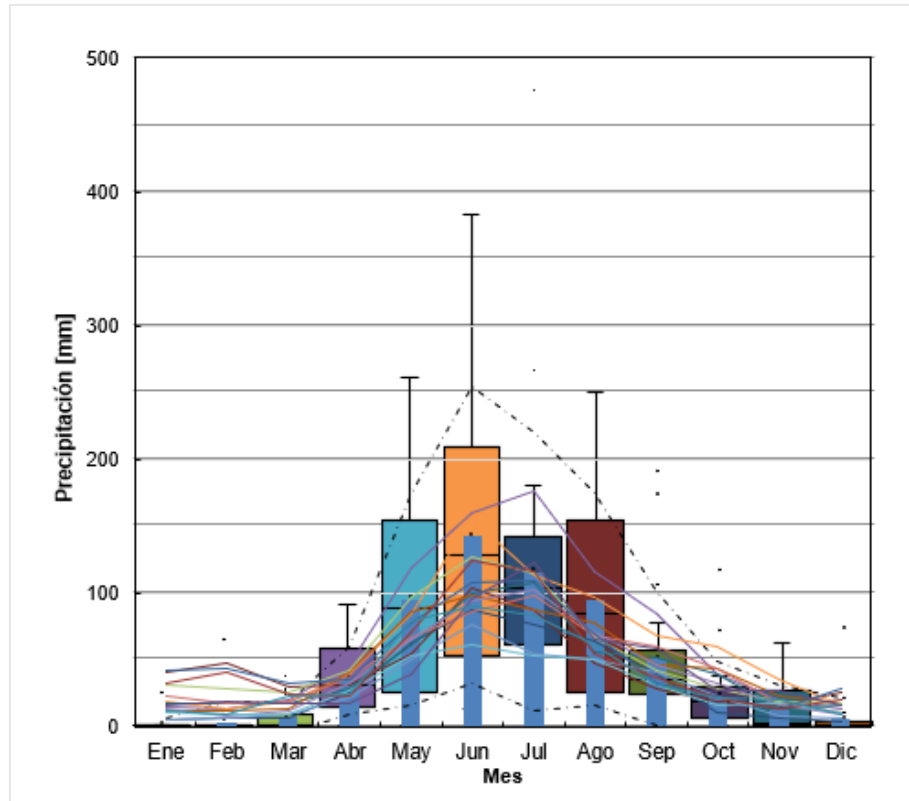


Figura 7-5: Elección final de modelos de simulación para la estación de Popeta.

## 7.2 Proyección de forzantes

Las forzantes futuras se construyeron a partir de las ecuaciones presentadas en 2.4.3. Estas ecuaciones requieren de un intervalo de tiempo con información medida en el punto donde se va a realizar la proyección, denominado línea base. En este caso se utilizaron las coordenadas de las estaciones meteorológicas ya que estas tienen la información requerida para las proyecciones. El intervalo de tiempo queda definido por el periodo donde que se realizó la calibración y validación de cada uno de los modelos.

Para el modelo uno se cuenta con 26 años de línea base (1990-2016) mientras que para los modelos dos y tres 22 años (1994-2016). En base a estos intervalos se crean los escenarios Futuro Cercano y Futuro Intermedio los cuales tienen como duraciones la línea base de cada modelo (Ver Tabla 7-4).

Tabla 7-4: Intervalo de tiempo de escenarios.

Modelos	Línea Base	Futuro Cercano	Futuro Intermedio
1 y 2	1994-2016	2020-2042	2043-2069
3	1990-2016	2020-2046	2047-2073

Cabe recordar que la información de las estaciones meteorológicas tiene un proceso de extensión de información lo cual incorpora incertidumbre a las proyecciones generadas

Por otro lado, las Ecuaciones presentadas en 2.4.3 también necesitan de un Factor distinto para las precipitaciones y temperaturas. Este Factor se obtiene desde la plataforma del CR2 presentada en 2.4.3.

Para las precipitaciones se obtuvo el Factor para cada punto de coordenadas de las estaciones meteorológicas presentes en la zona de estudio. En la Tabla 7-5 y 7-6 se muestra los factores de precipitación para los escenarios Futuro Cercano y Futuro Intermedio para la estación de Popeta.

**Tabla 7-5:** Valor de Factor de precipitación para el periodo de Futuro Cercano (2020-2046).

<b>Futuro Cercano (2020-2046)</b>												
<b>Modelo</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
CMCC-CESM	144	105	99	85	128	84	116	93	82	91	114	130
FIO-ESM	59	105	75	72	98	85	82	85	98	69	67	105
ACCESS1-3	72	84	68	96	126	84	63	136	92	112	51	89
MIROC5	88	88	71	64	90	98	89	81	86	97	55	95
NorESM1-ME	101	88	81	114	130	79	82	106	89	112	104	107
CCSM4	122	79	74	101	72	85	94	126	88	68	90	93
NorESM1-M	102	114	106	80	84	97	79	75	79	69	91	107
CESM1-CAM5-1-FV2	102	107	128	116	100	87	106	111	86	110	121	117
ACCESS1-0	88	86	127	82	73	115	108	87	95	105	89	51
HadGEM2-AO	90	99	104	120	113	93	86	121	124	118	176	77
HadGEM2-ES	76	91	74	145	115	119	92	76	121	92	112	132
FGOALS-s2	52	155	104	177	69	88	110	89	126	120	57	101
HadGEM2-CC	114	117	77	79	125	73	98	63	77	78	46	87

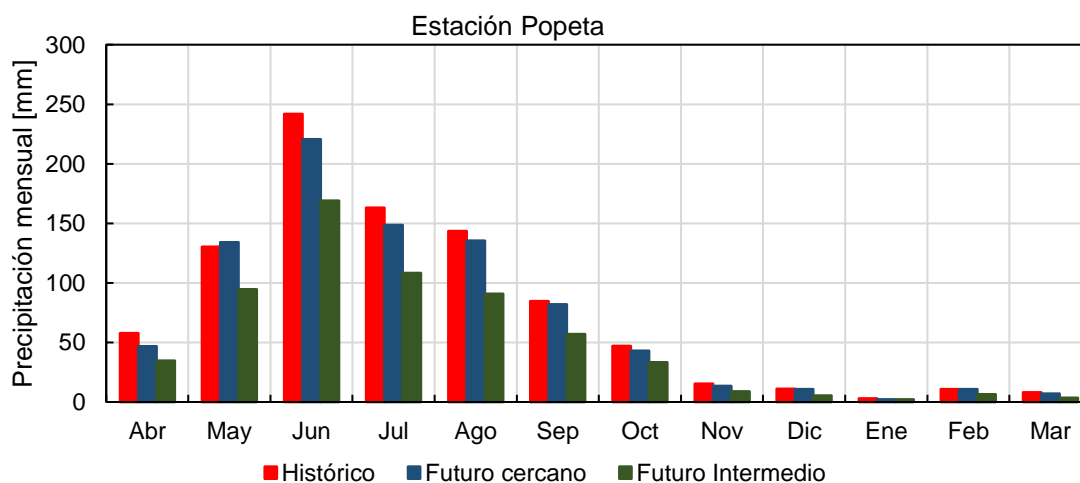
**Tabla 7-6:** Valor de Factor de precipitación para el periodo de Futuro Intermedio (2047-2073).

Futuro Intermedio (2047-2073)												
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
CMCC-CESM	127	88	74	83	117	101	110	101	79	96	84	91
FIO-ESM	68	90	72	69	103	92	75	95	93	57	55	111
ACCESS1-3	54	65	92	84	119	79	63	105	80	111	38	69
MIROC5	124	77	70	71	86	97	68	72	84	75	60	75
NorESM1-ME	108	77	83	95	115	69	71	79	80	94	86	110
CCSM4	110	82	75	140	80	73	77	131	129	70	101	102
NorESM1-M	91	99	88	67	78	96	87	56	76	63	92	81
CESM1-CAM5-1-FV2	102	126	120	112	112	109	106	93	91	121	139	115
ACCESS1-0	121	63	135	43	68	102	114	91	95	75	78	61
HadGEM2-AO	90	97	85	115	112	99	93	108	114	103	124	77
HadGEM2-ES	69	89	65	117	121	122	67	87	96	90	86	108
FGOALS-s2	42	141	99	174	57	77	88	78	82	140	61	108
HadGEM2-CC	111	100	74	88	90	61	82	61	79	89	49	77

Lo mismo se realizó para la temperatura utilizando los valores del Factor obtenido de la plataforma en el punto de coordenadas de la estación Rengo los cuales se encuentran en el Anexo 3.

Una vez obtenidas las series de tiempo de las forzantes para los escenarios Futuro Cercano e Intermedio de las estaciones meteorológicas, se aplica el procedimiento mostrado en 4.2 para la distribución de estos parámetros en las bandas de los modelos WEAP.

Las Figura 7-6 muestra la tendencia que tienen los modelos a disminuir la precipitación y aumentar la temperatura con respecto al periodo histórico.



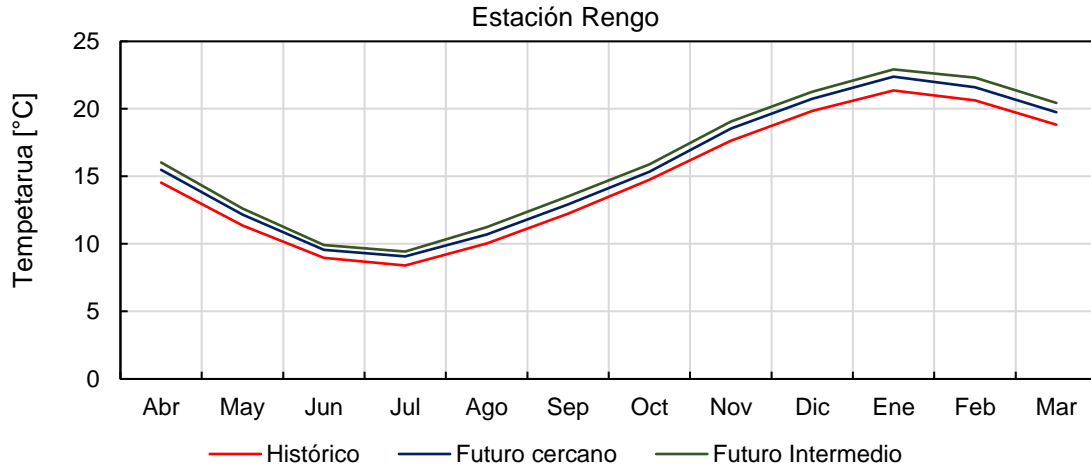


Figura 7-6: Tendencia de modelos seleccionados.

### 7.3 Resultado de proyecciones

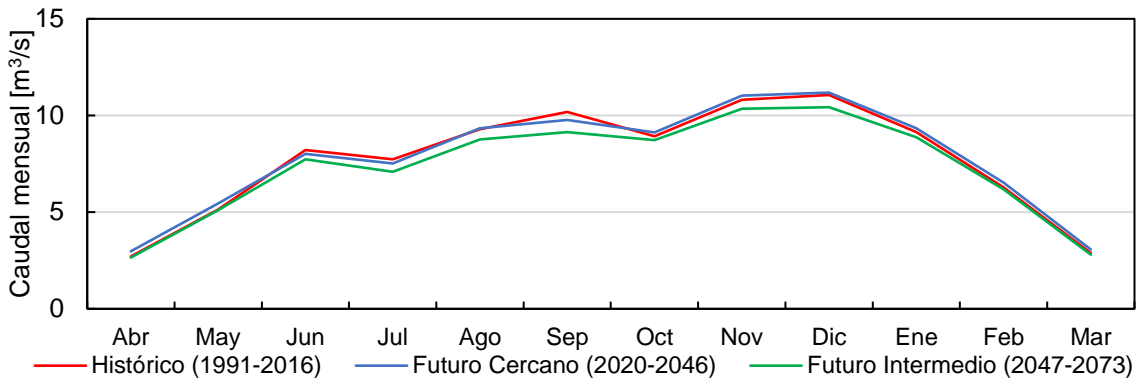
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las proyecciones realizadas con los 13 modelos. En base a esto se genera una banda de posibles escenarios futuros considerando tanto el promedio como los valores máximos y mínimos de la variable a analizar de los 13 modelos de simulación.

#### 7.3.1 Cuenca Hacienda Las Nieves

##### 7.3.1.1 Disponibilidad del recurso hídrico

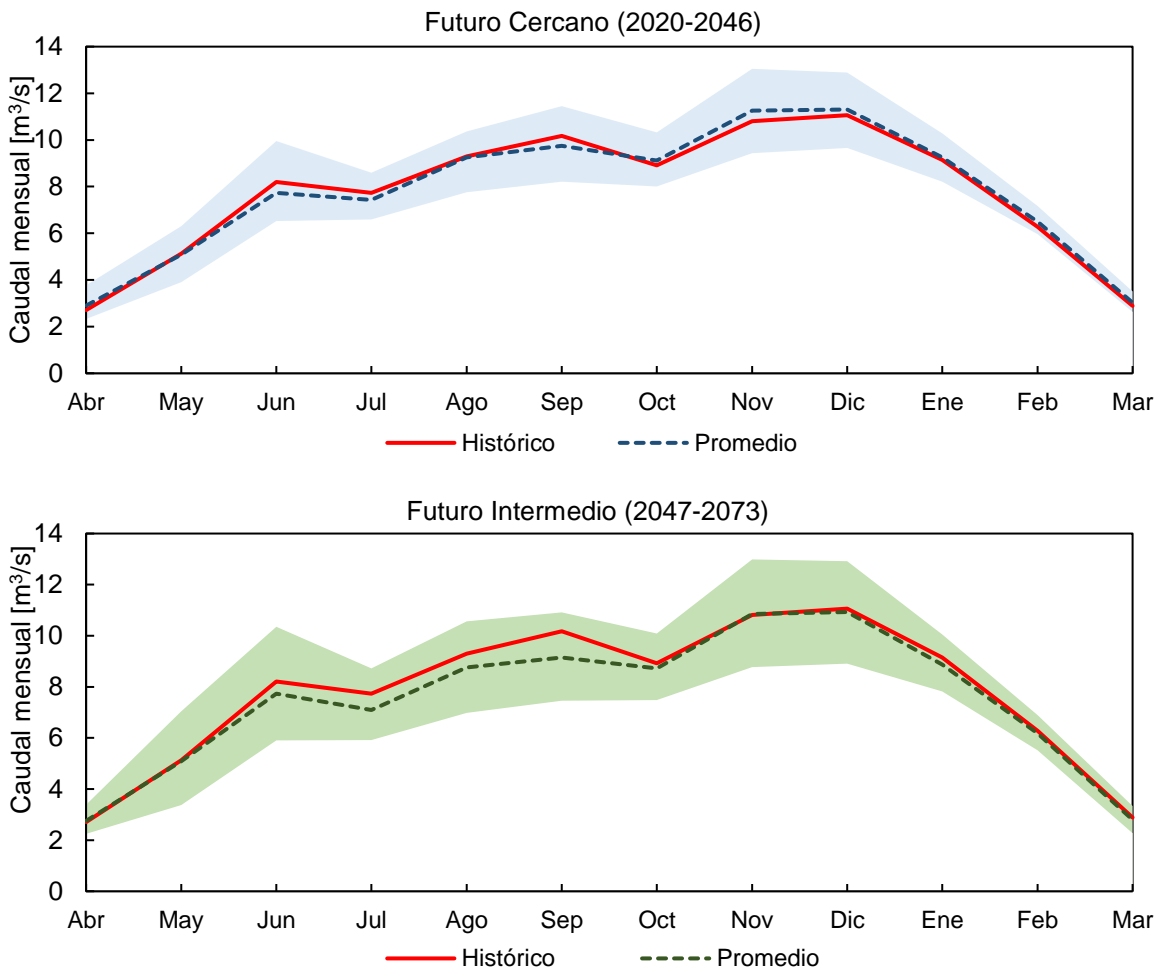
Para el análisis sobre la disponibilidad del recurso hídrico, la curva de entrega de caudal del embalse Los Cristales se supone constante en el futuro. Las Figuras 7-7 y 7-8 muestran el resultado en cuanto a caudal medio mensual en base a las proyecciones realizadas, mientras que el comportamiento de la serie de tiempo del caudal mensual se encuentra en el Anexo 4.

La Figura 7-7 muestra el promedio de los resultados de los 13 modelos de simulación para los escenarios Futuro Cercano e Intermedio, comparados con los valores históricos de caudal promedio mensual. Se denomina caudal histórico a lo obtenido mediante la modelación en WEAP con variables meteorológicas históricas. Se puede ver que en promedio para el futuro cercano hay un aumento de caudal para los meses donde se alcanza el peak, es decir, meses de noviembre y diciembre. Por otra parte, para el futuro intermedio se logra visualizar una disminución general del caudal medio mensual en prácticamente todos los meses del año. Cabe destacar que en ninguno de los dos escenarios se observa un cambio de régimen de la cuenca.



**Figura 7-7:** Comparación caudales mensuales promedio históricos y futuros para Cuenca Hacienda Las Nieves.

Con el fin de mostrar el comportamiento de los 13 modelos de simulación, se generó una banda de posibles resultados para los escenarios futuro cercano e intermedio (Ver Figura 7-8).



**Figura 7-8:** Banda de resultados para Futuro Cercano e Intermedio en Cuenca Hacienda Las nieves.

La figura 7-8 deja en evidencia la variabilidad que existe entre los 13 modelos de simulación, aunque sin evidenciar una tendencia clara el comportamiento del futuro cercano de la cuenca ya que hay

modelos que proyectan un futuro con más recurso hídrico y otros que menos. Para el futuro intermedio la variabilidad aumenta dejando una banda más amplia de posibles resultados sin embargo, se aprecia una leve tendencia a disminuir el caudal entre los meses de Junio a Octubre.

Para cuantificar las proyecciones de los modelos se crean las Tablas 7-7 y 7-8 donde se toman 3 modelos que evidencian la variabilidad existente en los escenarios de proyección de los caudales medios mensuales. Los porcentajes mostrados en dichas tablas se calculan en base al caudal medio mensual registrado en el periodo histórico, donde un valor negativo revela una disminución en el caudal y un valor positivo un aumento. En el Anexo 5 se muestra la tabla con los porcentajes de los 13 modelos de simulación.

**Tabla 7-7:** Proyecciones de caudal mensual para el periodo Futuro Cercano en Cuenca Hacienda Las Nieves.

<b>Futuro Cercano (2020-2046)</b>												
<b>Modelos</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
HadGEM2-AO	27%	14%	2%	-2%	8%	12%	16%	21%	16%	13%	14%	22%
NorESM1-M	-10%	-22%	-12%	-12%	-17%	-19%	-10%	-13%	-13%	-10%	-4%	-6%
NorESM1-ME	13%	23%	-3%	-9%	0%	-5%	2%	8%	6%	4%	6%	9%
<b>Promedio</b>	<b>7%</b>	<b>-1%</b>	<b>-6%</b>	<b>-4%</b>	<b>0%</b>	<b>-4%</b>	<b>2%</b>	<b>4%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>
<b>Max</b>	<b>39%</b>	<b>23%</b>	<b>21%</b>	<b>11%</b>	<b>12%</b>	<b>12%</b>	<b>16%</b>	<b>21%</b>	<b>16%</b>	<b>13%</b>	<b>14%</b>	<b>22%</b>
<b>Min</b>	<b>-14%</b>	<b>-24%</b>	<b>-21%</b>	<b>-15%</b>	<b>-17%</b>	<b>-19%</b>	<b>-10%</b>	<b>-13%</b>	<b>-13%</b>	<b>-10%</b>	<b>-5%</b>	<b>-9%</b>

La Tabla 7-7 muestra que para el futuro cercano en promedio hay un periodo de Octubre-Abril donde se logra un aumento en el caudal medio mensual proveniente del deshielo, siendo un 7% el mayor aumento, mientras que para el mes de Junio se registra una baja de 6% del caudal.

