



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

**MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL USO EFICIENTE
DEL RECURSO HÍDRICO. ANÁLISIS DE CASOS EN UNA CUENCA AGRÍCOLA DE
LA VI REGIÓN.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CLAUDIO ABRAHAM CORTÉS GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RICARDO GONZÁLEZ VALENZUELA

TANIA FERNÁNDEZ RUBILAR

SANTIAGO DE CHILE

2013

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil.
POR: Claudio Abraham Cortes González
FECHA: 01/09/2013
PROFESOR GUÍA: Ximena Vargas Mesa.

MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL USO EFICIENTE DEL RECURSO HÍDRICO. ANÁLISIS DE CASOS EN UNA CUENCA AGRÍCOLA DE LA VI REGIÓN.

El trabajo de título a realizar consiste en la confección de propuestas para la cuenca Río Claro en Tunca en la VI Región, con el fin de adaptarla a un escenario de rápido crecimiento económico regional donde existe un balance entre el uso de fuentes de energía fósil y no fósil, este escenario se denomina A1B. En esta cuenca la principal actividad económica es la agricultura donde el 42% de sus 943 Km² están destinados a variados cultivos. Estos cultivos se verán afectados por los cambios en la disponibilidad de agua en el siglo XXI debido al cambio climático.

El objetivo general es estudiar posibles adaptaciones que se deben realizar en la cuenca agrícola del Río Claro en Tunca, para enfrentar las variaciones en la disponibilidad del recurso debido al cambio climático. La presentación de estas medidas de adaptación tiene como finalidad utilizar eficientemente los recursos hídricos disponibles con las nuevas condiciones climáticas. Para ello debemos recopilar antecedentes de la cuenca para lograr un modelo que represente la hidrología de la cuenca Río Claro en Tunca y obtener la disponibilidad futura del recurso hídrico, a partir de la cual se estudiarán las adaptaciones necesarias en la cuenca.

Se pretende obtener medidas concretas orientadas a la adaptación de los procesos agrícolas, tanto en el ámbito de la eficiencia en el uso futuro del recurso hídrico como en el tipo de cultivos, de tal forma de maximizar los beneficios de los habitantes de la cuenca Río Claro en Tunca en la VI Región.

Los resultados indican que en el periodo 2015-2074 no existiría una variación significativa en lo que respecta al caudal anual disponible en la estación Río Claro en Tunca, un aspecto importante es que los caudales invernales aumentarían y los estivales disminuirían, esto está correlacionado directamente con el aumento de las temperaturas y el consecuente descenso en la acumulación de nieve. El aumento de temperatura sería de .05 [°C/año] y la acumulación de nieve bajaría en un 40% a fines del periodo 2015-2074.

Ante el cambio climático que afectará la cuenca y la creciente demanda de recursos hídricos para cultivos de la zona, las medidas de adaptación más útiles son: la diversificación de los cultivos aumentando las áreas dedicadas a paltos, manzanos, trigos, etc. y la ampliación del embalse Los Cristales peraltando su muro en 10 metros aumentando su capacidad en un 44%, de esta manera el embalse abastecería la cuenca en la temporada seca con una mayor cobertura.

Tabla de Contenido.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivos Generales.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Cambio Climático.....	4
2.2 Agricultura.....	6
2.3 Recurso hídrico.....	7
2.4 Medidas de Adaptación.....	8
2.5 Modelación de Recursos Hídricos.....	10
2.5.1 Generalidades.....	10
2.5.2 Modelo Hidrológico.....	11
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	17
3.1 Introducción.....	17
3.2 Ubicación y Delimitación de la Cuenca	17
3.3 Antecedentes Cuenca Del Río Claro en Tunca.....	19
3.3.1 Clima.....	19
3.3.2 Hidrografía.....	20
3.3.3 Aguas Subterráneas.....	22
3.3.4 Uso de Suelo y Evapotranspiración.....	22
3.3.5 Economía.....	24
3.3.6 División Administrativa.....	25
3.4 Embalse Los Cristales.....	25
3.5 Estaciones Disponibles.....	27
3.6 Estadística Meteorológica.....	28
3.6.1 Precipitación.....	28
3.6.2 Temperatura.....	30
4. CULTIVOS AGRÍCOLAS.....	34
4.1 Tipos de Cultivos.....	34
4.2 Coeficiente de Cultivos.....	36
4.3 Eficiencia de los métodos de riego de los cultivos.....	37
4.4 Demanda de los Cultivos.....	38
4.5 Análisis económico de los Cultivos.....	38
4.5.1 Maíz.....	39
4.5.2 Papas.....	39

