



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

**DISPONIBILIDAD Y DEMANDA FUTURA DEL RECURSO HÍDRICO. ANÁLISIS DEL
ESCENARIO A2 EN UNA CUENCA AGRÍCOLA DE LA VI REGIÓN.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

BRAULIO ALEJANDRO SALGADO FARIÑA

PROFESOR GUÍA:

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JAMES MC PHEE TORRES

LUIS ARRAU DEL CANTO

SANTIAGO DE CHILE

MAYO, 2011

“DISPONIBILIDAD Y DEMANDA FUTURA DEL RECURSO HÍDRICO. ANÁLISIS DEL ESCENARIO A2 EN UNA CUENCA AGRÍCOLA DE LA VI REGIÓN”

Los recursos hídricos constituyen un elemento fundamental para el desarrollo económico de nuestro país. Minería, agricultura y electricidad son actividades que ocupan una gran cantidad de agua en sus procesos, por lo cual su disponibilidad futura es un tema relevante de ser investigado, más aún cuando la mayoría de los modelos de circulación global de la atmósfera, pronostican una disminución de las precipitaciones para mediados del presente siglo. El presente estudio se realiza en la cuenca del Río Claro de Rengo, delimitada por la estación fluviométrica Claro en Tunca, ubicada en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, en donde la agricultura constituye la principal actividad económica de la zona media y baja de la cuenca, caracterizándose por una gran diversidad de cultivos.

La modelación del sistema se realiza utilizando el software Water Evaluation and Planning System (WEAP). La cuenca es dividida en una cuenca de cabecera y una intermedia, en donde cada una se calibra y valida por separado, con datos medidos durante el período 1991-2007. Posteriormente, el modelo calibrado se utiliza para analizar la disponibilidad futura del recurso hídrico en 2 períodos, comprendidos entre los años 2011-2040 y 2041-2070, para el escenario climático A2. Las series de las variables meteorológicas en estos períodos, fueron obtenidas a partir del modelo de circulación global de la atmósfera HadCM3, para lo cual se realiza una correspondencia de su línea base con datos observados, y luego se aplican las relaciones encontradas a los períodos futuros.

Los resultados indican que para el período 2011-2040, no existirá una variación significativa en cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico, en comparación al período de calibración, mientras que para el período 2041-2070, el volumen anual de agua que sale de la cuenca disminuiría en un 24%. Se produce a futuro un traslado de los caudales máximos desde el mes de junio al mes de julio, manteniéndose el régimen hidrológico pluvial. La cobertura nival presenta una disminución significativa en ambos períodos, produciéndose un adelantamiento de la época de deshielo. El cumplimiento en la entrega de los derechos de agua se hace más complejo y las demandas evapotranspirativas reales de los cultivos varían, debido al aumento del valor del coeficiente de cultivo y de la evapotranspiración de referencia, y la disminución de los recursos hídricos futuros.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Generalidades.....	1
1.2.	Objetivos.....	3
1.2.1.	Objetivo general.....	3
1.2.2.	Objetivos específicos.....	3
1.3.	Organización del informe.....	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	Modelación Hidrológica.....	4
2.2.	Modelo WEAP.....	5
2.2.1.	Generalidades.....	5
2.2.2.	Modelo hidrológico.....	5
2.3.	Evapotranspiración del Cultivo.....	8
3.	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	12
3.1.	Delimitación de la cuenca.....	12
3.2.	Descripción de la cuenca.....	15
3.2.1.	Recursos hídricos.....	15
3.2.2.	Clima.....	15
3.2.3.	Uso de suelo.....	16
3.2.4.	Organización agrícola.....	17
3.3.	Estaciones de medición.....	18
4.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	22
4.1.	Distribución de parámetros meteorológicos en las bandas.....	23
4.1.1.	Precipitación y temperatura.....	23
4.1.2.	Otras variables meteorológicas.....	25
4.2.	Caracterización agrícola.....	25
4.2.1.	Descripción de los cultivos.....	26
4.2.2.	Coefficientes de cultivo.....	27

4.2.3.	Demandas de agua.....	28
4.3.	Calibración y validación.....	30
4.3.1.	Cuenca Claro en Hacienda las Nieves (CHLN).....	31
4.3.2.	Cuenca Claro en Tunca (CT).....	36
4.3.3.	Análisis y comentarios de los parámetros y variables utilizados en la calibración y validación.....	40
5.	APLICACIÓN A ESCENARIOS FUTUROS.....	41
5.1.	Análisis de información del modelo HadCM3.....	41
5.1.1.	Downscaling espacial.....	42
5.1.2.	Downscaling temporal.....	43
5.2.	Resultados futuros.....	47
5.2.1.	Coefficiente de cultivo.....	47
5.2.2.	Disponibilidad del recurso hídrico.....	52
5.2.3.	Cobertura nival.....	56
5.2.4.	Satisfacción de la demanda.....	58
5.2.5.	Evapotranspiración.....	63
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
6.1.	Conclusiones generales.....	65
6.2.	Recomendaciones y comentarios finales.....	66
	REFERENCIAS.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Clasificación de los modelos hidrológicos (Xu, 2002).....	4
Figura 2-2: Método de la humedad del suelo.....	6
Figura 2-3: Curva generalizada del coeficiente de cultivo (FAO, 2006).....	10
Figura 3-1: Ubicación de la zona de estudio.....	12
Figura 3-2: Estación fluviométrica Claro en Tunca. Cauce aguas arriba del puente Zúñiga (izquierda), estación de medición (al centro) y cauce aguas abajo del puente (derecha).	13
Figura 3-3: Delimitación de la cuenca.....	14
Figura 3-4: Curva hipsométrica de la cuenca.....	14
Figura 3-5: Cauces Naturales y acuíferos.....	15
Figura 3-6: Uso de suelo de la cuenca.....	16
Figura 3-7: Estaciones pluviométricas y fluviométricas de la zona de estudio.....	18
Figura 3-8: Precipitación promedio mensual de las estaciones consideradas en el estudio.....	19
Figura 3-9: Temperatura promedio mensual y caudal medio mensual promedio de las estaciones de la zona de estudio.....	20
Figura 4-1: Discretización de la cuenca en bandas de elevación.....	23
Figura 4-2: Distribución de cultivos en las bandas.....	27
Figura 4-3: Coeficiente de cultivo según clase, banda 1.....	28
Figura 4-4: Esquema de entradas y salidas de agua de los catchments.....	29
Figura 4-5: Esquema CHLN realizado en WEAP.....	31
Figura 4-6: Volumen anual de escurrimiento observado y modelado en CHLN, período 1991-2007.....	33
Figura 4-7: Caudales medios mensuales promedio observados y modelados en CHLN, período 1991-2007.....	34
Figura 4-8: Serie de caudales medios mensuales observados y modelados en CHLN, período 1991-2007.....	35
Figura 4-9: Correlación de caudales observados y modelados en CHLN, período 1991-2007.....	35
Figura 4-10: Esquema CT en WEAP.....	36
Figura 4-11: Volumen anual de escurrimiento observado y modelado en CT, período 1994 - 2006.....	38
Figura 4-12: Caudales medios mensuales promedio observados y modelados en CT, período 1994-2006.....	38
Figura 4-13: Serie de caudales medios mensuales observados y modelados en CT, período 1994-2006.....	39
Figura 4-14: Correlación de caudales observados y modelados en CT, período 1994-2006.....	39
Figura 5-1: Ubicación de los puntos de la grilla de HadCM3.....	42
Figura 5-2: Ajuste de las distintas variables meteorológicas.....	45
Figura 5-3: Series de tiempo anuales.....	46

Figura 5-4: Coeficientes de cultivo en condición actual y futura para cultivos anuales.....	48
Figura 5-5: Coeficientes de cultivo en condición actual y futura para cultivos permanentes.....	49
Figura 5-6: Coeficientes de cultivo en condición actual y futura para praderas.....	50
Figura 5-7: Coeficientes de cultivo en condición actual y futura para hortalizas.....	51
Figura 5-8: Comparación volumen anual promedio actual y futuro en CHLN.....	52
Figura 5-9: Comparación curvas de duración de caudales medios mensuales actuales y futuros en CHLN	53
Figura 5-10: Comparación caudales medios mensuales promedio actuales y futuros en CHLN.....	53
Figura 5-11: Comparación volumen anual promedio actual y futuro en CT.....	54
Figura 5-12: Comparación curvas de duración de caudales medios mensuales actuales y futuras en CT.....	55
Figura 5-13: Comparación caudales medios mensuales promedio actuales y futuros en CT.	56
Figura 5-14: Variación mensual del equivalente en agua, bandas 10 y 11.....	57
Figura 5-15: Curva de duración del equivalente en agua, bandas 10 y 11.	58
Figura 5-16: Disponibilidad del recurso hídrico aguas arriba de la extracción y derechos de agua otorgados, bandas 1, 2 y 3. Período actual y futuro.....	59
Figura 5-17: Cuadro comparativo estrés hídrico para $Q_{85\%}$, banda 1.....	61
Figura 5-18: Cuadro comparativo estrés hídrico para $Q_{95\%}$, banda 1.....	62
Figura 5-19: Variación porcentual de la evapotranspiración de referencia en situación futura.....	63
Figura 5-20: Evolución de la evapotranspiración anual, períodos actual y futuros, cuenca intermedia.	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Características de los escenarios climáticos SRES (Carter et al, 1999).....	2
Tabla 2-1: Listado de parámetros y variables de entrada de WEAP.	7
Tabla 3-1: Parámetros característicos de la cuenca.....	13
Tabla 3-2: Clasificación de uso de suelo.....	17
Tabla 3-3: Distribución de tipos de cultivo en la primera sección del río Claro (INDAP, 1997).....	17
Tabla 3-4: Estaciones de medición.	18
Tabla 4-1: Bandas de elevación.....	22
Tabla 4-2: Factor de corrección de la precipitación para la cuenca CC.....	24
Tabla 4-3: Gradiente de temperatura.....	25
Tabla 4-4: Clases de cultivos según encuesta agronómica, 1ª sección del río (INDAP, 1997).....	26
Tabla 4-5: Área agrícola según cultivos.....	26
Tabla 4-6: Demanda de caudales por banda.	30

Tabla 4-7: Entregas del embalse.....	32
Tabla 4-8: Variación mensual de fracción nubosa y humedad relativa.	32
Tabla 4-9: Parámetros de Calibración CHLN.....	32
Tabla 4-10: Parámetros de calibración cuenca CT.	37
Tabla 5-1: Puntos a utilizar de la grilla HadCM3.....	43
Tabla 5-2: Período de corrección de datos HadCM3.	43
Tabla 5-3: Comparación precipitaciones mensuales.....	44
Tabla 5-4: Comparación temperaturas medias mensuales.	44
Tabla 5-5: Comparación humedad relativa media mensual.....	44
Tabla 5-6: Humedad relativa mínima futura.....	47
Tabla 5-7: Resumen estadísticos caudales medios mensuales y medio anual futuro cercano CHLN..	54
Tabla 5-8: Resumen estadísticos caudales medios mensuales y medio anual futuro lejano CHLN.	54
Tabla 5-9: Resumen estadísticos caudales medios mensuales y medio anual futuro cercano CT.....	56
Tabla 5-10: Resumen estadísticos caudales medios mensuales y medio anual futuro lejano CT.....	56
Tabla 5-11: Cuadro comparativo de evapotranspiración anual, período actual y futuros, cuenca intermedia.....	64

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

La agricultura es una de las actividades económicas de mayor importancia en nuestro país. Esto se debe a que el valle central presenta un clima favorable para su desarrollo, lo que sumado a su aislamiento geográfico, han permitido que Chile desarrolle una industria de la agricultura, que prospera año a año gracias a la creciente demanda internacional de los productos que se cultivan en sus tierras.

Sin embargo, este crecimiento en la actividad agrícola está limitado por una serie de factores de distinta índole, tales como la competitividad de los productos en los mercados internacionales, la disponibilidad de terrenos adecuados para trabajar el cultivo, pero principalmente por la disponibilidad del recurso hídrico, insumo indispensable para que esta actividad económica pueda desarrollarse. Desde este punto de vista, el cambio climático y sus consecuencias futuras, resulta ser un tema actual de gran importancia para el rubro en cuestión.

En una de sus publicaciones, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) hace alusión a los cambios que actualmente están ocurriendo en el clima y sus efectos a nivel global, señalando que el calentamiento del sistema climático es inequívoco, basándose en los aumentos ya observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar. A nivel nacional, y en particular en la zona central del país, el cambio climático se ha visto reflejado principalmente en 2 hechos: la disminución de la precipitación media anual y el aumento de la temperatura anual promedio (D'Arcangeli, 1997).

Para cuantificar la magnitud del cambio climático asociada a las distintas variables que se verán afectadas, el IPCC, basándose en características demográficas, político-económicas, sociales y tecnológicas futuras, determinó cuatro familias de escenarios de emisiones posibles de ocurrir, conocidos como los escenarios SRES: A1, A2, B1 y B2, de los cuales el escenario A2 corresponde al más severo en cuanto a las consecuencias que traería al planeta (ver Tabla 1-1).

Varios modelos de circulación global de la atmósfera (GCM), intentan simular el comportamiento que tendrán las variables meteorológicas a futuro, dependiendo del escenario climático en análisis. Uno de ellos es el HadCM3, desarrollado por el Hadley Centre en Inglaterra, el cual consiste en un modelo acoplado océano-atmósfera que cuenta con una resolución horizontal de 2.5° de latitud y 3.75° de longitud. A nivel de país, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile mediante el modelo regional PRECIS, ha obtenido resultados para Sudamérica en el período comprendido

entre los años 2070 y 2100, para el caso de los escenarios climáticos A2 y B2. El modelo cuenta con una grilla de espaciamiento horizontal de 25 kilómetros, y es forzado en los bordes por el modelo HadCM3 (DGF, 2006).

Tabla 1-1: Características de los escenarios climáticos SRES (Carter et al, 1999).

Tema	1990	SRES escenarios para el 2100			
		A1	A2	B1	B2
Población (billones)	5.252	7.1	15.1	7.2	10.4
Concentración de CO ₂ [ppmv]	354	680	834	547	601
Cambio en la temperatura media anual global [°C]	---	2.52	3.09	2.04	2.16
Rango [°C]	---	1.70 - 3.66	2.12 - 4.41	1.37 - 2.99	1.45-3.14
Elevación del nivel promedio del mar [cm]	---	58	62	50	52
Rango [cm]	---	23 - 101	27 - 107	19 - 90	20 - 93

Según la mayoría de los GCM, Chile se ubica en una región donde el cambio climático podría afectar negativamente a la pluviometría. Este hecho, junto al aumento de unos 2 a 4 °C de la temperatura media pronosticada para mediados del presente siglo, podría desplazar las actuales zonas climáticas hacia el sur, lo que produciría un cambio en el rendimiento de los cultivos que actualmente se cosechan, pudiendo ser este cambio positivo o negativo, dependiendo si las nuevas condiciones climáticas favorecen o no su desarrollo (AGRIMED, 2008).

Por todo lo mencionado, el cambio climático mirado a nivel de cuenca, se traducirá en una alteración de su balance hídrico, pudiendo determinar incluso modificaciones en las actividades económicas que en ella se desarrollan, resultando fundamental el análisis de cuál será la disponibilidad futura de agua, y en particular, si ésta alcanzará para satisfacer las necesidades propias de la cuenca.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar los posibles impactos que generará el cambio climático en la cuenca delimitada por la estación pluviométrica Claro en Tunca, en cuanto a la disponibilidad y demanda futura del recurso hídrico, para el escenario climático A2.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterización del régimen de caudales de salida de la cuenca y en otros puntos de interés, en condición actual y futura.
- Estimación y comparación de los coeficientes de cultivos, en condición actual y futura.
- Análisis de las distintas componentes del ciclo hidrológico, que se verán afectadas por el cambio climático.

1.3. ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El orden de los capítulos considerados en la presente memoria y su contenido a nivel general se detalla a continuación.

- En el capítulo 2, se presenta como principal referencia bibliográfica, el modelo WEAP. Además se introduce el concepto de evapotranspiración del cultivo y las consideraciones que se deben tener en cuenta para el cálculo del coeficiente de cultivo.
- En el capítulo 3, se caracteriza el lugar de estudio, considerando aspectos hidrológicos, climatológicos y de uso de suelo. Se señalan las estaciones meteorológicas y pluviométricas a utilizar.
- En el capítulo 4, se detalla el proceso de preparación de datos y posteriormente la calibración y validación del modelo en el software WEAP.
- En el capítulo 5, se muestra la preparación de datos meteorológicos para ser aplicados en el futuro. Se entregan los resultados correspondientes a las distintas componentes del ciclo hidrológico que se ven afectadas.
- En el capítulo 6 se entregan las principales conclusiones y recomendaciones, en virtud de los resultados obtenidos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Comprender a cabalidad el funcionamiento de un sistema hidrológico es una labor compleja, por lo cual se necesita de una herramienta que simule de una u otra forma los procesos hidrológicos que ocurren en el sistema, así como también, entregue resultados numéricos de variables hidrológicas de interés; con el objetivo de entender procesos, diseñar, pronosticar y/o analizar tendencias del sistema en función de distintas variables de entrada y parámetros relevantes.

Un modelo hidrológico es una representación simplificada del sistema real, cuyo objetivo es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Sus entradas generalmente corresponden a variables hidrometeorológicas, sus salidas a variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas con las salidas, las cuales pueden expresarse como función del tiempo.

Si bien existe una gran variedad de modelos, los más utilizados son aquellos del tipo simbólico (comparten las propiedades estructurales del sistema original), y en particular de base matemática. Este es el caso de WEAP, software utilizado para el desarrollo de la presente memoria. La Figura 2-1 ilustra un esquema de clasificación de los modelos hidrológicos propuesto por Xu (2002).

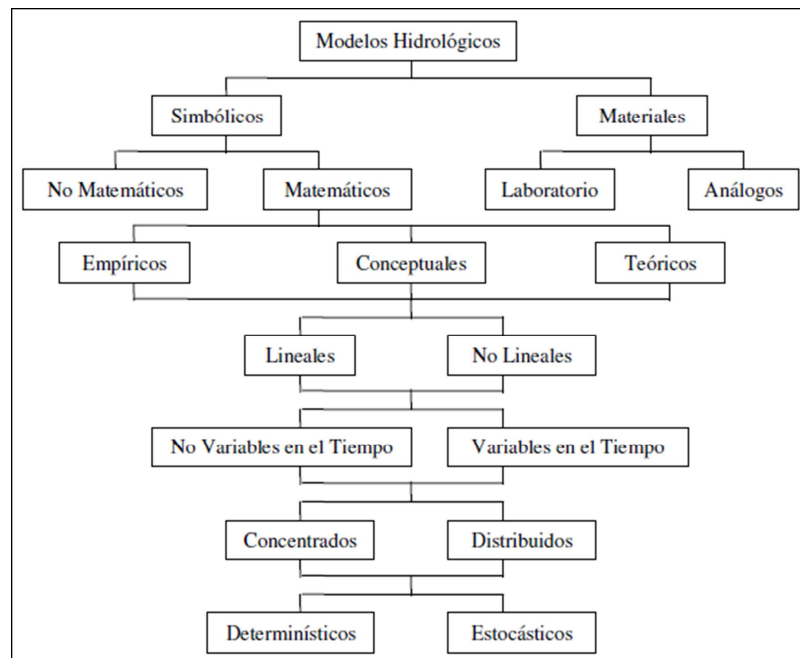


Figura 2-1: Clasificación de los modelos hidrológicos (Xu, 2002).

2.2. MODELO WEAP

2.2.1. GENERALIDADES

WEAP (Water Evaluation and Planning), a través de su página oficial www.weap21.org, se presenta como una herramienta computacional que provee un enfoque integral a la planificación de los recursos hídricos, cuyo objetivo es asistir más que sustituir al planificador experimentado. Corresponde a un modelo semi distribuido desarrollado por el Instituto del Medio Ambiente SEI (Stockholm Environment Institute). Funciona utilizando el principio básico de balance de masas, pudiendo ser aplicado a una sola cuenca o sistemas complejos de éstas, simulando una amplia gama de las componentes naturales y artificiales que en ellas intervienen (WEAP, 2010).

Entre sus principales características destacan, la posibilidad de utilizar una interfaz gráfica a través de mapas SIG, la facilidad de diseñar de manera esquemática el sistema a estudiar, la conexión dinámica con planillas de cálculo y otros modelos, entre otras (WEAP, 2010).

A nivel nacional, y específicamente en el ámbito de la hidrología, este modelo ha sido utilizado por instituciones tales como el Centro de Cambio Global de la Universidad Católica de Chile y la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (Mena, 2009; Mardones, 2009), principalmente en la determinación de la disponibilidad futura del recurso hídrico asociada a eventos de cambio climático, obteniéndose buenos resultados en cuanto a calibración se refiere.

2.2.2. MODELO HIDROLÓGICO

El cálculo del balance hídrico del sistema en WEAP, puede ser realizado mediante 3 métodos: demandas de riego, precipitación- escorrentía, y humedad del suelo. El primero, utiliza los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial, obteniéndose el volumen de agua requerido para suplir las demandas evapotranspirativas que la lluvia no puede cubrir. No se produce infiltración ni escorrentía.

El método de precipitación- escorrentía complementa al método anterior, permitiendo que el remanente de lluvia que no se pierde por evapotranspiración, sea considerado como escorrentía superficial o como aporte al acuífero, dependiendo del esquema que se diseñe en WEAP para la zona a modelar. A pesar de esto, el método es bastante sencillo y no entrega las respuestas que se esperan obtener en este estudio.

El método de la humedad del suelo requiere de una mayor cantidad de información, por lo cual la modelación de los procesos que ocurren en el sistema, representan de mejor manera la situación real. El esquema conceptual mostrado en la Figura 2-2, corresponde al método de la humedad del suelo, el cual considera 2 estanques que interactúan entre sí, simulando la zona de las raíces y zona profunda, en donde se produce escorrentía subsuperficial y flujo base respectivamente.

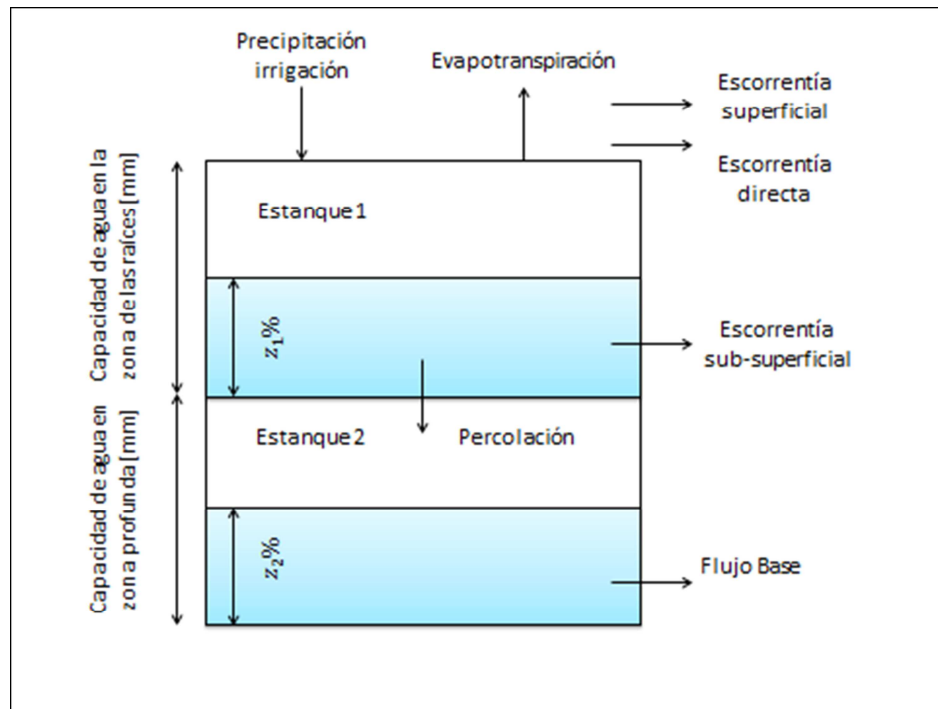


Figura 2-2: Método de la humedad del suelo.

En general un modelo hidrológico diseñado en WEAP, se compone de varias unidades como la mostrada en la Figura 2-2, denominadas catchments. Un catchment corresponde a una unidad de área que puede representar a una cuenca, subcuenca, banda de elevación o una superficie arbitraria. Cada uno de estos catchments se compone de 2 estanques los cuales funcionan de acuerdo a las ecuaciones (2-1) y (2-2). Para cada uno de estos catchments, se ingresa la información climática representativa de la zona, así como parámetros de uso de suelo. Adicionalmente estas unidades pueden ser subdivididas en branches, sub-unidades que comparten los parámetros meteorológicos y las características de la zona profunda (estanque 2), pero difieren en las cualidades del estanque 1, utilizados principalmente para la caracterización de distintos usos de suelo.

Una característica importante de WEAP, es que cada catchment funciona de manera independiente, no existiendo trasvases entre ellos. La conexión de los flujos resultantes de cada unidad de área se realiza a través de un cauce que los conecta. Los parámetros esenciales que requiere el modelo se listan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Listado de parámetros y variables de entrada de WEAP.

Variables y parámetros [unidades]		Símbolo
Meteorológicos	Precipitación [mm/mes]	P
	Temperatura [°C]	T
	Humedad relativa [%]	HR
	Velocidad del viento [m/s]	u
	Fracción nubosa [-]	FN
	Latitud [°]	Lat
	Nieve inicial [mm]	N_{ini}
	Albedo [-]	Al
	Temperatura de congelamiento del agua [°C]	T_s
	Temperatura de derretimiento de nieves [°C]	T_l
Uso de suelo	Área [km ²]	A
	Coefficiente de cultivo [-]	k_c
	Capacidad de almacenamiento en la zona de las raíces [mm]	Sw
	Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda [mm]	Dw
	Factor de resistencia a la escorrentía [-]	RRF
	Conductividad de la zona de las raíces [mm/mes]	k_s
	Conductividad de la zona profunda [mm/mes]	k_d
	Dirección preferencial del flujo [-]	f
	Nivel de humedad inicial en la zona de las raíces [%]	Z_1
	Nivel de humedad inicial en la zona profunda [%]	Z_2

El balance a realizar en cada uno de los catchments, queda representado por las ecuaciones (2-1) y (2-2).

- Estanque superior

Cambio en la humedad del suelo

$$= Pp.Efectiva - Evapotranspiración - Escorrentía superficial \\ - Escorrentía subsuperficial - Percolación$$

$$Sw \frac{dz_1}{dt} = P_e(t) - PET(t) \cdot k_c(t) \cdot \left(\frac{5z_1 - 2z_1^2}{3} \right) - P_e(t) \cdot z_1^{RRF} - f \cdot k_s \cdot z_1^2 - (1 - f) \cdot k_s \cdot z_1^2$$

(2-1)

- Estanque inferior

Cambio en la humedad del suelo = -Percolación + flujo base

$$Dw \frac{dz_{2j}}{dt} = -k_d \cdot z_2^2 + (1 - f) \cdot k_s \cdot z_2^2$$

(2-2)

Donde PET corresponde a la evapotranspiración de referencia calculada con la expresión de Penman-Monteith y P_e a la precipitación efectiva. Además, se consideran las siguientes definiciones.