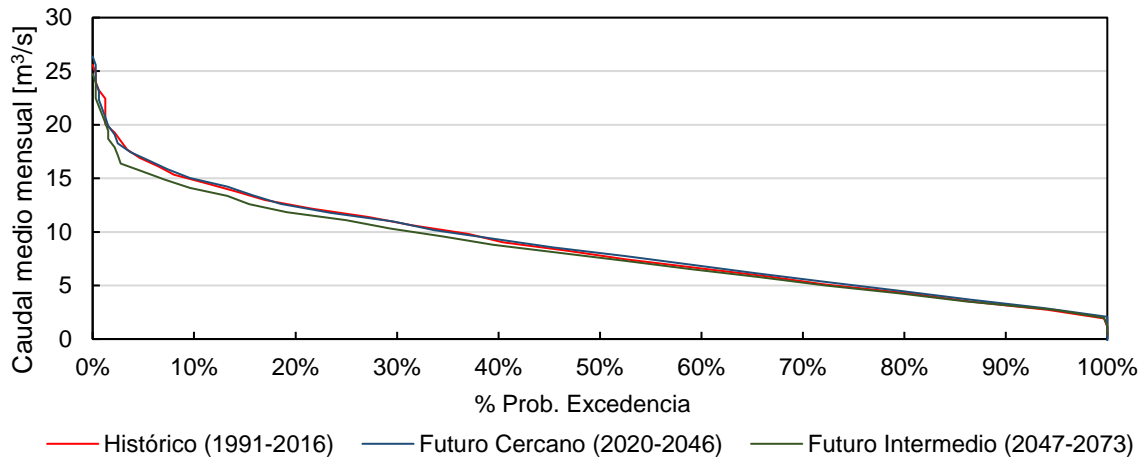
Para el futuro intermedio se tiene una disminución del caudal que en promedio alcanza hasta un 10% de disminución en el mes de septiembre (Ver Tabla 7-8).

**Tabla 7-8:** Proyecciones de caudal mensual para el periodo Futuro Intermedio en Cuenca Hacienda Las Nieves.

<b>Futuro Intermedio (2047-2073)</b>												
<b>Modelos</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
CESM1-CAM5-1-FV2	20%	19%	16%	13%	11%	0%	12%	20%	17%	10%	10%	16%
CMCC-CESM	2%	-6%	-13%	-17%	-9%	-14%	0%	13%	10%	4%	4%	9%
HadGEM2-CC	-17%	-15%	-28%	-23%	-25%	-27%	-16%	-19%	-19%	-14%	-12%	-21%
<b>Promedio</b>	<b>2%</b>	<b>-1%</b>	<b>-6%</b>	<b>-8%</b>	<b>-6%</b>	<b>-10%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-2%</b>	<b>-3%</b>
<b>Max</b>	<b>25%</b>	<b>37%</b>	<b>26%</b>	<b>13%</b>	<b>14%</b>	<b>7%</b>	<b>13%</b>	<b>20%</b>	<b>17%</b>	<b>10%</b>	<b>10%</b>	<b>16%</b>
<b>Min</b>	<b>-17%</b>	<b>-34%</b>	<b>-28%</b>	<b>-23%</b>	<b>-25%</b>	<b>-27%</b>	<b>-16%</b>	<b>-19%</b>	<b>-19%</b>	<b>-14%</b>	<b>-12%</b>	<b>-21%</b>

En la Figura 7-9 se presenta la comparación entre las curvas de duración de caudales realizadas con el promedio los 13 modelos de simulación para todos los escenarios. Como se dijo anteriormente, no existen prácticamente diferencias entre el futuro cercano y el periodo histórico. Sin

embargo, para el futuro intermedio hay una leve disminución que se acentúa entre los porcentajes 1 y 40% de probabilidad de excedencia, lo cual corresponde a la disminución de caudal entre los meses de Junio y Octubre, tal como se muestra en la Figura 7-8.

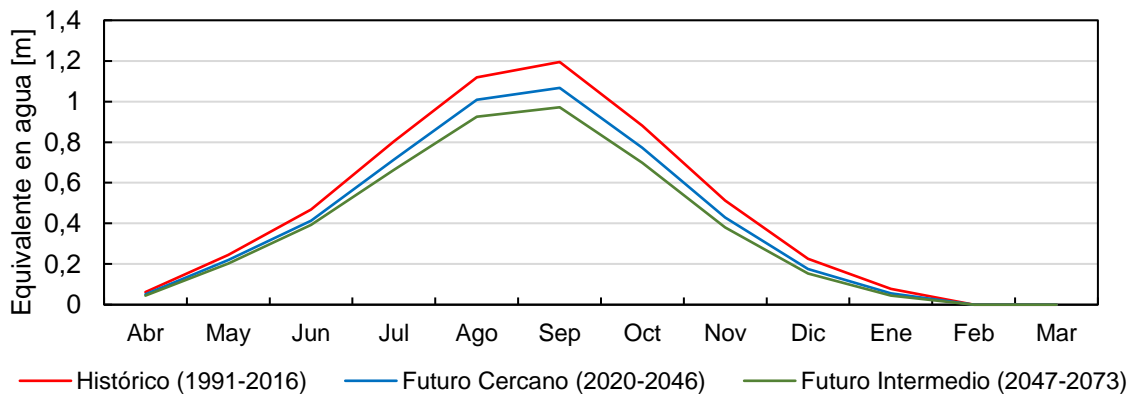


**Figura 7-9:** Comparación curva de duración de caudales promedios, Cuenca Hacienda Las Nieves.

Esto se reafirma cuando a nivel anual, existe en promedio un aumento de 1% del caudal para el futuro cercano y una disminución del 4.5% para el futuro intermedio con respecto al periodo histórico.

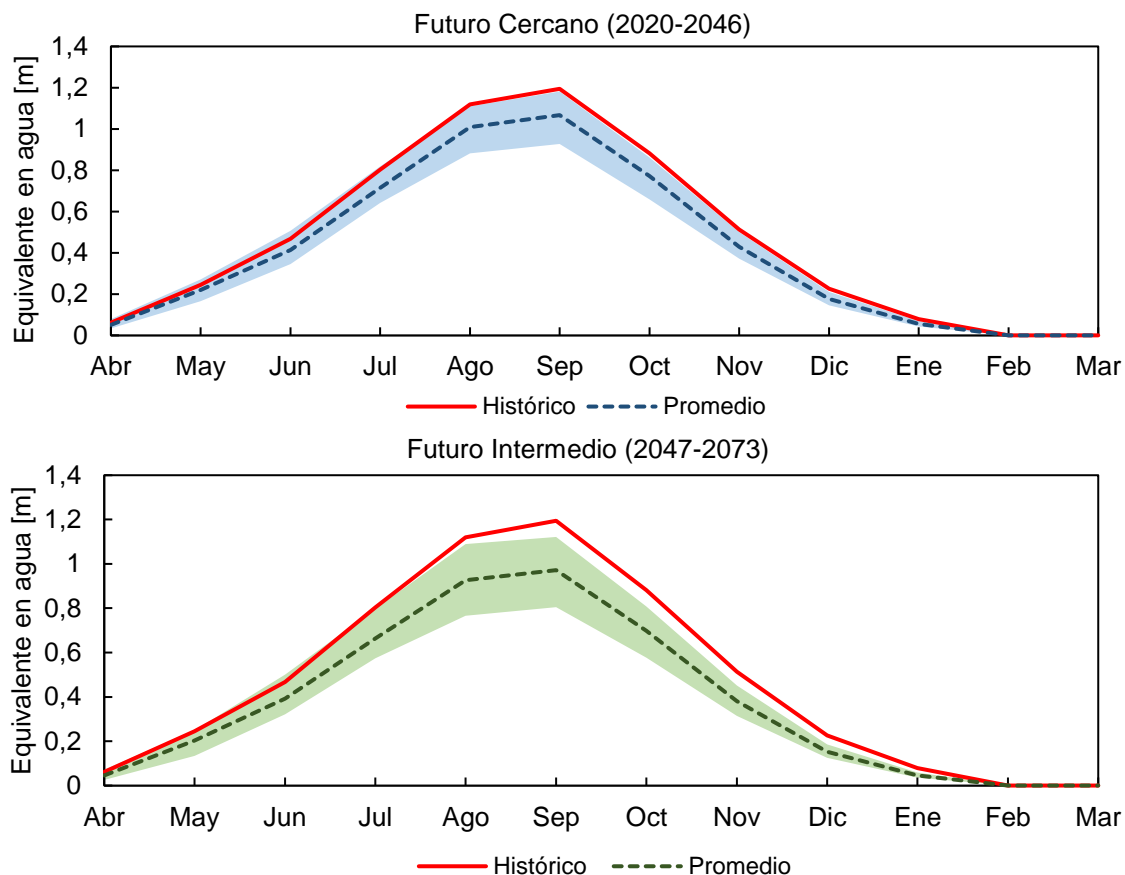
### 7.3.1.2 Acumulación de nieve

El análisis de la acumulación de nieve se realiza para la Banda 13 dado que es la única banda que presenta nieve en todos los periodos. La Figura 7-10 muestra que para ambos escenarios (Futuro Cercano e intermedio) en promedio la acumulación de nieve equivalente en agua es inferior que lo registrado históricamente en todos los meses del año siendo esta baja más notoria para el futuro intermedio.



**Figura 7-10:** Comparación de acumulación de nieve en los periodos histórico y futuro para Cuenca Hacienda Las Nieves.

La Figura 7-11 muestra la tendencia que tienen todos los modelos que en mayor o menor medida proyectan un futuro con menos acumulación de nieve en la parte alta de la cuenca. Las mayores variaciones que se observan entre futuro cercano y el futuro intermedio se encuentran en los meses del peak de acumulación hasta los meses de Enero y Febrero.



**Figura 7-11:** Banda de resultados para Futuro Cercano e Intermedio en Cuenca Hacienda Las Nieves.

Las Tablas 7-9 y 7-10 indican los porcentajes de disminución o aumento respecto al equivalente en agua de nieve para los escenarios futuro cercano e intermedio respectivamente, en el Anexo 6 se puede ver las tablas con los resultados de los 13 escenarios.

Si bien los resultados muestran una disminución mayor para los meses de deshielo, existe una clara tendencia a la baja en los meses de acumulación llegando a ser en promedio hasta un 19% de disminución para el futuro intermedio en el mes de septiembre.

**Tabla 7-9:** Proyecciones de acumulación de nieve para el periodo Futuro Cercano en Cuenca Hacienda Las Nieves.

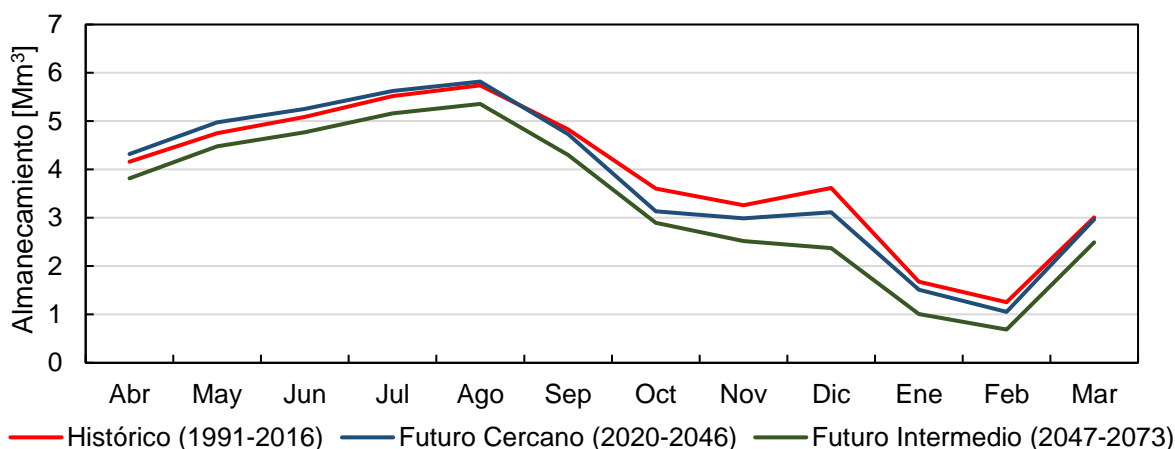
Futuro cercano (2020-2046)												
Modelos	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ACCESS1-3	-20%	5%	-6%	-17%	-6%	-8%	-8%	-12%	-16%	-25%	-	-
FIO-ESM	-43%	-19%	-20%	-20%	-19%	-19%	-22%	-28%	-36%	-46%	-	-
HadGEM2-ES	7%	6%	8%	2%	-4%	-2%	-3%	-6%	-13%	-25%	-	-
<b>Promedio</b>	<b>-19%</b>	<b>-10%</b>	<b>-12%</b>	<b>-11%</b>	<b>-10%</b>	<b>-11%</b>	<b>-12%</b>	<b>-16%</b>	<b>-22%</b>	<b>-29%</b>	-	-
<b>Max</b>	<b>25%</b>	<b>11%</b>	<b>8%</b>	<b>2%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>-2%</b>	<b>-2%</b>	<b>-7%</b>	<b>-11%</b>	-	-
<b>Min</b>	<b>-45%</b>	<b>-32%</b>	<b>-26%</b>	<b>-20%</b>	<b>-21%</b>	<b>-22%</b>	<b>-25%</b>	<b>-28%</b>	<b>-36%</b>	<b>-46%</b>	-	-

**Tabla 7-10:** Proyecciones de acumulación de nieve para el periodo Futuro Intermedio en Cuenca Hacienda Las Nieves.

Futuro Intermedio (2047-2073)												
Modelos	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
CESM1-CAM5-1-FV2	-16%	-4%	-1%	-1%	-3%	-7%	-10%	-12%	-19%	-31%	-	-
HadGEM2-CC	-35%	-24%	-31%	-29%	-32%	-33%	-35%	-39%	-45%	-53%	-	-
NorESM1-ME	-29%	-5%	-17%	-23%	-23%	-25%	-26%	-32%	-37%	-45%	-	-
<b>Promedio</b>	<b>-28%</b>	<b>-17%</b>	<b>-16%</b>	<b>-17%</b>	<b>-17%</b>	<b>-19%</b>	<b>-21%</b>	<b>-26%</b>	<b>-32%</b>	<b>-42%</b>	-	-
<b>Max</b>	<b>16%</b>	<b>2%</b>	<b>7%</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-6%</b>	<b>-8%</b>	<b>-12%</b>	<b>-18%</b>	<b>-25%</b>	-	-
<b>Min</b>	<b>-60%</b>	<b>-45%</b>	<b>-31%</b>	<b>-29%</b>	<b>-32%</b>	<b>-33%</b>	<b>-35%</b>	<b>-39%</b>	<b>-45%</b>	<b>-54%</b>	-	-

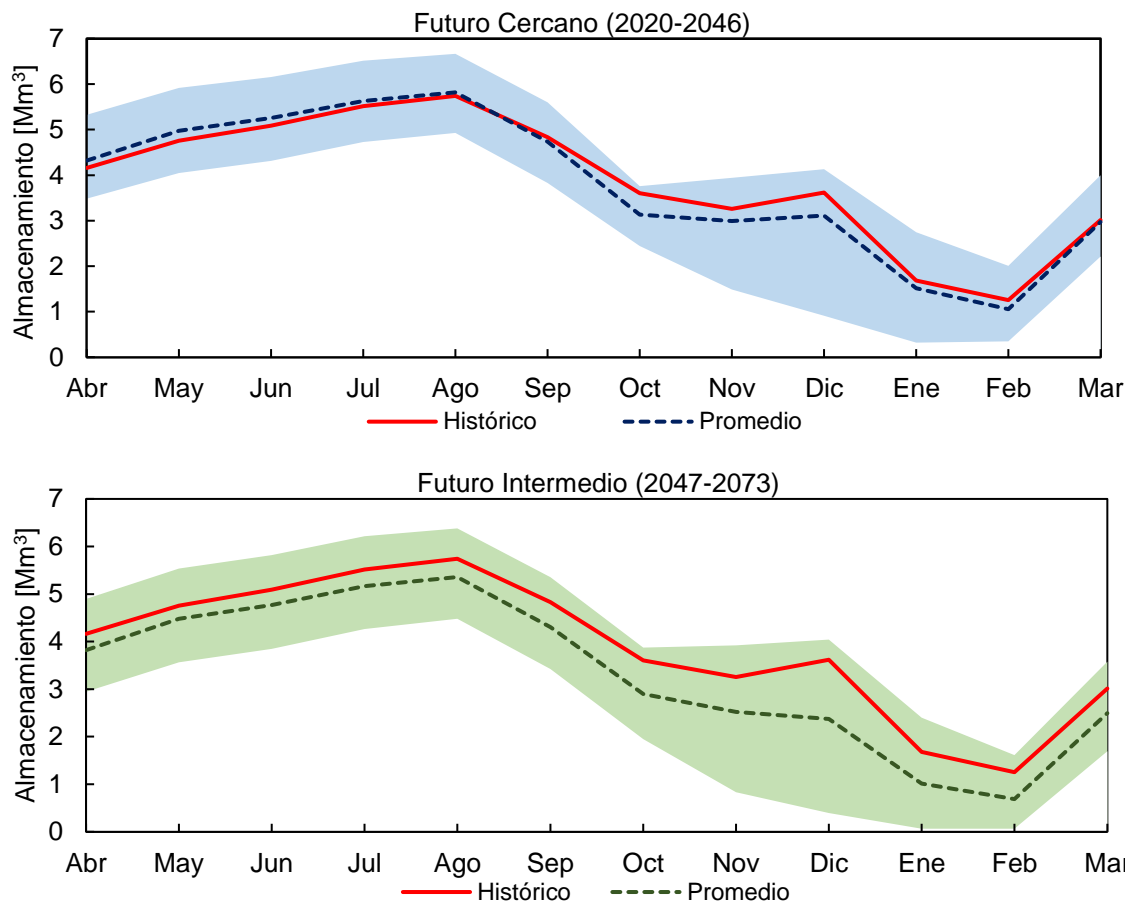
### 7.3.1.3 Volumen de embalse

En la Figura 7-12 se muestra el resultado promedio para cada uno de los escenarios. En general no se aprecia una diferencia muy notoria en el volumen de almacenamiento del embalse. Sin embargo, en los meses donde hay un mayor caudal de entrega las diferencias pueden llegar al orden de 1 millón de metros cúbicos para el escenario intermedio.



**Figura 7-12:** Comparación del nivel de almacenamiento del Hacienda Las Nieves en los periodos histórico y futuro.

La banda de resultados de la Figura 7-13 muestra una gran incertidumbre debido a su gran ancho pudiendo tener escenarios donde la disminución del volumen del embalse puede llegar hasta un 96% en enero para el escenario futuro intermedio. La gran variabilidad presentada en las figuras se puede atribuir a los constantes procesos de lleno y vaciado presente en el embalse para los periodos de simulación.



**Figura 7-13:** Banda de resultados de los 13 modelos para Futuro Cercano e Intermedio en Hacienda Las Nieves.

Los porcentajes de cambio en el volumen del embalse se analizan en base a 3 modelos que evidencian la variabilidad que existe tanto en el futuro cercano como en el intermedio. Los valores se presentan en las Tablas 7-11 y 7-12 para los respectivos casos analizados. La tabla con todos los resultados se encuentra en el Anexo 7.