4.5.3	Tomates.....	40
4.5.4	Cebolla.....	41
4.5.5	Manzana.....	41
4.5.6	Palto.....	42
4.5.7	Vides.....	43
4.5.8	Almendro.....	44
4.6	Perspectivas de desarrollo de los cultivos.....	44
5.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO WEAP.....	46
5.1	Distribución de parámetros meteorológicos.....	47
5.1.1	Temperatura.....	47
5.1.2	Precipitación.....	48
5.1.3	Humedad Relativa.....	49
5.1.4	Viento.....	49
5.2	Embalse Los Cristales.....	49
5.3	Demanda Agrícola.....	51
5.4	Calibración y Validación.....	53
5.4.1	Cuenca Río Claro en Hacienda las Nieves.....	54
5.4.2	Cuenca Río Claro en Tunca.....	60
5.5	Comentarios sobre Calibración y Validación.....	65
6.	ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL.....	66
6.1	Escalamiento Espacial.....	66
6.2	Escalamiento Temporal.....	67
6.2.1	Precipitaciones.....	67
6.2.2	Temperaturas.....	70
6.3	Consideraciones del Escalamiento del modelo PRECIS-DGF.....	73
6.3.1	Precipitaciones.....	73
6.3.2	Temperaturas.....	73
7.	ESCENARIOS FUTUROS.....	74
7.1	Escenario 1: Situación actual sin cambios.....	75
7.1.1	Disponibilidad del recurso hídrico.....	76
7.1.2	Embalse Los Cristales.....	76
7.1.3	Altura de nieve en las bandas cabeceras.....	77
7.1.4	Satisfacción de la demanda.....	78
7.1.5	Cambios en la demanda de los cultivos.....	79
7.2	Escenario 2: Aumento del área de cultivos en un 100%.....	80
7.2.1	Disponibilidad del recurso hídrico.....	80
7.2.2	Embalse Los Cristales.....	80
7.2.3	Satisfacción de la demanda.....	81
7.2.4	Cambios en la demanda de los cultivos.....	82
7.3	Escenario 3: Aumento en la capacidad del embalse.....	83
7.3.1	Disponibilidad del recurso hídrico.....	83
7.3.2	Embalse Los Cristales.....	84
7.3.3	Satisfacción de la demanda.....	85

7.3.4	Cambios en la demanda de los cultivos.....	85
7.4	Escenario 4: Cambios en los tipos de cultivos.....	86
7.4.1	Disponibilidad del recurso hídrico.	86
7.4.2	Embalse Los Cristales.....	87
7.4.3	Satisfacción de la demanda.	88
7.4.4	Cambios en la demanda de los cultivos.	89
7.5	Análisis de escenarios.....	89
8.	CONCLUSIONES.	91
8.1	Calibración y validación.....	91
8.2	Escalamiento de estadística PRECIS-DGF.....	91
8.3	Perspectivas de la agricultura.	92
8.4	Disponibilidad del recurso hídrico.....	92
8.5	Medidas de Adaptaciones Recomendadas.	93
9.	REFERENCIAS.	95

Índice de figuras.