- Coeficiente de derretimiento(m_c): Conocida la temperatura ambiente para el mes i , T_i , se define este coeficiente tal como se muestra en la ecuación (2-3).

$$m_c = \begin{cases} 0, & T_i < T_s \\ 1, & T_i < T_l \\ \frac{T_i - T_s}{T_l - T_s}, & T_s \leq T_i \leq T_l \end{cases}$$

(2-3)

- Acumulación de nieve(Ac): Se determina a partir de la nieve acumulada el mes anterior, y la precipitación caída el mes actual i , P_i . Ver ecuación (2-4).

$$Ac_i = Ac_{i-1} + (1 - m_c) \cdot P_i$$

(2-4)

- Precipitación efectiva (P_e): Corresponde a la suma de los flujos de agua líquida. Ver ecuación (2-5).

$$P_e = (P_i + Ac_i) \cdot m_c$$

(2-5)

2.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO

La evapotranspiración es la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. Los principales factores que afectan la evaporación son el gradiente de presión de vapor -entendido como la diferencia entre la presión de vapor saturado, que corresponde a la temperatura del agua y la presión de vapor del aire en contacto con ella- la

temperatura del aire, la radiación solar y los vientos, factores que se encuentran relacionados entre sí. La transpiración es el proceso por el cual el vapor de agua escapa de una planta, ya sea como evaporación directa de las membranas a través de la cutícula o bien como transpiración estomatal (Espíldora et al, 1975).

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo, para los métodos más importantes utilizados en la práctica, considera una evapotranspiración potencial de un cultivo tipo pasto y un coeficiente de cultivo, los cuales se relacionan de acuerdo a la ecuación (2-6).

$$ET_c = k_c \cdot ET_0 \quad (2-6)$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración potencial de un cultivo tipo pasto.

k_c : Coeficiente del cultivo.

ET_c : Evapotranspiración del cultivo.

La evapotranspiración potencial puede ser calculada por una serie de métodos tales como el de Jensen y Haise, Blaney y Criddle, Thornthwaite y Penman-Monteith, siendo este último el más usado en la actualidad y el que utiliza WEAP para su cálculo. Su expresión corresponde a la Ecuación (2-7) y tal como se puede apreciar, se requiere conocer una gran cantidad de parámetros para su estimación.

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (2-7)$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración potencial [mm/día].

R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m²/día].

G : Flujo de calor del suelo [MJ/m²/día].

T : Temperatura media del aire a 2 metros de altura [°C].

u_2 : Velocidad del viento a 2 metros de altura [m/s].

$(e_s - e_a)$: Déficit de presión de vapor [kPa].

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C].

γ : Constante psicrométrica [kPa/°C].

Mientras que los efectos de las distintas condiciones del tiempo atmosférico son incluidos en la evapotranspiración potencial, los efectos de las características que distinguen la superficie cultivada de la superficie de referencia se integran en el coeficiente de cultivo. Este coeficiente puede ser considerado como un coeficiente único o bien como un coeficiente dual. El coeficiente único de cultivo, incorpora las características del cultivo y los efectos promedio de la evaporación del suelo. Se recomienda su uso para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico. Solamente en los casos en que el coeficiente de cultivo sea necesario para períodos diarios, cultivos específicos y años específicos, se requerirá coeficiente separados de transpiración y evaporación (FAO, 2006).

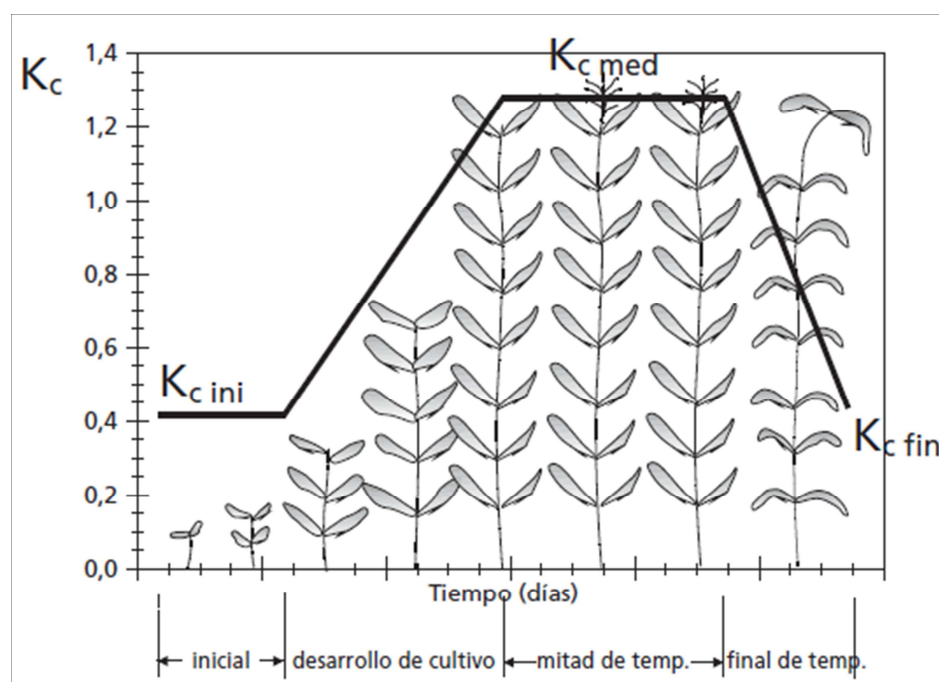


Figura 2-3: Curva generalizada del coeficiente de cultivo (FAO, 2006).

La curva del coeficiente de cultivo queda definida por 3 valores de k_c , los que permiten representar las variaciones de la demanda de agua durante las distintas etapas de su desarrollo (ver Figura 2-3). Estos coeficientes se encuentran tabulados en la literatura (FAO, 2006), donde se entregan valores estándar de los coeficientes de cultivo para las distintas etapas, así como la fecha típica de plantación, aplicando la ecuación de Penman-Monteith.

Para aplicar los coeficientes tabulados a la zona de estudio, deben ser corregidos de acuerdo a los siguientes aspectos.

- El valor del coeficiente de cultivo inicial, $k_{c\ ini}$, que depende fundamentalmente del intervalo entre eventos de humedecimiento y su magnitud, así como de la textura del suelo, puede ser corregido revisando un conjunto de gráficos que propone la FAO(2006), en los cuales se toman en cuenta estas consideraciones. En éstos se señala que mientras mayor sea la frecuencia de riego o la textura del suelo sea más fina, el valor del $k_{c\ ini}$ será mayor.
- El valor del coeficiente de cultivo medio y final, $k_{c\ med}$ y $k_{c\ fin}$ respectivamente, tiene directa relación con las condiciones climáticas, así como con la altura del cultivo en estas etapas. Las correcciones se realizan para climas en donde la humedad relativa mínima (HR_{min}), difiera de 45% o donde el valor de la velocidad del viento (u) medida a 2 metros del suelo, sea distinta de 2[m/s]. La fórmula a aplicar se muestra en la Ecuación (2-8).

$$k_{c\ med,fin} = k_{c\ med,fin(cua)} + (0.04 \cdot (u[m] - 2) - 0.004 \cdot (HR_{min}[\%] - 45)) \cdot \left(\frac{h[m]}{3}\right)^{0.3} \quad (2-8)$$

Donde $k_{c\ med,fin(cua)}$ corresponde al valor tabulado del coeficiente de cultivo y h corresponde a la altura media del cultivo medida en metros durante la etapa correspondiente. Se destaca que la ecuación no es altamente sensitiva al valor de la humedad relativa mínima.

El cálculo de la humedad relativa mínima se estima como se muestra en la Ecuación (2-9).

$$HR_{min} = 2 \cdot HR_{media} \cdot \left(1 + \exp\left(17.27 \cdot \left(\frac{T_{max}}{T_{max} + 237.3} - \frac{T_{min}}{T_{min} + 237.3}\right)\right)\right)^{-1} \quad (2-9)$$

Donde T_{max} y T_{min} corresponden a la temperatura máxima y mínima media diaria durante la etapa de mediados de temporada respectivamente, medida en grados Celsius.

Teniendo en cuenta lo anterior y aplicando la ecuación (2-6), es posible determinar la evapotranspiración del cultivo, que sólo coincidirá con la evapotranspiración real, en caso de que la disponibilidad del recurso hídrico sea ilimitada.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

La cuenca en estudio corresponde a la delimitada por la estación fluviométrica Claro en Tunca, ubicada bajo el puente Zúñiga en la localidad de Tunca, región del Libertador Bernardo O'Higgins, a 4 kilómetros de la confluencia del río Claro con el río Cachapoal. Sus coordenadas geográficas corresponden a 34°22' S y 71°05' W y su altitud es de aproximadamente 180 msnm. En las Figura 3-1 y Figura 3-2, se muestra la ubicación de la estación en cuestión.

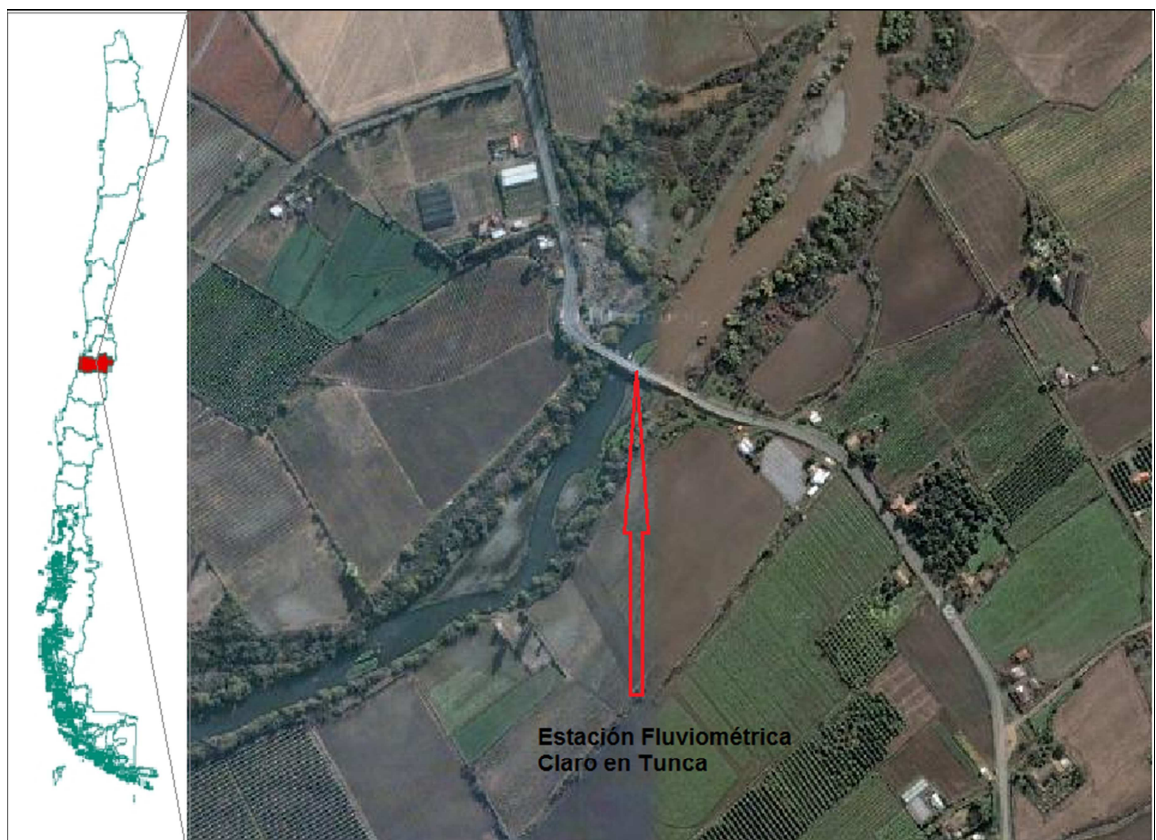


Figura 3-1: Ubicación de la zona de estudio.



Figura 3-2: Estación fluviométrica Claro en Tunca. Cauce aguas arriba del puente Zúñiga (izquierda), estación de medición (al centro) y cauce aguas abajo del puente (derecha).

Mediante la utilización conjunta de los programas WMS y ArcGIS, y a partir de un archivo DEM que contiene la topografía de la zona, obtenido del modelo del elevación digital ASTER Global Digital Elevation Model , fue posible realizar la delimitación de la cuenca, la cual se muestra en la Figura 3-3.

Las características principales de la cuenca, se detallan en la Tabla 3-1. En la Figura 3-4 se muestra la curva hipsométrica de la cuenca.

Tabla 3-1: Parámetros característicos de la cuenca.

Parámetro	Valor
Área [km ²]	942.95
Elevación media [msnm]	930.9
Longitud cauce principal [km]	77.6
Pendiente media [-]	0.272

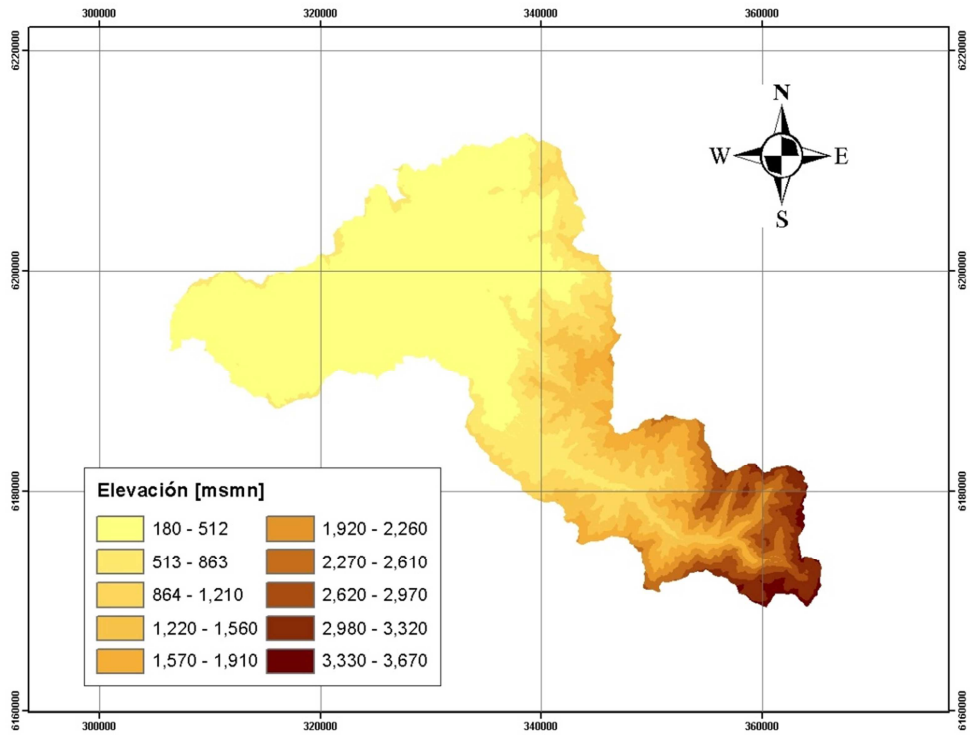


Figura 3-3: Delimitación de la cuenca.

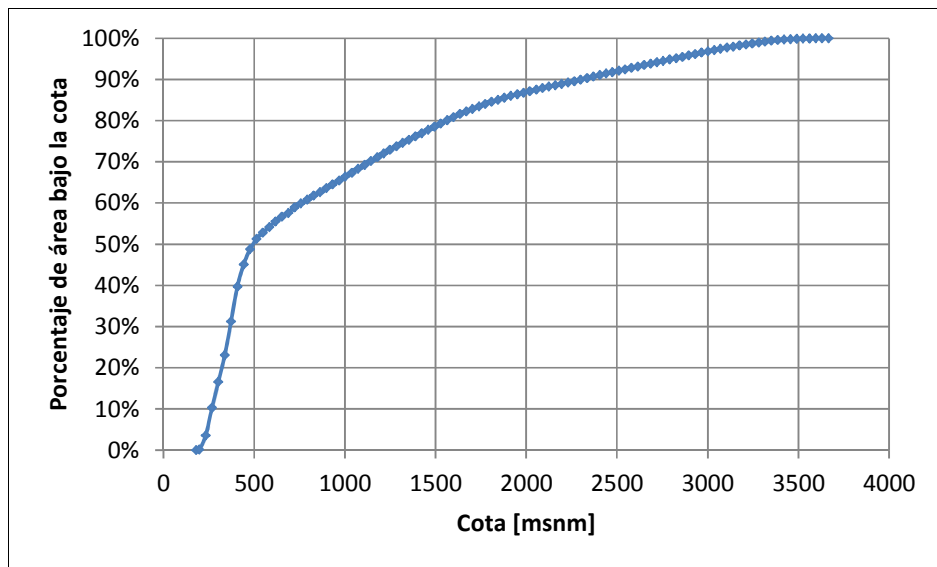


Figura 3-4: Curva hipsométrica de la cuenca.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

3.2.1. RECURSOS HÍDRICOS

El río Claro tiene su origen en la Cordillera de Los Andes a unos 3600 metros de altitud, drenando las lagunas Negra y Los Cristales, desde donde comienza a recibir una serie de aportes provenientes de diversas quebradas, tales como la Pandina, las Tierras Fofas, del Cepillo, Matalolos, entre otras. En este primer tramo, que llega hasta los 700 metros de altitud, existe una marcada pendiente de terreno, por lo cual el río escurre a alta velocidad, sobre un cauce pedregoso y rocoso. Ya en la zona baja, el afluente principal corresponde al estero Tipaume, el cual confluye en el Claro a la altura de la localidad de Rengo. Desde este punto, el terreno presenta una menor pendiente, razón por la cual el cauce del río se vuelve más ancho y meandroso, con una velocidad de escurrimiento menor. La Figura 3-5 ilustra los cauces naturales y acuíferos existentes en la cuenca.

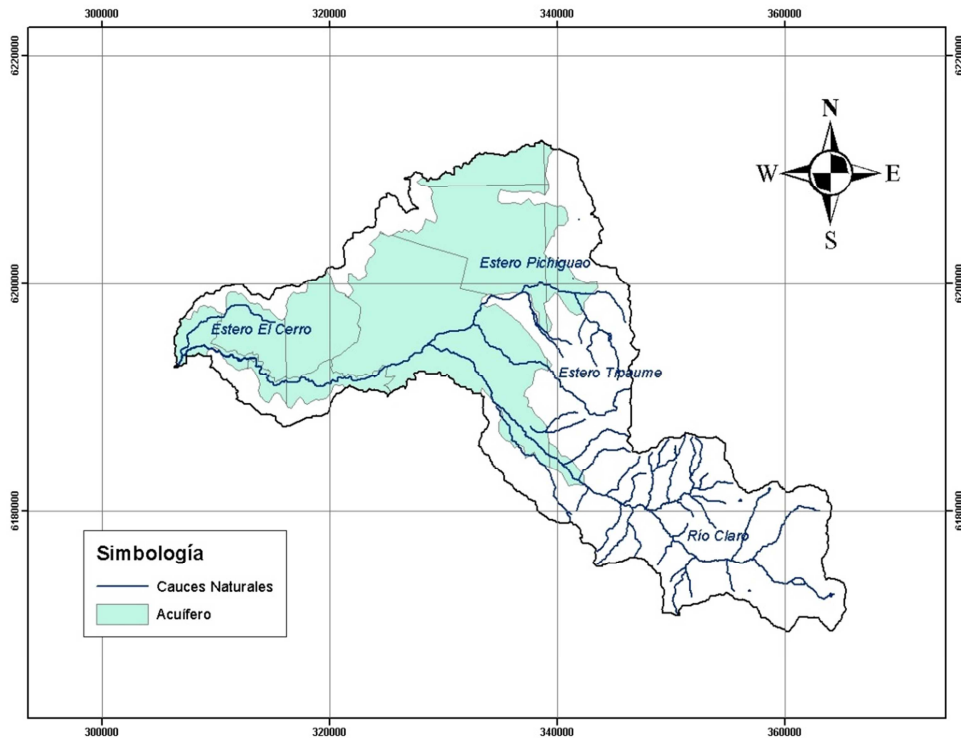


Figura 3-5: Cauces Naturales y acuíferos.

3.2.2. CLIMA

La importante diferencia de cotas entre el punto más alto y el punto de salida de la cuenca, sumada a la gran extensión de ésta, determina que a lo largo de la zona de estudio se presenten variaciones significativas en el clima. El valle longitudinal, presenta un clima templado cálido de estación seca prolongada, caracterizándose por veranos cálidos y secos, e inviernos lluviosos, frescos y húmedos.

Durante el período seco, cuya duración alcanza los 7 u 8 meses, las precipitaciones no superan en promedio los 40 mm al mes. En la zona precordillerana y cordillerana en cambio, temperaturas medias mensuales en invierno se aproximan a 0° y las precipitaciones se hacen sólidas, al mismo tiempo que aumentan a cerca de 1.000 mm anuales, acortándose así la duración de la estación seca a sólo 4 ó 5 meses del año (DMC, 2010).

3.2.3. USO DE SUELO

La cuenca presenta distintos usos de suelo dependiendo fundamentalmente de la altitud. En la zona baja, predomina el uso agrícola y el desarrollo de pequeñas zonas urbanas, rurales e industriales. A partir de los 700 metros de altitud, debido al cambio en las condiciones climáticas, aparecen los matorrales y bosques de tipo mixto, seguidos de praderas y áreas sin vegetación. Ya en la cordillera, se tiene la presencia de nieves y glaciares. El desglose del uso de suelo a nivel de cuenca, se muestra en la Tabla 3-2. La ubicación espacial de cada uno de los usos de suelo se muestra en la Figura 3-6.

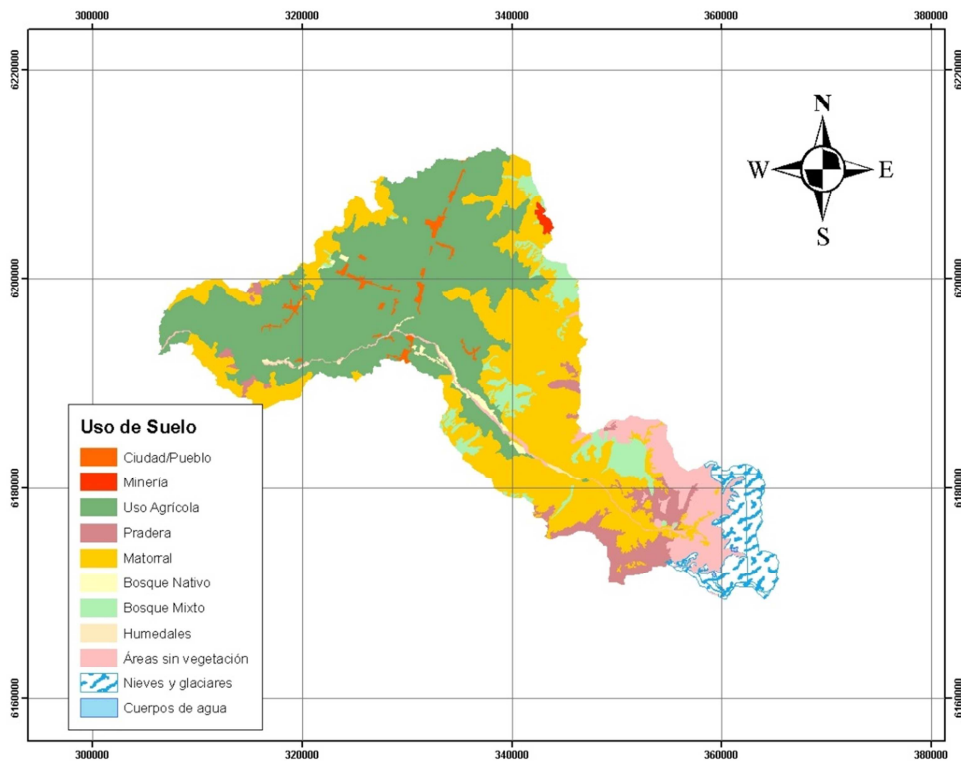


Figura 3-6: Uso de suelo de la cuenca.

Tabla 3-2: Clasificación de uso de suelo.

Uso de suelo	Área [km ²]	Fración del área total [%]
Ciudades- Pueblos- Zonas Industriales	12.48	1.32
Minería	2.51	0.27
Terreno uso agrícola	396.16	42.01
Pradera	47.29	5.02
Matorral	303.71	32.21
Bosque nativo	5.38	0.57
Bosque mixto	49.20	5.22
Humedales	2.91	0.31
Áreas sin vegetación	70.22	7.45
Nieves y glaciares	52.76	5.60
Cuerpos de agua	0.33	0.03
TOTAL	942.95	100

3.2.4. ORGANIZACIÓN AGRÍCOLA

La cuenca se encuentra dividida en 2 secciones, de las cuales sólo la primera tiene Junta de Vigilancia. La primera sección está integrada por 23 canales, que se dividen las aguas en 5975 acciones de ejercicio permanente, cuya equivalencia es una relación de 1.6 [l/s/acción]. Como resultado de la encuesta agronómica realizada en la zona en el año 1997, los principales cultivos desarrollados por los regantes son los que se muestran en la Tabla 3-3. La segunda sección está integrada por 16 canales y no presenta una Junta de Vigilancia organizada.

Tabla 3-3: Distribución de tipos de cultivo en la primera sección del río Claro (INDAP, 1997).

Cultivos	Ha.	Cultivos	Ha.
Cultivos Anuales	2002	Praderas	404
Maíz	1799	Pradera Natural	60
Trigo	193	Alfalfa	279
Papas	4	Otros (trébol)	65
Otros	6	Hortalizas	388
Cultivos Permanentes	3075	Tomates	208
Manzanos	1441	Cebollas	47
Almendros	385	Ajos	20
Duraznos	405	Pimientos	20
Vides	603	Porotos Verdes	14
Kiwis	41	Repollo	19
Guindos	9	Brócoli	18
Naranjas	10	Ají	17
Paltas	1	Otros (zapallo)	25
Perales	108	Otros (forestales, barbecho)	448
Otros (nectarines, nogales)	72	Total	6317

3.3. ESTACIONES DE MEDICIÓN

El listado de estaciones pluviométricas y meteorológicas a utilizar en el estudio y su ubicación espacial, se muestran en la Figura 3-7 y en la Tabla 3-4.