**Tabla 7-11:** Proyecciones de almacenamiento en Hacienda Las Nieves para el escenario futuro cercano.

Futuro cercano (2020-2046)												
Modelos	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
CCSM4	-7%	-4%	-4%	-5%	-5%	-8%	-19%	-16%	-13%	-33%	-36%	-15%
HadGEM2-AO	28%	24%	21%	18%	16%	16%	4%	21%	14%	53%	49%	33%
MIROC5	-11%	-10%	-10%	-10%	-10%	-16%	-32%	-41%	-53%	-70%	-59%	-21%
<b>Promedio</b>	<b>4%</b>	<b>5%</b>	<b>3%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>-13%</b>	<b>-8%</b>	<b>-14%</b>	<b>-10%</b>	<b>-16%</b>	<b>-1%</b>
<b>Max</b>	<b>28%</b>	<b>24%</b>	<b>21%</b>	<b>18%</b>	<b>16%</b>	<b>16%</b>	<b>4%</b>	<b>21%</b>	<b>14%</b>	<b>63%</b>	<b>60%</b>	<b>33%</b>
<b>Min</b>	<b>-16%</b>	<b>-15%</b>	<b>-15%</b>	<b>-14%</b>	<b>-14%</b>	<b>-21%</b>	<b>-32%</b>	<b>-54%</b>	<b>-75%</b>	<b>-81%</b>	<b>-72%</b>	<b>-27%</b>

**Tabla 7-12:** Proyecciones de almacenamiento en Hacienda Las Nieves para el escenario futuro intermedio.

<b>Futuro Intermedio (2047-2073)</b>												
<b>Modelos</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
ACCESS1-0	-11%	-12%	-14%	-14%	-14%	-18%	-25%	-25%	-29%	-48%	-47%	-18%
CESM1-CAM5-1-FV2	18%	15%	13%	11%	10%	9%	7%	19%	12%	43%	29%	19%
HadGEM2-CC	-29%	-25%	-24%	-23%	-22%	-29%	-43%	-74%	-89%	-96%	-95%	-44%
<b>Promedio</b>	<b>-8%</b>	<b>-6%</b>	<b>-6%</b>	<b>-6%</b>	<b>-7%</b>	<b>-11%</b>	<b>-20%</b>	<b>-23%</b>	<b>-34%</b>	<b>-40%</b>	<b>-45%</b>	<b>-17%</b>
<b>Max</b>	<b>18%</b>	<b>16%</b>	<b>14%</b>	<b>13%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>7%</b>	<b>20%</b>	<b>12%</b>	<b>43%</b>	<b>29%</b>	<b>19%</b>
<b>Min</b>	<b>-29%</b>	<b>-25%</b>	<b>-24%</b>	<b>-23%</b>	<b>-22%</b>	<b>-29%</b>	<b>-46%</b>	<b>-74%</b>	<b>-89%</b>	<b>-96%</b>	<b>-95%</b>	<b>-44%</b>

Cabe destacar que a pesar de que los resultados de las proyecciones muestran una disminución en el almacenamiento de agua en el embalse, sobre todo para los meses de mayor entrega, el embalse es capaz de realizar un proceso de llenado y vaciado en ambos escenarios, esto se puede ver en la serie de tiempo mostrada en el Anexo 8.

#### **7.3.1.4 Comentarios de resultados en Cuenca Hacienda Las Nieves**

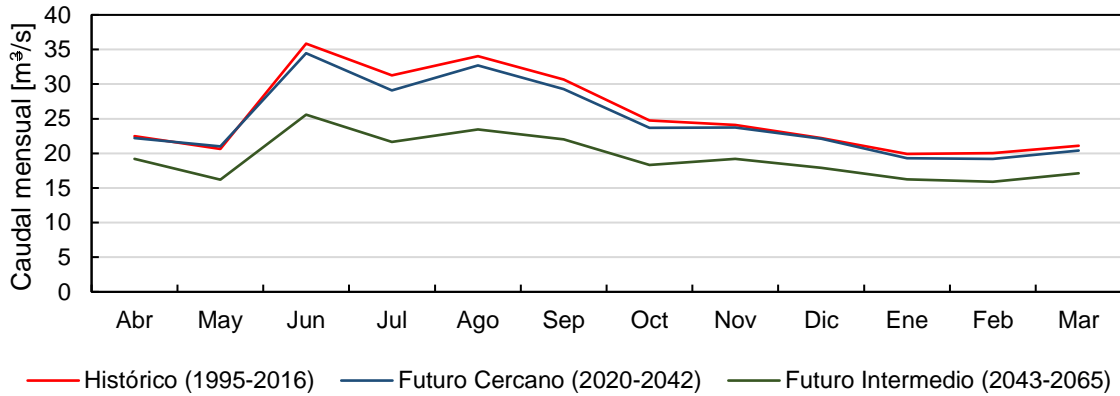
Se presentó un resultado inesperado para el escenario futuro cercano, donde para los meses de deshielo el caudal promedio mensual tiene un leve aumento con respecto al caudal histórico, además la acumulación de nieve también disminuye en los periodos de acumulación en este escenario. Esto se explica debido al aumento de temperatura presentado por los modelos de simulación (Figura 7-6) que incrementa la tasa de derretimiento de la nieve presente en la banda 13, lo cual provoca un aumento en la escorrentía superficial disminuyendo así la infiltración.

Por otro lado, el resultado más relevante se presenta en el almacenamiento del embalse ya que para el futuro intermedio se provee una notoria disminución sobre todo en los meses de mayor demanda. Esto es preocupante dado que el embalse tiene como objetivo cubrir gran parte de la demanda de los cultivos que existen en la cuenca en los meses que existe una ausencia de precipitaciones

#### **7.3.2 Cuenca Río Claro en Tunca**

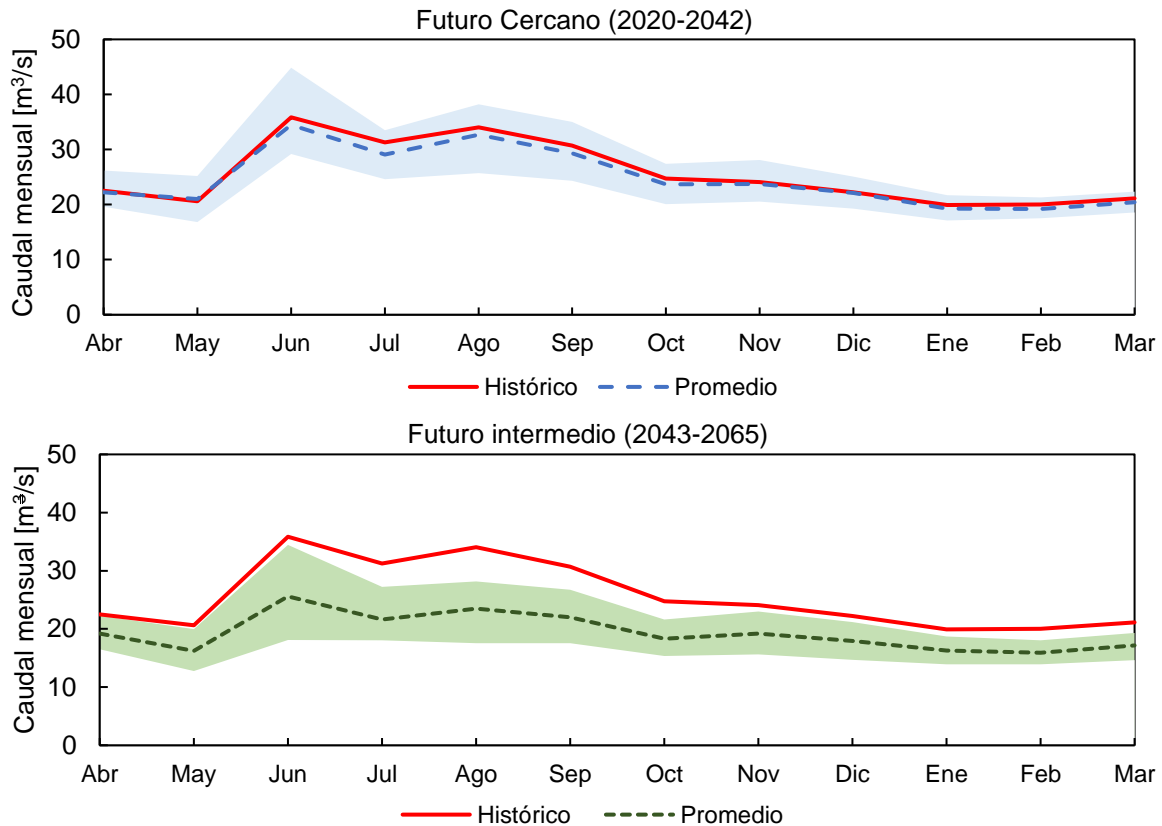
##### **7.3.2.1 Disponibilidad del recurso hídrico**

Los resultados de las proyecciones para la cuenca Hacienda Las Nieves sirven como entrada para determinar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del Río Claro en Tunca. La Figura 7-14 muestra la comparación de caudales promedios mensuales para cada escenario como resultado de los 13 modelos de simulación, donde se aprecia una leve diferencia entre el escenario histórico y futuro cercano, mientras que la diferencia con el futuro intermedio se ve significativamente mayor llegando a ser casi 10 m<sup>3</sup>/s menor en el mes de Junio con respecto el periodo histórico.



**Figura 7-14:** Comparación caudales mensuales promedio históricos y futuros para Cuenca del Río Claro en Tunca

La banda de resultados para la cuenca da a conocer que para el escenario futuro cercano las proyecciones no son tan negativas, con escenarios que favorecen el aumento en el recurso hídrico. Sin embargo, en el futuro intermedio, todas las proyecciones están por debajo del promedio histórico, revelando un futuro con escasez hídrica respecto al escenario histórico considerado en el análisis (Ver Figura 7-15).



**Figura 7-15:** Banda de resultados de los 13 modelos para Futuro Cercano e Intermedio en Cuenca del Río Claro en Tunca.

Para cuantificar cuánto puede llegar a ser la disminución del recurso es que se crean las Tablas 7-13 y 7-14 donde se expone el porcentaje de variación con respecto al caudal medio mensual en el periodo histórico para tres modelos representativos, mientras que las tablas de todos los modelos se encuentran en el Anexo 9

**Tabla 7-13:** Proyecciones de caudal medio mensual para la Cuenca del Río Claro en Tunca en futuro cercano.

<b>Futuro Cercano (2020-2042)</b>												
<b>Modelos</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
CESM1-CAM5-1-FV2	5%	5%	-5%	1%	7%	-2%	2%	6%	6%	3%	1%	2%
HadGEM2-AO	9%	16%	4%	-5%	12%	14%	11%	17%	13%	9%	6%	6%
NorESM1-M	-12%	-16%	-7%	-19%	-21%	-20%	-19%	-15%	-13%	-14%	-13%	-11%
<b>Promedio</b>	<b>-1%</b>	<b>2%</b>	<b>-4%</b>	<b>-7%</b>	<b>-4%</b>	<b>-5%</b>	<b>-4%</b>	<b>-2%</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-4%</b>	<b>-3%</b>
<b>Max</b>	<b>16%</b>	<b>22%</b>	<b>25%</b>	<b>7%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>11%</b>	<b>17%</b>	<b>13%</b>	<b>9%</b>	<b>6%</b>	<b>6%</b>
<b>Min</b>	<b>-13%</b>	<b>-18%</b>	<b>-19%</b>	<b>-21%</b>	<b>-24%</b>	<b>-21%</b>	<b>-19%</b>	<b>-15%</b>	<b>-13%</b>	<b>-14%</b>	<b>-13%</b>	<b>-12%</b>

Para el futuro cercano las variaciones en promedio no son tan excesivas, pero si hay modelos que proyecta una merma importante de caudal, llegando presentar disminuciones de hasta un 24% con respecto al histórico.

**Tabla 7-14:** Proyecciones de caudal medio mensual para la Cuenca del Río Claro en Tunca en futuro intermedio.

<b>Futuro Intermedio (2043-2065)</b>												
<b>Modelos</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
ACCESS1-3	-18%	-7%	-29%	-36%	-24%	-28%	-24%	-23%	-22%	-21%	-22%	-20%
CESM1-CAM5-1-FV2	-4%	-7%	-11%	-13%	-19%	-18%	-13%	-5%	-5%	-6%	-10%	-9%
HadGEM2-CC	-27%	-33%	-50%	-42%	-48%	-43%	-38%	-35%	-34%	-30%	-31%	-31%
<b>Promedio</b>	<b>-15%</b>	<b>-21%</b>	<b>-29%</b>	<b>-31%</b>	<b>-31%</b>	<b>-28%</b>	<b>-26%</b>	<b>-20%</b>	<b>-19%</b>	<b>-18%</b>	<b>-21%</b>	<b>-19%</b>
<b>Max</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-4%</b>	<b>-13%</b>	<b>-17%</b>	<b>-13%</b>	<b>-13%</b>	<b>-5%</b>	<b>-5%</b>	<b>-6%</b>	<b>-10%</b>	<b>-9%</b>
<b>Min</b>	<b>-27%</b>	<b>-38%</b>	<b>-50%</b>	<b>-42%</b>	<b>-48%</b>	<b>-43%</b>	<b>-38%</b>	<b>-35%</b>	<b>-34%</b>	<b>-30%</b>	<b>-31%</b>	<b>-31%</b>

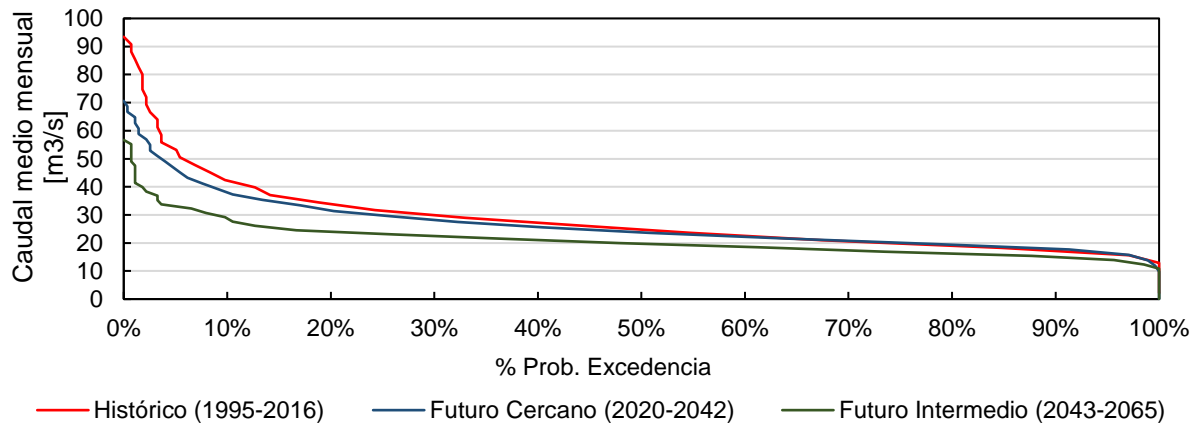
La Tabla 7-14 da muestra el nivel de escases del recurso para el futuro intermedio llegando a ser en promedio un 31% más bajo que el registrado históricamente. Esto puede verse aún más acentuado si se llegase a dar la proyección del escenario más desfavorable ya que presentaría una baja de recurso de hasta un 50%.

Este comportamiento de escasez es más notorio en meses de lluvia mientras que para los caudales base presentes en verano la disminución es menor. Esto se puede ver de mejor manera en la serie de tiempo del caudal de la cuenca presentado en el Anexo 4.

En la Figura 7-16 se puede ver las curvas de duración de caudales para los tres escenarios, en la cual se ve claramente que para el futuro cercano existe una disminución en los caudales peak, mientras que en los caudales base no existe una notoria variación con respecto a los caudales medios históricos.

Para el futuro intermedio se ve una disminución a lo largo de todos los porcentajes de probabilidad de excedencia, siendo considerablemente más notorio para los caudales medio mensuales con una probabilidad menor al 13% (caudales base).

A nivel anual, existe una disminución promedio de un 5% para el futuro cercano y un 25% para el futuro intermedio con respecto al caudal anual histórico.



**Figura 7-16:** Comparación curva de duración de caudales promedios, Cuenca Río Claro en Tunca.

### 7.3.2.2 Satisfacción de la demanda

Para realizar el análisis de la cobertura de la demanda, se hace la suposición que los derechos de agua asignados a cada banda (Tabla 6-4) no cambian en el periodo analizado. Los resultados de las proyecciones muestran que solo en las bandas 1 y 9 no se llega a cumplir con la cobertura del derecho asociado.

Para la banda 1 se muestra en la Figura 7-17 la serie de tiempo del caudal antes de la extracción de la banda, donde se aprecia que para todos los escenarios existen meses donde no se cumple con el derecho de agua asociado (16.8 l/s).

En el periodo histórico hubo un total de 59 meses donde no se satisface la demanda de un total de 276 meses analizados, lo cual corresponde a un 21.4% del periodo. El caudal máximo no cubierto es de 6.3 (l/s), lo que equivale a un 38% del derecho.

Tal como se muestra en la Figura 7-17, entre los años 1998 y 1999 se registró un total de 11 meses consecutivos donde no se cumple el derecho de agua de la banda 1.

La Tabla 7-15 muestra la cantidad de meses que no hubo cobertura del derecho para la banda 1 en los escenarios futuro cercano e intermedio, mientras que la Tabla 7-16 muestra el resumen.

**Tabla 7-15:** Cantidad de meses de no cobertura para la Banda 1.

<b>Escenario</b>	ACCESS 1-0	ACCESS1 -3	CCSM4	CESM1-CAM5-1-FV2	CMCC-CESM	FGOALS -s2	NorESM1-ME
<b>Cercano (meses)</b>	42	42	54	28	27	38	36
<b>%</b>	15.2	15.2	19.6	10.1	9.8	13.8	13.0
<b>Intermedio (meses)</b>	111	107	88	57	77	116	135
<b>%</b>	40.2	38.8	31.9	20.7	27.9	42.0	48.9
<b>Escenario</b>	FIO-ESM	HadGEM2 -AO	HadGEM2 -CC	HadGEM2-ES	MIROC5	NorESM 1-M	-
<b>Cercano (meses)</b>	70	17	73	19	66	81	-
<b>%</b>	25.4	6.2	26.4	6.9	23.9	29.3	-
<b>Intermedio (meses)</b>	127	55	180	71	155	162	-
<b>%</b>	46.0	19.9	65.2	25.7	56.2	58.7	-

**Tabla 7-16:** Resumen de resultados sobre meses de no cobertura.

Escenario	Promedio	Max	Min
Cercano (meses)	<b>46</b>	<b>81</b>	<b>17</b>
%	<b>16.5</b>	<b>29.3</b>	<b>6.2</b>
Intermedio (meses)	<b>111</b>	<b>180</b>	<b>55</b>
%	<b>40.2</b>	<b>65.2</b>	<b>19.9</b>

La Tabla 7-16 muestra que para el escenario futuro cercano en promedio hubo 46 meses donde no se logra la cobertura de la demanda, siendo este valor menor que el alcanzado en el periodo histórico (59 meses). Sin embargo, para el futuro intermedio existe un aumento considerable en los meses de no cobertura alcanzado en promedio un total de 111 meses.

El periodo más crítico se encuentra entre los años 2060 y 2062 en los cuales se registra un total de 25 meses consecutivos de insatisfacción de la demanda para el modelo de simulación HadGEM2-CC (Ver Figura 7-17).

La Tabla 7-17 muestra la cantidad en caudal de la demanda no cubierta para todos los modelos de simulación. Cabe destacar que los modelos que no se encuentran en la tabla cumplen con la cobertura del derecho en todo momento.