Figura 2-1: Escenario de Emisiones (IPCC, 2000).....	5
Figura 2-2: Representación modelo de humedad del suelo.....	12
Figura 3-1: Estación fluviométrica Río Claro en Tunca.....	18
Figura 3-2: Ubicación General de la cuenca Río Claro en Tunca.....	18
Figura 3-3: Delimitación de la cuenca Río Claro en Tunca.....	19
Figura 3-4: Hidrografía de la cuenca Río Claro en Tunca.....	21
Figura 3-5: Caudal medio mensual estación Río Claro en Tunca.....	21
Figura 3-6: Acuíferos de la cuenca Río Claro en Tunca.....	22
Figura 3-7: Uso de suelo cuenca Río Claro en Tunca.....	23
Figura 3-8: Uso de suelo VI Región, DNP 2007.....	24
Figura 3-9: División comunal cuenca Río Claro en Tunca.....	25
Figura 3-10: Curva de embalse Los Cristales.....	26
Figura 3-11: Evaporación Embalse Los Cristales.....	26
Figura 3-12: Hidrografía cuenca Río Claro en Tunca.....	27
Figura 4-1: Cultivos cuenca Río Claro en Tunca.....	34
Figura 4-2: Cultivos anuales.....	35
Figura 4-3: Cultivos permanente.....	35
Figura 4-4: Cultivos hortalizas.....	35
Figura 4-5: Superficie agrícola.....	36
Figura 4-6: Eficiencia de los métodos de riego de los cultivos.....	38
Figura 5-1: División en bandas de elevación cuenca Río Claro en Tunca.....	47
Figura 5-2: Caracterización zona del embalse Los Cristales en WEAP.....	50
Figura 5-3: Almacenamiento en embalse Los Cristales periodo de calibración y validación.	50
Figura 5-4: Caudales de entrega del embalse en el periodo de calibración y validación.	51
Figura 5-5: Sitios de demanda Agrícola.....	52

Figura 5-6:Provisión entregada en cada banda en el periodo de calibración y validación.	53
Figura 5-7:Demanda de los cultivos en cada banda en el periodo de calibración y validación.	53
Figura 5-8:Esquema Cuenca Río Claro en Hacienda las Nieves.	55
Figura 5-9:Correlación entre caudales simulados versus caudales observados, periodo de calibración.	56
Figura 5-10:Correlación entre caudales simulados versus caudales observados, periodo de validación.	57
Figura 5-11:Calibración cuenca Río Claro en Hacienda Las Nieves.	58
Figura 5-12:Validación Cuenca Río Claro en Hacienda Las Nieves.	59
Figura 5-13:Esquema cuenca Río Claro en Tunca.	60
Figura 5-14:Correlación entre caudales modelados versus estación Río Claro en Tunca, periodo de calibración.	61
Figura 5-15:Correlación entre caudales modelados versus estación Río Claro en Tunca, periodo de validación.	62
Figura 5-16:Calibración cuenca Río Claro en Tunca.	63
Figura 5-17:Validación cuenca Río Claro en Tunca.	64
Figura 6-1: Escalamiento espacial estación Rengo.	67
Figura 6-2: Precipitación media mensual.	69
Figura 6-3: Precipitación media anual.	69
Figura 6-4:Temperatura media mensual, periodo 1972-2010, estación Rengo, Modelo PRECIS-DGF no escalado temporalmente y escalado temporalmente.	71
Figura 6-5:Temperatura media mensual, periodo 1971-2010, estación Rengo, Modelo PRECIS-DGF y PRECIS-DGF corregido.	71
Figura 6-6: Temperatura media decenios, periodo 1972-2010, estación Rengo, Modelo PRECIS-DGF y PRECIS-DGF corregido.	72
Figura 6-7: Temperatura media anual, estación Rengo según PRECIS-DGF escalado.	72
Figura 7-1: Caudal medio anual, estación Río Claro en Tunca, escenario 1.	76
Figura 7-2: Variación estacional para la estación Río Claro en Tunca, escenario 1.	76
Figura 7-3: Variación caudal de salida embalse Los Cristales, escenario 1.	77
Figura 7-4: Volumen almacenado embalse Los Cristales, escenario 1.	77
Figura 7-5: Altura de nieve en las bandas cabeceras, escenario 1.	78