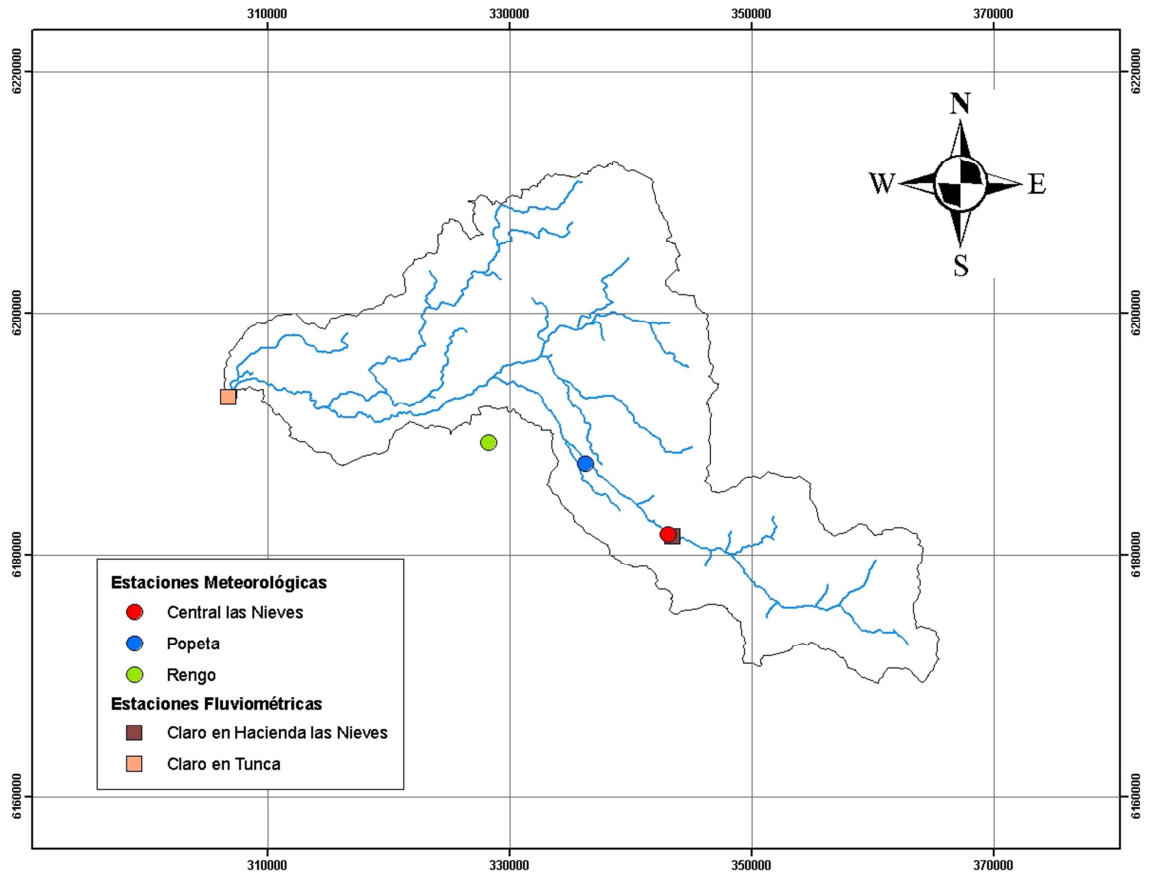


Figura 3-7: Estaciones pluviométricas y fluviométricas de la zona de estudio.

Tabla 3-4: Estaciones de medición.

Estación	Tipo	UTM N	UTM E	Altitud [msnm]
Central Las Nieves (CLN)	Meteorológica	6181767	343115	700
Rengo	Meteorológica	6189340	328281	310
Popeta	Meteorológica	6187622	336295	480
Claro en Hacienda Las Nieves (CHLN)	Fluviométrica	6181574	343449	720
Claro en Tunca (CT)	Fluviométrica	6193089	306745	180

La precipitación promedio mensual de las estaciones consideradas en el estudio se muestra en los gráficos de la Figura 3-8.

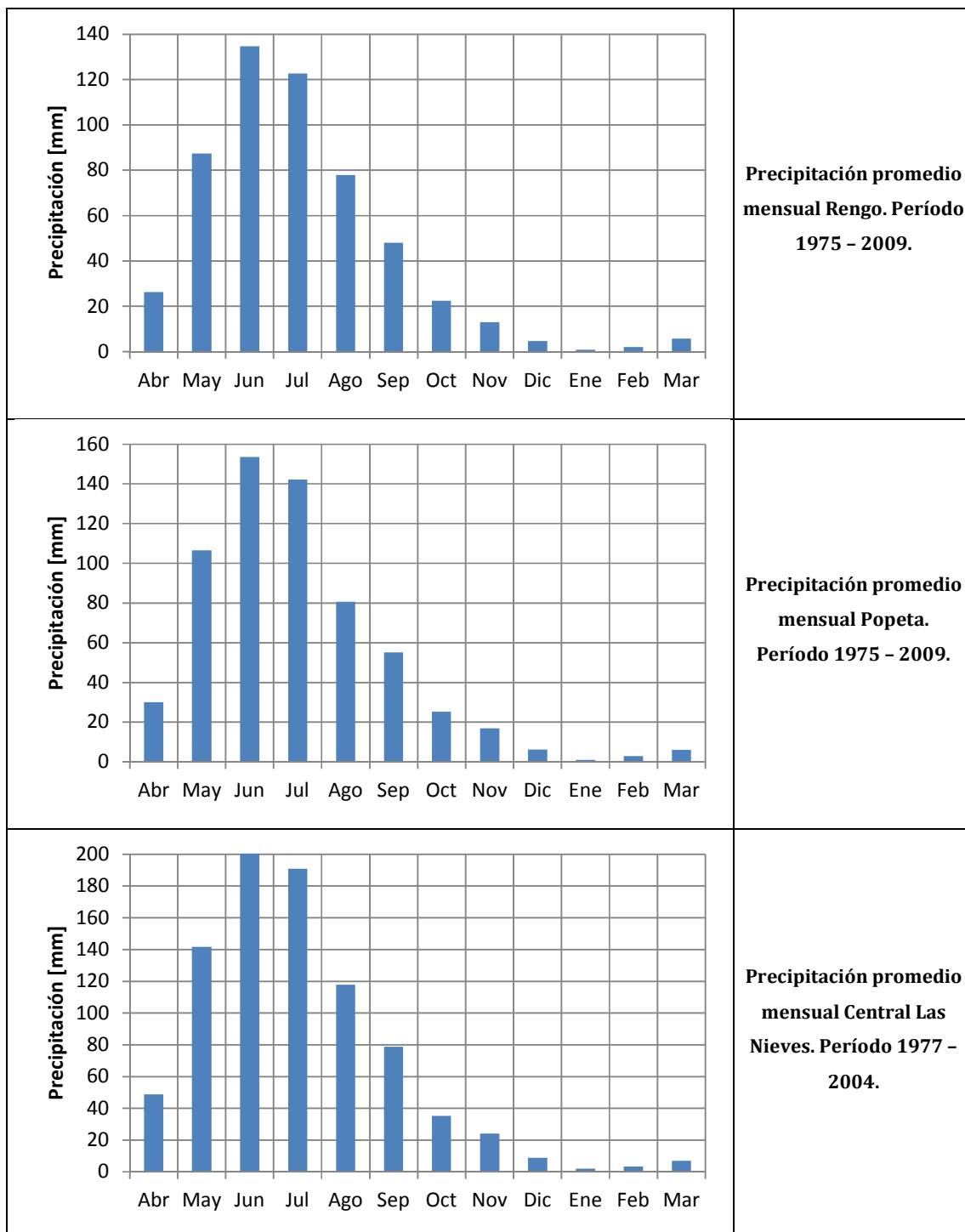


Figura 3-8: Precipitación promedio mensual de las estaciones consideradas en el estudio.

La temperatura promedio mensual de la estación Rengo y los caudales medios mensuales promedio medidos en Claro en Hacienda las Nieves y Claro en Tunca se ilustran en la Figura 3-9.

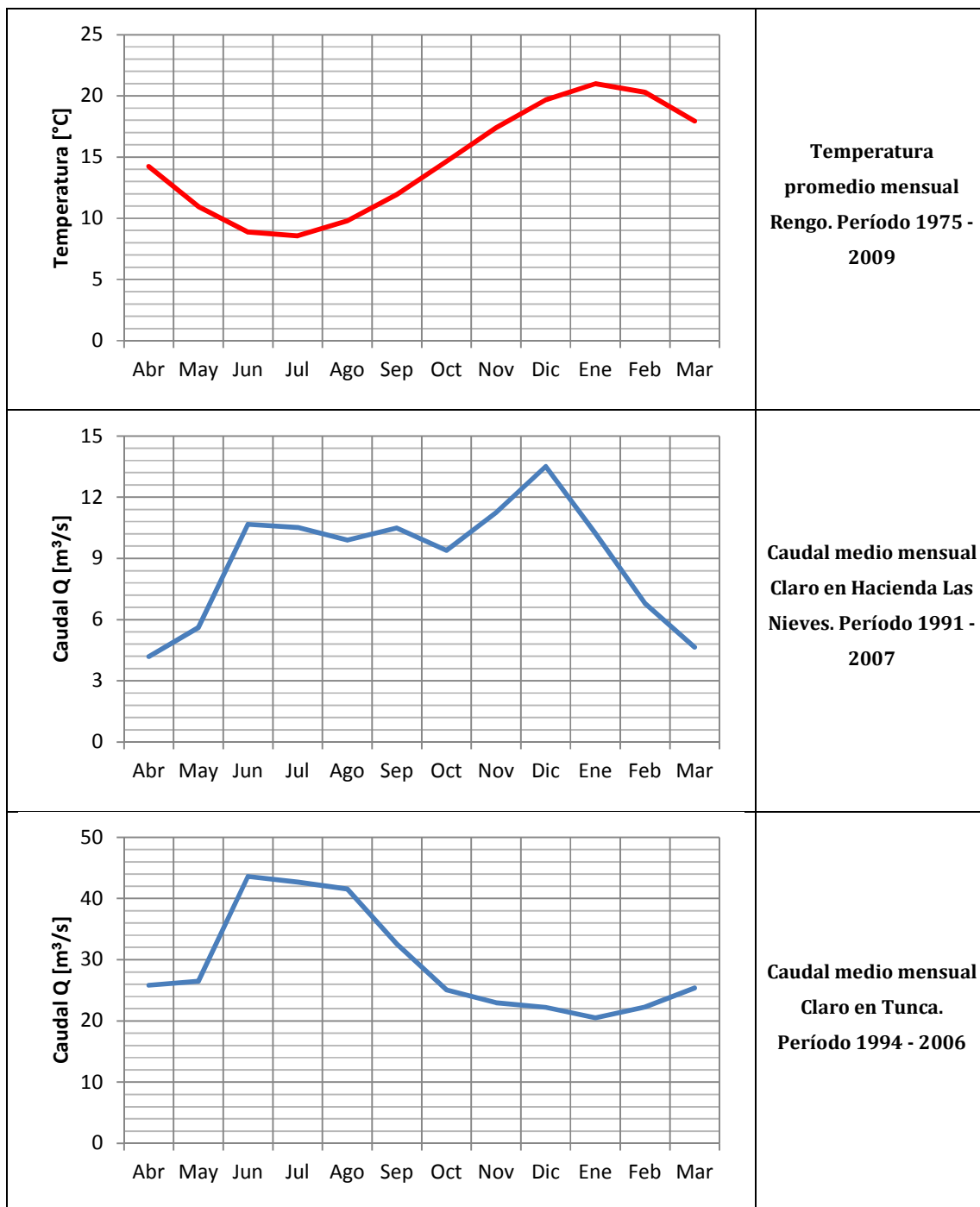


Figura 3-9: Temperatura promedio mensual y caudal medio mensual promedio de las estaciones de la zona de estudio.

De la Figura 3-8 se observa que las mayores precipitaciones en la zona de estudio (promedio de la precipitación total de cada mes en todos los años con información) se dan entre los meses de mayo y agosto. Se presenta una intensificación de la lluvia con la altitud, tendencia que se puede observar prácticamente en todos los meses. Por ejemplo, la precipitación promedio mensual en el mes de julio en las estaciones Rengo, Popeta y Central Las Nieves, corresponden a 123, 142 y 191 milímetros respectivamente.

La estación meteorológica Popeta se utiliza para extender la estadística de la estación Central Las Nieves, la cual sólo cuenta con información hasta el año 2004. Las correlaciones mensuales en el período de medición coincidente son altas, caracterizadas por valores de R^2 que se van entre 0.73 y 0.99.

La Figura 3-9 muestra que en la estación meteorológica Rengo, las mayores temperaturas se tienen en el período comprendido entre noviembre y marzo, mientras que las menores temperaturas se observan en el período junio - agosto.

En cuanto a los caudales superficiales, la cuenca delimitada por la estación Claro en Hacienda Las Nieves, tiene un régimen nivo - pluvial con regulación de un embalse y un máximo en el mes de diciembre, mientras que la estación Claro en Tunca presenta un régimen netamente pluvial cuyos caudales son máximos durante los meses de junio, julio y agosto.

4. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Debido a que la cuenca cuenta con 2 estaciones fluviométricas, se realiza el proceso de calibración y validación en 2 etapas.

Etapa 1: calibración y validación de la cuenca de cabecera (CC) delimitada por la estación Claro en Hacienda las Nieves, de la cual se obtiene la serie de caudales medios mensuales que produce esta zona.

Etapa 2: calibración y validación de la cuenca intermedia (CI) delimitada por la estación Claro en Tunca, considerando como input de esta cuenca, la serie de caudales medida en Claro en Hacienda las Nieves.

Para ello se divide la cuenca en 11 bandas de elevación, a las cuales son asignadas las características meteorológicas y de uso de suelo correspondientes, para posteriormente ser trabajadas en WEAP. La discretización en bandas y la delimitación de subcuencas se muestra en la Figura 4-1. El área de las bandas y su rango de elevación se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Bandas de elevación.

Nº Banda	Elevación [msnm]	Área [km ²]	Elevación media [msnm]
1	180-275	105.3	240
2	275-375	189.7	325
3	375-500	185.2	420
4	500-725	78.0	615
5	725-1250	98.4	1000
6	1250-2300	40.7	1650
7	725-1250	29.7	985
8	1250-1775	65.0	1520
9	1775-2300	54.2	2050
10	2300-3000	63.9	2570
11	3000-3670	32.3	3210

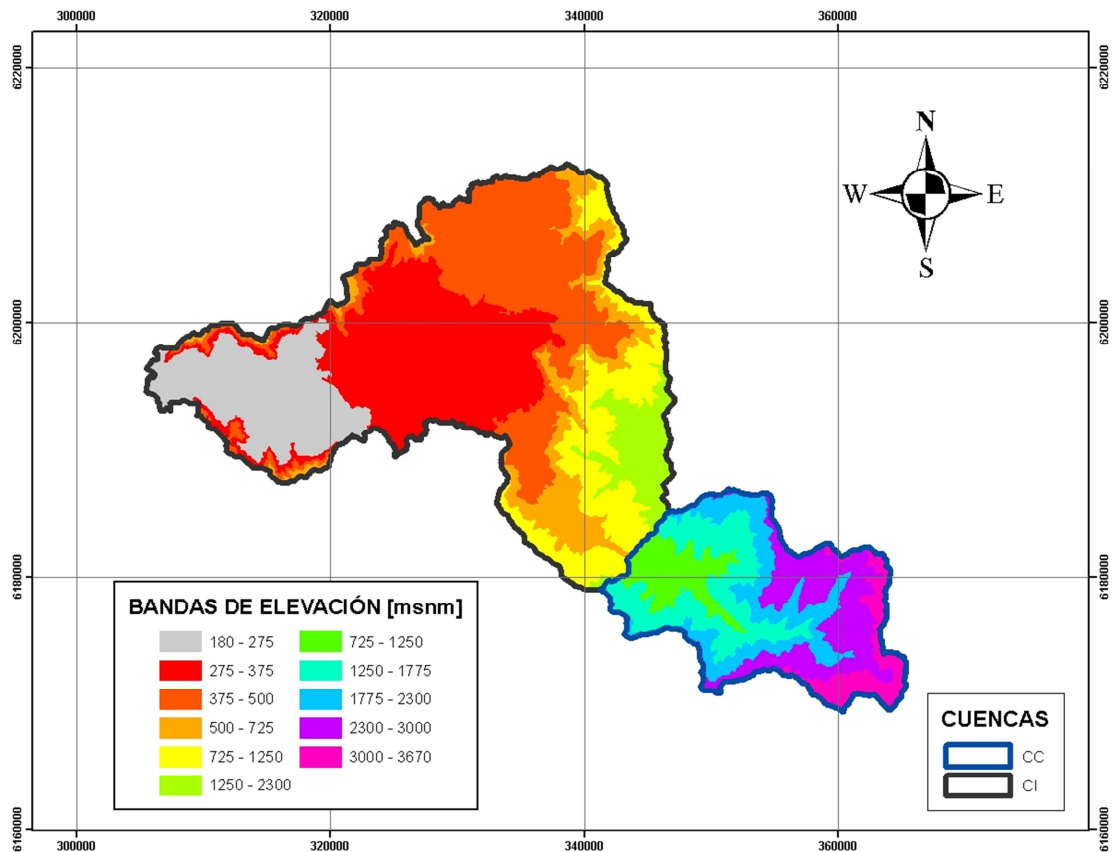


Figura 4-1: Discretización de la cuenca en bandas de elevación.

De la Figura 4-1, se aprecia que las cuencas CC y CI quedan divididas en 5 y 6 bandas de elevación respectivamente. La cuenca CC tiene un área de 245 [km²], correspondiente al 26% del área total, mientras que la cuenca CI tiene un área de 698 [km²], que corresponde al 74% del área total.

4.1. DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS EN LAS BANDAS

4.1.1. PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

Para cada variable meteorológica (VM), se define un gradiente (G_j) a nivel mensual, el cual se considera válido a lo largo de toda la cuenca. Para asignar el valor de la VM en cada una de las bandas, se utiliza la ecuación (4-1).

$$VM_{i,j} = VM_{Bj} + G_j \cdot \Delta H_i$$

(4-1)

Donde $VM_{i,j}$ corresponde al valor de la variable en la banda i para el mes j , VM_{Bj} al valor de la variable en la estación base para el mes j , G_j al gradiente de la variable en el mes j , y ΔH_i a la diferencia de cotas entre la estación base y la altitud representativa de la banda de elevación correspondiente.

Adicionalmente, para cada una de las variables antes mencionadas, se hacen las siguientes consideraciones.

- Precipitación

Para determinar su gradiente, se considera la precipitación mensual observada en las estaciones Rengo y Central Las Nieves. Conocida la diferencia de cotas entre estaciones, se calcula el valor de G [mm/m]. La estación base corresponde a Central las Nieves.

Para el caso de la cuenca CC, se pondera la precipitación calculada con la expresión (4-1), por un factor que disminuye su monto en cada banda. Esto se justifica por el hecho de que las precipitaciones no necesariamente tienen un ajuste lineal en función de la altura, y a pesar que no se cuenta con datos medidos en esta cuenca de cabecera, se puede verificar que si se considera esta relación, el volumen de agua generado por la cuenca es bastante mayor que el medido en la estación Claro en Hacienda las Nieves. Los ponderadores considerados se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Factor de corrección de la precipitación para la cuenca CC

Nº banda	7	8	9	10	11
Factor	1	0.85	0.77	0.73	0.7

- Temperatura

Para definir el gradiente de temperatura, se considera la ecuación (4-2).

$$G = GTS + (GTC - GTS) \cdot \frac{n}{N}$$

(4-2)

Donde GTS y GTC corresponden a los valores del gradiente de temperatura a nivel diario, para días sin y con lluvia respectivamente, n al número de días con lluvia y N al número de días del mes. Los valores de GTS y GTC ya fueron calculados a nivel diario para la cuenca del Cachapoal por Figueroa (2008) y corresponden a -0.209 [°C/100 msnm] y -0.535 [°C/100 msnm] respectivamente. Considerando los días de lluvia promedio por mes en la estación Rengo (estación base para la temperatura), se obtiene el gradiente a nivel mensual que se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Gradiente de temperatura.

Mes	Días con lluvia	G [°C/100 m]
ABR	4.8	-0.261
MAY	7.8	-0.293
JUN	13.9	-0.360
JUL	9.1	-0.308
AGO	5.8	-0.271
SEP	4.5	-0.258
OCT	3.8	-0.250
NOV	1.6	-0.227
DIC	1.1	-0.221
ENE	0.0	-0.209
FEB	0.3	-0.212
MAR	0.6	-0.216

4.1.2. OTRAS VARIABLES METEOROLÓGICAS

- Humedad relativa

Se consideran los promedios mensuales de humedad relativa medida en la estación Rengo y cuyo valor se supone igual para todas las bandas de elevación. Esto porque no se cuenta con información suficiente para calcular un gradiente de humedad relativa, que permita realizar una distribución de este parámetro en las bandas.

- Viento

Dado a que las estaciones que cuentan con los instrumentos para realizar mediciones de viento no registran información, se obtuvo el valor de esta variable a partir de un explorador de energía eólica y solar realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para la Comisión Nacional de Energía (DGF, 2009), el cual cuenta con mapas de viento a nivel trimestral para el año 2006. En éste se ingresan las coordenadas de cada banda, para encontrar el valor del viento promedio mensual para ese punto.

4.2. CARACTERIZACIÓN AGRÍCOLA

De acuerdo con la información mostrada en la Figura 3-6, e imágenes satelitales obtenidas de Google Earth para la zona de estudio, el área destinada al uso agrícola se encuentra ubicada entre las bandas 1, 2, 3 y 4. Considerando lo anterior y conocida la zona de influencia de la primera sección del río Claro de Rengo, dentro de la cual se tienen 63 [km²] de área destinada al uso agrícola, se obtiene que el área agrícola correspondiente a la segunda sección del río es de 96 [km²].

4.2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CULTIVOS

A partir de la encuesta agronómica realizada en la primera sección del río Claro de Rengo (INDAP, 1997), se agrupan los cultivos en 5 clases, cada una de ellas compuesta por un set de cultivos, los cuales se listan en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Clases de cultivos según encuesta agronómica, 1ª sección del río (INDAP, 1997).

Clase	Cultivos
Cultivos anuales	Maíz, trigo, papas.
Cultivos permanentes	Manzanos, almendros, duraznos, vides, kiwis, guindos, naranjas, paltas, perales, nectarines, nogales.
Praderas	Alfalfa, trébol, otros.
Hortalizas	Tomates, cebollas, ajos, pimientos, porotos verdes, repollo, brócoli, ají, zapallo.
Otros	Forestales, barbecho, huerto casero, quinta.

Se considera que el porcentaje de participación de un cultivo dentro de su clase, se conserva en la segunda sección del río. Para efectos de modelación, la clase otros se considera sin subcategorías. La Tabla 4-5 muestra el área agrícola total, según la clase de cultivo.

Tabla 4-5: Área agrícola según cultivos.

Parámetro	Cultivos anuales	Cultivos permanentes	Praderas	Hortalizas	Otros	Total
Área [km ²]	50.1	76.9	10.1	9.7	11.2	157.9
Fración del total [%]	31.7	48.7	6.4	6.1	7.1	100.0

En la Figura 4-2 se muestran los porcentajes en que se divide el área agrícola en cada una de las bandas de interés.

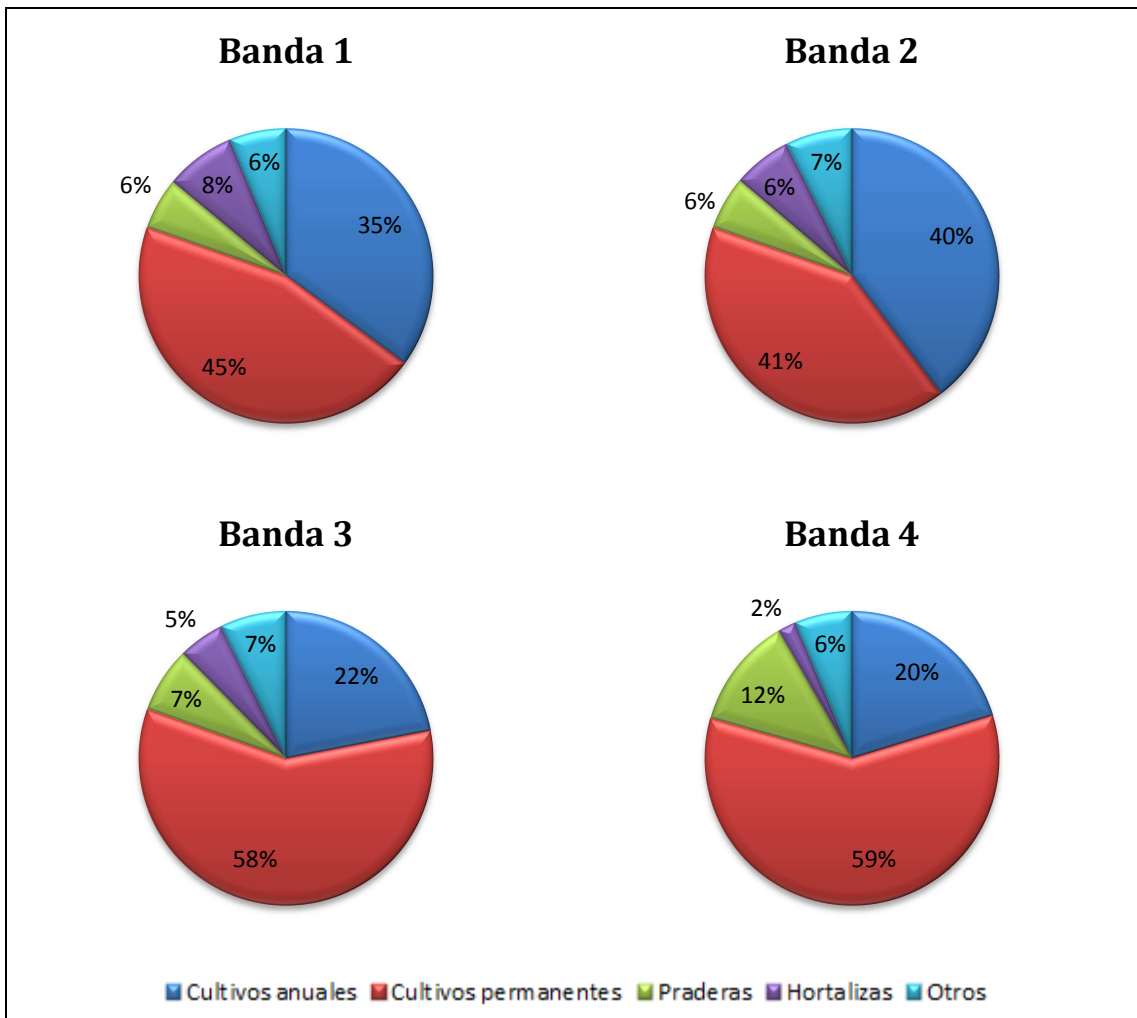


Figura 4-2: Distribución de cultivos en las bandas.

4.2.2. COEFICIENTES DE CULTIVO

A partir de los valores entregados por la FAO (2006) para los coeficientes de cultivo en condiciones estándar, y conocida la fecha de plantación característica del cultivo en la zona, se obtiene la curva de k_c para cada uno de los cultivos mostrados en la Tabla 4-4. En base a ello y conocido el porcentaje de participación que tiene cada cultivo perteneciente a una clase, se genera una curva de k_c ponderada, propia para cada clase y diferente para cada banda, en función de las correcciones realizadas para los coeficientes de cultivo de mediados y final de temporada.

Se señala que el coeficiente de cultivo para inicios de temporada no fue corregido, ya que depende netamente del manejo que se le da al recurso hídrico, el cual puede ser muy variado a lo largo de la cuenca. Los valores de $k_{c\ ini}$ asignados, corresponden a los utilizados en el proyecto del embalse

Callihue (DOH, 1999), el cual se desarrolla en la región de O'Higgins y cuyos cultivos son prácticamente los mismos que los presentes en la cuenca del Claro de Rengo. De no existir información sobre el valor del $k_{c\ ini}$ en este estudio, se completó con el valor sugerido por la FAO.

Para el caso de la clase otros, el valor del coeficiente de cultivo se determina como el promedio del k_c de cultivos permanentes, hortalizas y superficie sin cultivar, de manera que sus componentes (forestal, huerto casero, quinta, barbecho) queden bien representados en cuanto a las demandas evapotranspirativas.