**Tabla 7-17:** Cantidad de demanda no cubierta para la Banda 1.

<b>Escenario</b>	ACCESS1-0	ACCESS1-3	CCSM4	CESM1-CAM5-1-FV2	CMCC-CESM	FGOALS-s2	FIO-ESM
<b>Cercano (m<sup>3</sup>/s)</b>	6.81	6.67	7.08	6.11	6.30	6.09	7.53
<b>%</b>	41.2	40.4	42.9	37.0	38.2	36.9	45.7
<b>Intermedio (m<sup>3</sup>/s)</b>	7.54	7.28	7.30	6.52	6.69	7.27	7.85
<b>%</b>	45.7	44.1	44.2	39.5	40.5	44.1	47.6
<b>Escenario</b>	HadGEM2-AO	HadGEM2-CC	HadGEM2-ES	MIROC5	NorESM1-M	NorESM1-ME	-
<b>Cercano (m<sup>3</sup>/s)</b>	5.40	7.63	5.40	7.50	7.54	6.37	-
<b>%</b>	32.7	46.3	32.7	45.4	45.7	38.6	-
<b>Intermedio (m<sup>3</sup>/s)</b>	6.29	8.05	6.39	7.94	8.04	7.24	-
<b>%</b>	38.1	48.8	38.7	48.1	48.7	43.9	-

**Tabla 7-18:** Resumen de resultados sobre demanda no cubierta.

Escenario	Promedio	Max	Min
Cercano (m <sup>3</sup> /s)	<b>6.65</b>	<b>7.63</b>	<b>5.40</b>
%	<b>40.3</b>	<b>46.3</b>	<b>32.7</b>
Intermedio (m <sup>3</sup> /s)	<b>7.26</b>	<b>8.05</b>	<b>6.29</b>
%	<b>44.0</b>	<b>48.8</b>	<b>38.1</b>

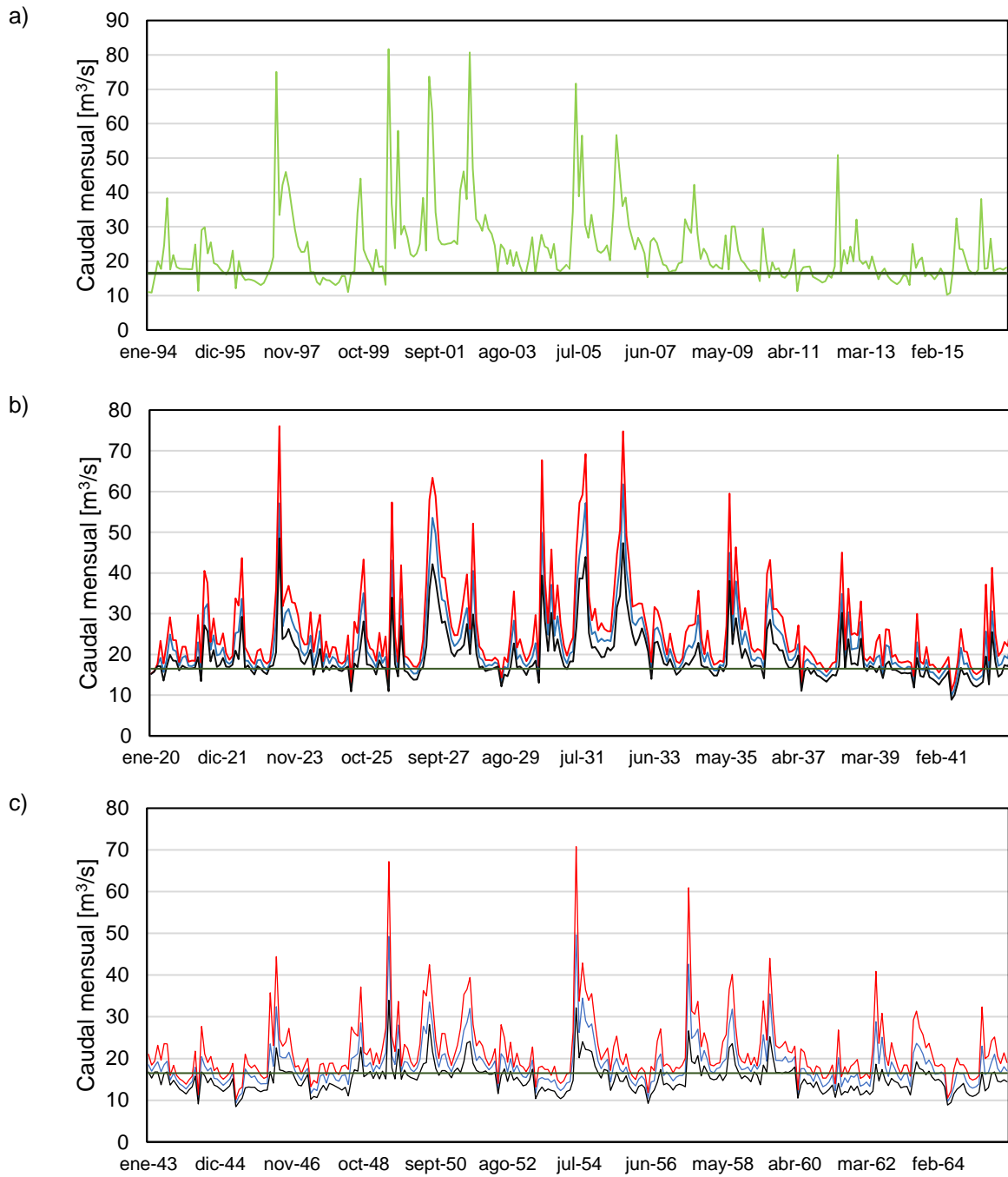
En base a los resultados mostrados en las Tablas 7-17 y 7-18, se puede ver que, si bien hay una gran diferencia entre los meses de no cobertura, la diferencia en cantidad de caudal no cubierto no es tan grande entre ambos periodos. Sin embargo, ambos superan el del periodo histórico llegando a ser en promedio hasta un 44% del derecho.

Para el caso de la Banda 9, tal como se ve en la Figura 7-18, solo en el escenario futuro intermedio no se cumple con la demanda, alcanzando en promedio un total de 3 meses de no cobertura con un valor máximo promedio de 0.25 (m<sup>3</sup>/s) de insatisfacción, lo cual corresponde a un 7% de derecho (3.8 m<sup>3</sup>/s).

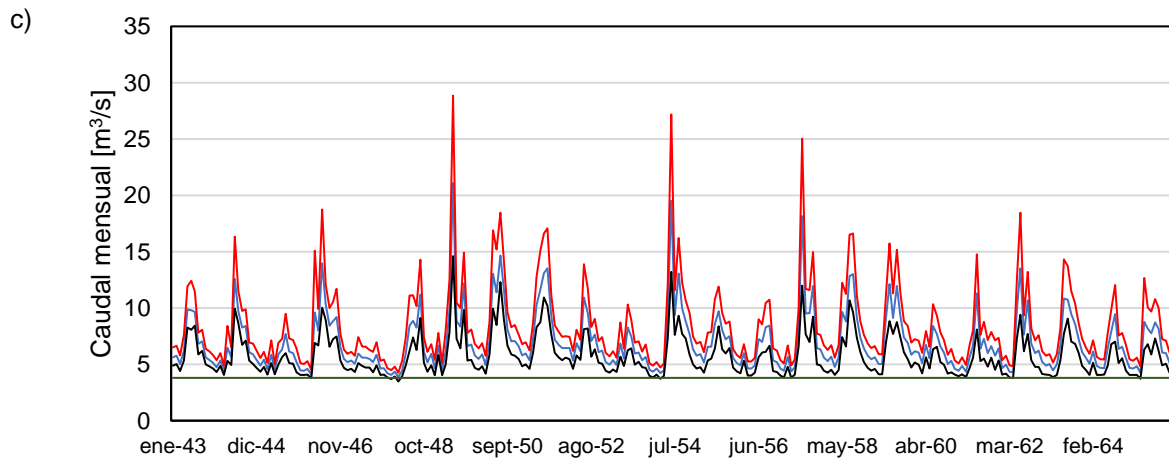
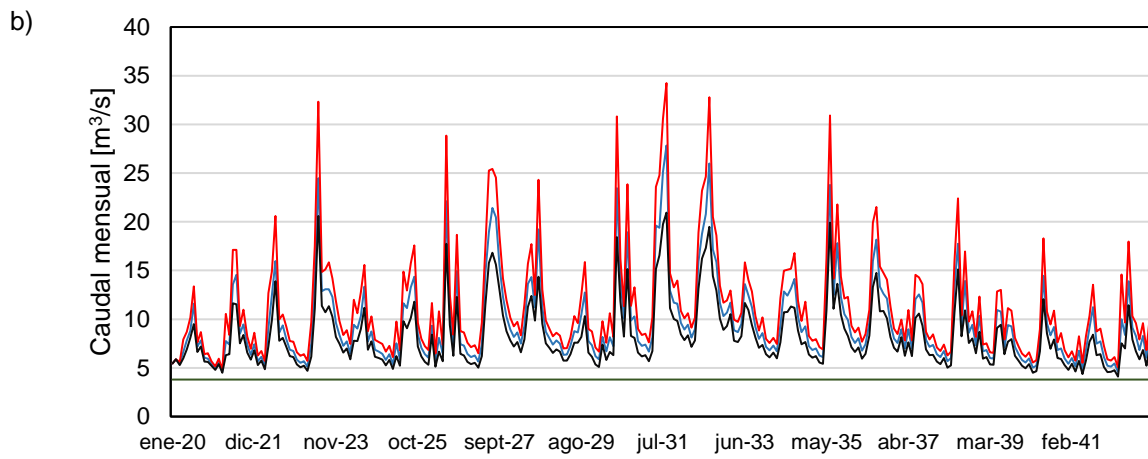
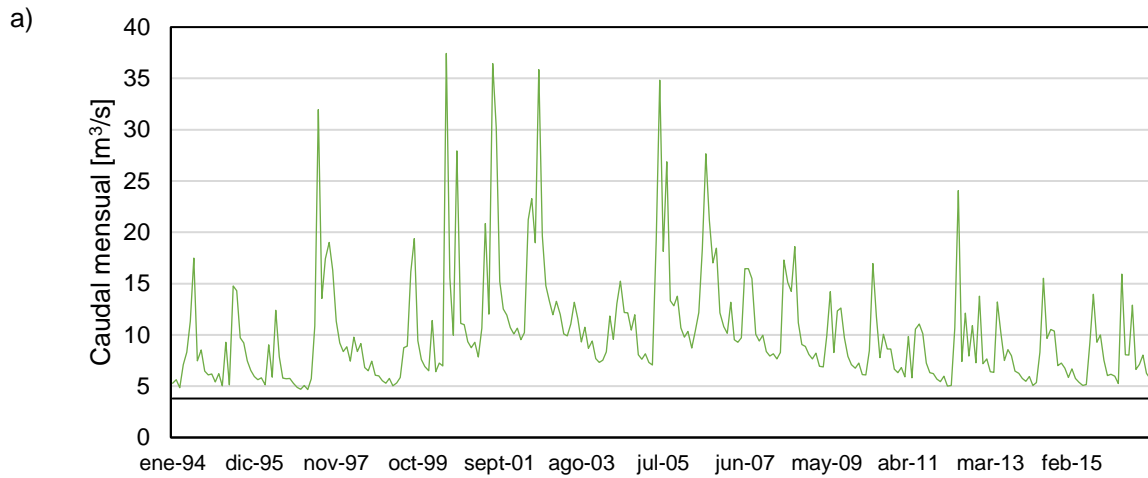
En el Anexo 10 se muestra gráficamente la cobertura de demanda para las otras bandas.

### 7.3.2.3 Comentarios de resultados en Cuenca Río Claro en Tunca

Los resultados dan a conocer una disminución notoria en el recurso hídrico marcado principalmente por la disminución en las precipitaciones incorporadas en los modelos de simulación. Esta escasez del recurso hace que cada año sea más complicado conseguir cubrir el derecho de agua lo cual afecta directamente en la agricultura de la cuenca.



**Figura 7-17:** Cobertura de demanda para la banda 1 para los periodos: a) Histórico (1994-2016), b) Futuro cercano (2020-2042) y c) Futuro intermedio (2043-2064).



**Figura 7-18:** Cobertura de demanda para la banda 9 para los periodos: a) Histórico (1994-2016), b) Futuro cercano (2020-2042) y c) Futuro intermedio (2043-2064).

## 8. Recomendaciones y posibles medidas de adaptación al cambio climático en la cuenca

En esta sección se propone una posible medida de adaptación al cambio climático basada en los resultados obtenidos y una recopilación de recomendaciones presentes en la literatura.

### 8.1 Limitar la expansión del terreno agrícola

Tal como se mostró en la Figura 4-4, la cuenca solo hasta el año 2015 cuenta con más de un 40% de su superficie con terrenos agrícolas. Sin embargo, en la cuenca hay presente terrenos con matorrales los cuales podrían ser considerados como potenciales zonas para cultivos agrícolas.

Una expansión del terreno agrícola en la cuenca conlleva un aumento en la demanda del recurso hídrico y por consecuencia un incremento en los derechos de agua asociado a la red de canales de la cuenca. Esto se podría hacer perfectamente en las bandas en las cuales, bajo los efectos del cambio climático, siempre tienen agua disponible para satisfacer los derechos de agua asociados, tal como la banda 6 ya que esta presenta una considerable extensión de matorrales (Ver Tabla 8-1).

**Tabla 8-1:** Uso de suelo para banda de elevación N°6.

Uso de suelo	Banda 6	Banda 6
	Área Km2	%
Áreas desprovistas de vegetación	2.82	5.03
Áreas Urbanas	2.51	4.48
Bosque	20.87	37.20
Cuerpos de agua	0.00	0.00
Humedales	0.00	0.00
Nieves eternas y glaciares	0.00	0.00
Praderas y matorrales	14.45	25.76
Terreno Agrícola	15.45	27.53
<b>Totales</b>	<b>56.10</b>	<b>100.00</b>

Para ver qué sucede con una expansión del terreno agrícola, se incorpora al modelo un cambio en el uso de suelo para la banda 6. El criterio de expansión fue tomado a partir de lo obtenido en 7.3.2.2, donde en promedio en la banda 6, se puede aumentar en 0.58 m<sup>3</sup>/s el derecho de agua y aun así se sigue satisfaciendo la demanda. En base a este aumento del derecho se calcula un área de terreno agrícola equivalente igual a 400 [Ha] el cual tendrá lugar cambiando el uso de suelo Praderas y matorrales.

Tanto el aumento del derecho como del terreno agrícola son incorporados al modelo WEAP, donde se utilizan 5 modelos de simulación, que como se mostró en 7.3.2.1 evidencian la variabilidad de las proyecciones.

Los resultados muestran que solo en la banda 1 no hay un cubrimiento del derecho. Sin embargo, en las bandas 2, 3, 4 y 5 aumenta la brecha entre la oferta y la demanda del recurso hídrico.

La Tabla 8-1, muestra el total de meses de no cobertura para los 5 modelos de simulación para los periodos futuro cercano y futuro intermedio con el cambio en el uso de suelo para la banda 6.

**Tabla 8-2:** Cantidad de meses de no cobertura para la banda 1 bajo cambios de uso de suelo en banda 6.

Escenario	CESM1-CAM5-1-FV2	HadGEM2-AO	NorESM1-M	ACCESS1-3	HadGEM2-CC
<b>Cercano (Meses)</b>	42	26	97	51	88
%	15	9	35	18	32
<b>Intermedio (Meses)</b>	69	69	176	125	196
%	25	25	64	45	71

**Tabla 8-3:** Resumen de resultados para meses de no cobertura.

Escenario	Promedio	Max	Min
Cercano (Meses)	<b>60.8</b>	<b>97</b>	<b>26</b>
%	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>9</b>
Intermedio (Meses)	<b>127</b>	<b>196</b>	<b>69</b>
%	<b>46</b>	<b>71</b>	<b>25</b>

En la Tabla 8-3 se muestra el resumen en cuanto a los meses en los cuales no hubo cobertura del derecho de agua asociado a la banda 1, con respecto a la Tabla 7-16, en promedio hubo un aumento de 15 meses de no cobertura para el futuro cercano y en 16 para el futuro intermedio, alcanzando en total un aumento de 31 meses en ambos periodos. También los meses consecutivos de insatisfacción pasaron de 22 a 25 meses con el cambio en el uso de suelo.

La Tabla 8-4 muestra la cantidad en caudal de la demanda no cubierta para los 5 modelos con el cambio en la banda 6.

**Tabla 8-4:** Cantidad de demanda no cubierta para la Banda 1 bajo cambio de uso de suelo en banda 6.

Escenario	CESM1-CAM5-1-FV2	HadGEM2-AO	NorESM1-M	ACCESS1-3	HadGEM2-CC
<b>Cercano (m<sup>3</sup>/s)</b>	6.55	5.84	7.98	7.09	8.09
%	40	35	48	43	49
<b>Intermedio (m<sup>3</sup>/s)</b>	6.94	6.74	8.46	7.70	8.72
%	42	41	51	47	53

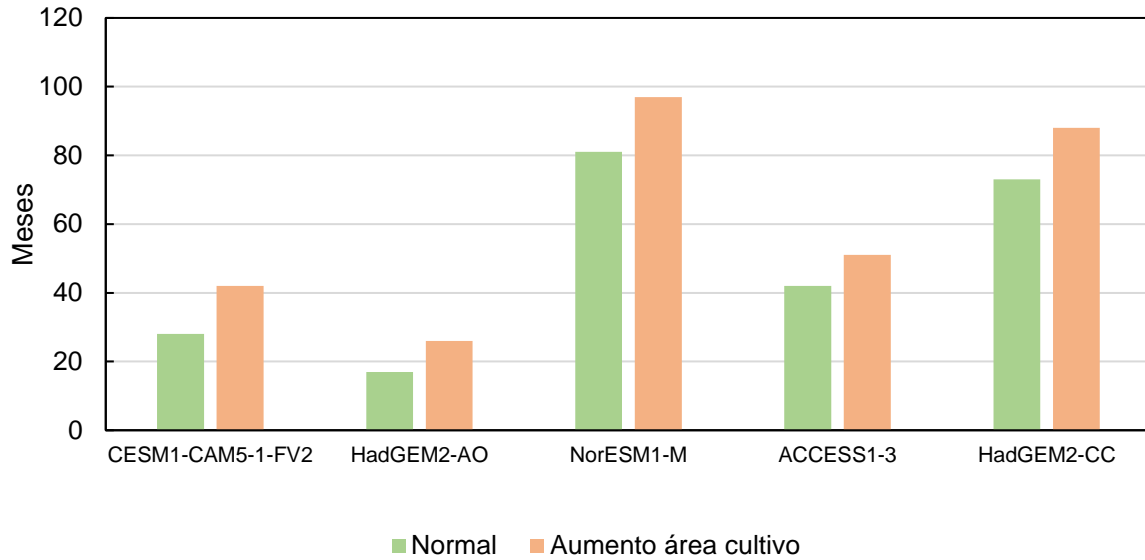
**Tabla 8-5:** Resumen de resultados para cantidad de derecho no cubierto.

Escenario	Promedio	Max	Min
Cercano (m <sup>3</sup> /s)	<b>7.11</b>	<b>8.09</b>	<b>5.84</b>
%	<b>43</b>	<b>49</b>	<b>35</b>
Intermedio (m <sup>3</sup> /s)	<b>7.71</b>	<b>8.72</b>	<b>6.74</b>
%	<b>47</b>	<b>53</b>	<b>41</b>

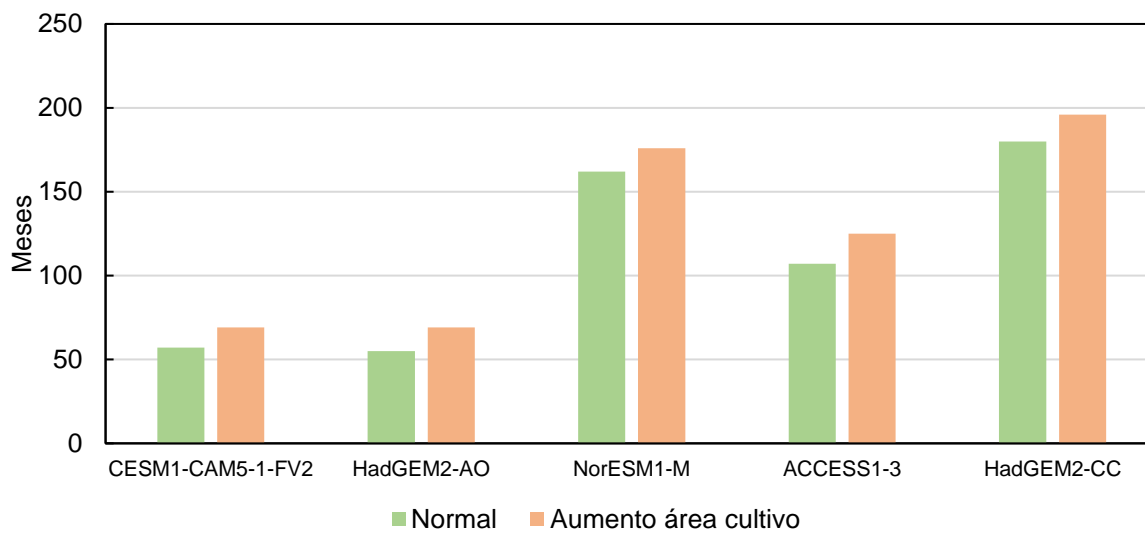
En la Tabla 8-5 se muestra el resumen en cuanto a la demanda no cubierta en m<sup>3</sup>/s de la banda 1, bajo el cambio de uso de suelo en la banda 6. En base a la Tabla 7-18, en promedio hubo un aumento de 0.46 m<sup>3</sup>/s para el futuro cercano y en 0.45 m<sup>3</sup>/s para el futuro intermedio en cantidad de demanda no cubierta. Estos aumentos representan un 7% y 6% respectivamente producto de la expansión agrícola.