Figura 7-6: Satisfacción de la demanda en los Periodos I y II, escenario 1.	79
Figura 7-8: Caudal medio anual, estación Río Claro en Tunca, escenario 2.	80
Figura 7-9: Variación estacional para la estación Río Claro en Tunca, escenario 2.	80
Figura 7-10: Variación caudal de salida embalse Los Cristales, escenario 2.....	81
Figura 7-11: Volumen almacenado embalse Los Cristales, escenario 2.....	81
Figura 7-12: Satisfacción de la demanda en los Periodos I y II, escenario 2.	82
Figura 7-14: Caudal medio anual, estación Río Claro en Tunca, escenario 3.....	83
Figura 7-15: Variación estacional para la estación Río Claro en Tunca, escenario 3. ...	84
Figura 7-16: Variación caudal de salida embalse Los Cristales, escenario 3.....	84
Figura 7-17: Volumen almacenado embalse Los Cristales, escenario 3.....	85
Figura 7-18: Satisfacción de la demanda en los Periodos I y II, escenario 3.	85
Figura 7-20: Caudal medio anual, estación Río Claro en Tunca, escenario 3.....	86
Figura 7-21: Variación estacional para la estación Río Claro en Tunca, escenario 3. ...	87
Figura 7-22: Variación caudal de salida embalse Los Cristales, escenario 3.....	87
Figura 7-23: Volumen almacenado embalse Los Cristales, escenario 3.....	88
Figura 7-24: Satisfacción de la demanda en los Periodos I y II.....	88

Índice de tablas.

Tabla 2-1: Variables y parámetros del modelo WEAP. Método Humedad del suelo.....	12
Tabla 3-1: Parámetros de la cuenca Río Claro en Tunca.	19
Tabla 3-2: Uso de suelo cuenca Río Claro en Tunca.....	23
Tabla 3-3: Demanda Evapotranspirativa Provincia del Cachapoal.....	23
Tabla 3-4: Distribución porcentual de los cultivos en la Cuenca Río Claro en Tunca.	24
Tabla 3-5: Estaciones Meteorológicas y Fluviométrica.	27
Tabla 3-6: Número de días con estadística de precipitación estación Rengo.	29
Tabla 3-7: Estadísticos utilizados en las correlaciones Rengo - Convento Viejo.	31
Tabla 3-8: Estadísticos utilizados para el relleno de datos, estación Rengo.	32
Tabla 3-9: Cantidad de registros de temperatura media diaria Estación Rengo.	33
Tabla 4-1: Coeficientes de cultivo.	37
Tabla 4-2: Perspectivas para los cultivos.	45
Tabla 5-1: Bandas de Elevación zona de Estudio.	46
Tabla 5-2: Gradiente de precipitación mensual.	48
Tabla 5-3: Factores de corrección gradiente de Precipitación.....	49
Tabla 5-4: Demanda de agua por banda de Elevación.	51
Tabla 5-5: Valores referenciales del criterio Nash Sutcliffe.	54
Tabla 5-6: Calibración de variables Río Claro en Hacienda las Nieves.	55
Tabla 5-7: Calibración de variables Cuenca Río Claro en Tunca.....	60
Tabla 6-1: Distancia puntos de la grilla a estación Rengo.....	66
Tabla 6-3: Relaciones lineales, Escalamiento temporal de temperaturas.	70
Tabla 7-1: Distribución de los cultivos en el escenario 4.....	74

Índice de Anexos.

ANEXO A: Escalamiento Temporal de las Precipitaciones PRECIS-DFG.

ANEXO B: Escalamiento Temporal de las Temperaturas PRECIS-DFG.

ANEXO C: Precipitaciones escaladas PRECIS-DFG

ANEXO D: Temperaturas escaladas PRECIS-DFG.

ANEXO E: Simulación de Escenarios WEAP.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

A partir del año 1988 el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), ha analizado la información científica existente, para responder a la problemática del cambio climático. Desde entonces se ha estimado sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas para la población mundial. En el Informe de síntesis del (IPCC, 2007) se sugiere a las naciones adoptar y aplicar políticas en respuesta al cambio climático, para evitar los efectos nocivos que traerá consigo este proceso.

En la actualidad se cuenta con modelos de circulación global de la atmosfera y los océanos (AOGCMs), los cuales simulan variables meteorológicas futuras para los distintos escenarios climáticos, cuyos resultados pueden ser utilizados para modelar los procesos hidrológicos que se producen en una cuenca, con el fin de estimar la disponibilidad del recurso hídrico. El escenario A1B, definido en el Informe de síntesis del (IPCC, 2007), se caracteriza por un desarrollo equilibrado entre tecnologías energéticas que utilizan como fuente combustibles fósiles y no fósiles.