La Figura 4-3 muestra la variación mensual de los coeficientes de cultivo en la banda 1, para cada una de las clases consideradas. Se puede apreciar que los valores de k_c son máximos en los meses de diciembre y enero, y mínimos en los meses de junio y julio. Los valores del k_c para las otras bandas, pueden ser consultados en anexo digital.

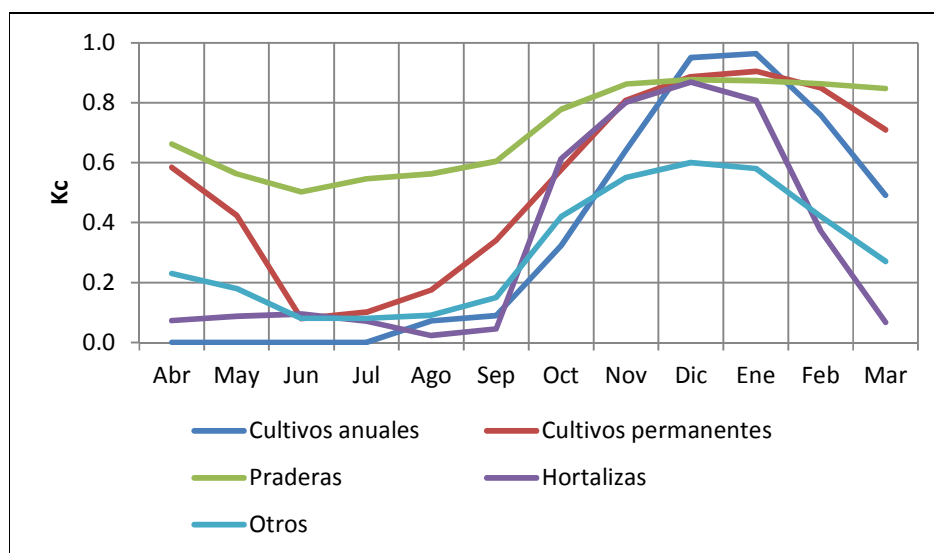


Figura 4-3: Coeficiente de cultivo según clase, banda 1.

4.2.3. DEMANDAS DE AGUA

En el caso de la primera y segunda sección del río Claro de Rengo, se cuenta con información de los derechos al cauce medidos en acciones, que tiene cada comunidad asociada a un canal. Además, se conoce la capacidad máxima de estos canales, lo cual permite obtener una relación $Q_{derechos}/Q_{máximo}$ de 0.44, aplicable cuando no se cuente con información de los derechos de agua, tal como es el caso de los canales que extraen agua desde los esteros Tipaume, Pichiguao, Guacargue y Paso de Piedra, afluentes al río Claro de Rengo. Si bien la utilización de este factor es un supuesto

fuerte, no se dispone de mayor información que pudiese mejorar la estimación de las demandas de agua en el caso que no se cuente con dicha información.

Para efectos de modelación, todos los canales que entregan agua a la misma banda de elevación se consideran en un único gran canal. En consecuencia, el modelo cuenta con sólo un gran canal por banda (en total cuatro puntos de extracción desde el río, correspondiente a las cuatro bandas con desarrollo agrícola), el cual cumple la función de entregar la totalidad de los derechos de agua asociados a ésta. Cada banda de elevación, la cual se compone de las distintas clases de cultivo según la distribución mostrada en la Figura 4-2, tiene la misma prioridad a la hora de realizarse las entregas. En caso de que el suelo se encuentre 100% saturado el agua es devuelta al río, en caso contrario será evapotranspirada e infiltrada de acuerdo a las ecuaciones que rigen en los catchments. La Figura 4-4 muestra un diagrama de flujos de agua desde y hacia los catchments.

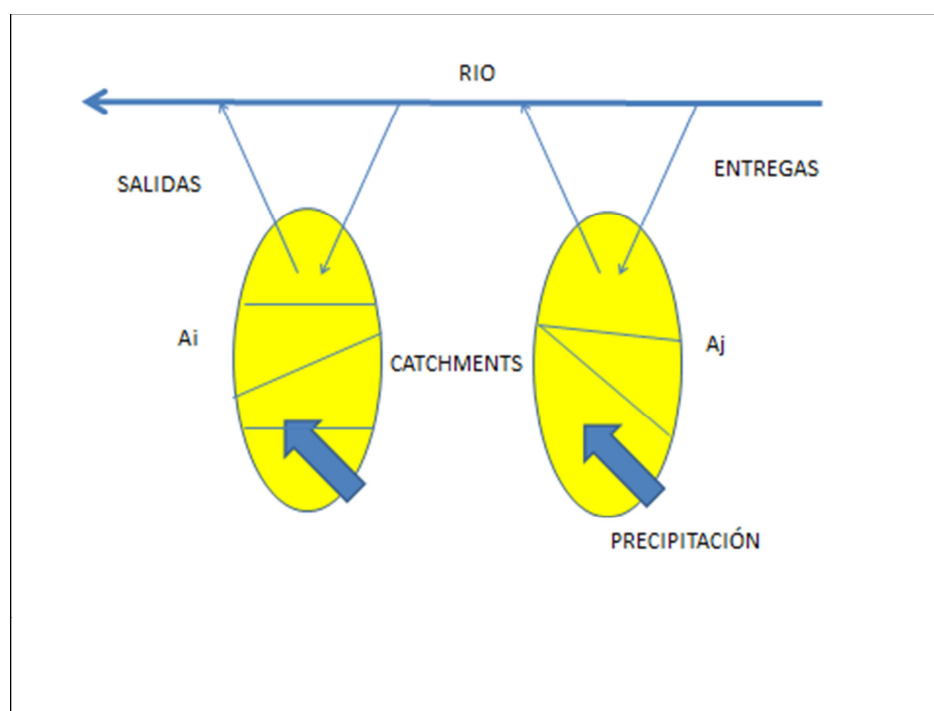


Figura 4-4: Esquema de entradas y salidas de agua de los catchments.

La Tabla 4-6 muestra los caudales máximos a entregar en cada banda de elevación. Debe destacarse que estas demandas de agua se consideran invariantes durante el período completo de calibración y validación. En anexo digital se adjunta el diagrama unifilar de la primera y segunda sección de la cuenca del Río Claro de Rengo.

Tabla 4-6: Demanda de caudales por banda.

Banda 1	Q [m³/s]	Banda 2	Q [m³/s]
Estero Guacargue	11.94	C. Carrizal	0.09
Estero Paso de Piedra	2.25	C. Palmino	0.18
C. Molino de Tunca	0.39	C. El cerro	0.30
C. Punta de Tunca	1.43	C. San Pedro	0.52
C. Farías Machuca	0.14	C. Panquehue	0.74
C. Alegría	0.07	C. Besoain	0.23
		C. Manchenes	1.00
Total	16.23	C. San Luis	1.04
Banda 3	Q [m³/s]	C. Cartagena	0.06
Estero Tipaume(zona alta)	1.93	C. Las Rosas	0.02
Estero Pichiguao	0.35	C. Santa Rita	0.06
C.Mira	0.05	Estero Tipaume (zona baja)	0.98
C.Lorenzoni	0.23	C. Lo de lobos	0.45
C. El Peñón	1.22	C. Mendoza	0.26
C. Pedregal	0.24	C. San Judas	0.03
C. Córdova	0.05	C. Pretil	0.24
C. Molino	0.46	C. Población	1.73
C. Molino Chico	0.12	C. Santa Margarita	0.34
C. Chanqueahue Cerrillos	0.89	C. Urbina	0.06
C. Ramirano	1.03	C. Saavedra	0.05
C. Bisquert	0.24		
C. Talhuén	0.01	Total	8.39
C. Popeta	1.25	Banda 4	Q [m³/s]
C. Molinana	0.13	C. Bollenar	0.032
Total	8.20	Total	0.032

4.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

La calibración y validación se realiza basándose en el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe, definido como se muestra en la expresión (4-3).

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Qsim_i - Qobs_i)^2}{\sum_i (Qobs_i - \overline{Qobs})^2}$$

(4-3)

Donde:

$Qsim_i$: Caudal simulado en el mes i.

$Qobs_i$: Caudal observado en el mes i.

\overline{Qobs} : Caudal observado promedio en el período de análisis.

Mediante el proceso de calibración y validación, se busca obtener el mejor ajuste posible entre la serie observada de caudales medios mensuales y la serie generada por el modelo.

4.3.1. CUENCA CLARO EN HACIENDA LAS NIEVES (CHLN)

El período de calibración se extiende desde abril de 1991 hasta marzo de 2001, mientras que la validación comprende desde abril de 2001 hasta marzo de 2008. El coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) obtenido a nivel mensual para la calibración es de 0.76, mientras que el de la validación es de 0.71. El esquema realizado en WEAP se muestra en la Figura 4-5. Los resultados del proceso se muestran en las Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8 y Figura 4-9.

Debe mencionarse que el flujo natural de esta cuenca se ve regulado por el embalse Los Cristales. Esta obra que peralta la Laguna de Los Cristales, permite un almacenamiento máximo de 8.5 [Hm³] útiles. La entrega al cauce natural se hace por medio de 2 tubos de 800 [mm] de diámetro, previéndose un gasto máximo de entrega de 4.5 [m³/s] por tubo (Sandoval, 2003). Debido a que no se cuenta con información de las entregas que realiza el embalse, se supone una curva de entrega, cuyo máximo se presenta en el mes donde las demandas de los cultivos son mayores y que alcanza un valor igual a la capacidad máxima que pueden transportar las tuberías. Si el embalse luego de la entrega, tuviese más volumen de agua del que puede almacenar, este será evacuado por el vertedero, cuya capacidad de vertimiento es de 41.5 [m³/s]. La Tabla 4-7 muestra la curva adoptada para las entregas que realiza el embalse Los Cristales.

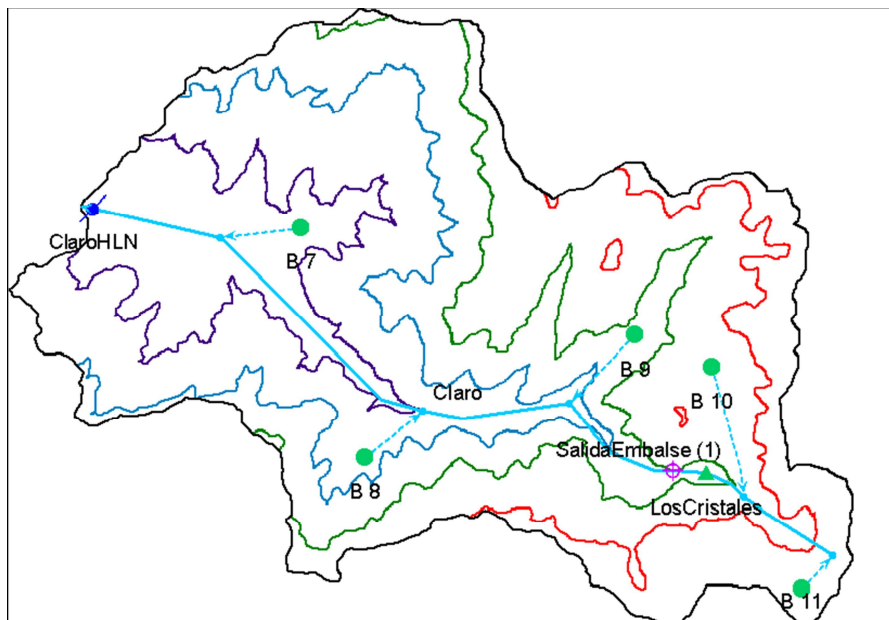


Figura 4-5: Esquema CHLN realizado en WEAP.

Tabla 4-7: Entregas del embalse.

Mes	Entrega [m ³ /s]	Mes	Entrega [m ³ /s]	Mes	Entrega [m ³ /s]
Abr	0.2	Ago	0.2	Dic	9
May	0.2	Sept	1	Ene	8
Jun	0.2	Oct	3	Feb	4
Jul	0.2	Nov	8	Mar	1

La fracción nubosa (FN), definida como el porcentaje del tiempo sin presencia de nubes, que toma valor 1 para cielo completamente despejado y 0 para cielo cubierto; y la humedad relativa promedio a nivel mensual, fueron obtenidas de la estación meteorológica Rengo y sus valores se muestran en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Variación mensual de fracción nubosa y humedad relativa.

Mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
FN [-]	0.49	0.34	0.27	0.3	0.37	0.44	0.53	0.63	0.65	0.72	0.72	0.63
HR [%]	68	73	78	78	71	70	60	56	49	47	53	57

Los parámetros utilizados para la calibración del modelo, así como los rangos de valores en que se mueven según los catchments, se muestran en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Parámetros de Calibración CHLN.

Parámetro	Rango de valores
Coefficiente de cultivo [-]	0-0.9
Capacidad de almacenamiento en la zona de las raíces [mm]	2080
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda [mm]	1200-23000
Factor de resistencia a la escorrentía [-]	0.5-6
Conductividad de la zona de las raíces [mm/mes]	2700-14000
Conductividad de la zona profunda [mm/mes]	400-450
Dirección preferencial del flujo [-]	0.05-0.94
Nivel de humedad inicial en la zona de las raíces [%]	1-32
Nivel de humedad inicial en la zona profunda [%]	6-42
Albedo [-]	0.1-0.85
Temperatura de congelamiento del agua [°C]	1
Temperatura de derretimiento de nieve [°C]	10

La Figura 4-6 permite afirmar que el modelo desarrollado, es capaz de representar de manera razonable el volumen anual de agua que escurre por el punto de salida de la cuenca. El volumen total modelado en el período de análisis, es un 1.8% mayor que el volumen medido en la estación fluviométrica, resultado que se considera satisfactorio. Analizando la gráfica, puede apreciarse que para los años secos, el modelo sobrestima el volumen anual en un rango que va entre un 20 y 40%, mientras que para el año de mayor volumen observado (1997), el modelo subestima su valor en un 13.5%.

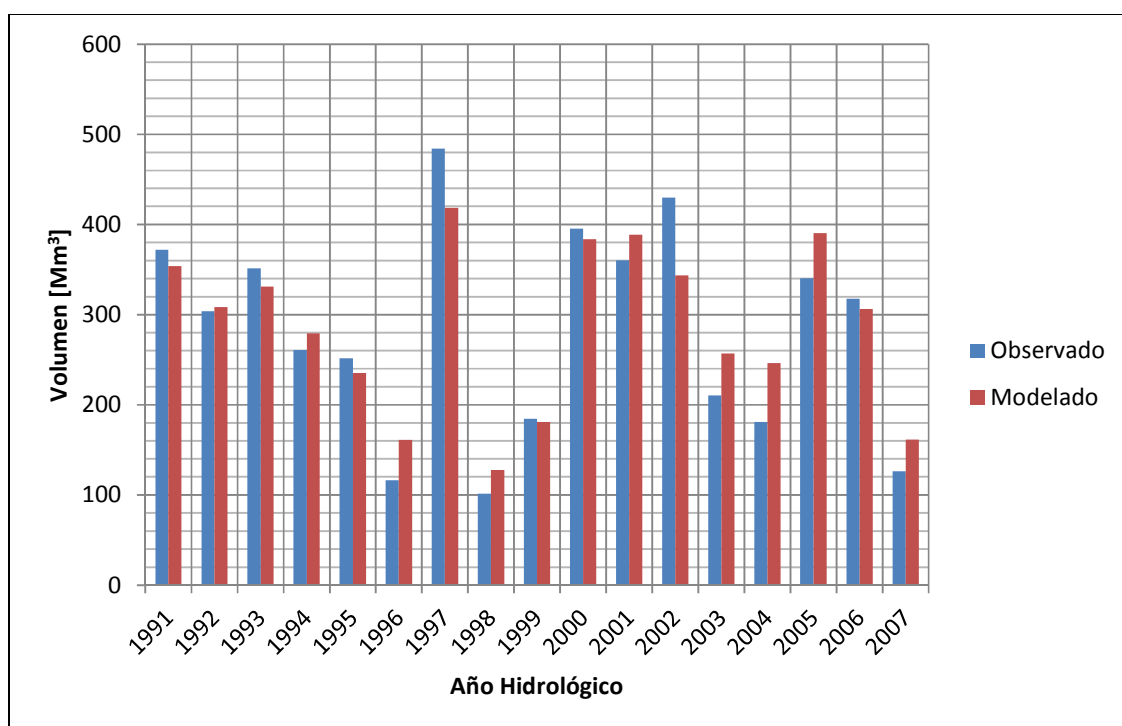


Figura 4-6: Volumen anual de escurrimiento observado y modelado en CHLN, período 1991-2007.

La Figura 4-7 muestra que en términos de caudales medios mensuales promedio, el comportamiento del modelo representa bien la situación observada. Se aprecia que para los meses de septiembre, octubre y diciembre existe una sobrestimación del caudal entre un 5% y 6%, según el mes, mientras que para enero se subestima el caudal en un 5.8%.

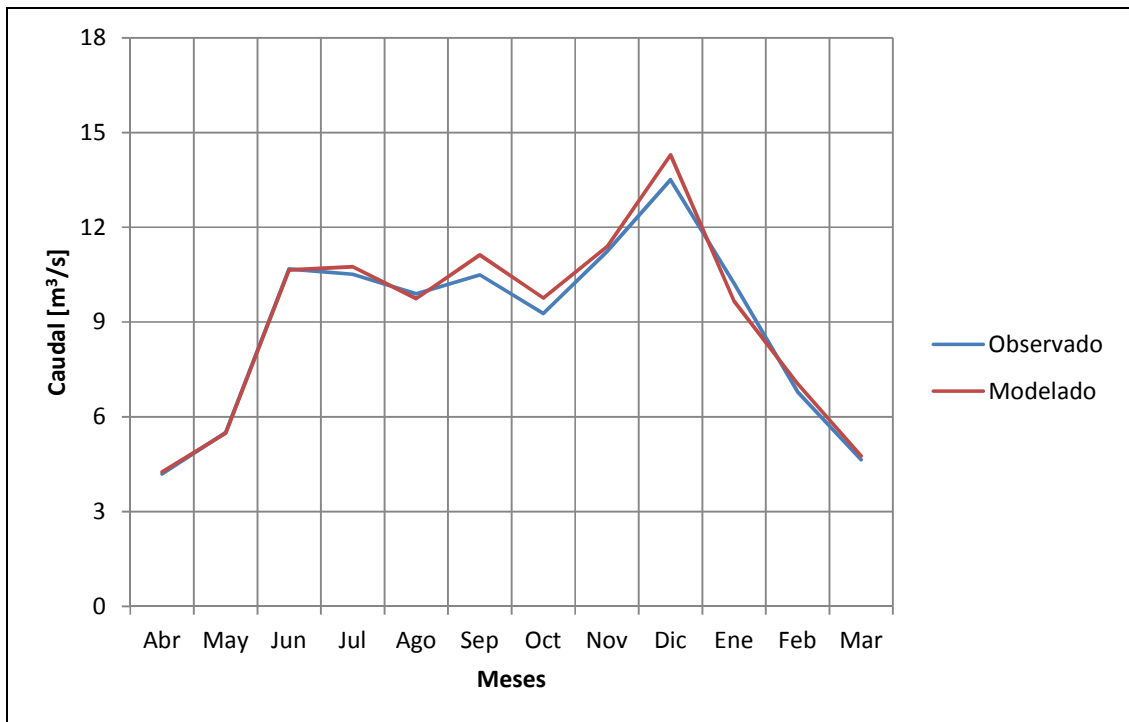


Figura 4-7: Caudales medios mensuales promedio observados y modelados en CHLN, período 1991-2007.

La Figura 4-8 compara los caudales observados con los simulados por el modelo durante el período de calibración (fondo blanco) y validación (fondo azul). Se puede apreciar que los máximos observados no son bien representados por el modelo, mientras que los caudales mínimos son levemente sobreestimados. La búsqueda de un mejor ajuste de los caudales máximos, se traduce en un aumento de los caudales base, y consecuentemente, del volumen total modelado, por lo cual se opta por una calibración que logre un equilibrio entre ambos.

Las principales fuentes de incertidumbre de los resultados se atribuyen fundamentalmente a 2 hechos: el no conocimiento de las entregas que realiza el embalse; y la ausencia de estaciones meteorológicas dentro de la cuenca, que permitan determinar de mejor manera el gradiente de precipitaciones que existe en ésta.

La Figura 4-9 muestra por separado la etapa de calibración y validación, siendo en general el comportamiento similar en ambos casos. Se detecta una leve sobrestimación de los caudales bajos y medios en la etapa de validación, lo que se traduce en un menor coeficiente de NS para esta etapa.

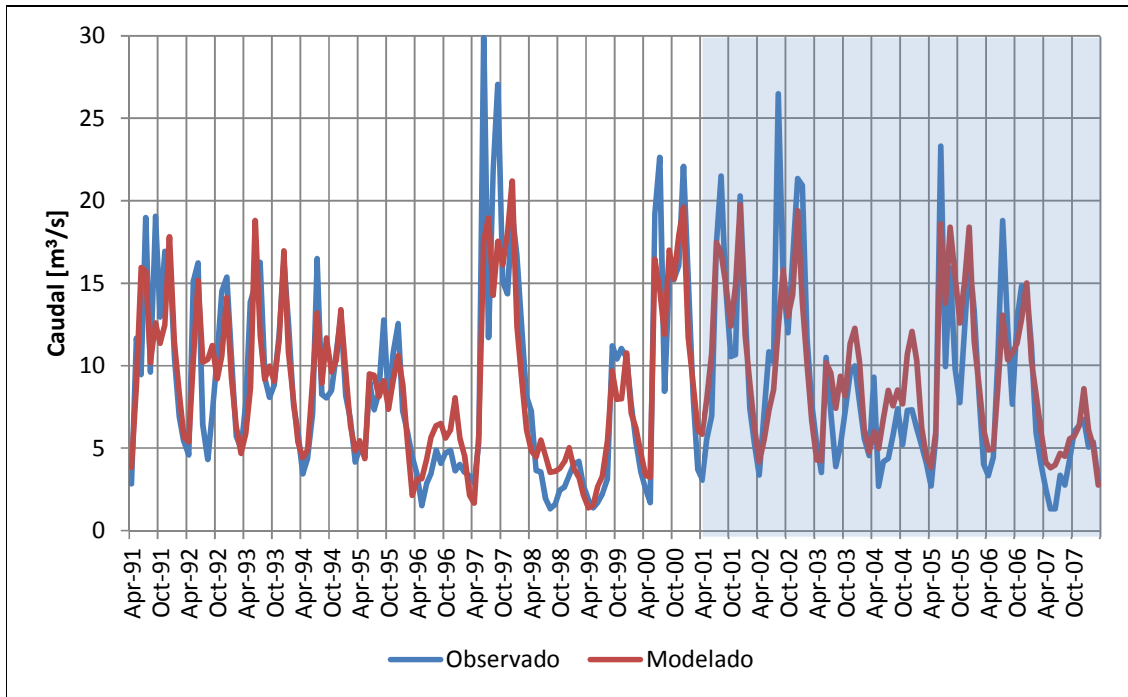


Figura 4-8: Serie de caudales medios mensuales observados y modelados en CHLN, período 1991-2007.

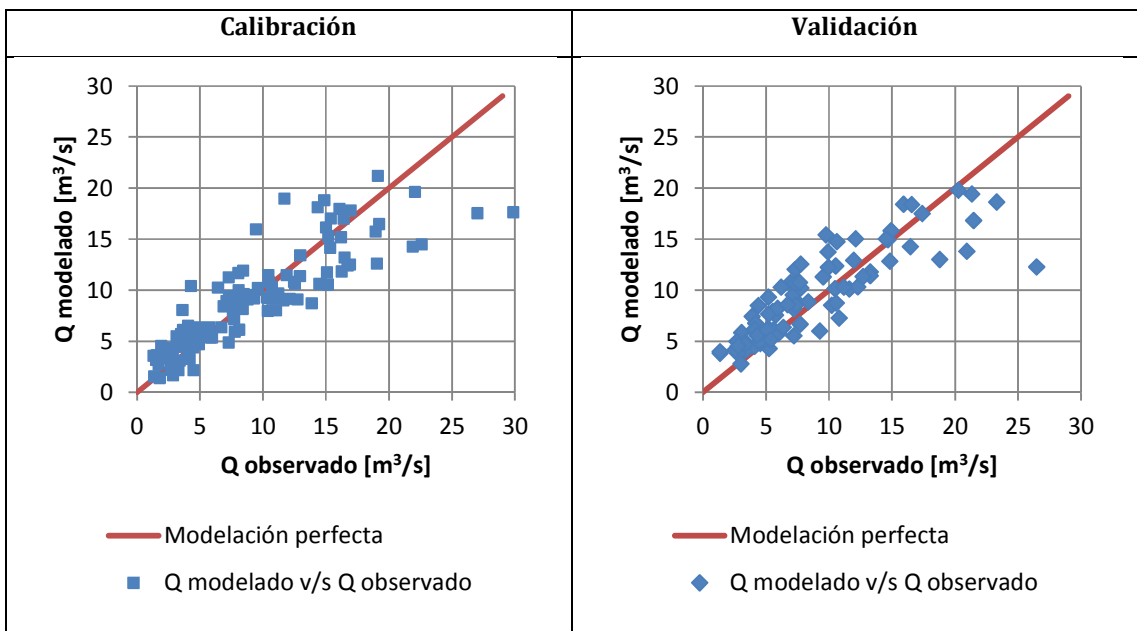


Figura 4-9: Correlación de caudales observados y modelados en CHLN, período 1991-2007.

4.3.2. CUENCA CLARO EN TUNCA (CT)

El período de calibración se extiende desde abril de 1994 hasta marzo de 2002, mientras que la validación comprende desde abril de 2002 hasta marzo de 2007. El coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) obtenido a nivel mensual para la calibración es de 0.84, mientras que el de la validación es de 0.75. Las Figura 4-11, Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14 muestran los resultados obtenidos. El esquema realizado en WEAP se muestra en la Figura 4-10.

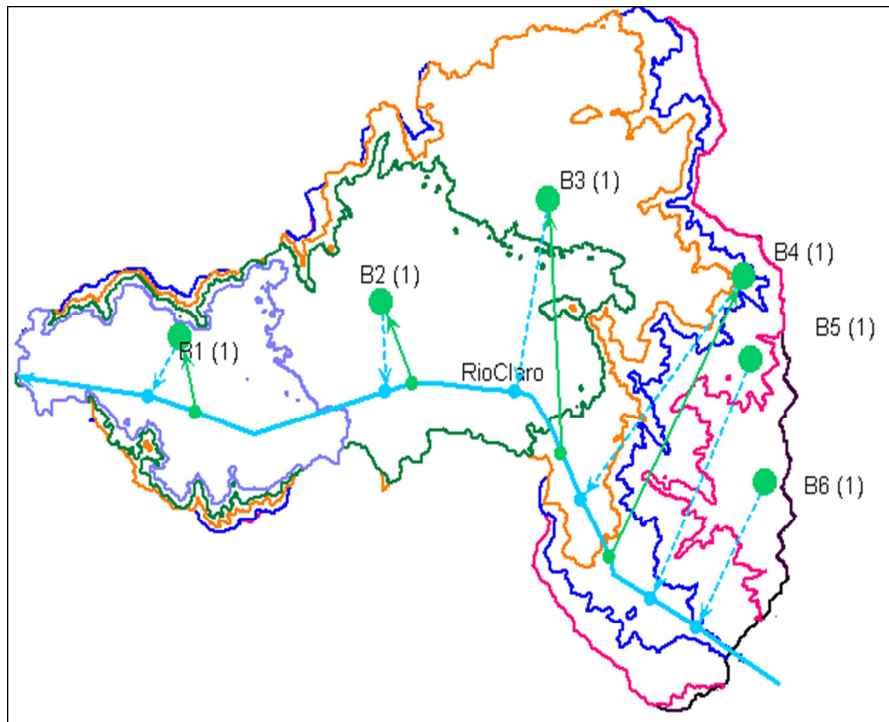


Figura 4-10: Esquema CT en WEAP.