Las Figuras 8-1 y 8-2 muestran la comparación entre los modelos de simulación para los meses de no cobertura y la cantidad de demanda no cubierta con respecto a los escenarios normal y aumento en el área de cultivo en la cuenca.

Comparación modelos futuro cercano

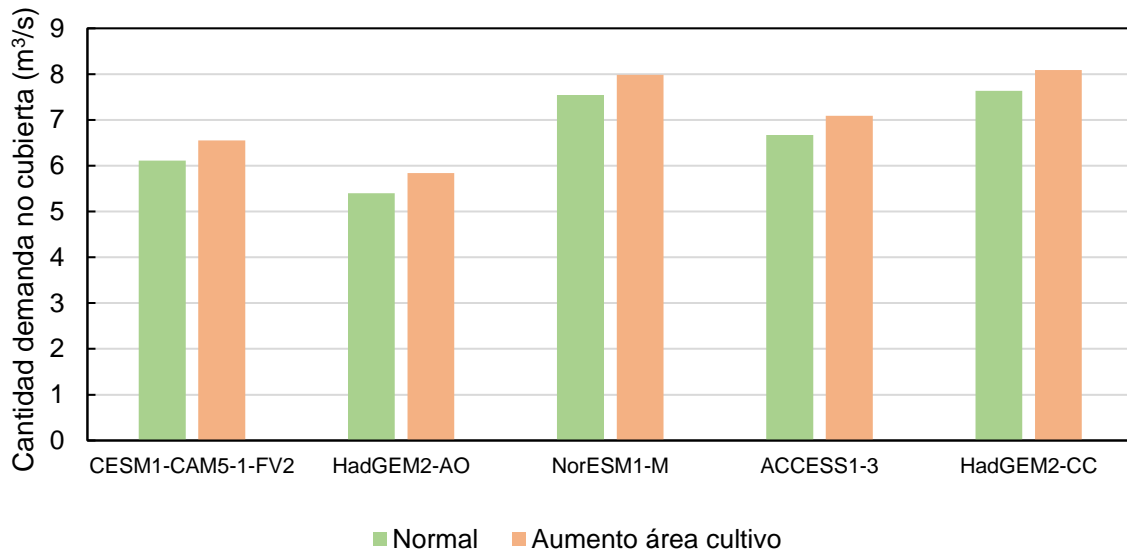


Comparación modelos futuro intermedio

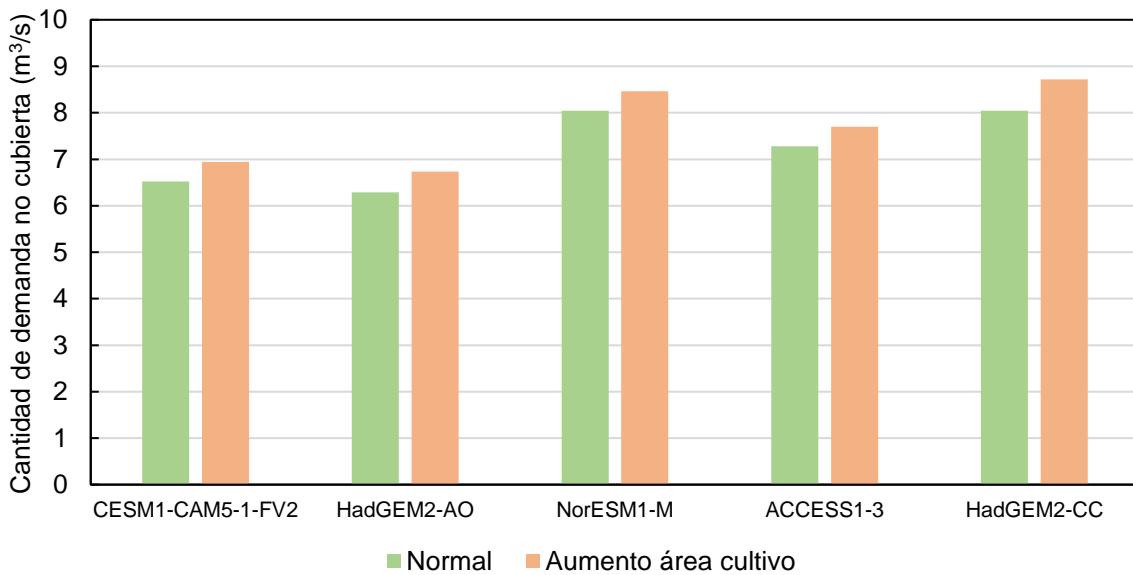


**Figura 8-1:** Comparación de meses de no cobertura para los 5 modelos de simulación en los escenarios normal y aumento en área de cultivo.

### Comparación modelos futuro cercano



### Comparación modelos futuro intermedio



**Figura 8-2:** Comparación de cantidad de demanda no cubierta para los 5 modelos de simulación en los escenarios normal y aumento en área de cultivo.

Sin duda, la expansión afecta negativamente a la disponibilidad del recurso hídrico, como se pudo ver, un aumento de 400 hectáreas lo cual equivale a un aumento de un 3% en la superficie agrícola de la banda 6, aumenta considerablemente los meses donde no se cumple la demanda.

Es por esto que es de suma importancia limitar la expansión del terreno agrícola en la cuenca ya que históricamente existe un déficit del recurso en la parte baja y este se puede prolongar a lo largo de toda la cuenca si existe un crecimiento agrícola no controlado.

En el Anexo 11 se muestra la serie de tiempo de la cobertura de las bandas afectadas por el cambio en el área de cultivo.

## 8.2 Rotación de cultivos permanentes en la cuenca

Cuando se comenzó a realizar este trabajo de título, la información más reciente respecto a los cultivos en la región de O'Higgins era el Catastro Frutícola del año 2015 [48]. En ese entonces, en la localidad de Rengo, los principales cultivos permanentes eran el duraznero, vid de mesa, manzano y el cerezo. Actualmente se encuentra disponible la información del Catastro Frutícola 2018 [49] donde se destaca un gran crecimiento tanto en exportaciones como en superficie plantada de cerezo, llegando a ser el cultivo predominante en la región y en la comunidad de Rengo.

En la Tabla 8-6 se muestra las variaciones que han tenido los principales cultivos de la cuenca en cuanto a superficie plantada en la región como la variación en las exportaciones en el periodo 2015-2018. Los números reflejan que cultivos que antes predominaban en la zona están bajando su producción y sus exportaciones, tal es el caso del durazno y el manzano, llegando a tener números negativos respecto al año 2015.

La vid de mesa ya no es el principal cultivo de la región dado que hubo un estancamiento en las exportaciones producto de un mercado con mayor competencia y variedades lo cual está haciendo que los productores chilenos pierdan terreno en el mercado<sup>4</sup>.

El cultivo de manzana se está viendo afectado principalmente por el aumento en la temperatura de la región, teniendo repercusiones en la fecha de floración, acidez, firmeza y corazón de la manzana, lo cual tiene como consecuencia un traslado de manzanos a las regiones del sur, como son Bío Bío y la Araucanía, donde las temperaturas y lluvias son más favorables para conseguir un fruto de exportación [50].

Sin duda existe una rotación de cultivos en la zona, pero la causa principal no es el cambio climático sino más bien tener un cultivo más lucrativo como cerezas y nueces. Esto se ve reflejado con la Tabla 8-6 donde se presentan aproximadamente el consumo anual de cada cultivo, el cual se calculó mediante evapotranspiración de la estación Rengo estimada con el método de Ivanov que ha presentado buenos resultados en la región de O'Higgins [51]. El consumo de agua que tienen estos cultivos lucrativos es de igual o incluso superior magnitud que los cultivos que están bajando su producción en la cuenca.

Actualmente, Chile se ha convertido en el principal exportador de cerezas del hemisferio sur debido a la alta demanda que existe desde China, lo cual explica la gran variación de este cultivo en la región. Similar es el caso de las nueces, donde un aumento del 30% de su valor ha impulsado a la producción y exportación de dicho fruto<sup>5</sup> [52].

---

<sup>4</sup> Fuente: <http://www.redagricola.com/cl/la-industria-de-la-uva-de-mesa-chilena-y-sus-retos>

<sup>5</sup> Fuente: [https://elpais.com/economia/2019/03/21/actualidad/1553168111\\_505359.html](https://elpais.com/economia/2019/03/21/actualidad/1553168111_505359.html)

**Tabla 8-6:** Variaciones de exportaciones y superficie plantada 2015-2018 según censo frutícola 2018 en la región de O'higgins [49].

Especie	N° Exportaciones 2018	Variación 2015-2018 (%)	Superficie (ha) 2015	Superficie (ha) 2018	Variación (%)	participación nacional (%)	Consumo anual (m <sup>3</sup> /ha/año)
Almendo	142	10	2413	2959	23	33	8860
Cerezo	914	44	8675	13699	58	45	8354
Ciruelo	303	-2	5378	5743	2	62	7326
Durazno	397	2	3021	2659	-3	51	9177
Kiwi	219	-4	3054	3014	-1	35	8158
Manzano	529	-14	4622	3867	-18	29	8450
Naranja	194	-8	1873	1758	-6	28	7581
Nectarín	665	9	3645	3866	6	73	7713
Nogal	301	35	5527	7022	27	19	9031
Uva de mesa	537	0	12364	13435	9	28	9397

Como se pudo apreciar en la Tabla 8-6, existe toda una estrategia comercial en el cambio de cultivos en la zona, donde el cerezo, entre el periodo 2015-2018, alcanza hasta un aumento del 44% en la superficie plantada.

**Tabla 8-7:** Algunos cultivos con menor consumo anual a nivel nacional [49].

Especie	N° Exportaciones 2018	Variación 2015-2018 (%)	Superficie (ha) 2015	Superficie (ha) 2018	Variación (%)	participación nacional (%)	Consumo anual (m <sup>3</sup> /ha/año)
Frambuesa	26	189	36	52	44	2	5725
Jojoba	-	-	-	-	-	-	4602
Maqui	2	100	0	7	100	81	6000
Nogal Serr	-	-	-	-	-	-	7715
Tuna	3	0	25	8	-69	1	3230

La Tabla 8-7 muestra algunos cultivos que tienen un consumo anual más reducido. Una variedad del nogal es el nogal serr, el cual reduce hasta un 30% el consumo de agua en los meses de verano, sin embargo, su consumo anual sigue siendo alto [53].

Los cultivos que menos demandan agua son la tuna y la jojoba pero estos cultivos son de climas más áridos predominan en las regiones del norte de Chile y su rentabilidad no se compara con la cereza.

Una buena alternativa sería el maqui el cual se conoce como un superalimento cuya demanda mundial ha ido en aumento debido a sus propiedades antioxidantes. Si bien este cultivo se encuentra de manera silvestre, diversas empresas han realizado investigaciones con el fin de producirlo a nivel industrial consiguiendo en 2017 tres variedades que permiten masificar la producción<sup>6</sup>.

*“Hoy se comercializa en Chile y en distintos lugares del mundo, además de como fruto fresco, principalmente a través de cápsulas, polvo liofilizado, néctar, pulpa, aguas y jugos. Las exportaciones llegaron a US\$4,5 millones en 2015, con más de 190.000 kilos procesados que fueron enviados a destinos como Japón, Corea del Sur, Italia, Estados Unidos, Alemania, Australia y Dinamarca, entre otros. En 2016 las ventas al exterior aumentaron a US\$9,9 millones y 433.000 kilos procesados”<sup>5</sup>.*

<sup>6</sup> Fuente: <http://www.redagricola.com/cl/maqui-un-negocio-millonario-que-apuesta-por-masificarse/>

Otro cultivo puede ser la frambuesa, la cual se espera que para el año 2020 su valor por kilo se eleve llegando a 1200 pesos por kilo, esto producto al aumento de demanda de este fruto<sup>7</sup>.

### 8.3 Aumento en la eficiencia de riego

La Tabla 8-3 muestra que en la región de O'Higgins para los árboles frutales existe un gran porcentaje de riego por goteo. Sin embargo, la idea es aumentar este porcentaje disminuyendo el riego por surcos.

**Tabla 8-8:** Distribución porcentual de la superficie de frutales por método de riego en la región de O'Higgins [49].

Método de riego	Eficiencia (%)	Método en la región (%)
<b>Tendido</b>	30	5
<b>Surco</b>	45	21
<b>Microaspersión</b>	85	7.8
<b>Goteo</b>	90	66.2

Distinto pasa para cultivos anuales tales como el maíz, que su eficiencia de riego en la cuenca no supera el 50% [54]. Un aumento en la eficiencia de riego del maíz tendría una repercusión bastante positiva dado que su participación en la cuenca en cuanto a hectáreas es considerable.

### 8.4 Mejorar la implementación predial

Actualmente se apunta a la agricultura de precisión (AP), este es un concepto agronómico de gestión de predios agrícolas, basado en la existencia de una importante variabilidad espacial a nivel de campo. Esto requiere del uso de varias herramientas tecnológicas dentro de las cuales destacan, Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes satelitales, sensores remotos y/o Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Toda la información extraída de estas tecnologías puede ser usada para conseguir mayores beneficios y reducir los costos [55].

Esta medida de mitigación apunta a un tipo de sensor remoto en particular: los sensores de humedad de suelo, los cuales tienen como objetivo monitorear el contenido de agua en el suelo, esto es esencial para ayudar a los agricultores a optimizar la producción, conservar agua, reducir los impactos ambientales y ahorrar dinero. El monitorear la humedad del suelo puede ayudar a tomar mejores decisiones en la programación del riego, tales como el determinar la cantidad de agua a aplicar y cuándo aplicarla. También puede ayudar a igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada con el riego y así evitar pérdidas de agua excesivas por percolación profunda o por escurrimientos o bien evitar aplicar una cantidad insuficiente.

Estos sensores remotos determinan el contenido de agua en el suelo de manera eléctrica, determinando una frecuencia que se produce en el estrato que está indirectamente relacionada con el contenido de agua que tienen las raíces. Su implementación es de manera sencilla y directa al suelo donde se encuentra el cultivo.

En el año 2015 el Instituto de Investigaciones Agropecuarias en su proyecto denominado "Incremento competitividad de los productores del palto Hass de la Región de Valparaíso mediante la

<sup>7</sup> Fuente: <https://www.radiosago.cl/las-frambuesas-recuperaran-precio-despues-de-anos-malos-y-los-arandanos-bajaran/>

transferencia y capacitación del uso de sensores de humedad de suelo” implementó en 25 predios estos sensores, los cuales mejoraron notablemente las prácticas de riego del palto, determinando tiempos de riego localizados y como secuencia un ahorro del recurso hídrico y de la energía eléctrica.

Esta medida se reduce a nivel de predio y su implementación puede llevarse a cabo mediante proyectos de riego.

## 9. Conclusiones

Se logró implementar un modelo hidrológico en una cuenca agrícola con el software WEAP, logrando en los procesos de calibración y validación resultados razonables que sirven para representar de buena manera los fenómenos físicos presentes en la cuenca. A nivel general, se observó que los modelos tienen una leve tendencia a subestimar los caudales altos y sobrestimar los caudales base. Por otro lado, la disminución en el nivel de nieve en la parte alta de la cuenca producto principalmente del aumento de temperatura y disminución de precipitaciones en la época de invierno tendrá como resultado un temprano deshielo.

La dificultad que hubo para llevar a cabo estos procesos fue principalmente la falta de información, tales como: supuesto en la operación del embalse, ausencia de datos meteorológicos y fluviométricos, lo cual generó un considerable aumento en la incertidumbre en los procesos de calibración y validación. Además, en la zona no existe un buen cubrimiento en cuanto a información de temperatura sobre todo en las partes montañosas, lo cual para el modelo fue un gran problema ya que la cuenca cuenta con un desnivel considerable, obligando a la utilización de parámetros para distribuir la temperatura.

Es de suma importancia tener la mayor cobertura posible a nivel nacional de los parámetros tanto meteorológicos como fluviométricos, ya que estos son esenciales para la caracterización de las cuencas y así lograr una buena gestión del recurso hídrico en todo Chile.

La plataforma de simulaciones climáticas CR2MET fue fundamental para la elección de los modelos de circulación global, ya que permite de manera sencilla y en base a la tendencia histórica de la zona, la selección de manera representativa de estos. En general los modelos seleccionados muestran en promedio una disminución sostenida en las precipitaciones alcanzadas en junio una disminución del 9% para el futuro cercano y un 30% para el futuro intermedio con respecto al periodo histórico. Mientras que para la temperatura, se espera que en promedio aumente en el mes de enero, hasta un 7% (+1.1 °C) para el futuro cercano y un 11% (+1.8 °C) para el futuro intermedio.

La agricultura es la actividad principal en la cuenca y, con los resultados observados esta será fuertemente afectada por la escasez del recurso hídrico, generado principalmente por la ausencia de lluvias en la temporada estival y la disminución de la acumulación de nieve en la parte alta de la cuenca, siendo el periodo más crítico el futuro intermedio.

Si bien, en la parte alta de la cuenca no se observaron disminuciones elevadas en el caudal medio mensual, en la parte baja de la cuenca, donde se encuentra la actividad agrícola, se espera para el futuro intermedio una disminución promedio del 31% del caudal para los meses de julio y agosto, siendo de suma importancia tomar medidas preventivas en la cuenca.

Los cultivos permanentes son los que se pueden ver más afectados, dado que, en base a los resultados obtenidos, se espera un periodo de 25 meses consecutivos de no cobertura de los derechos de agua otorgados en la parte baja de la cuenca. Teniendo en cuenta lo anterior, si no se toman medidas, se puede desencadenar una pérdida total del cultivo por este prolongado periodo de estrés.

El aumento sostenido de temperatura que se espera en la cuenca hará que el maíz (principal cultivo rotativo en la cuenca) disminuya su productividad entre un 10 y 20%. Por lo tanto, se espera un traslado de este cultivo al sur del país, ya que se encuentran condiciones climáticas más favorables para el desarrollo del cultivo.

Sin duda se espera un futuro con dificultades para los cultivos en la cuenca y es de gran importancia que los agricultores estén al tanto de estos escenarios para que puedan gestionar de mejor manera el recurso y no perder sus cultivos.