Sin embargo los modelos de circulación global tienen una baja resolución espacial, del orden de los cientos de kilómetros, lo cual dificulta su uso en el País, debido al alto relieve y los considerables cambios climáticos entre costa y cordillera. Ante esto se recurre a los modelos regionales del clima (RCMs) como el PRECIS-DGF, el cual cuenta con datos en cada punto de una grilla de 25 km, la cual cubre todo el País, y ha sido forzado en las paredes laterales por el modelo de circulación global de la Atmosfera y los Océanos ECHAM5.

Recientemente se han desarrollado diferentes estudios tendientes a evaluar la disponibilidad de recursos hídricos en cuencas agrícolas, (Salgado, 2011). (Raddatz, 2011) ha estudiado efectos producidos por el cambio climático en las crecidas de algunos ríos del valle central. Estos estudios han mostrado una disminución en la disponibilidad de agua para los escenarios futuros. Esto se suma a que la VI Región verá disminuido el rendimiento de los cultivos, (AGRIMED, 2008).

Uno de los efectos importantes de este fenómeno es la variabilidad que provocará en la disponibilidad del recurso hídrico. En particular en Chile, cuya economía se soporta en la explotación de los recursos naturales, el cambio climático podría repercutir muy fuertemente en las faenas productivas especialmente en el sector agrícola.

El valle central del país destaca por la riqueza de sus suelos, lo que ha permitido una pujante industria agrícola, sin embargo, este desarrollo puede verse limitado debido a la carencia del recurso hídrico. La cuantificación de este fenómeno toma relevancia en zonas donde esta actividad es intensiva. Tal es el caso de la cuenca del Río Claro en Tunca. La tecnología actual permite observar el escenario proyectado para un futuro cercano, y con ello nace la oportunidad de anticiparnos a estos cambios y adaptarse a las nuevas condiciones ambientales, considerando la introducción de nuevos cultivos con distintas necesidades de agua e implementar nuevas tecnologías que apunten al uso eficiente del recurso hídrico.

1.2 **Objetivos.**

1.2.1 **Objetivos Generales.**

El objetivo principal es estudiar posibles adaptaciones que se deben realizar en la cuenca agrícola del Río Claro en Tunca, para enfrentar las variaciones en la disponibilidad del recurso debido al cambio climático.

1.2.2 **Objetivos Específicos.**

Los Objetivos Específicos a considerar en la presente memoria son:

- Obtener un modelo calibrado y validado de precipitación-escorrentía para la cuenca del Río Claro en Tunca a través del software WEAP.
- Utilizar el modelo calibrado para obtener la disponibilidad futura del recurso hídrico, a partir de los resultados del modelo de circulación global de la atmósfera y los océanos ECHAM5, escalados a través del modelo PRECIS-DGF.
- Cuantificar las variaciones de los caudales en la cuenca para las condiciones actuales y las condiciones futuras para el escenarioA1B.
- Analizar los usos del recurso hídrico que se verán afectados por el cambio climático y proponer medidas de adaptación para el uso futuro del recurso hídrico.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cambio Climático.

El cambio climático es la variación identificable del estado del clima; las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, las cuales se mantienen durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. La Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMCC), ha definido el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. En la CMCC se hace la diferencia entre el cambio climático imputable a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática producida por causas naturales (IPCC, 2007).

Las variables más relevantes de este fenómeno son: temperatura, precipitaciones y nubosidad. Las variaciones en estos parámetros climáticos son atribuidas directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, mediante la emisión de los Gases Efecto Invernadero (GEI).

En el año 1988 la organización de naciones unidas creó el Panel intergubernamental de cambio climático (IPCC), el cual analiza la información científica, técnica y socioeconómica relevante para la comprensión de los elementos científicos concernientes al cambio climático de origen antropogénico, así como sus posibles repercusiones, riesgos y sus posibilidades de mitigación y de adaptación. El IPCC no realiza investigaciones, ni controla datos referentes al clima u otros parámetros pertinentes, sino que basa su evaluación en la literatura científica y técnica publicada.

El informe complementario (IPCC, 1992), fue la base de la Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMCC), la cual fue adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992 y rubricada ese mismo año en la Cumbre para la Tierra, celebrada en Río de Janeiro por más de 150 países más la Comunidad Europea. Su objetivo último

es “la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático”.