Al igual que en la cuenca CHLN, la fracción nubosa (FN) y la humedad relativa promedio a nivel mensual, fueron obtenidas de la estación meteorológica Rengo y sus valores se muestran en la Tabla 4-8. Los parámetros utilizados para la calibración del modelo, así como los rangos de valores en que se mueven según los catchments, se muestran en la Tabla 4-10.

En la Figura 4-11 se observa que el modelo desarrollado es capaz de representar de manera adecuada el volumen anual medido a la salida de la cuenca. El volumen total modelado en el período de análisis, es de un 0.1% menor que el registrado en Claro en Tunca. Analizando año a año, las mayores diferencias se presentan en el año 2000 con un 18% de déficit y el 2003 con un 20% de exceso, valores que están por debajo de las diferencias que se obtienen al analizar la cuenca CHLN. Se mantiene la tendencia a sobrestimar los volúmenes anuales para años secos.

Tabla 4-10: Parámetros de calibración cuenca CT.

Parámetro	Rango de valores
Coefficiente de cultivo [-]	Variación según clase, ver Figura 4-3.
Capacidad de almacenamiento en la zona de las raíces [mm]	3600-8000
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda [mm]	23000-32000
Factor de resistencia a la escorrentía [-]	0.46-1.05
Conductividad de la zona de las raíces [mm/mes]	2200-8000
Conductividad de la zona profunda [mm/mes]	4500-37000
Dirección preferencial del flujo [-]	0.2-0.8
Nivel de humedad inicial en la zona de las raíces [%]	4-10
Nivel de humedad inicial en la zona profunda [%]	6-7
Albedo [-]	0.2-0.5
Temperatura de congelamiento del agua [°C]	1
Temperatura de derretimiento de nieve [°C]	10

De la Figura 4-12, puede verse que los caudales a nivel medio mensual promedio modelados, se ajustan de buena manera a los observados. Existe una sobrestimación de los caudales de invierno en un 6%, que se explica por el bajo ajuste que se tiene entre caudales observados y modelados en años secos para este período. Para los meses de febrero y marzo, se tiene una subestimación de los caudales en un 10%, lo cual acusa un leve déficit de caudal base.

La Figura 4-13 muestra la serie de caudales medios mensuales observados y modelados, tanto para la etapa de calibración (fondo blanco) como para la de validación (fondo azul). Se aprecia en general un buen ajuste entre las curvas, siendo tanto los caudales peaks como los caudales mínimos levemente subestimados. Se observa también un leve déficit sistemático de caudal en los meses de febrero y marzo, a excepción de los años secos. A pesar de esto, esta configuración es la que logra el mejor coeficiente de NS, ya que un aumento del flujo base genera un incremento de los caudales en todos los meses, produciendo un desajuste mayor en los meses de invierno y un desbalance del volumen anual de agua producido por la cuenca.

La Figura 4-14 muestra por separado las etapas de calibración y validación, en donde se puede apreciar que en general el modelo se comporta bien en ambas etapas. Para el caso de la calibración existe un buen ajuste en caudales bajos y medios y una subestimación para caudales altos, mientras que para la validación el ajuste es mejor para caudales bajos y altos, con una leve sobrestimación en los caudales medios.

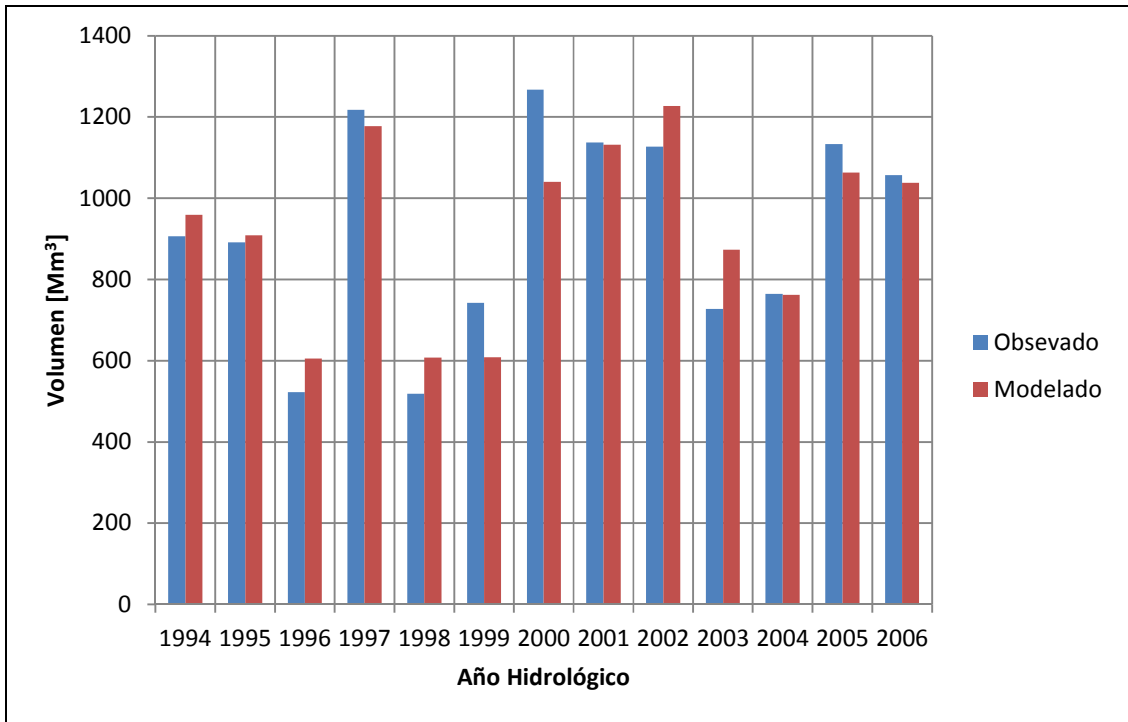


Figura 4-11: Volumen anual de escurrimiento observado y modelado en CT, período 1994 - 2006.

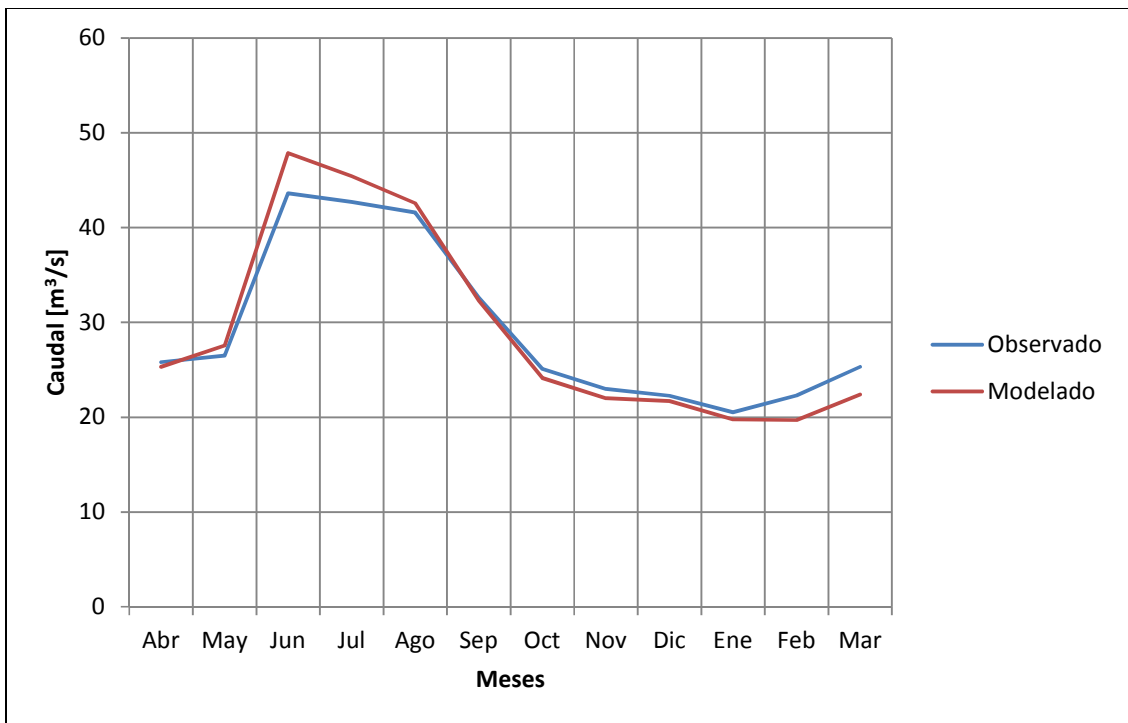


Figura 4-12: Caudales medios mensuales promedio observados y modelados en CT, período 1994-2006.

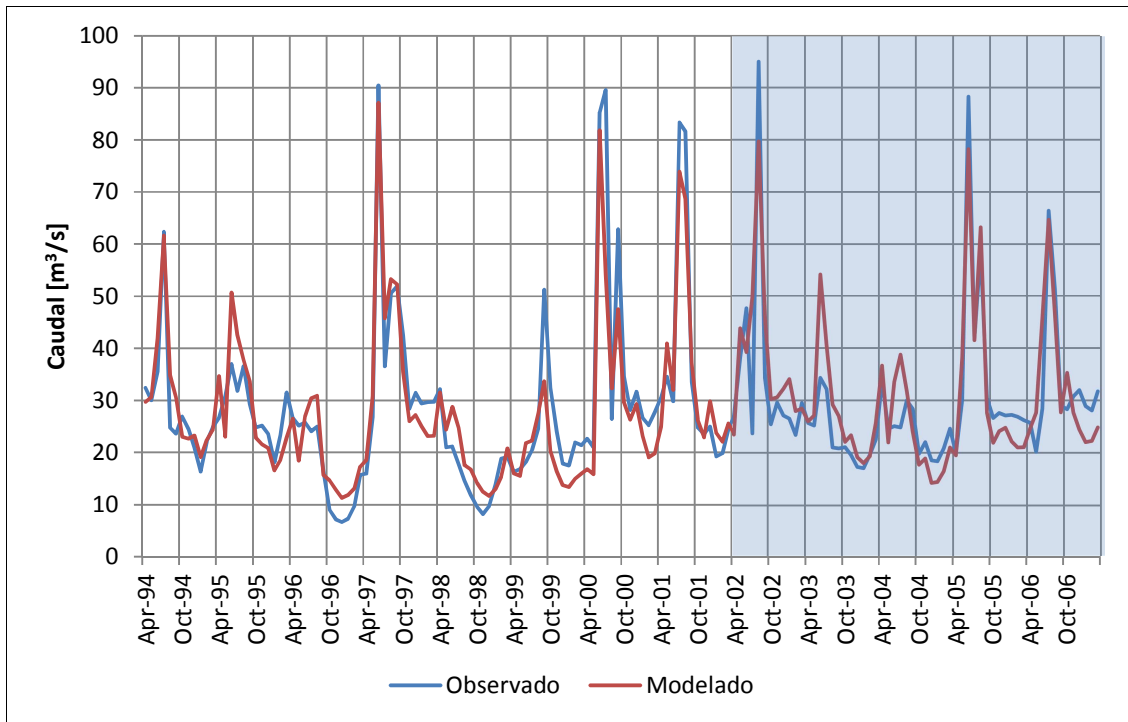


Figura 4-13: Serie de caudales medios mensuales observados y modelados en CT, período 1994-2006.

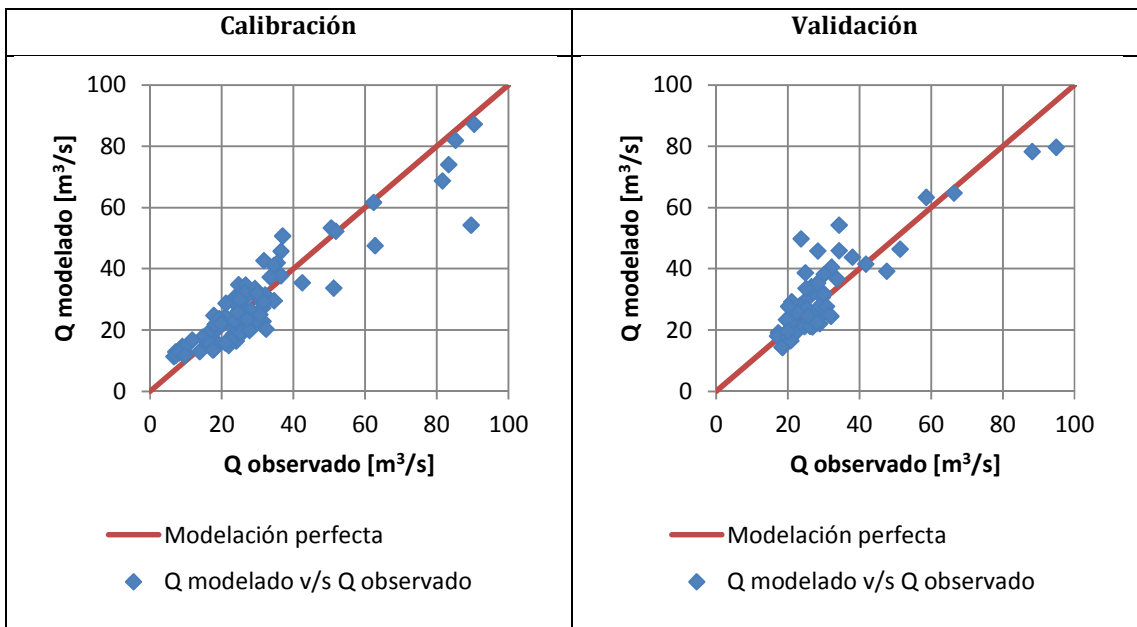


Figura 4-14: Correlación de caudales observados y modelados en CT, período 1994-2006.

4.3.3. ANÁLISIS Y COMENTARIOS DE LOS PARÁMETROS Y VARIABLES UTILIZADOS EN LA ETAPA DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN.

En primer lugar, se destaca la alta sensibilidad del modelo a los parámetros temperatura de congelamiento del agua y temperatura de derretimiento de nieve. Una variación igual o mayor a un grado de cualquiera de estos parámetros, altera de manera significativa la serie de caudales medios mensuales simulada, a tal punto que es posible obtener un régimen hidrológico de la cuenca completamente distinto al que se observa. Esto hecho sólo se percibe en la cuenca delimitada por Claro en Hacienda Las Nieves, la cual presenta una componente nival no despreciable.

Los parámetros de suelo obtenidos en la calibración, dan como resultado un bajo espesor de suelo en la zona cordillerana y precordillerana de la cuenca y un mayor espesor en las zonas bajas, consistente con lo que se observa habitualmente en la realidad. Mientras la capacidad de almacenamiento en la zona de las raíces varía de los 2080 a 8000 [mm] desde zonas altas a zonas bajas, la de la zona profunda lo hace entre los 1200 y 32000 [mm]. Si se conoce que el espesor promedio del acuífero del Cachapoal es de 35 [m], se puede decir que los valores obtenidos, se encuentran en el orden de magnitud de lo observado. De todas formas se considera algo elevado el valor de la capacidad de almacenamiento de la zona de las raíces, en comparación con valores obtenidos de la literatura (SEI, 2009), en donde para distintas modelaciones realizadas en WEAP, oscila entre los 80 y 4320 [mm].

Se destaca además la corta longitud de registro fluviométrico con que se dispone en la estación Claro en Tunca. La estadística muestra que dentro del período de calibración se presentan 2 sequías de importancia: 1996 y 1998-1999, siendo esta última la más grande que se ha producido en la zona central después de la ocurrida en el año 1968. Lo anterior podría quitarle cierto grado de validez a la calibración, puesto que siempre es deseable contar con una gran cantidad de años de información, en donde se tengan años lluviosos, normales y secos, de manera que el modelo considere la alta variabilidad de las precipitaciones, y en general de las distintas variables meteorológicas, en la cuenca.

5. APLICACIÓN A ESCENARIOS FUTUROS

La aplicación del modelo a escenarios futuros, se realiza para 2 períodos:

- Futuro cercano: desde abril de 2011 a marzo de 2040
- Futuro lejano: desde abril de 2041 a marzo de 2070.

Se considera para efectos de análisis, la conservación del área actual destinada a la agricultura y los derechos de agua otorgados a cada una de las bandas, así como los cultivos existentes en éstas. No se considera en ningún caso decisiones del tipo económico.

5.1. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DEL MODELO HADCM3

Para determinar la disponibilidad futura del recurso hídrico, se utiliza el modelo de circulación global de la atmósfera HadCM3, desarrollado por el Hadley Centre en Inglaterra, el cual consiste en un modelo acoplado océano-atmósfera, compuesto por una grilla de 73 x 96 puntos (latitud x longitud) y cuyo equiespaciado es de 2.5° de latitud versus 3.75° de longitud.

Este modelo cuenta con una línea base que llega hasta el año 1999 y un conjunto de escenarios futuros posibles de ocurrir, cuya estimación fue realizada para los años comprendidos entre el 2000 y 2099. Cada punto de la grilla almacena la serie completa de las distintas variables atmosféricas que este modelo considera, tanto para la línea base como para los diferentes escenarios futuros, ya sea a nivel diario o mensual.

Las variables de interés para el presente estudio corresponden a la precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, tanto para la línea base como para el escenario climático A2, escenario más desfavorable en cuanto a la disponibilidad futura del recurso hídrico en el planeta.

El uso directo de las series atmosféricas entregadas por el modelo no es válido por 2 razones:

- La información debe ser llevada al punto de interés, correspondiente a la estación de medición de la variable meteorológica. Para ello se realiza un procedimiento conocido como downscaling espacial.
- Las series resultantes del modelo no tienen una correspondencia temporal con las observadas, sino que entregan la tendencia que tienen los datos en ese período. Para corregir esto, se realiza un procedimiento conocido como downscaling temporal.

5.1.1. DOWNSCALING ESPACIAL

Inicialmente se consideran los 4 puntos de la grilla de HadCM3 (ver ubicación espacial en Figura 5-1) que rodean a la estación de medición, y se grafica la variación mensual de cada una de las variables en cuestión. Debido a que 2 de los puntos de la grilla se ubican en Argentina, la variación mensual de las variables meteorológicas en éstos, no tiene ninguna relación con el comportamiento que tienen estas variables en Chile, lo cual se explica por el efecto de biombo climático que produce la presencia de la Cordillera de Los Andes. Un ejemplo de ello, es que al analizar la línea base, las máximas precipitaciones entregadas por HadCM3 se dan en los meses de diciembre y enero, mientras que para los puntos ubicados en Chile, éstas se dan en los meses de junio y julio.

Otro punto relevante corresponde a las distintas tendencias a futuro que tienen los puntos ubicados a uno u otro lado de la cordillera. Mientras que en Chile se pronostica una disminución de las precipitaciones según el escenario climático A2, en Argentina no existiría mayor variación en la tasa de precipitación futura.



Figura 5-1: Ubicación de los puntos de la grilla de HadCM3.

Por lo anterior, se consideran sólo los puntos 1 y 2, proponiéndose una expresión para el downscaling, tal como se muestra en la Ecuación (5-1).

$$VM_B = \frac{\frac{VM_1}{d_1} + \frac{VM_2}{d_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}$$

(5-1)

Donde VM_B corresponde al valor que toma la variable meteorológica de HadCM3, al trasladarla a la estación base, VM_1 y VM_2 al valor de la variable en los puntos 1 y 2, y d_1 y d_2 a la distancia entre el punto de la grilla y la estación base. Los datos necesarios para la realización de este cálculo se adjuntan en la Tabla 5-1 Posteriormente, se procede a realizar el downscaling temporal con los valores de VM_B .

Tabla 5-1: Puntos a utilizar de la grilla HadCM3

Punto	Longitud [°]	Latitud [°]	Distancia a Central las Nieves [m]	Distancia a Rengo [m]
1	71.25 W	32.5 S	224894	213794
2	71.25 W	35 S	76178	77004

5.1.2. DOWNSCALING TEMPORAL

Para cada una de las variables meteorológicas, se busca el período coincidente entre la serie de datos observados y la línea base de HadCM3. Luego, para cada mes, se ordenan los datos de mayor a menor, haciendo coincidir los valores de igual probabilidad de excedencia de la serie observada y la entregada por HadCM3. Posteriormente, se busca la tendencia de cada nube de puntos, la cual se obtiene mediante curvas lineales por tramos. Se considera que la relación obtenida para la línea base, es válida también para ser aplicada en el futuro. Luego, a partir de las series de variables meteorológicas que entrega HadCM3 para el escenario climático A2 y utilizando las relaciones encontradas, se obtienen las series meteorológicas futuras.

Para el caso de la humedad relativa, la corrección se hizo de forma bimensual dada la poca cantidad de datos observados con los que se cuenta, mientras que para la velocidad del viento, no se realizó este procedimiento, puesto que no se detecta un cambio en la tendencia a futuro de esta variable. El período coincidente utilizado en la corrección se muestra en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Período de corrección de datos HadCM3.

Precipitación	Temperatura	Humedad relativa
1977-1999	1975-1999	1986-1999

La Figura 5-2 muestra ejemplos de curvas ajustadas para las distintas variables meteorológicas. En general, las correcciones realizadas tienen una buena correlación, representadas por un valor alto del R². En anexo digital, se presentan todas las correcciones realizadas para la obtención de las series de precipitación, temperatura y humedad relativa futura, requeridas para realizar la modelación en WEAP.

Si bien el uso de curvas lineales por tramos, entrega buenos resultados cuando la variable HadCM3 futura se encuentra dentro del rango observado en la línea base, no se está considerando la tendencia general de los datos sino que sólo la de un rango de éstos. Por lo anterior, cuando se cuenta con datos HadCM3 futuros fuera del rango observado en la línea base, se toma sólo la tendencia más extrema, lo cual no es representativo de la tendencia general. Otra alternativa es la utilización de una tendencia única, pero en este caso se pierde precisión en el ajuste de la línea base, especialmente en el caso de la precipitación, la cual tiene una variabilidad muy alta.

Las Tabla 5-3, Tabla 5-4 y Tabla 5-5, muestran los promedios mensuales de las variables meteorológicas en cuestión, tanto para la línea base corregida como los períodos futuros. De éstas, se aprecia un aumento de las temperaturas medias mensuales en todos los meses y una reducción de la humedad relativa en todos los meses. En cuanto a las precipitaciones, para el futuro cercano se presenta un leve aumento de las lluvias en los meses de octubre, diciembre y marzo, y una disminución importante en los meses de mayo y junio. Para el futuro lejano destaca el incremento de las precipitaciones durante el mes de abril.

Tabla 5-3: Comparación precipitaciones mensuales.

Pp [mm/mes]	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Promedio
1975-1999	53.1	137.5	192.7	193.4	99.5	75.3	36.3	21.3	10.5	0.9	1.2	7.0	828.8
2011-2040	44.7	105.4	161.3	191.7	100.7	60.3	53.3	15.7	18.9	2.3	2.6	11.1	768.0
2041-2070	56.0	88.8	83.0	139.4	71.0	41.7	30.8	18.3	13.0	0.5	2.4	10.6	555.4

Tabla 5-4: Comparación temperaturas medias mensuales.

T° [°C]	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Promedio
1975-1999	14.1	11.2	9.0	8.6	9.7	11.9	14.5	17.4	19.6	20.8	20.2	18.0	14.6
2011-2040	14.8	11.3	9.6	8.9	10.4	12.9	14.8	18.2	20.7	22.1	20.8	18.9	15.3
2041-2070	15.0	12.3	9.6	10.0	10.8	13.6	16.0	20.0	21.9	23.2	21.4	21.2	16.3

Tabla 5-5: Comparación humedad relativa media mensual.

HR [%]	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Promedio
1986-1999	68.8	75.0	83.0	79.4	74.8	72.7	66.0	58.0	56.5	54.9	57.0	59.7	67.1
2011-2040	68.3	73.4	78.2	78.7	73.5	70.4	63.2	56.6	52.6	50.2	56.4	58.7	65.0
2041-2070	67.9	73.1	78.0	77.8	71.4	69.5	60.1	55.6	48.7	46.6	53.5	57.2	63.3

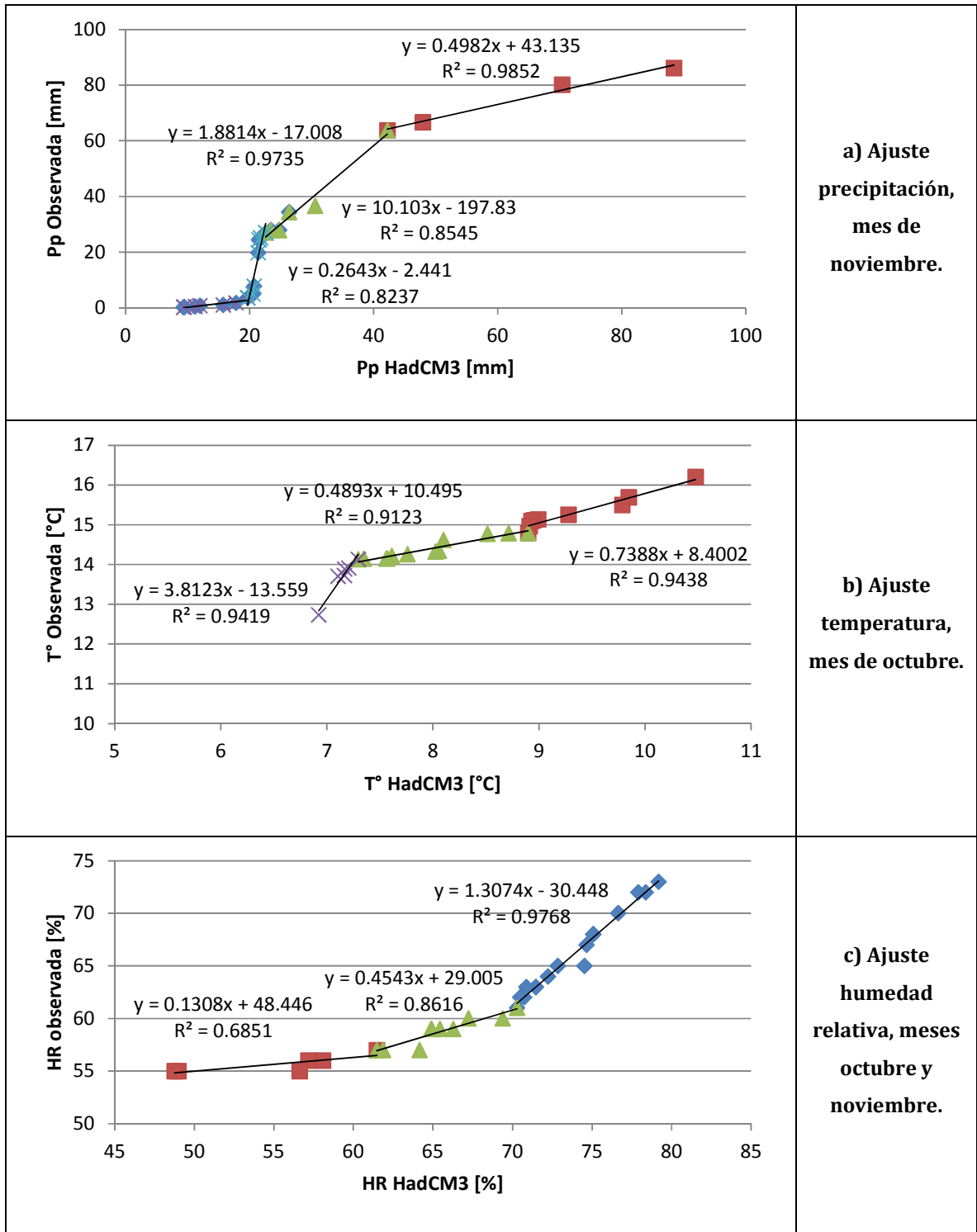


Figura 5-2: Ajuste de las distintas variables meteorológicas.