Es por esto que el llamado es a utilizar de manera eficiente el recurso hídrico, utilizando como información los pronósticos del cambio climático con el fin de gestionar de manera efectiva el agua. Como se mostró, el embalse Los Cristales se encuentra en un proyecto de mejoramiento de su capacidad lo cual puede ser una gran herramienta para mejorar la disponibilidad del recurso ya que como se observó en los análisis, el embalse logra tener procesos de llenado y vaciado en todos los escenarios. Por otro lado, la rotación estratégica de cultivos en la cuenca puede llegar a disminuir la demanda de agua considerablemente

## Referencias

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate change 2014". Synthesis report. Versión inglesa. 2014.
- [2] Ministerio del Medio Ambiente. "Segundo informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto invernadero de Chile serie 1990-2013". Vol 2. pp. 90, 2017.
- [3] Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias, "Cambio climático: El impacto en la agricultura y costos de adaptación" pp. 30, 2009.
- [4] Gobierno de Chile, "Estrategia nacional de recursos hídricos," pp. 40, 2013.
- [5] C. Cortés, "Medidas de adaptación al Cambio Climático para el Uso Eficiente del Recurso Hídrico. Análisis de Casos en una Cuenca Agrícola de la VI Región" *Memoria de Título*, 2013.
- [6] Instituto Nacional de Estadísticas, "Censo Agropecuario y Forestal 2007", 2007.
- [7] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. "Manzanas: una temporada de alto valor de exportaciones", 2013.
- [8] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. "Maíz: producción, precios y comercio exterior", 2016.
- [9] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. "Una mirada al mercado vitivinícola nacional e internacional", 2018.
- [10] D. Dionizis. "Las Proyecciones de Recursos Hídricos Aportantes a los Sistemas Embalse el Yeso y Laguna Negra Bajo el Escenario de Cambio Climático RCP8.5", *Memoria de Título*, 2018.
- [11] D. Viner, "Modelling Climate Change: A conceptual structure of a coupled ocean-atmosphere GCM" p. 3, 2000.
- [12] Fahey, D.W., S.J. Doherty, K.A. Hibbard, A. Romanou, and P.C. Taylor, 2017: Physical drivers of climate change. In: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 73-113, doi: 10.7930/J0513WCR.
- [13] Knutson, T., J.P. Kossin, C. Mears, J. Perlwitz, and M.F. Wehner, 2017: Detection and attribution of climate change. In: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 114-132, doi: 10.7930/J01834ND.
- [14] Hayhoe, K., J. Edmonds, R.E. Kopp, A.N. LeGrande, B.M. Sanderson, M.F. Wehner, and D.J. Wuebbles, 2017: Climate models, scenarios, and projections. In: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 133-160, doi: 10.7930/J0WH2N54.
- [15] R. Garreaud, "Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile", *Rev. Tierra Adentro INIA-Chile*, no. 93, pp. 13-19, 2011.

- [16] M. Falvey and R. D. Garreaud, "Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006)," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 114, no. 4, pp. 1-16, 2009.
- [17] F. Santibañez, "El cambio climático y los recursos hídricos de Chile," pp. 147–178, 2016.
- [18] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. "Cambio Climático: Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía", 2013.
- [19] F. Santibañez, "Cómo los cambios climáticos afectarán a la agricultura Chilena", *Rev. Tierra Adentro INIA-Chile*, no. 93, pp. 21-26, 2011.
- [20] IPCC, "Emissions Scenarios". *Special Report*, 2000.
- [21] USAID, "A review of Downscaling Methods for Climate Change Projections. African and Latin American Resilience to Climate Change (ARCC)", *United States Agency Int. Dev. By Tetra Tech ARD*, September, pp. 1-42, 2014.
- [22] E. Zorita and H. von Storch, "The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods", *J. Clim.*, vol. 12, no. 8 PART2, pp- 2474-2489, 1999.
- [23] L. O. Mearns, F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme, and M. Lal, "Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments," 1994.
- [24] M. Falvey, "Guía de referencia para la plataforma de visualización de simulaciones climáticas," vol. 2, 2018.
- [25] G. Cortés, "Evaluación de un Modelo Hidrológico Semi Distribuido para la Estimación de la Escorrentía de Deshielo en el Río Juncal", *Memoria de Título*, 2010.
- [26] B. Salgado, "Disponibilidad y Demanda Futura del Recurso Hídrico. Análisis del Escenario A2 en una Cuenca Agrícola de la VI Región", *Memoria de Título*, 2011.
- [27] J. Pascal, "Guía práctica sobre modelización hidrológica", 2016."
- [28] C. Xu, "Textbook of Hydrologic Models". *Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology*, 2002.
- [29] R. Serrano, "Proyecciones de Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca alta del Maipo, Bajo Escenarios recientes de Cambio Climático", *Memoria de Título*, 2014.
- [30] Stockholm Environment Institute, "Water Evaluation and Planning System", User manual, 2010.
- [31] C. Reyes, "Proyección de Variables Hidrológicas diarias a largo plazo en la Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones, Bajo Escenarios A1B y A2 de Cambio Climático", *Memoria de Título*, 2012.
- [32] P. Krause, D. P. Boyle, and F. Bäse, "Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment", *Adv. Geosci.*, vol. 5, pp. 89-97, 2005.
- [33] D. R. Legates and G. J. McCabe Jr., "Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation" *Water Resources Res.*, vol. 35, no. 1, pp. 233–241, 1999.

- [34] P. Molnar, "Calibration Watershed Modelling", *Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management*, 2011.
- [35] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations", vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007.
- [36] E. Muñoz, J. Gutiérrez-Vejar and P. Tume-Zapata, "Incertidumbre en los caudales de salida de un modelo hidrológico semidistribuido", *Tecnología y ciencias del agua*, 9(2), pp. 150-174, 2018.
- [37] C. Nacional, "Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo xxi", 2006.
- [38] Organización de las Naciones Unidas por la Agricultura y Alimentación, "Evapotranspiración del cultivo, Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", 2009.
- [39] J. S. Jeria, "El Riego en Chile," 2003.
- [40] A. Benítez, "Taller de Hidrología aplicada a la resolución de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales", 1998.
- [41] C. Alvarez-garretón et al., "The CAMELS-CL dataset : catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset," pp. 5817–5846, 2018.
- [42] Center for Climate and Resilience Research (2016). Productos Grillados [Online]. Available: <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>, [Accessed: 10-Jan-2020].
- [43] Dirección General de Aguas, "Balance Hídrico de Chile", 1987.
- [44] Federación de Juntas de Vigilancia de la VI Región, "La Región prepara su temporada de riego enfrentando el año más seco desde 1998 (y el cuarto más seco desde 1910)", 2018.
- [45] R. Figueroa, "Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recurso hídrico a nivel de cuenca. Implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo", *Memoria de Título*, 2008.
- [46] Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. "El Explorador Eólico 2012: Descripción y Manual de Uso", 2012.
- [47] Dirección General de Aguas, "Estudio de Síntesis de Catastros de Usuarios de Agua e Infraestructura de Aprovechamiento", 1991.
- [48] Centro de Información de Recursos Naturales, "Catastro Frutícola 2015", 2016.
- [49] Centro de Información de Recursos Naturales, "Catastro Frutícola 2018", 2019.
- [50] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, "Cambio Climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía", 2013.
- [51] M. Sánchez & L. Carvacho, "Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile", 2011.

- [52] J. Bravo, "Industria de frutos secos, evolución destacada y amplio potencial", 2012.
- [53] Instituto de Investigaciones Agropecuarias, "Manejo de la Floración del Nogal Bajo las Condiciones de la Provincia de Choapa", 2014.
- [54] C. Cortés, "Medidas de Adaptación al Cambio Climático para el uso Eficiente del Recurso Hídrico. Análisis de casos de una Cuenca Agrícola de la VI Región", *Memoria de Título*, 2013.
- [55] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, "Estudio Alcance de la agricultura de precisión en Chile: estado del arte, ámbito de aplicación y perspectivas", 2009.

# Anexo 1: Diagrama unifilar general Río Claro de Rengo

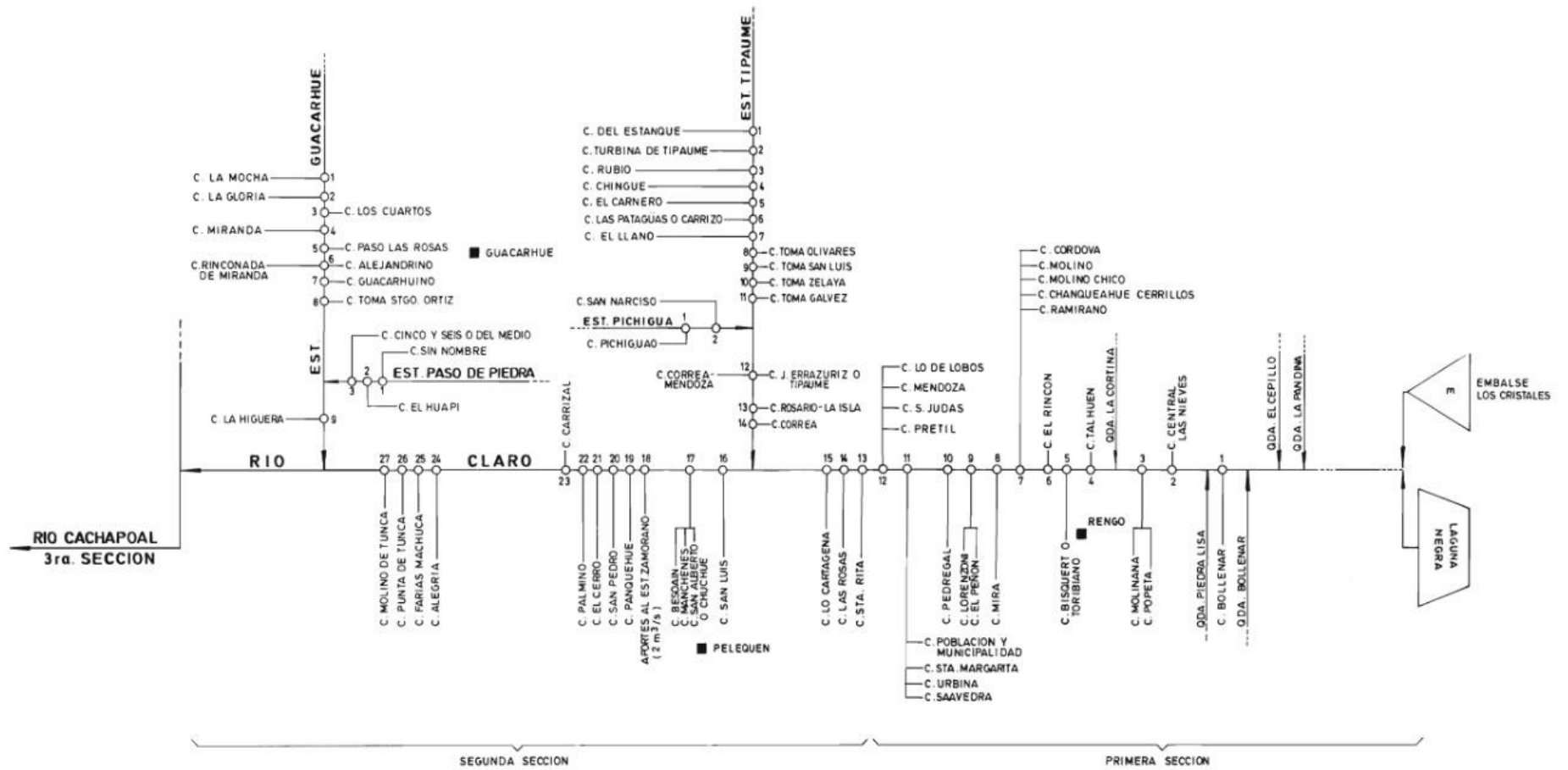
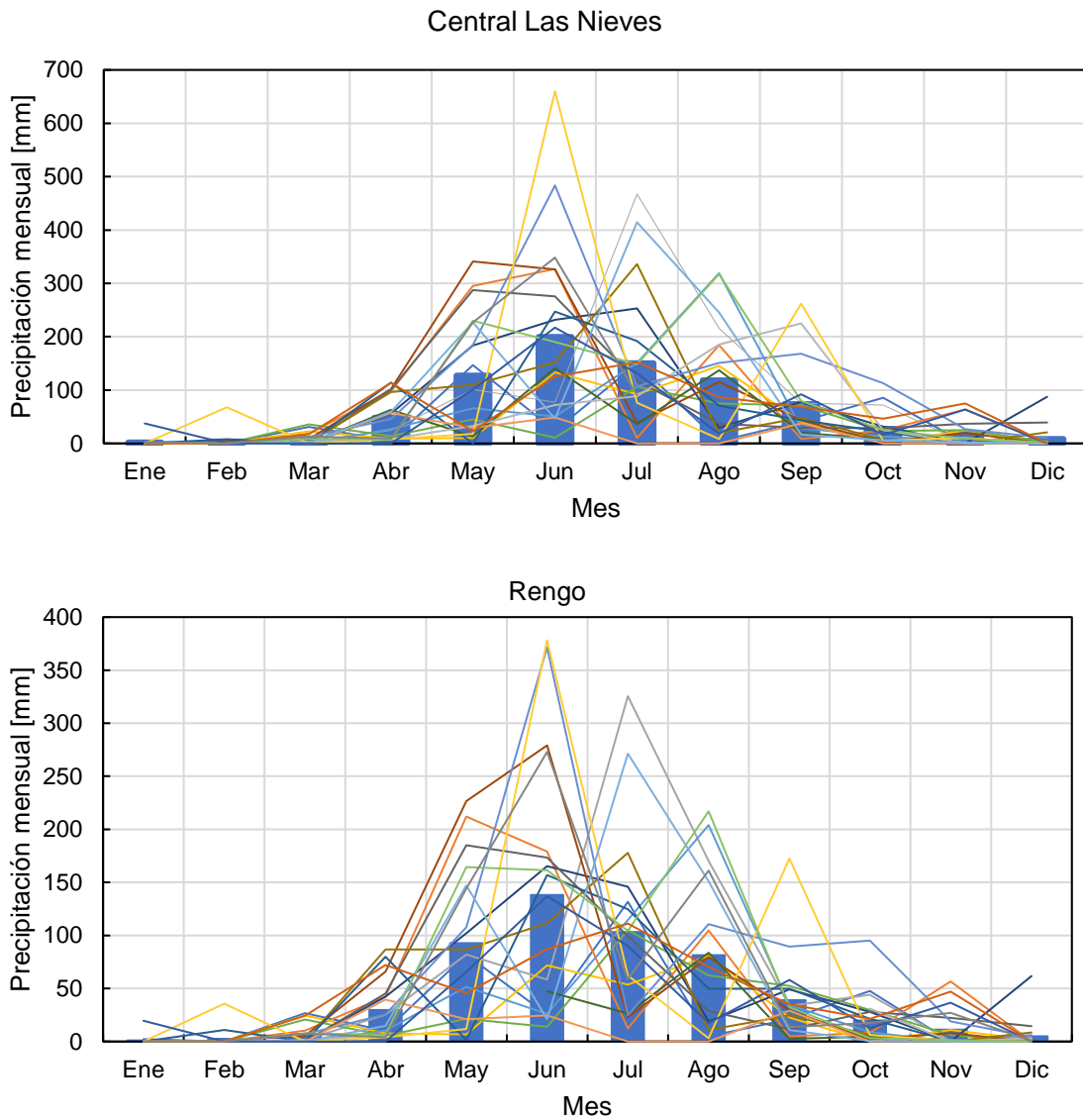


Figura A1-1: Diagrama unifilar general de la primera y segunda sección del río claro.

## Anexo 2: Distribución de precipitaciones para la estación Rengo y Central las nieves en el periodo histórico 1985-2005.



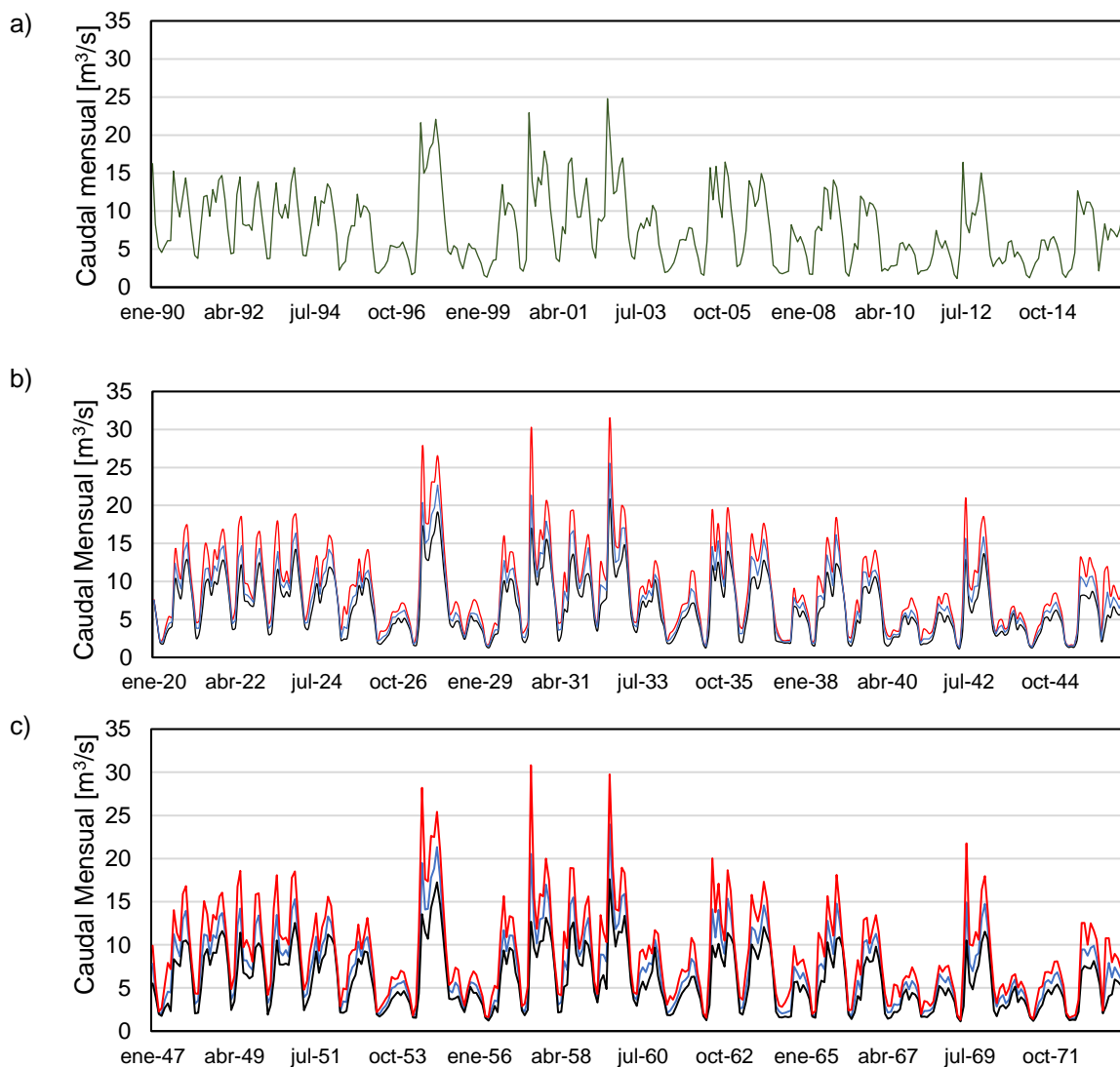
**Figura A2-1:** Distribución de precipitaciones para la estación Rengo y Central las nieves en el periodo histórico 1985-2005.