El segundo informe (IPCC, 1995), fue la base del protocolo de Kyoto que contiene compromisos jurídicamente vinculantes, además de los señalados en el CMCC. Los países suscriptores de este protocolo acordaron reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero antropógenos en un 5%, como mínimo, por debajo de los niveles de 1990 durante el período de compromiso de 2008 a 2012. El Protocolo de Kyoto entró en vigor el 16 de febrero de 2005. Posteriormente el IPCC ha seguido entregando informes instalando el tema ante la comunidad internacional, y procurando poner en la palestra los efectos de este fenómeno.

El calentamiento del sistema climático es inequívoco y aceptado por toda la comunidad científica, como evidencian ya los aumentos 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. Las observaciones efectuadas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, en donde la variable más importante es el aumento de temperatura en la superficie terrestre (IPCC, 2007).

Considerando esta evidencia se puede afirmar que las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios. Para cuantificar este panorama se han creados escenarios de referencia publicados por el informe especial del IPCC sobre escenarios de emisión (IEEE, 2000). Estos están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1, B2) que exploran vías de desarrollo alternativas, incorporando variables demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI resultantes, estos escenarios se presentan en la Figura 2-1. Estas proyecciones de emisión son utilizadas para analizar la evolución del cambio climático.

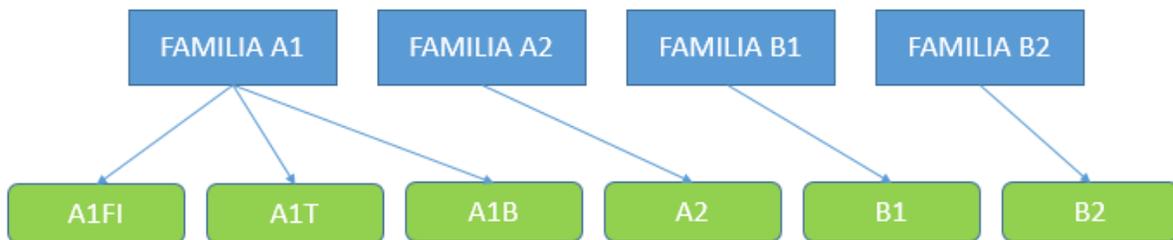


Figura 2-1: Escenario de Emisiones (IPCC, 2000).

El escenario A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, donde el máximo de la población mundial se consigue a mediados de siglo, y una rápida

introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos de acuerdo a la fuente de energía:

- A1FI es un escenario donde la producción energética se realiza intensivamente con combustibles fósiles.
- A1T es un escenario donde la producción energética es de origen no fósil.
- A1B es un escenario de equilibrio entre las distintas fuentes de energía.

El escenario A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento y cambio tecnológico lento. El escenario B1 describe un mundo convergente, con la misma descripción demográfica que A1, pero con una evolución más rápida a una economía de servicios y de información. El escenario B2 describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental (IPCC, 2000).

Las pruebas científicas muestran que el cambio climático constituye una seria amenaza mundial, que exige urgentemente una respuesta internacional acorde a los riesgos asociados. Por ello (Stern, 2007), sostiene que los beneficios de la adopción de medidas prontas y firmes sobre el cambio climático superarán con creces los costos. Sin embargo las pruebas científicas apuntan a la existencia de un riesgo creciente de que la actitud de mantener el “status quo” con respecto a las emisiones tenga consecuencias graves e irreversibles.

El cambio climático constituye una amenaza contra los elementos básicos de la vida humana en distintas partes del mundo: acceso a suministro de agua, producción de alimentos, salud, uso de las tierras y medio ambiente.

2.2 Agricultura.

Según el informe sobre el desarrollo social (Banco Mundial, 2008), el cambio climático tendrá consecuencias de gran alcance para el sector agrícola que afectarán en forma desproporcionada a la población pobre. El número creciente de cosechas fallidas y de cabezas de ganado muertas ya representan pérdida económica importante y deteriora la seguridad alimentaria. Es probable que los efectos de este cambio en cultivos y ganado se agraven en la medida que continúe el calentamiento del planeta.