La Figura 5-3 muestra las tendencias a nivel anual que tienen estas series a futuro, luego de realizar el downscaling de las variables meteorológicas. Se puede apreciar que tanto en el caso de la precipitación (Figura 5-3 a) como de la humedad relativa (Figura 5-3 c), existe una tendencia a la disminución. La temperatura media anual (Figura 5-3 b) en cambio, muestra una importante alza.

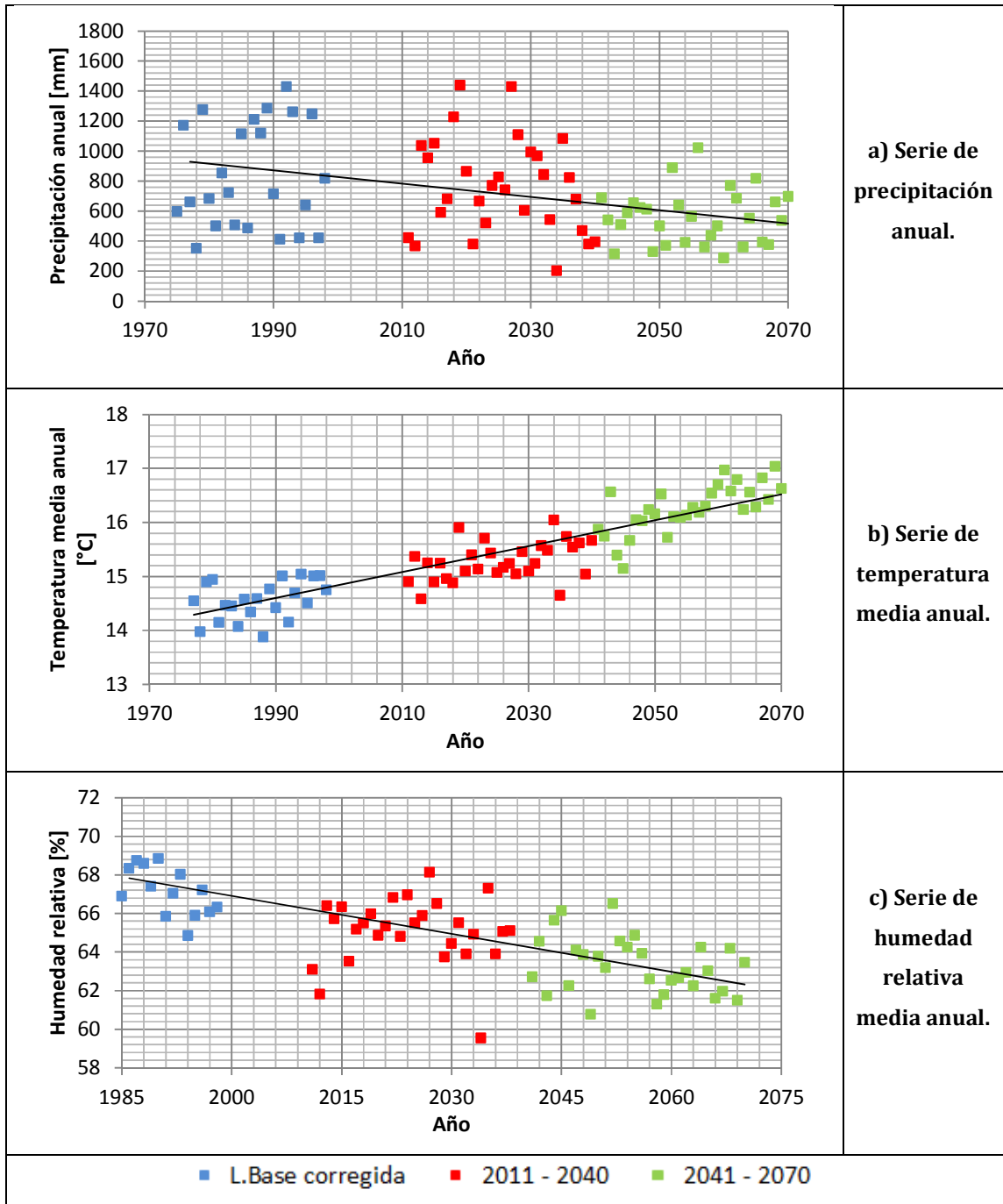


Figura 5-3: Series de tiempo anuales.

5.2. RESULTADOS FUTUROS

Las series de datos futuros de precipitación y temperatura son ingresadas al modelo ya calibrado en WEAP. La serie de humedad relativa se ingresa como promedio mensual. Los valores de los coeficientes de cultivo son corregidos de acuerdo a las expresiones propuestas por la FAO.

5.2.1. COEFICIENTE DE CULTIVO

Para obtener el valor a futuro de los coeficientes de cultivo, es necesario conocer los valores de la humedad relativa mínima y de la velocidad del viento en este período. Como ya se mencionó, el viento no muestra una variación significativa a futuro, por lo cual se consideran válidos los valores actuales.

El cálculo de la humedad relativa mínima, requiere determinar la temperatura máxima y mínima media diaria a nivel mensual. Para esto se considera que la amplitud entre la temperatura máxima media diaria y la media mensual, y la amplitud entre la temperatura mínima media diaria y la media mensual, obtenidas para la línea base, se mantienen invariantes en los períodos futuros. La Tabla 5-6 muestra el valor mensual de la humedad relativa mínima a futuro, proyectándose una disminución de su valor en todos los meses, la cual se explica principalmente por la disminución de la humedad relativa media. La variación de las temperaturas no tiene mayor incidencia en el cálculo de esta variable meteorológica.

Tabla 5-6: Humedad relativa mínima futura [%].

Período	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
2011-2040	48.8	50.9	55.1	55.1	52.4	50.7	45.9	41.4	40.5	40.7	45.5	44.6
2041-2070	48.5	50.9	54.9	54.7	51.0	50.2	43.8	40.9	37.6	37.8	43.1	43.7

Como resultado se obtiene un incremento del valor del k_c para todas las clases de cultivos, explicado por la reducción de la humedad relativa mínima. Este incremento es mayor para los meses de diciembre, enero y febrero y varía según la banda de elevación. Las Figura 5-4, Figura 5-5, Figura 5-6 y Figura 5-7, muestran los valores del k_c para los distintos períodos en análisis, en meses particulares para cada una de las clases, considerando las 4 bandas en donde se desarrolla la agricultura. El valor de los k_c para todos los meses se encuentra en anexo digital.

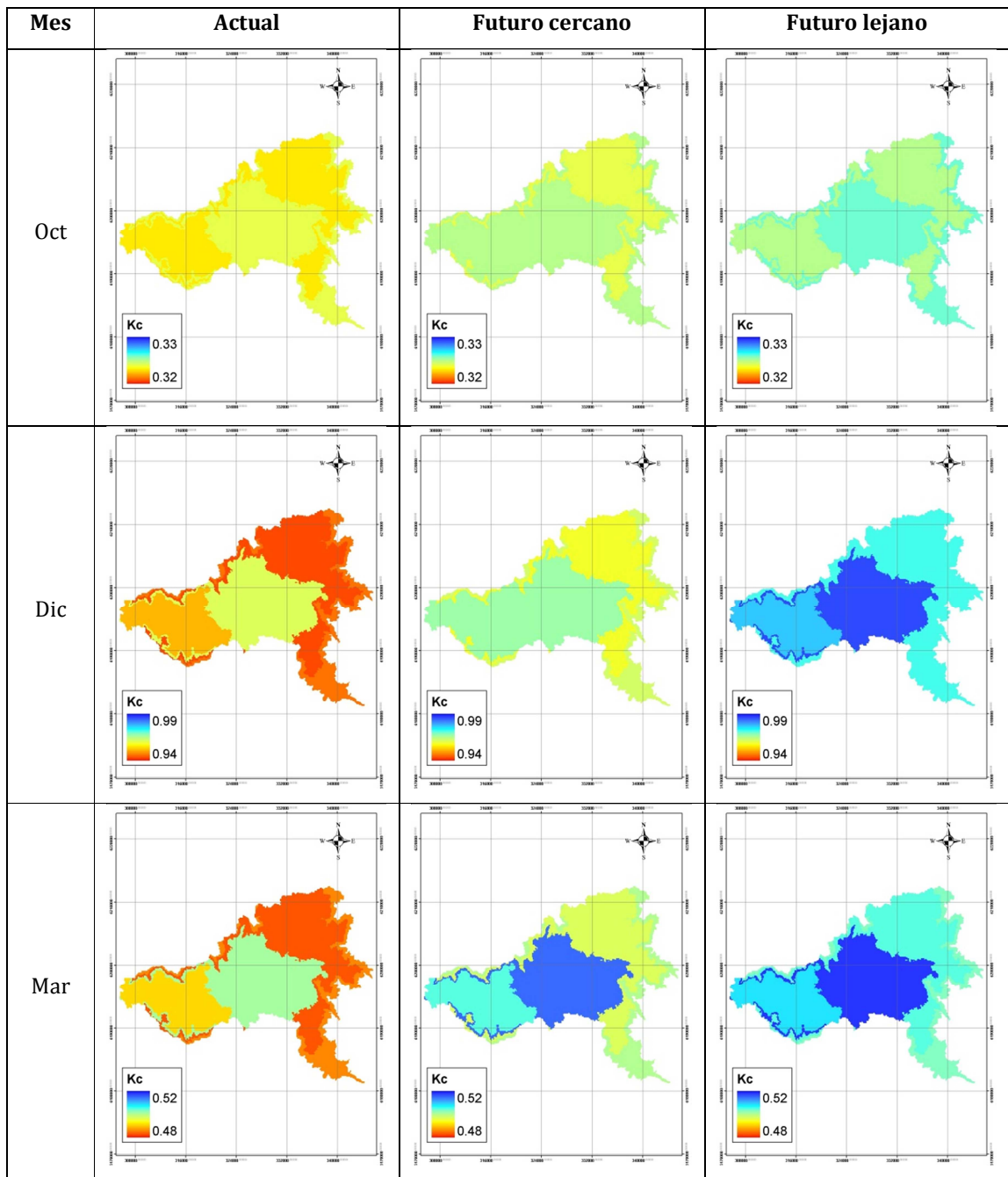


Figura 5-4: Coeficientes de cultivo en condición actual y futura para cultivos anuales.

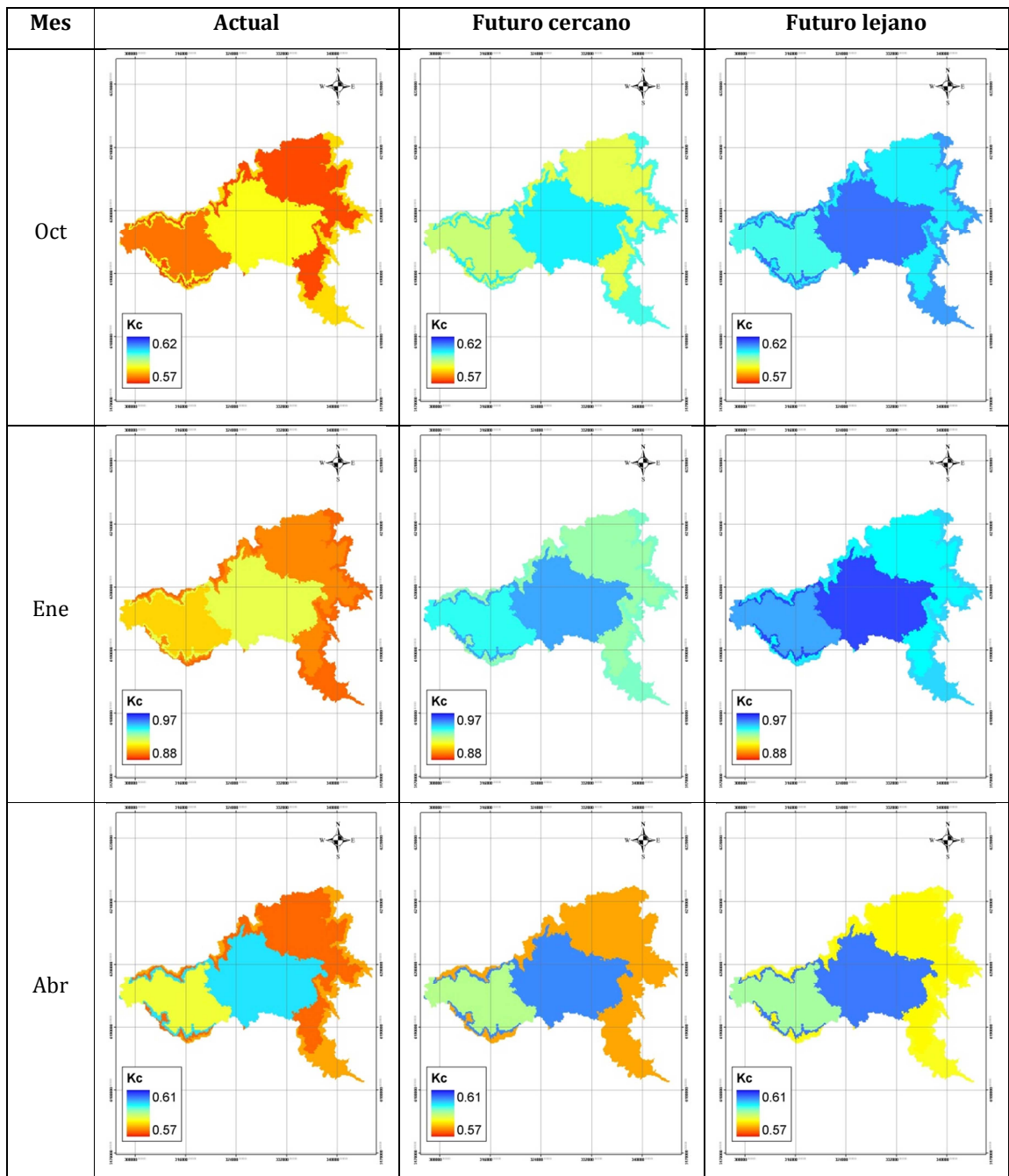


Figura 5-5: Coeficientes de cultivo en condición actual y futura para cultivos permanentes.

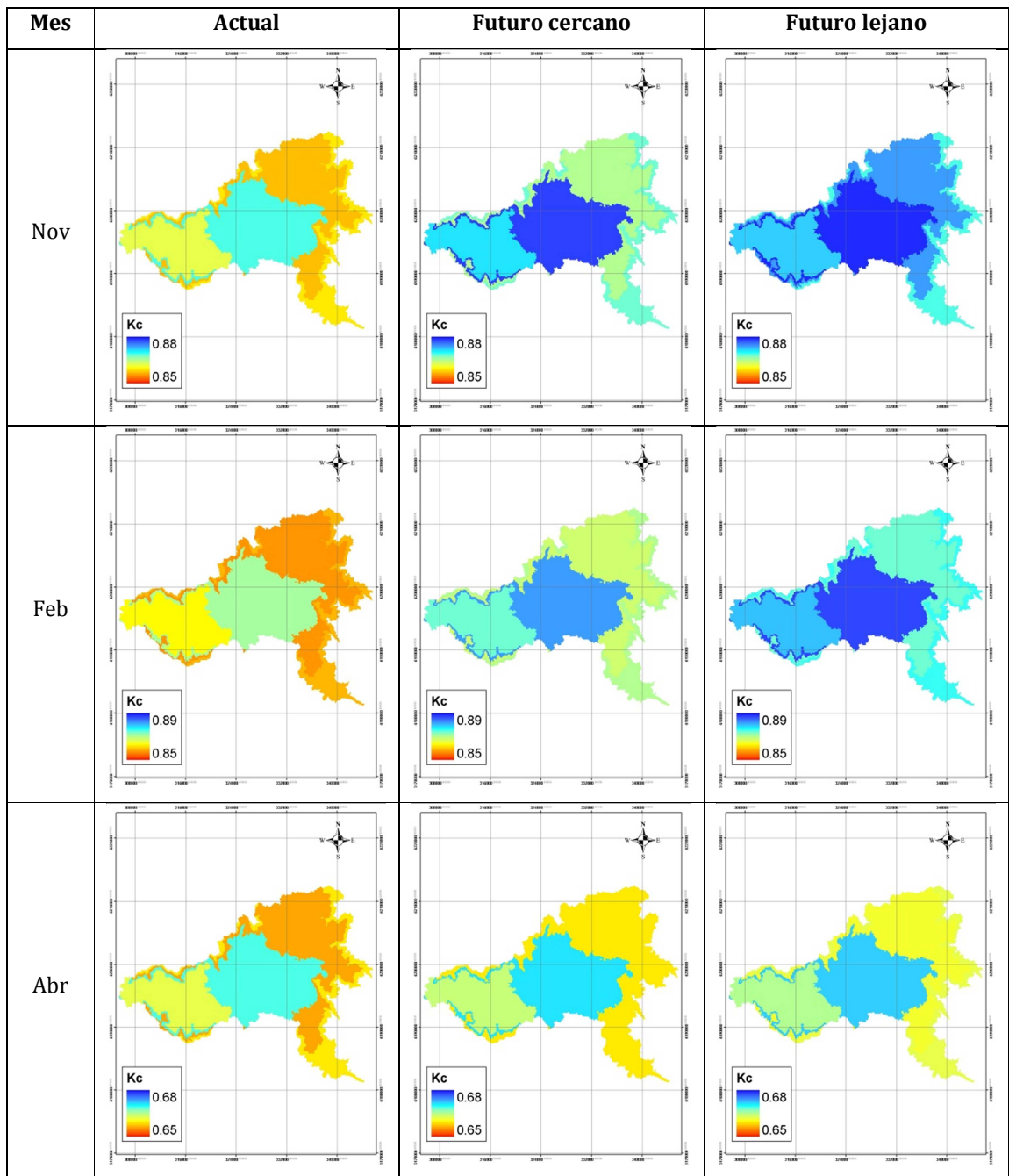


Figura 5-6: Coeficientes de cultivo en condición actual y futura para praderas.

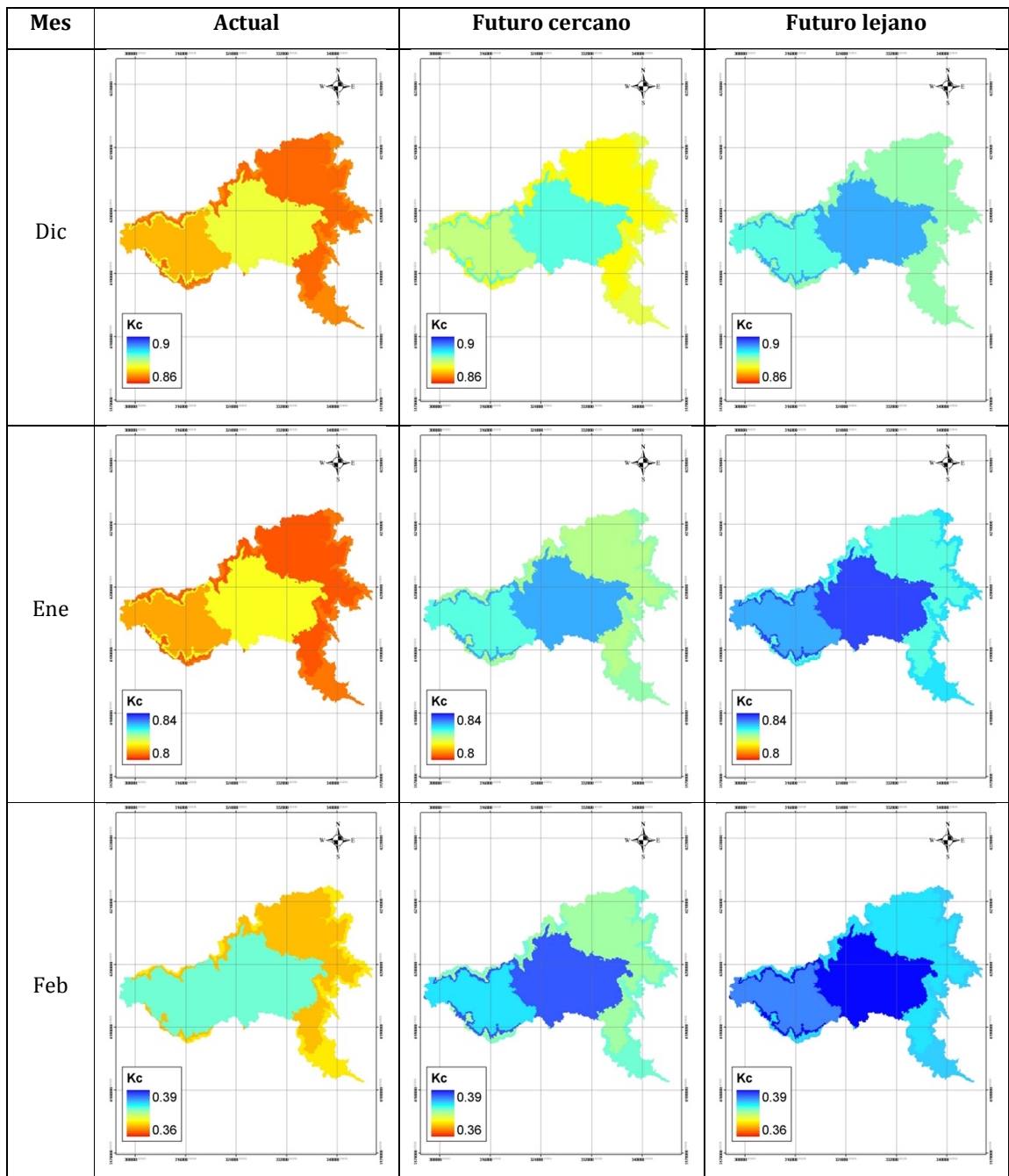


Figura 5-7: Coeficientes de cultivo en condición actual y futura para hortalizas.

5.2.2. DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO

Se determina la serie de caudales futuros a la salida de la estación Claro en Hacienda las Nieves, siendo éstos posteriormente ingresados como input a la cuenca intermedia, para determinar la serie de caudales futuros en Claro en Tunca.

- Claro en Hacienda Las Nieves

Se considera que la curva de entrega adoptada para el embalse Los Cristales se mantiene a futuro. La Figura 5-8 muestra que durante el período 2011-2040 se pronostica una disminución del volumen de agua que sale de la cuenca en un 3%, con respecto a la situación actual, mientras que para el período 2041-2070, la disminución sería de un 13%.

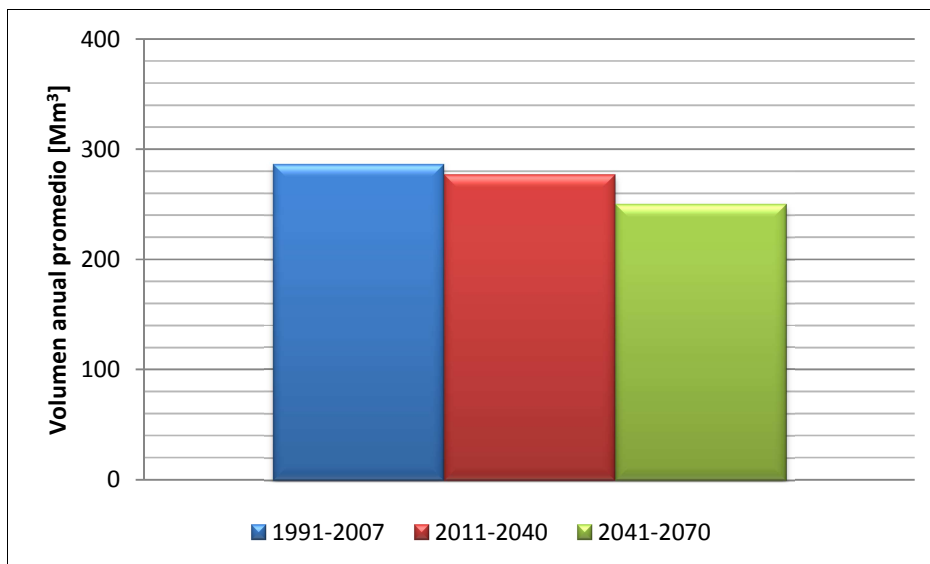


Figura 5-8: Comparación volumen anual promedio actual y futuro en CHLN.

En cuanto a las curvas de duración, la Figura 5-9 muestra una disminución importante de los caudales altos a futuro, mientras que para los caudales con probabilidad de excedencia mayor al 50%, no se distinguen mayores diferencias entre los 3 períodos de análisis.

La Figura 5-10 muestra que en cuanto a caudales medios mensuales promedio, el mayor cambio se presenta en el mes de diciembre, en donde la reducción de los caudales es del orden del 20% para el período 2041-2070. Se aprecia además la aparición de un máximo pluvial durante el mes de julio, que no se observa en la situación actual y cuyo valor se acerca bastante al que se produce en el mes de diciembre, acusando un cambio en el régimen hidrológico de la cuenca. El mes de mayo no sufre mayores variaciones entre el caudal actual y los períodos futuros.