### Anexo 3: Factor de temperatura estación Rengo

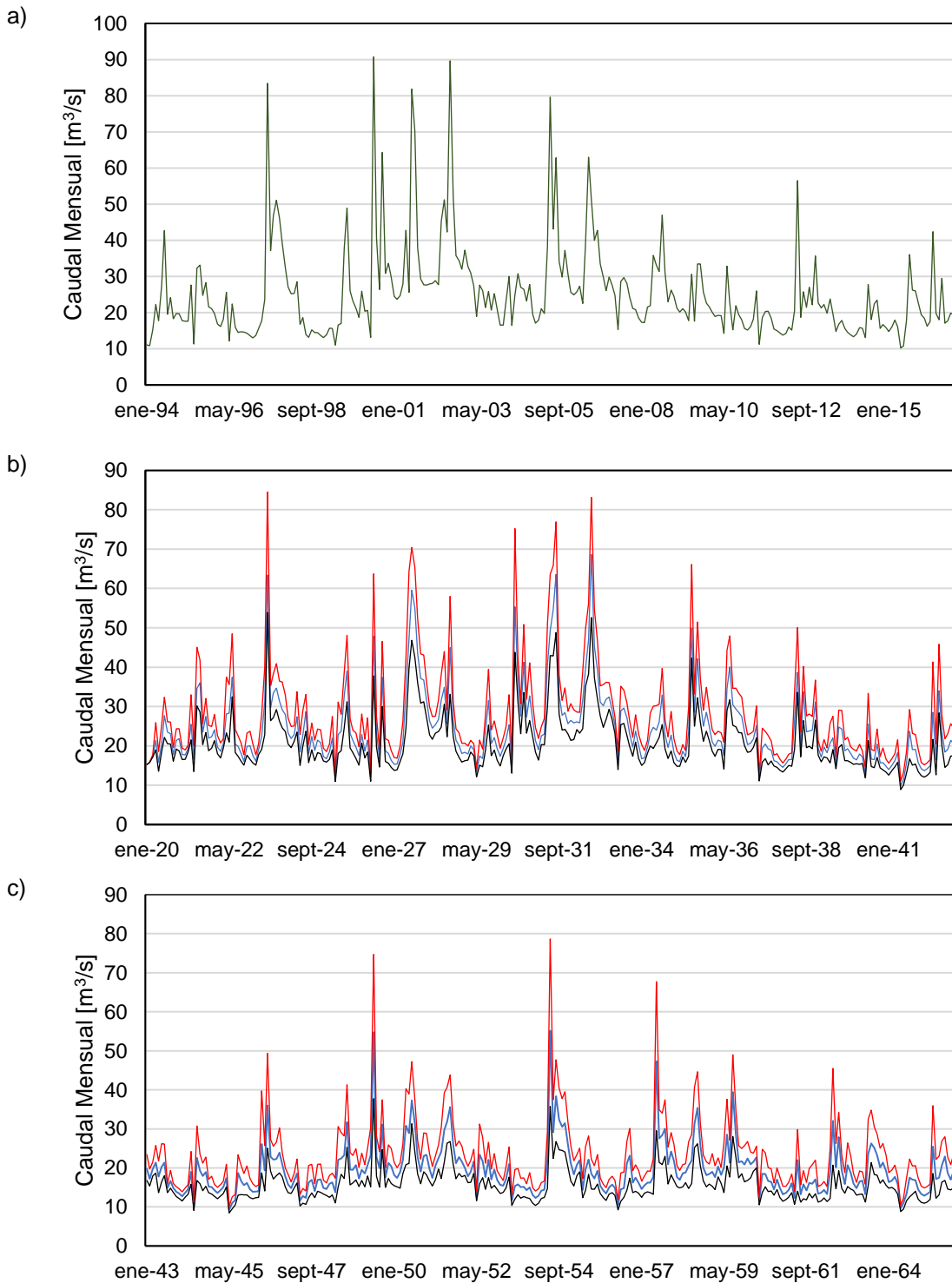
Futuro Cercano (2020-2047)												
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
CMCC-CESM	1.0	1.0	0.8	1.1	0.7	0.3	-0.1	0.0	0.6	0.8	1.1	0.7
FIO-ESM	1.9	1.4	1.5	1.2	1.1	0.8	0.6	0.7	0.8	1.2	1.7	1.8
ACCESS1-3	1.4	0.8	1.0	0.6	0.7	0.6	1.2	0.7	1.0	0.1	0.8	0.5
MIROC5	1.0	1.0	0.8	1.5	1.2	0.8	0.8	1.1	0.6	0.5	1.2	1.3
NorESM1-ME	0.9	1.2	1.4	0.9	0.6	0.0	0.4	0.8	0.5	-0.1	1.5	0.9
CCSM4	1.5	0.9	1.0	1.6	1.5	0.7	1.5	1.0	1.0	0.5	1.3	1.6
NorESM1-M	0.9	1.2	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	1.2	0.6	0.5
CESM1-CAM5-1-FV2	0.9	1.4	0.9	0.8	0.7	0.1	0.3	0.4	0.7	1.1	0.6	1.0
ACCESS1-0	1.2	1.0	0.8	1.6	1.1	1.1	1.3	0.3	0.6	0.7	0.8	1.0
HadGEM2-AO	0.5	0.7	0.8	0.7	0.2	1.1	0.5	0.3	1.0	0.5	0.5	0.6
HadGEM2-ES	1.7	1.1	1.4	1.0	0.9	0.8	0.8	1.6	0.6	0.2	0.7	1.1
FGOALS-s2	1.4	1.8	1.6	0.9	0.8	1.1	1.0	1.0	1.1	1.3	1.7	1.5
HadGEM2-CC	0.9	1.2	1.1	1.1	1.4	0.7	1.0	1.2	1.3	1.2	1.3	1.1
Futuro Intermedio (2047-2073)												
Modelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
CMCC-CESM	1.5	1.4	1.3	1.7	1.2	1.1	0.3	0.6	1	1.5	1.5	1.4
FIO-ESM	2.1	2	2	1.7	1.5	0.7	0.8	1	1	1.7	1.7	1.8
ACCESS1-3	1.3	1.1	1.3	0.9	1	0.2	1.5	1.3	1.6	0.5	1.2	0.8
MIROC5	1.3	1.6	1.3	1.8	1.1	0.6	0.5	1.4	0.8	0.9	1.3	1.7
NorESM1-ME	1.4	1.8	1.7	1.3	0.9	0.4	0.7	0.9	0.8	0.8	2.1	1.2
CCSM4	1.6	1.5	1.6	1.8	1.3	1.3	1.6	1.2	1.1	0.5	1.7	1.6
NorESM1-M	1.3	1.8	1.5	1.3	1.1	0.9	0.8	1.3	1.4	1.3	1.1	0.9
CESM1-CAM5-1-FV2	1.5	1.9	1.7	1.5	1	1	0.4	0.9	1.3	1.5	0.9	1.3
ACCESS1-0	1.6	1.4	1.3	2	1.5	1.4	1.7	0.7	1	1.1	1.2	1.5
HadGEM2-AO	0.8	1.3	1.6	1.5	0.6	1.7	0.8	0.9	1.4	1	1	0.9
HadGEM2-ES	2.2	1.7	1.6	1.7	1.5	0.7	1.2	1.6	1.2	0.6	1	1.7
FGOALS-s2	2.1	2.3	2.4	1.5	1.5	1.9	1.4	1.5	1.8	1.8	1.9	2
HadGEM2-CC	1.6	1.7	1.6	1.2	1.4	0.8	1.4	2.1	1.7	1.4	1.2	1.6

**Figura A3- 1:** Factores de temperatura en estación Rengo para la proyección de la variable en los periodos Futuro Cercano y Futuro Intermedio.

## Anexo 4: Proyección de caudal medio mensual cuenca Embalse los Cristales



**Figura A4- 1:** Tiempo historia de caudal medio mensual para cuenca embalse los Cristales para los periodos: a) Histórico (1994-2016), b) Futuro cercano (2020-2046) y c) Futuro intermedio, donde rojo: máximo azul: promedio y negro: mínimo de los modelos de proyección (



**Figura A4- 2:** Tiempo historia de caudal medio mensual para cuenca río claro en Tunca para los periodos: a) Histórico (1994-2016), b) Futuro cercano (2020-2042) y c) Futuro intermedio, donde rojo: máximo azul: promedio y negro: mínimo de los modelos de proyección

## Anexo 5: Proyecciones de caudal mensual Cuenca embalse Los Cristales

a)

Futuro Cercano (2020-2046)												
Modelos	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ACCESS1-0	0%	-24%	-2%	8%	1%	-3%	3%	3%	1%	0%	3%	5%
ACCESS1-3	6%	14%	-3%	-15%	5%	-1%	4%	5%	3%	3%	5%	8%
CCSM4	2%	-21%	-21%	-10%	12%	-1%	0%	2%	1%	0%	2%	0%
CESM1-CAM5-1-FV2	18%	3%	-7%	1%	11%	1%	8%	12%	9%	7%	9%	13%
CMCC-CESM	7%	16%	-2%	6%	5%	-1%	6%	12%	9%	8%	9%	14%
FGOALS-s2	39%	-4%	-13%	2%	3%	5%	12%	13%	6%	2%	4%	5%
FIO-ESM	-14%	-15%	-15%	-15%	-13%	-11%	-5%	-6%	-7%	-6%	-5%	-9%
HadGEM2-AO	27%	14%	2%	-2%	8%	12%	16%	21%	16%	13%	14%	22%
HadGEM2-CC	-13%	5%	-12%	-7%	-14%	-19%	-8%	-8%	-10%	-9%	-5%	-9%
HadGEM2-ES	30%	20%	21%	11%	1%	1%	8%	13%	13%	11%	11%	15%
MIROC5	-14%	-21%	-11%	-8%	-8%	-14%	-6%	-7%	-7%	-6%	-4%	-7%
NorESM1-M	-10%	-22%	-12%	-12%	-17%	-19%	-10%	-13%	-13%	-10%	-4%	-6%
NorESM1-ME	13%	23%	-3%	-9%	0%	-5%	2%	8%	6%	4%	6%	9%
<b>Promedio</b>	<b>7%</b>	<b>-1%</b>	<b>-6%</b>	<b>-4%</b>	<b>0%</b>	<b>-4%</b>	<b>2%</b>	<b>4%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>
<b>Max</b>	<b>39%</b>	<b>23%</b>	<b>21%</b>	<b>11%</b>	<b>12%</b>	<b>12%</b>	<b>16%</b>	<b>21%</b>	<b>16%</b>	<b>13%</b>	<b>14%</b>	<b>22%</b>
<b>Min</b>	<b>-14%</b>	<b>-24%</b>	<b>-21%</b>	<b>-15%</b>	<b>-17%</b>	<b>-19%</b>	<b>-10%</b>	<b>-13%</b>	<b>-13%</b>	<b>-10%</b>	<b>-5%</b>	<b>-9%</b>

b)

Futuro Intermedio (2047-2073)												
Modelos	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ACCESS1-0	-14%	-34%	-15%	4%	3%	-4%	0%	1%	0%	-2%	-1%	-1%
ACCESS1-3	0%	37%	14%	3%	14%	1%	3%	-1%	-5%	-5%	-3%	-6%
CCSM4	22%	0%	-17%	-16%	6%	7%	6%	10%	9%	3%	4%	5%
CESM1-CAM5-1-FV2	20%	19%	16%	13%	11%	0%	12%	20%	17%	10%	10%	16%
CMCC-CESM	2%	-6%	-13%	-17%	-9%	-14%	0%	13%	10%	4%	4%	9%
FGOALS-s2	25%	-12%	-23%	-14%	-13%	-18%	-5%	-6%	-9%	-7%	-6%	-14%
FIO-ESM	-12%	-6%	-6%	-13%	-8%	-11%	-5%	-3%	-4%	-5%	-5%	-8%
HadGEM2-AO	21%	19%	10%	4%	9%	6%	13%	20%	15%	8%	9%	15%
HadGEM2-CC	-17%	-15%	-28%	-23%	-25%	-27%	-16%	-19%	-19%	-14%	-12%	-21%
HadGEM2-ES	12%	25%	26%	2%	-4%	-8%	2%	7%	8%	5%	4%	6%
MIROC5	-16%	-20%	-11%	-18%	-20%	-22%	-14%	-15%	-14%	-13%	-9%	-16%
NorESM1-M	-16%	-26%	-14%	-11%	-19%	-24%	-15%	-15%	-15%	-13%	-9%	-16%
NorESM1-ME	-6%	10%	-13%	-20%	-19%	-20%	-11%	-7%	-7%	-7%	-6%	-9%
<b>Promedio</b>	<b>2%</b>	<b>-1%</b>	<b>-6%</b>	<b>-8%</b>	<b>-6%</b>	<b>-10%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-2%</b>	<b>-3%</b>
<b>Max</b>	<b>25%</b>	<b>37%</b>	<b>26%</b>	<b>13%</b>	<b>14%</b>	<b>7%</b>	<b>13%</b>	<b>20%</b>	<b>17%</b>	<b>10%</b>	<b>10%</b>	<b>16%</b>
<b>Min</b>	<b>-17%</b>	<b>-34%</b>	<b>-28%</b>	<b>-23%</b>	<b>-25%</b>	<b>-27%</b>	<b>-16%</b>	<b>-19%</b>	<b>-19%</b>	<b>-14%</b>	<b>-12%</b>	<b>-21%</b>

Figura A5-1: Porcentaje de variación con respecto al caudal medio mensual histórico para la cuenca embalse los Cristales para los periodos: a) Futuro cercano (2020-2046) b) Futuro intermedio (2047-2073).

## Anexo 6: Proyecciones de acumulación de nieve Cuenca embalse Los Cristales

a)

Futuro Cercano (2020-2046)												
Modelos	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ACCESS1-0	-32%	-32%	-16%	-9%	-10%	-10%	-12%	-15%	-22%	-29%	-	-
ACCESS1-3	-20%	5%	-6%	-17%	-6%	-8%	-8%	-12%	-16%	-25%	-	-
CCSM4	-23%	-30%	-26%	-20%	-11%	-12%	-14%	-19%	-27%	-36%	-	-
CESM1-CAM5-1-FV2	-9%	-8%	-12%	-7%	-3%	-6%	-8%	-10%	-16%	-22%	-	-
CMCC-CESM	-27%	5%	-5%	1%	-1%	-4%	-7%	-10%	-14%	-21%	-	-
FGOALS-s2	25%	-19%	-18%	-10%	-10%	-8%	-10%	-18%	-26%	-35%	-	-
FIO-ESM	-43%	-19%	-20%	-20%	-19%	-19%	-22%	-28%	-36%	-46%	-	-
HadGEM2-AO	-2%	2%	-4%	-9%	-3%	-1%	-2%	-2%	-7%	-11%	-	-
HadGEM2-CC	-36%	0%	-13%	-10%	-16%	-19%	-22%	-27%	-32%	-37%	-	-
HadGEM2-ES	7%	6%	8%	2%	-4%	-2%	-3%	-6%	-13%	-25%	-	-
MIROC5	-45%	-25%	-18%	-17%	-18%	-18%	-19%	-24%	-31%	-36%	-	-
NorESM1-M	-33%	-25%	-18%	-20%	-21%	-22%	-25%	-27%	-29%	-34%	-	-
NorESM1-ME	-11%	11%	-4%	-10%	-7%	-8%	-8%	-13%	-18%	-24%	-	-
<b>Promedio</b>	<b>-19%</b>	<b>-10%</b>	<b>-12%</b>	<b>-11%</b>	<b>-10%</b>	<b>-11%</b>	<b>-12%</b>	<b>-16%</b>	<b>-22%</b>	<b>-29%</b>	-	-
<b>Max</b>	<b>25%</b>	<b>11%</b>	<b>8%</b>	<b>2%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>-2%</b>	<b>-2%</b>	<b>-7%</b>	<b>-11%</b>	-	-
<b>Min</b>	<b>-45%</b>	<b>-32%</b>	<b>-26%</b>	<b>-20%</b>	<b>-21%</b>	<b>-22%</b>	<b>-25%</b>	<b>-28%</b>	<b>-36%</b>	<b>-46%</b>	-	-

b)

Futuro Intermedio (2047-2073)												
Modelos	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ACCESS1-0	-60%	-45%	-28%	-16%	-15%	-16%	-19%	-23%	-31%	-42%	-	-
ACCESS1-3	-33%	-5%	-13%	-22%	-18%	-21%	-21%	-27%	-31%	-40%	-	-
CCSM4	-3%	-20%	-25%	-26%	-16%	-12%	-14%	-20%	-28%	-39%	-	-
CESM1-CAM5-1-FV2	-16%	-4%	-1%	-1%	-3%	-7%	-10%	-12%	-19%	-31%	-	-
CMCC-CESM	-34%	-5%	-5%	-2%	-3%	-7%	-11%	-17%	-24%	-35%	-	-
FGOALS-s2	16%	-31%	-29%	-25%	-26%	-27%	-29%	-36%	-43%	-54%	-	-
FIO-ESM	-47%	-19%	-17%	-21%	-19%	-20%	-23%	-30%	-37%	-50%	-	-
HadGEM2-AO	-12%	-2%	-5%	-7%	-6%	-6%	-8%	-12%	-18%	-25%	-	-
HadGEM2-CC	-35%	-24%	-31%	-29%	-32%	-33%	-35%	-39%	-45%	-53%	-	-
HadGEM2-ES	-16%	2%	7%	-8%	-10%	-12%	-13%	-18%	-26%	-41%	-	-
MIROC5	-46%	-29%	-21%	-26%	-27%	-28%	-29%	-34%	-41%	-48%	-	-
NorESM1-M	-46%	-34%	-24%	-22%	-27%	-29%	-31%	-34%	-38%	-46%	-	-
NorESM1-ME	-29%	-5%	-17%	-23%	-23%	-25%	-26%	-32%	-37%	-45%	-	-
<b>Promedio</b>	<b>-28%</b>	<b>-17%</b>	<b>-16%</b>	<b>-17%</b>	<b>-17%</b>	<b>-19%</b>	<b>-21%</b>	<b>-26%</b>	<b>-32%</b>	<b>-42%</b>	-	-
<b>Max</b>	<b>16%</b>	<b>2%</b>	<b>7%</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-6%</b>	<b>-8%</b>	<b>-12%</b>	<b>-18%</b>	<b>-25%</b>	-	-
<b>Min</b>	<b>-60%</b>	<b>-45%</b>	<b>-31%</b>	<b>-29%</b>	<b>-32%</b>	<b>-33%</b>	<b>-35%</b>	<b>-39%</b>	<b>-45%</b>	<b>-54%</b>	-	-

Figura A6-1: Porcentaje de variación con respecto acumulación de nieve histórico para la cuenca embalse los Cristales para los periodos: a) Futuro cercano (2020-2046) b) Futuro intermedio (2047-2073).