Además se indica que para reducir los efectos adversos del cambio climático, se requieren con urgencia medidas de adaptación facilitadas por dos iniciativas: una acción internacional concertada que busque activamente financiación en todo el mundo, y una planificación estratégica de largo plazo en los países en desarrollo.

Aunque es una fuente importante de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), la agricultura tiene una gran capacidad para reducir estas emisiones; puede, por ejemplo, controlar la deforestación y modificar tanto el uso de la tierra como las prácticas agrícolas.

Según la Organización mundial de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), la capacidad de los pueblos de producir suficientes alimentos para consumo propio y de su ganado, depende en gran medida del clima: la temperatura, la luz y el agua. Por lo cual las fluctuaciones a corto y a largo plazo de las variables climáticas, pueden tener repercusiones extremas en la producción agrícola, y hacer que se reduzca drásticamente el rendimiento de las cosechas, lo que obligaría a los agricultores a utilizar nuevas prácticas para adaptarse a la modificación de las condiciones.

2.3 Recurso hídrico.

El cambio climático, con aumento de la temperatura y variabilidad en general de la precipitación, causará un cambio de las aportaciones hídricas y una modificación de la demanda de agua en los sistemas de regadío.

Según el Plan Nacional de España de adaptación al cambio climático (España, 2008) los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos no sólo dependen del ciclo hidrológico, sino que el sistema de recursos hidráulicos existente, y la forma de administrarlo, es un factor determinante de la suficiencia o escasez de agua frente a la demanda de la sociedad.

Agrega que la sensibilidad de los recursos hídricos al aumento de la temperatura y disminución de precipitación es muy alta, precisamente en las zonas con temperaturas medias altas y con precipitaciones bajas. Las zonas más críticas son las semiáridas, donde la disponibilidad del recurso puede reducirse sobre el potencial actual.

Este plan considera importantes medidas como las siguientes:

- Es básico impulsar una política de manejo del recurso hídrico que nos permita asegurar el mantenimiento de la calidad de las aguas y la protección de éstas.
- Asegurar el suministro de agua para consumo humano.
- Promover la protección de las cabeceras de cuencas hidrográficas.
- Generar una legislación y políticas que nos permitan proteger y conservar, para las generaciones futuras las reservas de agua con que cuenta nuestro país, es decir glaciares y ventisqueros.

- Poner las mayores exigencias ambientales a proyectos que afecten la calidad de las aguas y no permitir el desarrollo de proyectos que afecten nuestras reservas de agua, es decir proteger nuestros glaciares.

2.4 Medidas de Adaptación.

Para hacer frente al cambio climático, los científicos concuerdan en proponer dos líneas de acción: las medidas de mitigación y las medidas de adaptación

Las medidas de mitigación apuntan principalmente a disminuir la emisión GEI, en base a cambios y reemplazos tecnológicos que reducen el consumo de recursos y las emisiones por unidad de producción. Aunque hay varias políticas sociales, económicas y tecnológicas que reducirían las emisiones, la mitigación referida al cambio climático, es la aplicación de políticas destinadas directamente a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En tanto las medidas e iniciativas de adaptación se enfocan a reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos ante los efectos reales o esperados de un cambio climático. Existen diferentes tipos de adaptaciones, por ejemplo: preventivas y reactivas, privadas y públicas, autónomas y planificadas. Algunos ejemplos de adaptación son la construcción de diques fluviales o costeros, la sustitución de plantas sensibles al choque térmico por otras más resistentes, etc.

Grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático y en particular la variabilidad del clima y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad dependerá del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema, de su sensibilidad y capacidad de adaptación.

El Banco mundial para el año 2008 sostenía que las pruebas científicas sobre la seriedad de la amenaza climática para el sector agrícola son muy claras y ya no presentan ambigüedad. Aunque la magnitud exacta de tal amenaza es incierta, dadas la complejidad de las interacciones y de los procesos de retroinformación que ocurren en el ecosistema mundial y en la economía. También recalca que en los países que tienen limitaciones serias de recursos, los agricultores no podrán adaptarse al cambio climático sin ayuda externa.