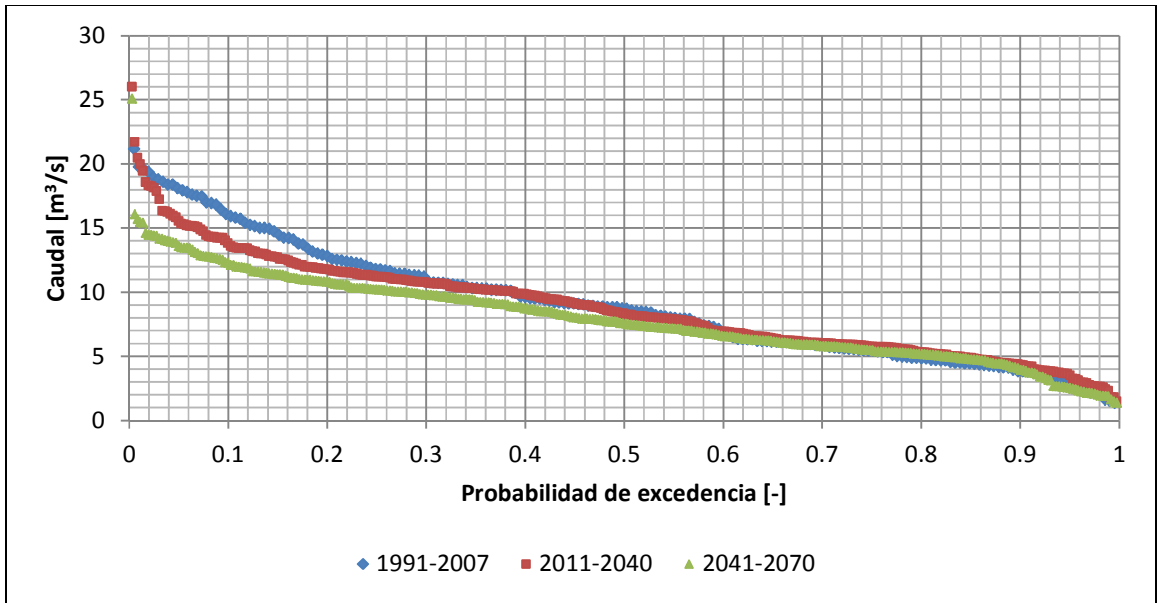


Figura 5-9: Comparación curvas de duración de caudales medios mensuales actuales y futuros en CHLN

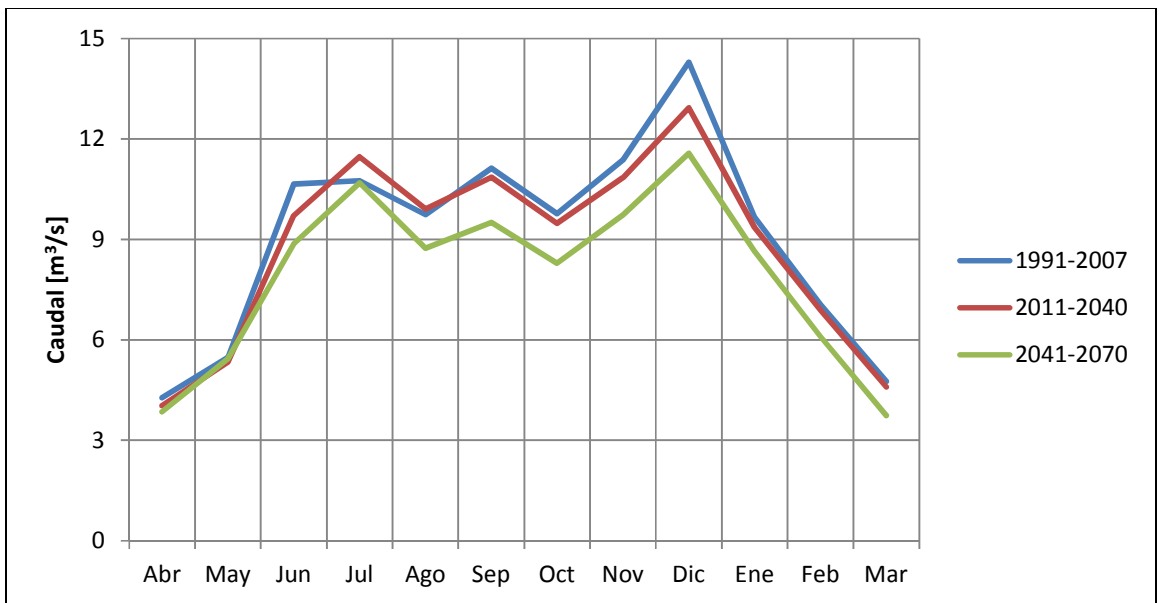


Figura 5-10: Comparación caudales medios mensuales promedio actuales y futuros en CHLN

A modo de resumen, las Tabla 5-7 y Tabla 5-8 muestran el promedio, máximo, mínimo y la desviación estándar de las series futuras. Se incluye también una comparación de estos estadísticos con la situación base.

Tabla 5-7: Resumen estadísticos caudales medios mensuales y medio anual futuro cercano CHLN.

Mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
Promedio [m ³ /s]	4.0	5.3	9.7	11.5	9.9	10.9	9.5	10.8	12.9	9.4	6.9	4.6	8.8
Máximo [m ³ /s]	6.1	8.4	17.3	26.0	18.3	16.1	15.2	18.1	20.0	12.3	10.2	6.9	13.8
Mínimo [m ³ /s]	1.5	3.7	5.3	5.0	4.6	5.0	5.1	5.9	8.1	5.5	4.7	1.8	5.0
Desvest [m ³ /s]	1.1	1.3	3.1	5.4	3.3	3.1	2.7	2.9	3.1	1.7	1.3	1.5	2.1
Variación Prom. [%]	-5.4	-2.6	-8.9	6.7	1.7	-2.4	-2.9	-4.7	-9.5	-3.2	-2.4	-3.5	-3.2
Variación Desvest [%]	-21.9	-43.2	-42.4	16.1	-20.4	-21.9	-21.9	-26.5	-35.5	-38.1	-29.7	-1.4	-26.2

Tabla 5-8: Resumen estadísticos caudales medios mensuales y medio anual futuro lejano CHLN.

Mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
Promedio [m ³ /s]	3.9	5.4	8.9	10.7	8.7	9.5	8.3	9.7	11.6	8.6	6.1	3.7	7.9
Máximo [m ³ /s]	5.7	9.5	15.5	25.1	14.4	14.4	12.8	13.5	16.1	10.3	8.5	5.9	12.0
Mínimo [m ³ /s]	1.4	2.5	3.7	5.2	5.1	5.8	5.2	6.1	7.9	5.8	4.7	1.9	4.9
Desvest [m ³ /s]	1.3	1.7	2.9	3.9	2.5	2.4	2.1	2.2	2.2	1.6	1.0	1.5	1.7
Variación Prom. [%]	-9.7	-0.6	-16.8	-0.5	-10.3	-14.5	-15.1	-14.5	-19.0	-10.5	-13.6	-21.5	-12.6
Variación Desvest [%]	-0.1	-28.8	-45.8	-14.6	-38.0	-40.5	-37.1	-45.4	-53.8	-39.8	-46.4	-5.5	-39.2

- Claro en Tunca

La Figura 5-11 muestra que para el período 2011-2040, se proyecta un leve incremento del 1.5% en el volumen anual promedio de agua que sale de la cuenca, en comparación a la situación actual (1994-2006). Esto puede explicarse observando la Figura 5-3 a), en donde se aprecia que las precipitaciones anuales entre el período base y el comprendido entre el 2011-2040 son similares, por cuanto se espera que el volumen anual promedio evacuado también lo sea. Para el período 2041-2070 en cambio, donde se aprecia una disminución sostenida de las precipitaciones, se pronostica una disminución del 24.7% en el volumen evacuado.

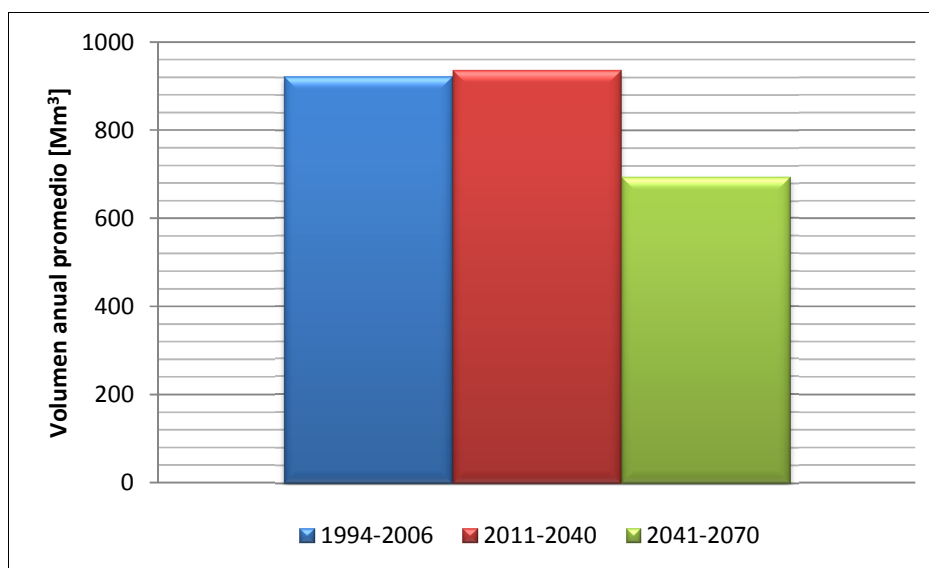


Figura 5-11: Comparación volumen anual promedio actual y futuro en CT.

La Figura 5-12 muestra una alta coincidencia de las curvas de duración entre la situación base y el futuro cercano, salvo en los caudales mayores, donde la situación futura refleja un leve aumento de ellos en comparación a la situación base. Para el futuro lejano, la disminución de los caudales es evidente para cualquier valor de probabilidad de excedencia.

En cuanto a los caudales medios mensuales promedio, la Figura 5-13 muestra que si bien el régimen pluvial de la cuenca se mantiene en situación futura, los caudales máximos se desplazan desde el mes de junio al mes de julio. Durante el período 2011-2040, las variaciones mensuales de los caudales son mínimas, a excepción del mes de julio. Para el período 2041-2070, los meses de junio, agosto y septiembre presentan una importante reducción de los caudales en alrededor de un 35%, mientras que los meses de abril y mayo presentan las menores bajas, con un 15% y 11% respectivamente.

A modo de resumen, las Tabla 5-9 y Tabla 5-10 muestran el promedio, máximo, mínimo y la desviación estándar de las series futuras. Se incluye también una comparación de estos estadísticos con la situación base.

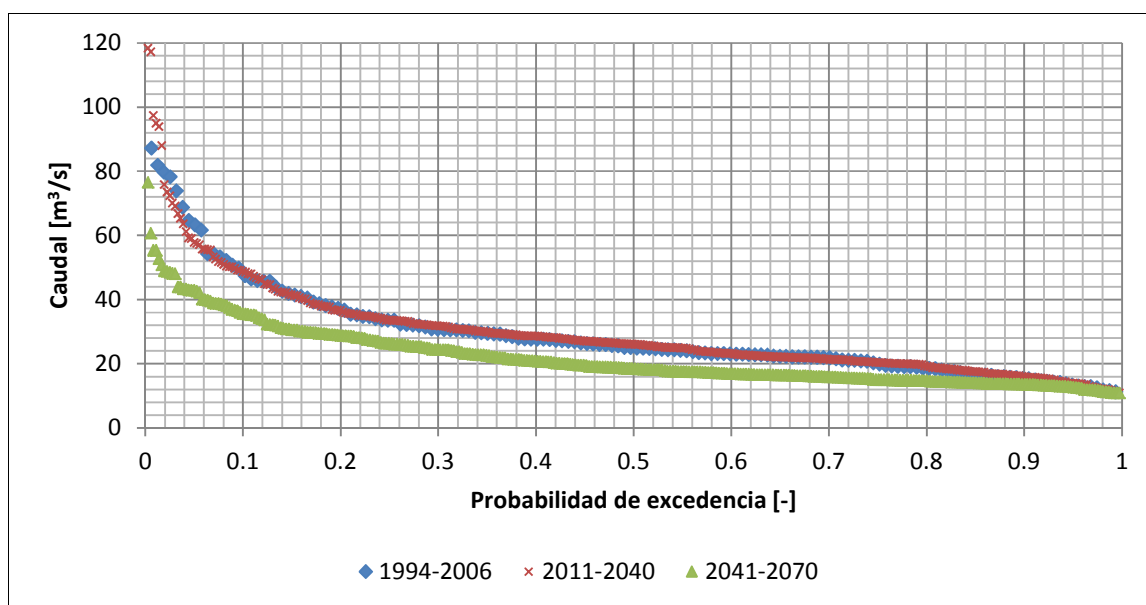


Figura 5-12: Comparación curvas de duración de caudales medios mensuales actuales y futuras en CT.

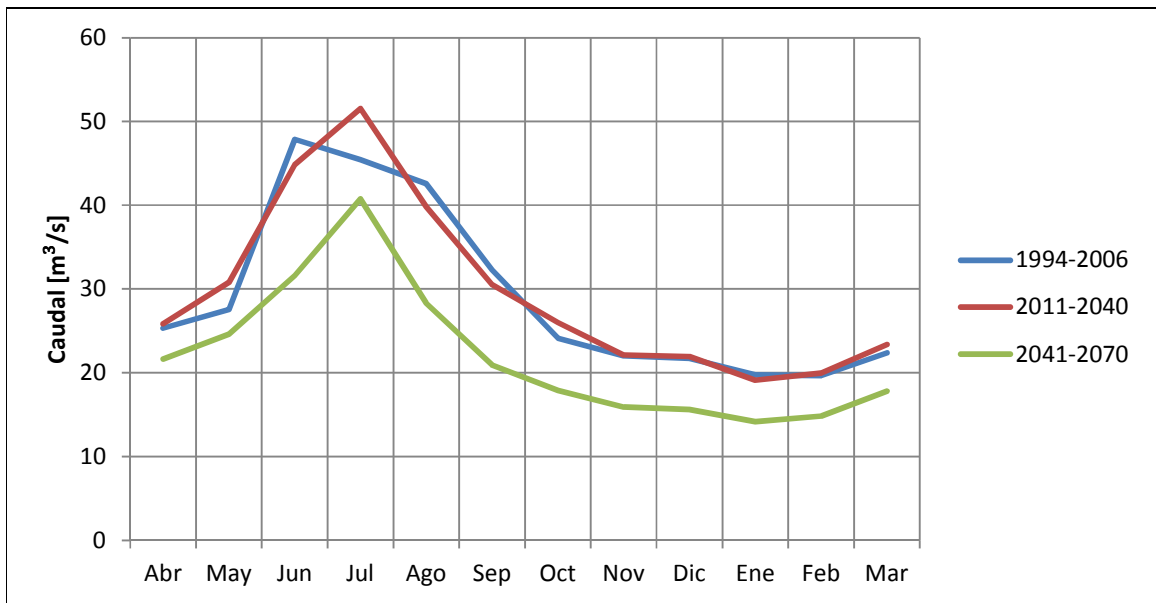


Figura 5-13: Comparación caudales medios mensuales promedio actuales y futuros en CT.

Tabla 5-9: Resumen estadísticos caudales medios mensuales y medio anual futuro cercano CT.

Mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
Promedio [m³/s]	25.8	30.8	44.9	51.5	39.8	30.5	26.0	22.1	21.9	19.1	19.9	23.4	29.7
Máximo [m³/s]	40.6	55.4	117.2	118.4	97.4	55.7	47.9	34.2	32.3	28.3	29.5	35.5	46.7
Mínimo [m³/s]	14.6	15.6	20.8	22.1	20.1	13.8	13.5	11.5	11.1	10.9	11.6	14.6	16.5
Desvest [m³/s]	5.6	11.4	21.1	22.8	15.3	9.9	8.6	6.1	5.8	4.7	4.7	5.5	7.9
Variación Prom. [%]	2.1	11.7	-6.3	13.4	-6.5	-5.5	7.8	0.6	1.1	-3.3	1.3	4.4	1.5
Variación Desvest [%]	-15.3	24.9	-3.2	48.6	-17.0	-11.5	24.3	10.3	-18.6	-25.0	15.4	56.4	14.9

Tabla 5-10: Resumen estadísticos caudales medios mensuales y medio anual futuro lejano CT.

Mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
Promedio [m³/s]	21.6	24.6	31.6	40.8	28.3	20.9	17.9	15.9	15.6	14.2	14.8	17.8	22.0
Máximo [m³/s]	31.8	48.9	60.7	76.5	43.3	31.2	35.5	22.8	22.0	17.7	18.1	21.9	31.0
Mínimo [m³/s]	13.8	14.1	18.7	25.3	17.7	13.2	12.6	11.2	10.9	10.8	11.7	13.6	16.5
Desvest [m³/s]	5.4	7.9	9.9	10.1	6.7	4.9	5.1	3.0	2.8	1.7	1.6	2.4	3.4
Variación Prom. [%]	-14.5	-10.7	-33.9	-10.3	-33.5	-35.2	-25.8	-27.6	-28.1	-28.3	-24.7	-20.5	-24.7
Variación Desvest [%]	-17.6	-13.2	-54.7	-33.9	-64.0	-56.1	-26.5	-46.4	-60.6	-73.0	-60.0	-32.4	-51.4

5.2.3. COBERTURA NIVAL

Para analizar este punto, se consideran las bandas más altas, en donde la acumulación de nieve durante el invierno es significativa. De la Figura 5-14 se aprecia una clara tendencia a la disminución del equivalente en agua promedio en todos los meses en donde existe acumulación. Se entiende por equivalente en agua, el volumen total de agua contenida en una muestra o volumen de nieve determinado.

En el caso de la banda 11, la máxima acumulación pasa desde el mes de agosto al mes julio, producto del incremento de temperaturas proyectado, que anticipa el derretimiento de la nieve. En el caso de la banda 10, para el futuro lejano se tiene que el derretimiento total se produce en octubre, mientras que en el período de calibración ocurría en noviembre, lo cual se justifica tanto por el aumento de las temperaturas como también por la considerable reducción de las precipitaciones durante este período. El equivalente en agua promedio durante el período 2041-2070, se reduce en un 35% para el mes de agosto en la banda 11, y en un 37% para el mes de julio en la banda 10. En cuanto al inicio de la acumulación de nieve, este continúa siendo en el mes de abril para la situación futura.

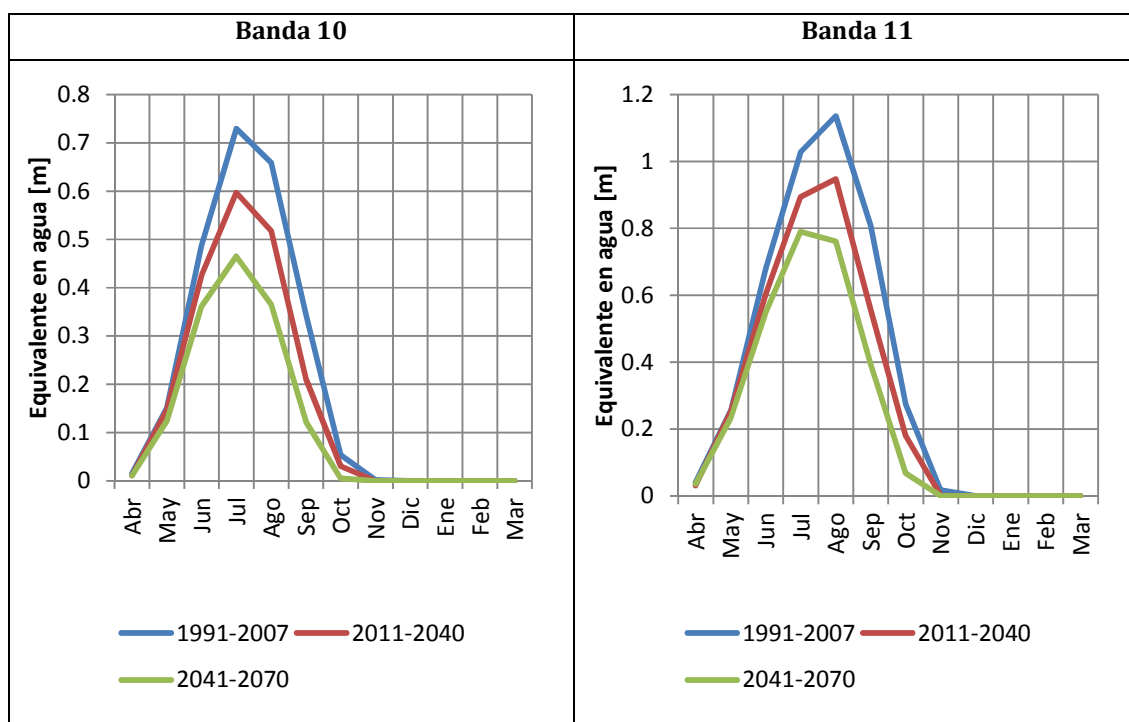


Figura 5-14: Variación mensual del equivalente en agua, bandas 10 y 11.

Si se analizan las curvas de duración asociadas a las mismas bandas anteriores, las cuales se muestran en la Figura 5-15, se tiene que en ambas bandas la reducción de la cobertura nival existe a todo nivel de probabilidad de excedencia. En el futuro cercano, la acumulación máxima de nieve es mayor a la obtenida en el período base para la banda 11, no siendo así para la banda 10, mientras que en el período 2041-2070, la máxima acumulación de equivalente en agua disminuye en un 32% con respecto a la situación base, ya sea en la banda 10 u 11.

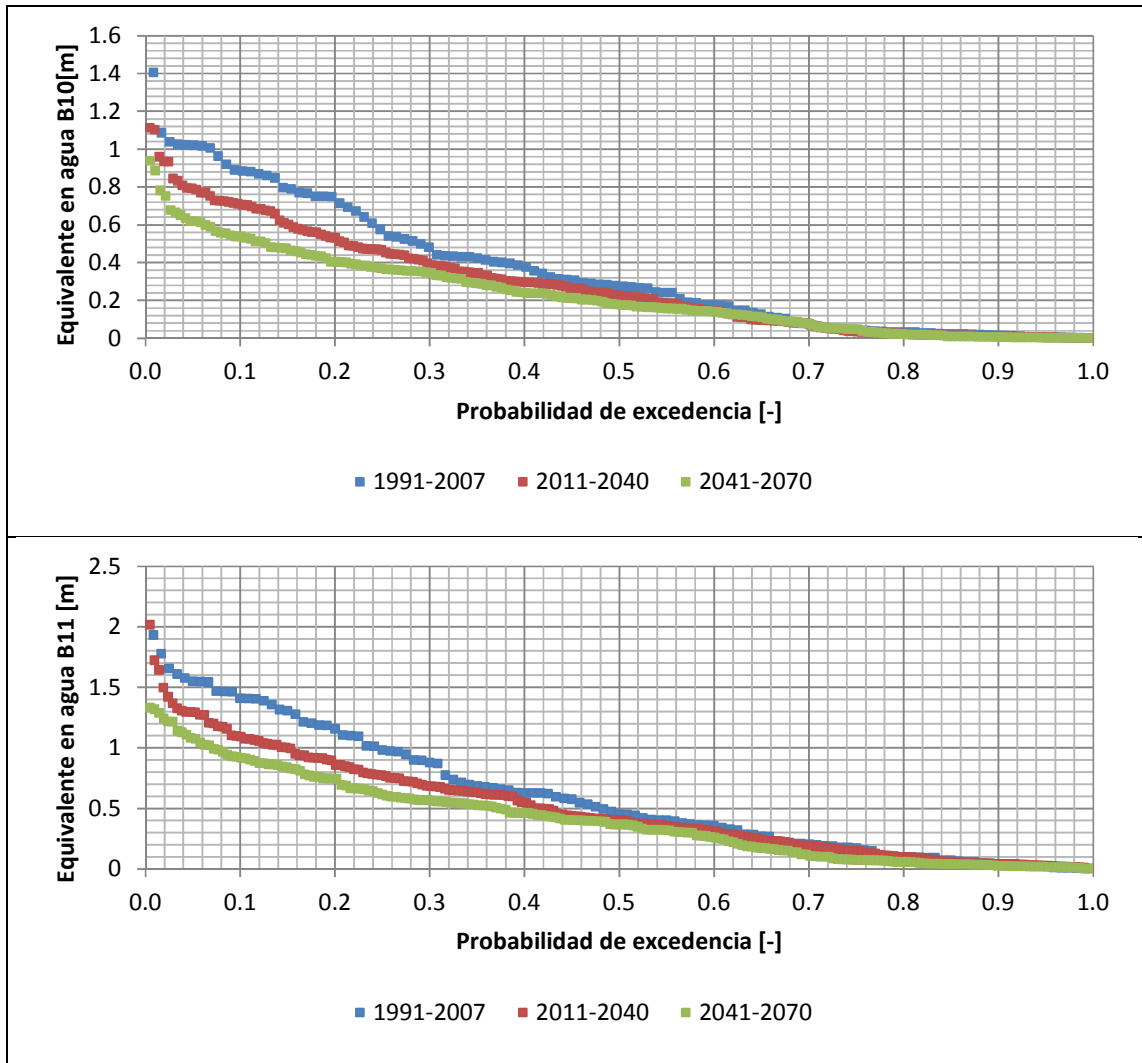


Figura 5-15: Curva de duración del equivalente en agua, bandas 10 y 11.

5.2.4. SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA

Como supuesto para este análisis, se considera que los derechos de agua otorgados en el escenario base se mantienen a futuro. La Figura 5-16 muestra la disponibilidad del recurso hídrico aguas arriba de la extracción, como serie de caudales medios mensuales, para las bandas 1, 2 y 3. Se puede apreciar que mientras en la banda 2 es posible suplir el total de los derechos de agua durante todo el tiempo de la modelación, en las bandas 1 y 3 no es posible disponer del total de agua requerida, hecho que se intensifica durante los escenarios futuros. Para el caso de la banda 4 (no se muestra en la figura), siempre es posible contar con los 0.032 [m³/s] que se requieren.

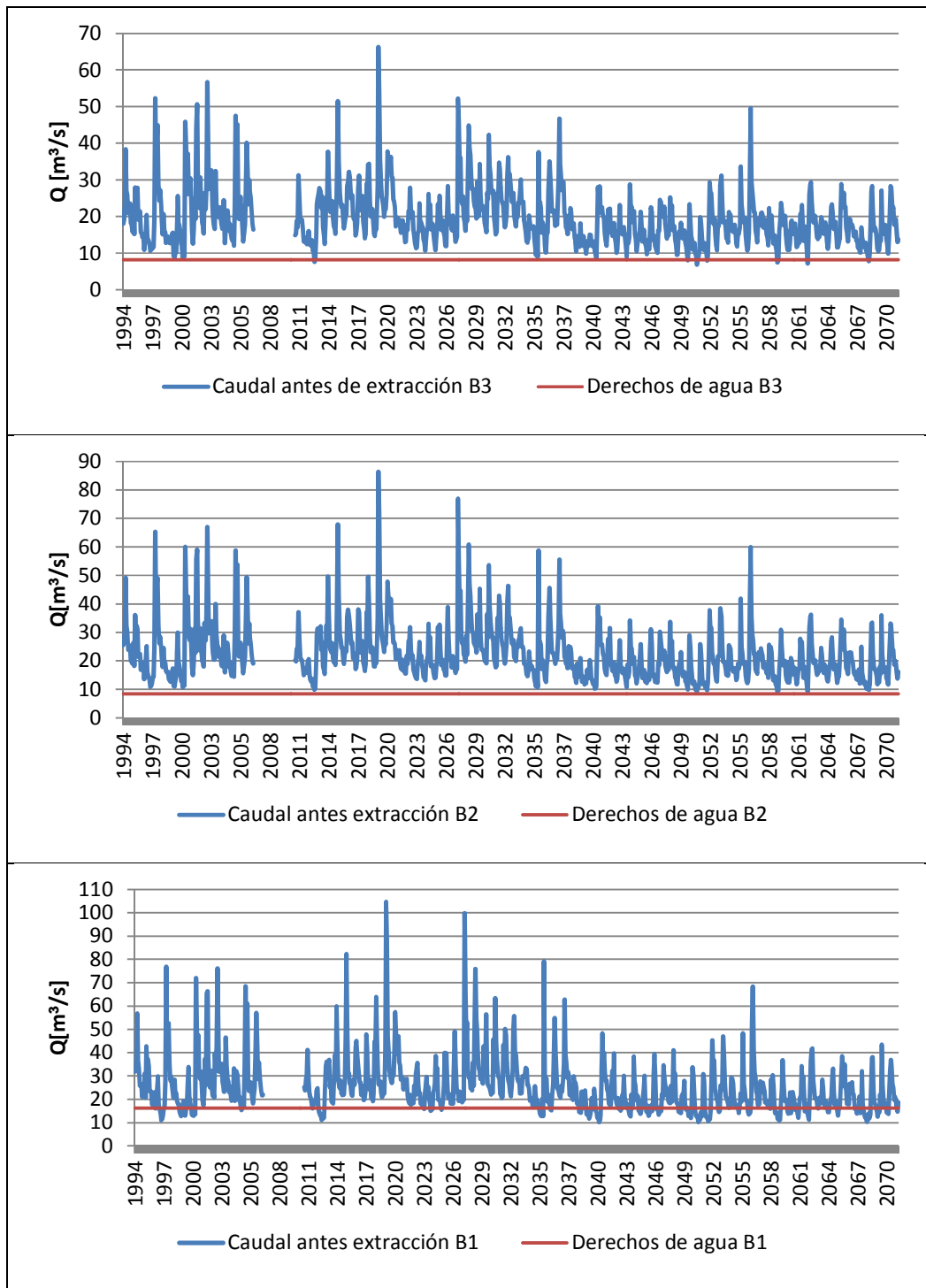


Figura 5-16: Disponibilidad del recurso hídrico aguas arriba de la extracción y derechos de agua otorgados, bandas 1, 2 y 3. Período actual y futuro.