## Anexo 7: Proyecciones de almacenamiento en embalse Los Cristales

a)

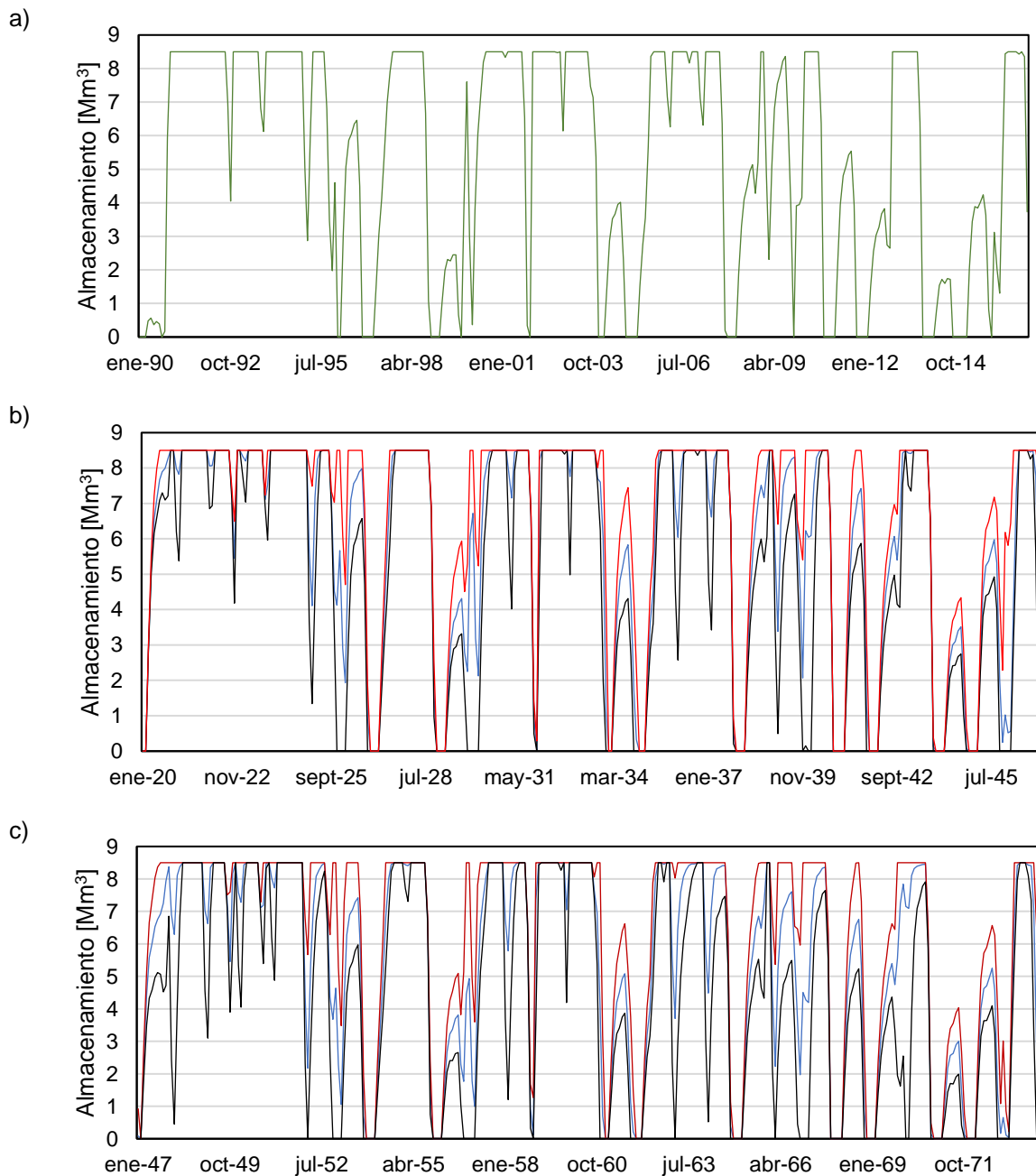
Modelos	Futuro Cercano (2020-2046)											
	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ACCESS1-0	1%	3%	2%	1%	1%	-3%	-15%	-13%	-13%	-18%	-27%	-6%
ACCESS1-3	8%	10%	9%	6%	6%	3%	-10%	-1%	1%	13%	2%	7%
CCSM4	-7%	-4%	-4%	-5%	-5%	-8%	-19%	-16%	-13%	-33%	-36%	-15%
CESM1-CAM5-1-FV2	15%	13%	10%	8%	7%	5%	-2%	6%	6%	25%	6%	11%
CMCC-CESM	14%	12%	10%	8%	7%	4%	-3%	11%	8%	32%	12%	14%
FGOALS-s2	4%	10%	7%	5%	4%	2%	-2%	15%	8%	-2%	-23%	-6%
FIO-ESM	-16%	-15%	-15%	-14%	-14%	-21%	-29%	-33%	-44%	-65%	-61%	-27%
HadGEM2-AO	28%	24%	21%	18%	16%	16%	4%	21%	14%	53%	49%	33%
HadGEM2-CC	-12%	-8%	-7%	-6%	-6%	-10%	-16%	-20%	-38%	-65%	-57%	-22%
HadGEM2-ES	23%	20%	17%	15%	14%	12%	0%	15%	12%	63%	60%	30%
MIROC5	-11%	-10%	-10%	-10%	-10%	-16%	-32%	-41%	-53%	-70%	-59%	-21%
NorESM1-M	-8%	-7%	-7%	-7%	-7%	-14%	-32%	-54%	-75%	-81%	-72%	-21%
NorESM1-ME	10%	12%	9%	7%	6%	3%	-13%	3%	5%	16%	-1%	6%
<b>Promedio</b>	<b>4%</b>	<b>5%</b>	<b>3%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>-13%</b>	<b>-8%</b>	<b>-14%</b>	<b>-10%</b>	<b>-16%</b>	<b>-1%</b>
<b>Max</b>	<b>28%</b>	<b>24%</b>	<b>21%</b>	<b>18%</b>	<b>16%</b>	<b>16%</b>	<b>4%</b>	<b>21%</b>	<b>14%</b>	<b>63%</b>	<b>60%</b>	<b>33%</b>
<b>Min</b>	<b>-16%</b>	<b>-15%</b>	<b>-15%</b>	<b>-14%</b>	<b>-14%</b>	<b>-21%</b>	<b>-32%</b>	<b>-54%</b>	<b>-75%</b>	<b>-81%</b>	<b>-72%</b>	<b>-27%</b>

b)

Modelos	Futuro Intermedio (2047-2073)											
	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ACCESS1-0	-11%	-12%	-14%	-14%	-14%	-18%	-25%	-25%	-29%	-48%	-47%	-18%
ACCESS1-3	-11%	-8%	-7%	-7%	-7%	-11%	-21%	-27%	-44%	-65%	-60%	-21%
CCSM4	-3%	3%	2%	0%	0%	-2%	-13%	-1%	-1%	-17%	-32%	-12%
CESM1-CAM5-1-FV2	18%	15%	13%	11%	10%	9%	7%	19%	12%	43%	29%	19%
CMCC-CESM	6%	7%	5%	4%	3%	1%	1%	17%	11%	21%	-6%	2%
FGOALS-s2	-20%	-10%	-9%	-9%	-9%	-13%	-19%	-36%	-66%	-87%	-86%	-37%
FIO-ESM	-18%	-16%	-16%	-15%	-15%	-20%	-23%	-23%	-34%	-63%	-63%	-29%
HadGEM2-AO	18%	16%	14%	13%	11%	11%	6%	20%	11%	32%	15%	16%
HadGEM2-CC	-29%	-25%	-24%	-23%	-22%	-29%	-43%	-74%	-89%	-96%	-95%	-44%
HadGEM2-ES	7%	8%	7%	6%	5%	3%	-4%	8%	6%	21%	7%	6%
MIROC5	-24%	-21%	-21%	-20%	-20%	-29%	-46%	-68%	-82%	-87%	-88%	-37%
NorESM1-M	-21%	-19%	-19%	-18%	-18%	-25%	-40%	-64%	-83%	-90%	-91%	-34%
NorESM1-ME	-17%	-13%	-12%	-11%	-12%	-19%	-35%	-41%	-61%	-80%	-70%	-31%
<b>Promedio</b>	<b>-8%</b>	<b>-6%</b>	<b>-6%</b>	<b>-6%</b>	<b>-7%</b>	<b>-11%</b>	<b>-20%</b>	<b>-23%</b>	<b>-34%</b>	<b>-40%</b>	<b>-45%</b>	<b>-17%</b>
<b>Max</b>	<b>18%</b>	<b>16%</b>	<b>14%</b>	<b>13%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>7%</b>	<b>20%</b>	<b>12%</b>	<b>43%</b>	<b>29%</b>	<b>19%</b>
<b>Min</b>	<b>-29%</b>	<b>-25%</b>	<b>-24%</b>	<b>-23%</b>	<b>-22%</b>	<b>-29%</b>	<b>-46%</b>	<b>-74%</b>	<b>-89%</b>	<b>-96%</b>	<b>-95%</b>	<b>-44%</b>

Figura A7-1: Porcentaje de variación con respecto al almacenamiento histórico del embalse Los Cristales para los periodos: a) Futuro cercano (2020-2046) b) Futuro intermedio (2047-2073).

## Anexo 8: Almacenamiento mensual en embalse Los Cristales



**Figura A8-1:** Tiempo historia de almacenamiento mensual del embalse Los Cristales para los periodos: a) Histórico (1994-2016), b) Futuro cercano (2020-2042) y c) Futuro intermedio, donde rojo: máximo azul: promedio y negro: mínimo de los modelos de proyección (2043-2064).

## Anexo 9: Proyecciones de caudal mensual Cuenca Río Claro en Tunca

a)

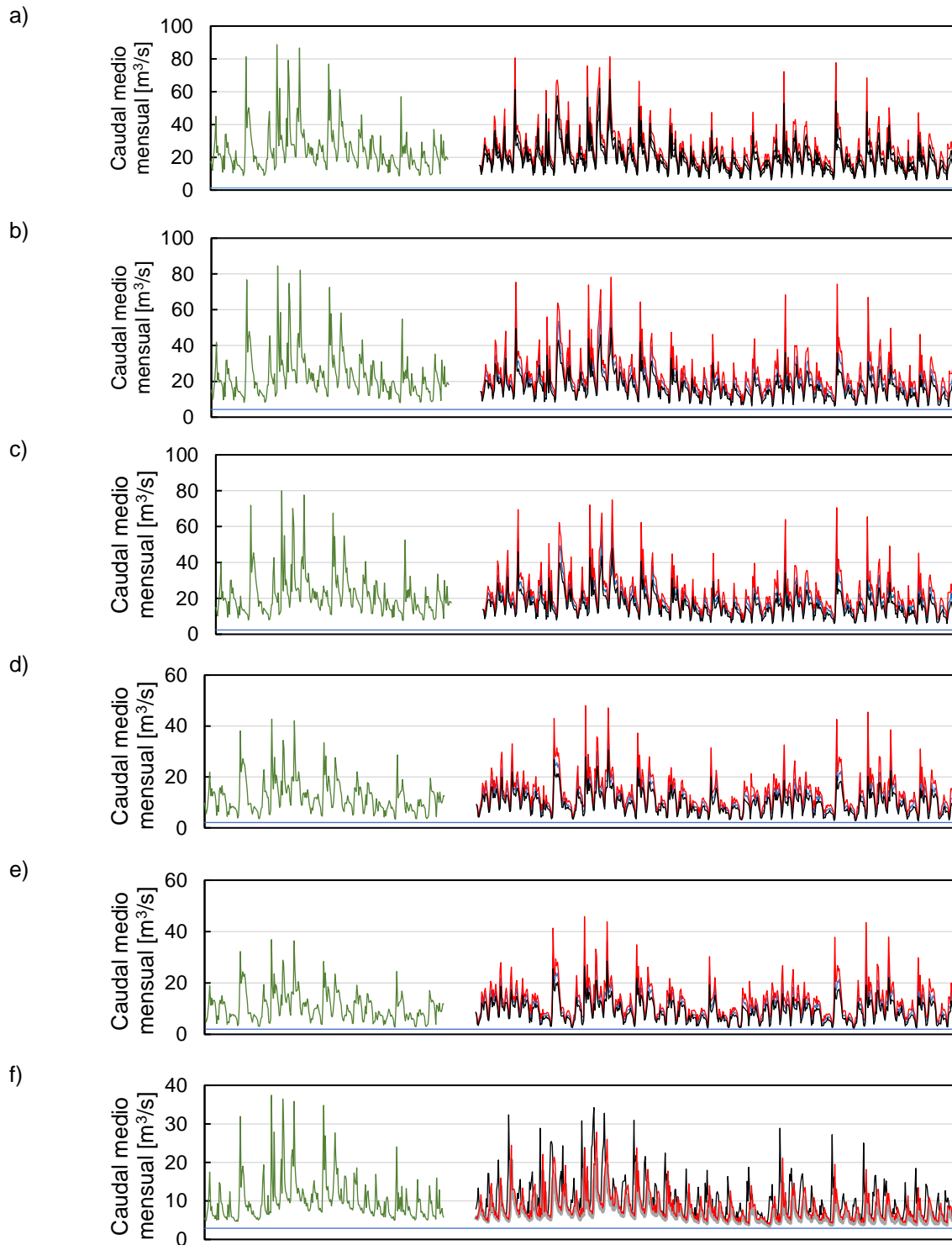
Futuro Cercano (2020-2042)												
Modelos	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ACCESS1-0	-4%	-16%	10%	4%	-5%	-3%	-1%	-1%	-1%	-2%	-4%	-2%
ACCESS1-3	-2%	18%	-6%	-21%	12%	-2%	0%	-2%	1%	-2%	-3%	-2%
CCSM4	-4%	-18%	-15%	-12%	9%	-6%	-10%	-4%	-2%	-5%	-7%	-6%
CESM1-CAM5-1-FV2	5%	5%	-5%	1%	7%	-2%	2%	6%	6%	3%	1%	2%
CMCC-CESM	-2%	20%	-4%	7%	0%	-4%	-2%	4%	5%	3%	0%	1%
FGOALS-s2	16%	-11%	-7%	3%	-4%	7%	5%	4%	5%	-1%	0%	0%
FIO-ESM	-13%	-8%	-14%	-19%	-17%	-12%	-16%	-12%	-10%	-13%	-12%	-11%
HadGEM2-AO	9%	16%	4%	-5%	12%	14%	11%	17%	13%	9%	6%	6%
HadGEM2-CC	-12%	9%	-19%	-10%	-24%	-21%	-17%	-15%	-13%	-14%	-13%	-12%
HadGEM2-ES	13%	19%	25%	5%	-5%	8%	4%	8%	10%	7%	4%	4%
MIROC5	-13%	-13%	-5%	-13%	-15%	-14%	-11%	-11%	-8%	-11%	-11%	-10%
NorESM1-M	-12%	-16%	-7%	-19%	-21%	-20%	-19%	-15%	-13%	-14%	-13%	-11%
NorESM1-ME	2%	22%	-8%	-12%	0%	-6%	-2%	1%	3%	-1%	-3%	-2%
<b>Promedio</b>	<b>-1%</b>	<b>2%</b>	<b>-4%</b>	<b>-7%</b>	<b>-4%</b>	<b>-5%</b>	<b>-4%</b>	<b>-2%</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-4%</b>	<b>-3%</b>
<b>Max</b>	<b>16%</b>	<b>22%</b>	<b>25%</b>	<b>7%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>11%</b>	<b>17%</b>	<b>13%</b>	<b>9%</b>	<b>6%</b>	<b>6%</b>
<b>Min</b>	<b>-13%</b>	<b>-18%</b>	<b>-19%</b>	<b>-21%</b>	<b>-24%</b>	<b>-21%</b>	<b>-19%</b>	<b>-15%</b>	<b>-13%</b>	<b>-14%</b>	<b>-13%</b>	<b>-12%</b>

b)

Futuro Intermedio (2043-2065)												
Modelos	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ACCESS1-0	-23%	-38%	-28%	-20%	-28%	-25%	-26%	-20%	-19%	-18%	-21%	-17%
ACCESS1-3	-18%	-7%	-29%	-36%	-24%	-28%	-24%	-23%	-22%	-21%	-22%	-20%
CCSM4	-6%	-26%	-38%	-36%	-18%	-16%	-24%	-15%	-14%	-15%	-18%	-16%
CESM1-CAM5-1-FV2	-4%	-7%	-11%	-13%	-19%	-18%	-13%	-5%	-5%	-6%	-10%	-9%
CMCC-CESM	-12%	-13%	-23%	-21%	-24%	-26%	-20%	-12%	-10%	-10%	-14%	-13%
FGOALS-s2	-1%	-35%	-39%	-33%	-37%	-33%	-24%	-24%	-23%	-22%	-22%	-21%
FIO-ESM	-23%	-24%	-30%	-36%	-33%	-30%	-31%	-25%	-22%	-22%	-24%	-22%
HadGEM2-AO	-3%	-7%	-17%	-20%	-17%	-13%	-13%	-5%	-6%	-7%	-11%	-9%
HadGEM2-CC	-27%	-33%	-50%	-42%	-48%	-43%	-38%	-35%	-34%	-30%	-31%	-31%
HadGEM2-ES	-6%	-3%	-4%	-27%	-27%	-22%	-20%	-13%	-11%	-11%	-14%	-13%
MIROC5	-25%	-34%	-31%	-41%	-42%	-37%	-35%	-31%	-30%	-26%	-28%	-26%
NorESM1-M	-26%	-37%	-33%	-35%	-46%	-40%	-37%	-31%	-31%	-28%	-28%	-26%
NorESM1-ME	-18%	-15%	-39%	-40%	-40%	-36%	-32%	-26%	-25%	-23%	-24%	-22%
<b>Promedio</b>	<b>-15%</b>	<b>-21%</b>	<b>-29%</b>	<b>-31%</b>	<b>-31%</b>	<b>-28%</b>	<b>-26%</b>	<b>-20%</b>	<b>-19%</b>	<b>-18%</b>	<b>-21%</b>	<b>-19%</b>
<b>Max</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-4%</b>	<b>-13%</b>	<b>-17%</b>	<b>-13%</b>	<b>-13%</b>	<b>-5%</b>	<b>-5%</b>	<b>-6%</b>	<b>-10%</b>	<b>-9%</b>
<b>Min</b>	<b>-27%</b>	<b>-38%</b>	<b>-50%</b>	<b>-42%</b>	<b>-48%</b>	<b>-43%</b>	<b>-38%</b>	<b>-35%</b>	<b>-34%</b>	<b>-30%</b>	<b>-31%</b>	<b>-31%</b>

Figura A9-1: Porcentaje de variación con respecto al caudal medio mensual histórico para la cuenca Río Claro en Tunca para los periodos: a) Futuro cercano (2020-2046) b) Futuro intermedio (2047-2073).

## Anexo 10: Cobertura de demanda bajo el escenario RCP 8.5



**Figura A10- 1:** Cobertura de demanda para; a) Banda 2, b) Banda 3, c) Banda 4, d) Banda 5, e) Banda 6 y f) Banda 8.

## Anexo 11: Cobertura de demanda con el cambio en el área de cultivo banda 6

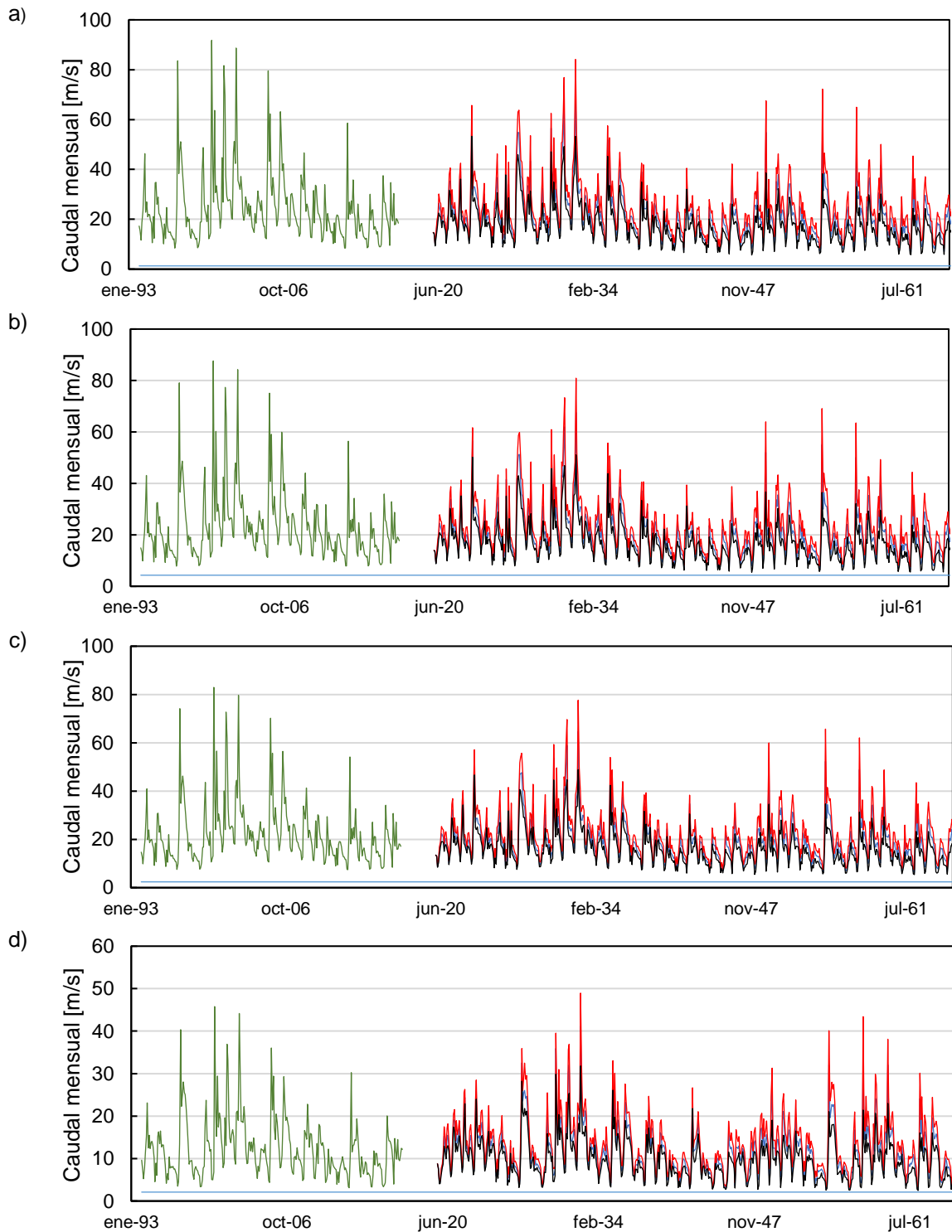


Figura A11- 1: Cobertura de demanda con el cambio de uso de suelo para; a) Banda 2, b) Banda 3, c) Banda 4 y d) Banda 5.