- Estrés hídrico

En términos generales, se habla de estrés hídrico cuando la cantidad de agua demandada es mayor que la ofertada o disponible, durante un período de tiempo determinado.

En este punto, el concepto es utilizado para cuantificar la fracción de tiempo en que no se puede satisfacer cierto porcentaje de los derechos de agua otorgados en la banda 1. El análisis se realiza para esta banda, puesto que es la más crítica en cuanto a la satisfacción de las demandas, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 5-16. Los derechos de agua totales corresponden a $Q_d = 16.23$ [m³/s] y los porcentajes a considerar son un 85% y un 95% de estos derechos, que corresponden a $Q_{85\%} = 0.85 \cdot Q_d = 13.8$ [m³/s] y $Q_{95\%} = 0.95 \cdot Q_d = 15.42$ [m³/s]. Los meses con caudales bajo estos valores, serán considerados meses con estrés en el análisis respectivo.

Los resultados obtenidos se muestran en las Figura 5-17 y Figura 5-18. En éstas se puede apreciar que si bien en la situación actual como en el futuro cercano el porcentaje de meses con estrés es similar, para el futuro lejano se proyecta un aumento de los meses con estrés, independientemente del caudal umbral considerado, siendo de 11.1% para el $Q_{85\%}$ y de 25.3% para el $Q_{95\%}$, lo que significa que en el futuro lejano, un 25.3% de los meses no se podrá disponer del $Q_{95\%}$ asociado a la banda 1.

Los meses con estrés hídrico varían dependiendo del período a considerar. Para el $Q_{85\%}$, en el período actual se tiene un mayor porcentaje de estrés en los meses de diciembre, enero y mayo, mientras que en el futuro cercano y lejano, se tiene mayor estrés en los meses de enero, febrero y marzo. Para el $Q_{95\%}$, en el período actual se tiene mayor porcentaje de estrés en los meses comprendidos entre noviembre y febrero, mientras que en los escenarios futuros los meses más críticos corresponden a enero, febrero y marzo. Se destaca que la suma de los porcentajes de estos 3 meses cubre más del 50% de la torta de estrés para los escenarios futuros, lo cual es un indicador de la dificultad que se tendrá en estos meses para suplir los derechos de agua durante los períodos futuros. Lo anterior traería consecuencias negativas a los cultivos que durante esa fecha se encuentran en pleno proceso de desarrollo, tal y como es el caso de algunos cultivos anuales y hortalizas. Ya que a futuro se proyecta un incremento importante de las temperaturas, es posible adelantar la fecha de plantación de estos cultivos, adaptándose a las nuevas condiciones de esta variable meteorológica, de manera que la cosecha del cultivo también se adelante y se vea lo menos afectada posible por el estrés hídrico proyectado para los meses de verano.

En el futuro lejano, destaca la aparición de estrés hídrico en un pequeño porcentaje durante los meses de junio y septiembre, sólo para el caso de $Q_{95\%}$. Para el $Q_{85\%}$ en cambio, no se proyecta situación de estrés para los meses comprendidos entre junio y septiembre.

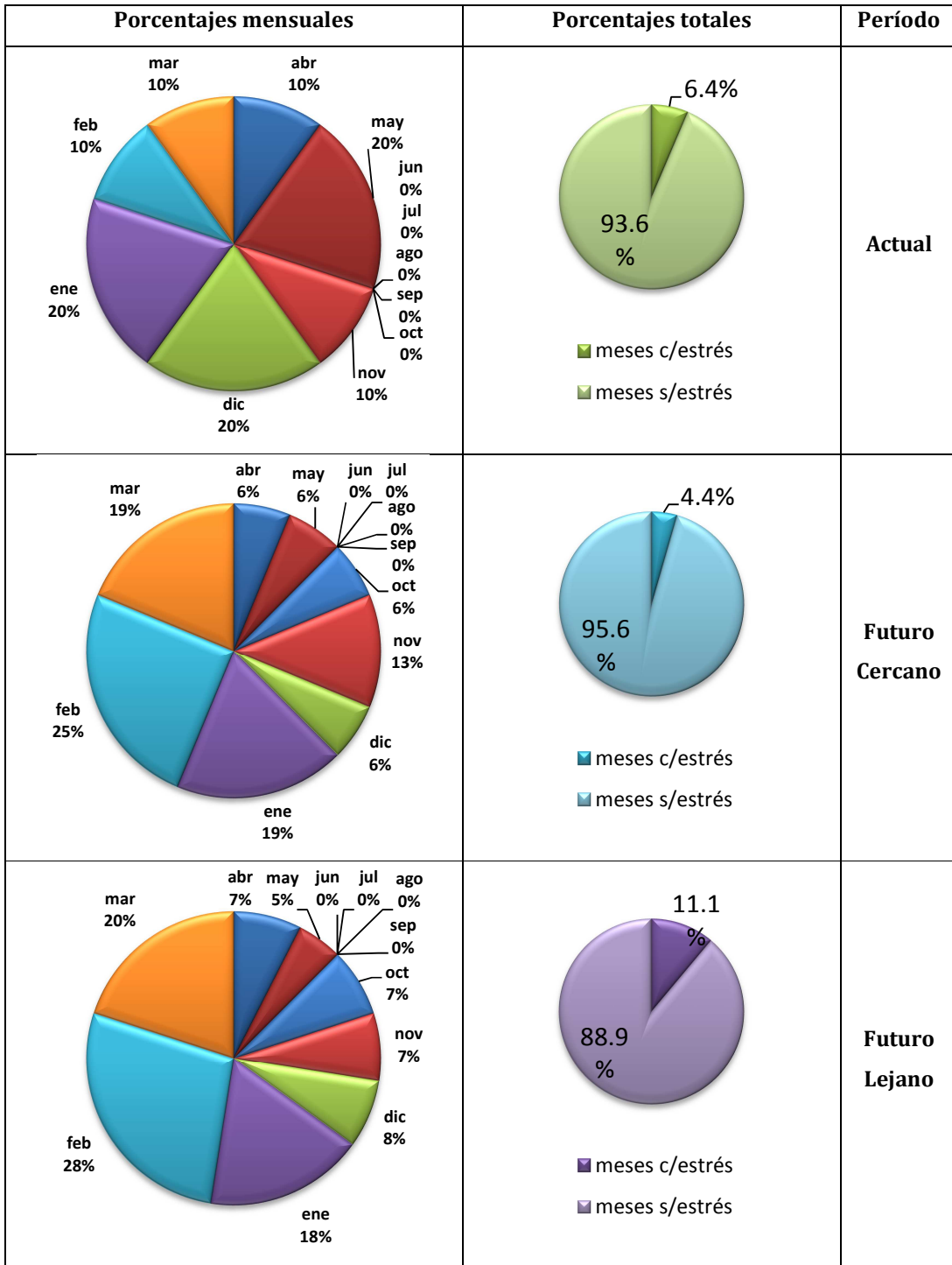


Figura 5-17: Cuadro comparativo estrés hídrico para Q_{85%}, banda 1.

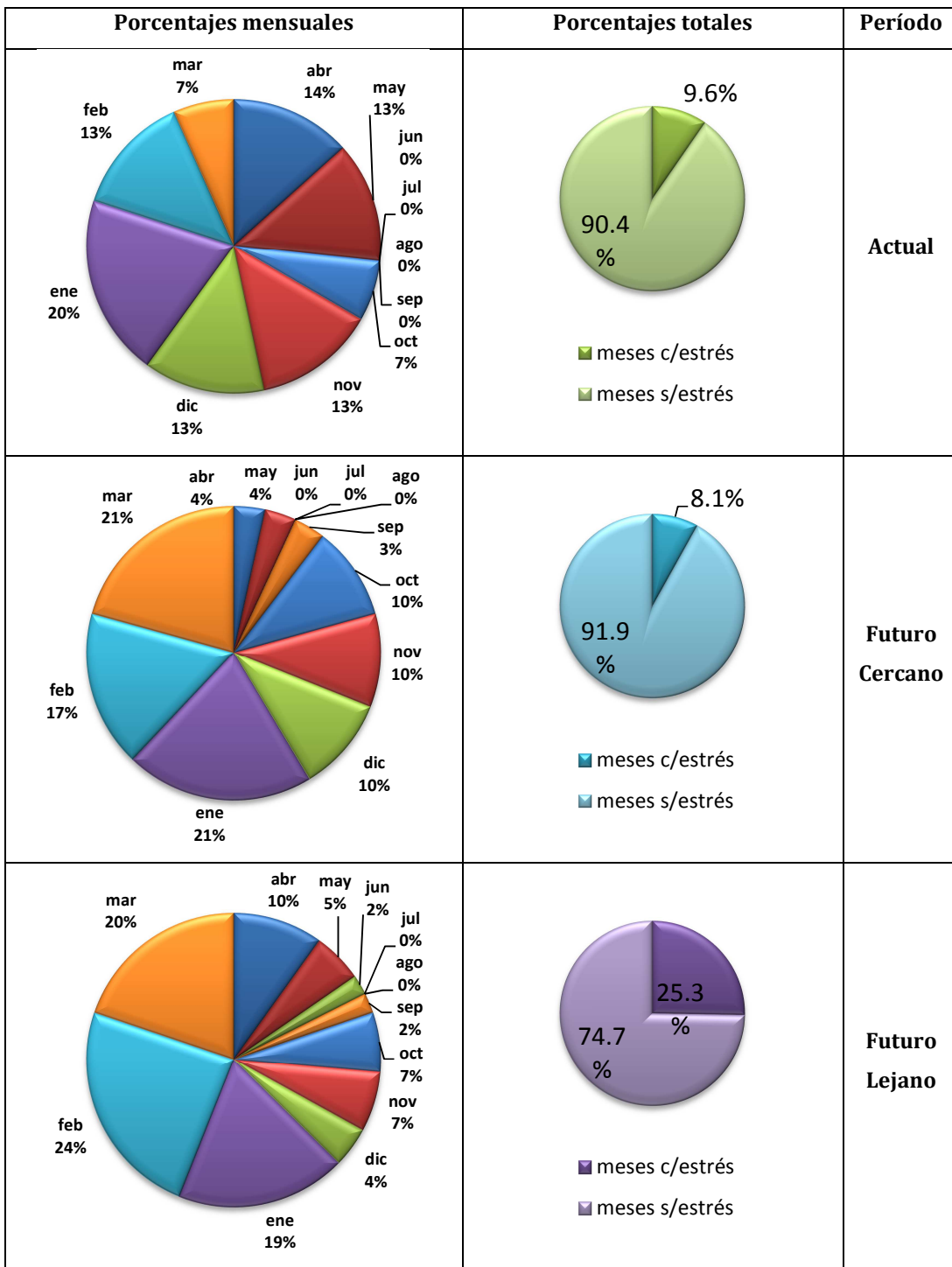


Figura 5-18: Cuadro comparativo estrés hídrico para Q_{95%}, banda 1.

5.2.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La Figura 5-19 muestra la variación porcentual de la evapotranspiración de referencia (ET_0) a futuro para los meses de octubre, enero y abril en las bandas 1, 2, 3 y 4. La tendencia para todos los meses es al alza (en todas las bandas de elevación), pero se acentúa en el mes de enero, en donde la variación porcentual alcanza valores cercanos al 10%.

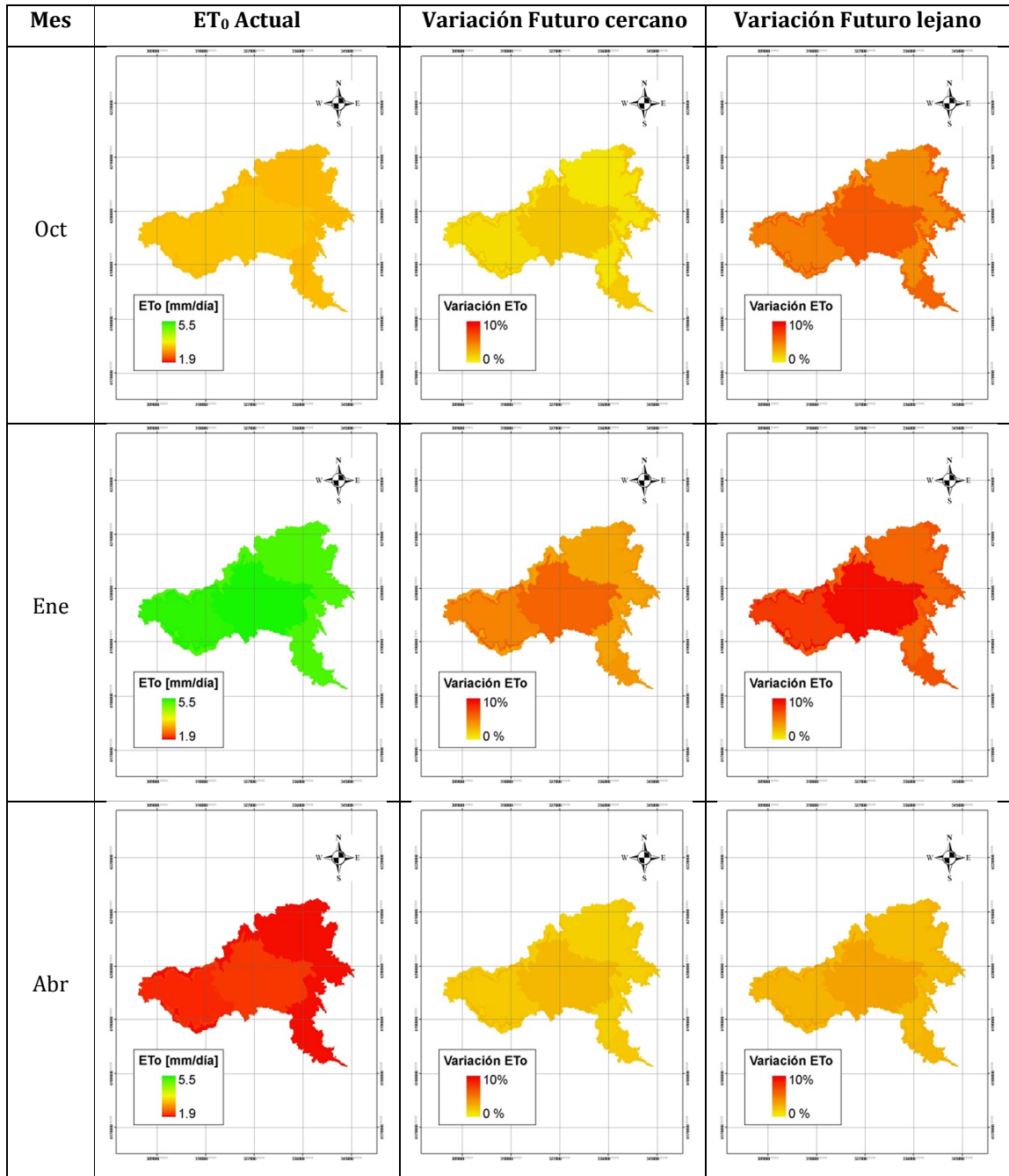


Figura 5-19: Variación porcentual de la evapotranspiración de referencia en situación futura.

La Figura 5-20 muestra la evolución de la evapotranspiración anual, durante los períodos actual y futuros, para la cuenca intermedia. Se puede apreciar una tendencia al alza de la evapotranspiración potencial, producto del incremento del valor de la evapotranspiración de referencia y del coeficiente de cultivo; mientras que la evapotranspiración real calculada por el programa, no muestra una tendencia clara en cuanto a los resultados.

La Tabla 5-11 muestra un cuadro comparativo de la evapotranspiración anual. El aumento de la evapotranspiración potencial en el futuro cercano es de un 4% respecto al período actual, lo cual no tiene mayor repercusión en el factor ET real /ET potencial, puesto que para el futuro cercano se proyecta un leve aumento de la disponibilidad del recurso hídrico. Para el futuro lejano, el aumento de la evapotranspiración potencial es de un 8% respecto al período actual, lo cual se traduce en una disminución de la satisfacción de las demandas evapotranspirativas desde un 27.2% a un 25%. Debe destacarse que el valor de ET real tiene directa relación con el nivel de agua del estanque superficial, siendo ET real igual a ET potencial cuando el estanque superficial está completamente lleno.

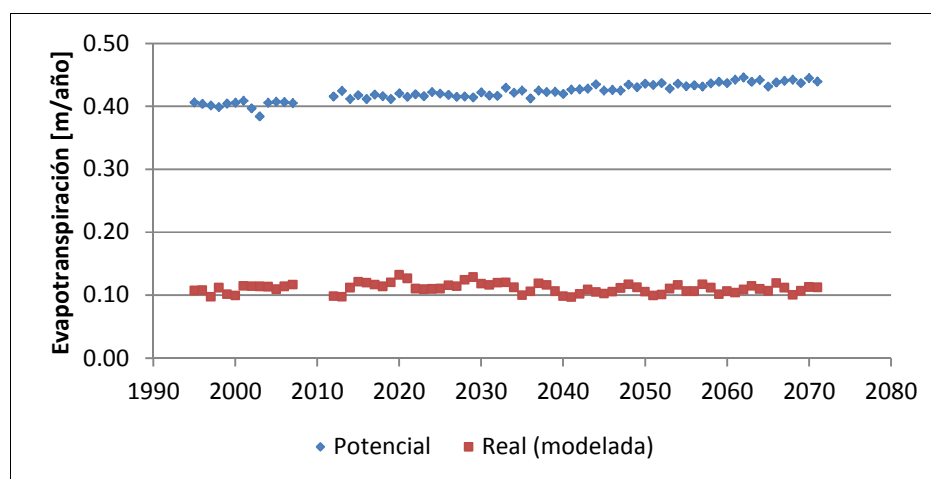


Figura 5-20: Evolución de la evapotranspiración anual, períodos actual y futuros, cuenca intermedia.

Tabla 5-11: Cuadro comparativo de evapotranspiración anual, período actual y futuros, cuenca intermedia.

Período	Actual	Futuro Cercano	Futuro Lejano
ET potencial [m/año]	0.402	0.418	0.435
ET real [m/año]	0.109	0.114	0.109
ET real /ET potencial	27.2%	27.3%	25.0%

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES GENERALES

El proceso de calibración y validación realizado en WEAP logra un buen ajuste, representado por un alto valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe en ambas cuencas estudiadas. La dificultad de ajustar el modelo, tanto a los caudales máximos como mínimos de la serie observada, dan como resultado una calibración que tiende levemente a subestimar de los máximos y a sobrestimar los caudales bajos. Ideal hubiese sido contar con una mayor longitud de registro fluviométrico, de manera que el modelo calibrado considere una cantidad mayor de años lluviosos, normales y secos, como también disponer de un número mayor de estaciones meteorológicas representativas de la zona alta de la cuenca, con el objeto de realizar la menor cantidad posible de supuestos respecto a las variables climáticas de entrada que requiere modelo.

El modelo HadCM3 para el escenario climático A2, pronostica una tendencia a la baja de las precipitaciones, la cual se manifiesta de manera importante a partir del año 2035, y una tendencia al alza de las temperaturas durante todo el período de análisis. Como resultado de esto y la aplicación del modelo calibrado, se obtiene para el período 2011-2040 un incremento del 1.5% en volumen de agua que sale de la cuenca delimitada por la estación Claro en Tunca (el cual puede considerarse despreciable), seguido de una disminución del 24.6% durante el período 2041-2070. Si bien el régimen hidrológico pluvial de esta cuenca se mantiene a futuro, el máximo caudal medio mensual promedio se traslada desde el mes de junio al mes de julio.

De acuerdo a la modelación en WEAP, la reducción de la cobertura nival a futuro en las bandas más altas es inminente, debido fundamentalmente al incremento de las temperaturas medias en los meses de invierno y a la disminución de las precipitaciones durante esta época. Como resultado de esto, la acumulación de nieve es menor y la temporada de deshielo se adelanta, aumentando la cantidad de meses sin cobertura nival. Se destaca que la definición de la temperatura de congelamiento del agua y del derretimiento de nieve, es de suma importancia para lograr una buena calibración para el caso de cuencas altas. Un cambio de 1 grado de cualquiera de estas variables, produce una alteración significativa en los resultados de la calibración.

La satisfacción del total de los derechos de agua a futuro será un tema complejo. De acuerdo con el esquema planteado, las demandas asociadas a las bandas 1 y 3 no son posibles de satisfacer en un 100% del tiempo. En la banda 1, los meses con estrés hídrico para un caudal equivalente al 95% de las demandas de agua asociadas a esta banda, aumentan desde un 9.6% a un 25.3%, siendo enero, febrero y marzo los meses con mayor déficit.

Los valores del coeficiente de cultivo para mediados y finales de temporada se incrementan en situación futura, debido a la disminución de la humedad relativa. Este incremento es mayor (en términos absolutos) para los meses más cálidos y particularmente en los cultivos permanentes, cuya altura promedio del cultivo es mayor. Además existe un incremento de la evapotranspiración de referencia, cuyo resultado también se traduce en un aumento de la evapotranspiración potencial del cultivo. De acuerdo a la modelación realizada en WEAP, la evapotranspiración real promedio correspondería a un 27% de la evapotranspiración potencial para el período actual y el futuro cercano, y a un 25% de la evapotranspiración potencial para el futuro lejano. Este resultado depende directamente del valor que se le asignó a la capacidad del estanque 1, el cual varía entre los 3.6 y 8 metros, valores que se encuentran dentro del orden de magnitud de los utilizados en otras modelaciones, pero que podrían considerarse algo elevados para simular la capacidad de la zona de las raíces.

Por todo lo mencionado anteriormente, se hace indispensable estudiar medidas que enfatizen el uso eficiente de los recursos hídricos, ante un escenario climático en donde la reducción de éstos es considerable, y en una cuenca en donde el agua es el principal insumo para su desarrollo económico.

6.2. RECOMENDACIONES Y COMENTARIOS FINALES

Como una medida para disminuir el valor del coeficiente de cultivo de comienzos de temporada, es necesario considerar una mejora en la tecnología o forma de riego, la cual permita aumentar el tiempo entre intervalos de riego y disminuir el espesor de la lámina de agua aplicada, sin que el cultivo sufra alteraciones en su normal desarrollo. Esta medida es válida puesto que en la primera etapa de crecimiento, el efecto de la evaporación desde el suelo es mucho más importante que el de la transpiración del cultivo.

En cuanto a la disponibilidad futura del recurso hídrico, si bien no se identifica un cambio en el régimen hidrológico para Claro en Tunca, es necesario destacar que el incremento de las temperaturas medias mensuales podría incentivar el adelantamiento de la fecha de plantación de los cultivos anuales y hortalizas, en un período que va entre 2 y 3 semanas, lo cual sería bueno desde el punto de vista de atenuar el incremento proyectado de los k_c para mediados y finales de temporada de los cultivos.

La utilización del modelo HadCM3 para la aplicación a escenarios futuros, tiene la ventaja de poder realizar un análisis más a corto plazo que lo que ocurre con el modelo PRECIS. Sin embargo, la grilla de HadCM3 es mucho más espaciada que la de PRECIS, por lo que la mala o buena corrección de los datos que resulta con uno u otro modelo es un tema que debiera ser analizado. Otro tema relevante de estudiar es como cambia la corrección de los datos, si es que se considera sólo el punto más

cercano a la estación meteorológica, en vez de proponer una expresión para trasladar la información desde los puntos HadCM3 hasta la estación de medición; como también la utilización de una tendencia única en vez de curvas lineales por tramos, a la hora de realizar la equivalencia entre datos HadCM3 y datos observados.

En conclusión, por medio de la realización de un modelo simplificado del funcionamiento de una cuenca agrícola de la VI región de Chile, y aplicado a un escenario climático futuro específico, es posible aportar con nuevos antecedentes sobre la disponibilidad futura del recurso hídrico en la región, así como también analizar de manera general la afectación en las demandas evapotranspirativas de los cultivos que se tiene frente a este escenario climático.

REFERENCIAS

AGRIMED (2008). Impactos Productivos en el Sector Silvoagropecuario de Chile frente a Escenarios de Cambio Climático. Centro de Agricultura y Medio Ambiente.

Carter T.R., Hulme M., Lal M. (1999). Guidelines on the use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, IPCC.

Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.

CNR (1997). Estudio para mejorar la gestión regional y su coordinación con las organizaciones privadas de riego en el ámbito de la cuenca hidrográfica del río Rapel, VI Región. Comisión Nacional de Riego.

CNR (2006). Situación Actual- Diciembre 2005 de las organizaciones de Regantes en la VI Región. Comisión Nacional de Riego.

DGF (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe Final. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente.

DGF (2009). Modelación del recurso solar y eólico en el norte de Chile. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Comisión Nacional de Energía. Consultada en Octubre, 2010. <http://condor.dgf.uchile.cl>.

DOH (1999). Construcción embalse Callihue del valle del Nilahue y sus obras complementarias. Volumen 4/6. Dirección de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas.

DMC (2010). Climas de Chile, región del Libertador Bernardo O'Higgins. Dirección Meteorológica de Chile. Dirección General de Aeronáutica Civil. Consultada en octubre, 2010. http://www.meteochile.cl/climas/climas_sexta_region.html.

D'Arcangeli, V (1997). Variación temporal de algunos factores meteorológicos en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Espíldora B., Brown E., Cabrera G. e Isensee P. (1975). Elementos de hidrología. Centro de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

FAO (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje N°56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación.

Figueroa, R (2008). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca. Implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

INDAP (1997). Encuesta Agronómica y de agua de Rengo. Primera sección del río Claro de Rengo. Instituto de desarrollo agropecuario.

IPCC (2007). Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza.

Mardones, G (2009). Implementación y uso del modelo WEAP en cuencas nivales de la IV región para el análisis del cambio climático. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Mena, D (2009). Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando el modelo WEAP. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Sandoval, J (2003). El Riego en Chile. Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Sieber, J., Purkey, D. (2007). User Guide for WEAP21. Stockholm Environment Institute, U.S. Center, Estados Unidos.

WEAP (2010). ¡Bienvenidos a WEAP!. Water Evaluation and Planning System. Consultada en agosto 2010. <http://www.weap21.org/indexesp.asp>.