Sobre las adaptaciones se enumeran algunas consideraciones propuestas por el Banco Mundial, 2008 y el IPCC, 2007:

- Las barreras a la adaptación varían según el país, ya que las realidades de crédito o de ahorros son la barrera principal.
- En algunos lugares la falta de acceso al agua es el obstáculo a la adaptación.
- La adaptación puede reducir sustancialmente el impacto económico adverso del cambio climático, pero requiere de una respuesta política urgente.
- La mejor manera de abordar una mayor incertidumbre que genere el cambio climático es la planificación de eventos posibles.
- Los países deben preparar planes de acción para la adaptación al nivel nacional que permitan definir las prioridades inmediatas y mejorar así su preparación para el cambio climático.
- El sector público puede facilitar la adaptación aplicando medidas como los seguros agrícolas y pecuarios, las redes de protección social, los estudios sobre cultivos resistentes a la inundación, al calor y a la sequía, la diseminación de tales cultivos, y la conservación de variedades tradicionales de plantas que presenten esas características.
- Pueden ser particularmente eficaces los nuevos esquemas de riego para regiones áridas cultivadas, especialmente si se combinan estos esquemas con reformas complementarias y con un mejor acceso al mercado para productos de alto valor.
- Se debe tener en cuenta la variabilidad mayor de la precipitación y los flujos del agua superficial en el diseño de nuevos esquemas de riego y en la modernización de los ya existentes.
- Una mejor información sobre el clima, por ejemplo el suministro de pronósticos climáticos de largo plazo, es otra forma que puede ser efectiva respecto a su costo para adaptarse al cambio climático.
- Si no se hacen inversiones significativas en adaptación, el cambio climático socavará el progreso logrado en los países en desarrollo, que son sumamente vulnerables a los efectos del cambio climático.
- El estado debe subvencionar el financiamiento para la adaptación en el sector agropecuario, un sector especialmente sensible al cambio climático.
- La comunidad internacional debe diseñar nuevos mecanismos para proveer diversos bienes públicos globales, entre ellos la información sobre el clima y los pronósticos del tiempo; la investigación, la conservación y el desarrollo de cultivos adaptados a los nuevos patrones climáticos; y técnicas que ayuden a reducir la degradación de la tierra.

- Dado el largo intervalo desde que se produce el desarrollo de tecnologías y sistemas de información hasta su adopción en el campo. Las inversiones que sostendrán la adaptación deben iniciarse lo antes posible.
- Aumento en la obtención de agua de lluvia; técnicas de almacenamiento y conservación de agua; reutilización del agua; desalación; eficiencia en el uso del agua y de la irrigación.
- Ajuste de las fechas de plantación y de las variedades de cultivo; reubicación de cultivos; mejora de la gestión de la tierra, por ejemplo, control de la erosión o protección de los suelos mediante plantación de árboles.
- Políticas hídricas nacionales y gestión integrada de los recursos hídricos; gestión de fenómenos peligrosos como inundaciones, desbordes de sistemas de aguas lluvias, desprendimientos de laderas de cerros, etc.

2.5 Modelación de Recursos Hídricos.

2.5.1 Generalidades.

WEAP (Water Evaluation and Planning) corresponde a un modelo semidistribuido desarrollado por el Instituto del Medio Ambiente Stockholm Environment Institute (SEI). El cual utiliza el principio básico de balance de masas, simulando una gran cantidad de componentes naturales y artificiales (WEAP, 2011).

De acuerdo a www.weap21.org el software WEAP es una forma eficiente de modelar un sistema de planificación integrado de los recursos hídricos y crear modelos incorporados para modelación de: escorrentía e infiltración por precipitación, evapotranspiración, requisitos y producciones de cosechas, interacciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas, y calidad del agua en ríos. Todas estas cualidades son útiles a la hora de calcular la disponibilidad de los recursos hídricos en una cuenca a partir de los datos meteorológicos.

En el país, este software 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 Matemática de la Universidad de Chile (Mena, 2009; Mardones 2009; Raddatz 2011; Salgado 2011). Fundamentalmente ha sido utilizado para cuantificar la disponibilidad de recursos hídricos, en particular (Raddatz 2011; Salgado 2011) lo utilizaron analizando efectos del cambio climático para el escenario climático A2 del (IPCC, 2000).

2.5.2 Modelo Hidrológico.

Para realizar el balance hídrico, WEAP tiene a disposición del usuario cuatro métodos:

Solo demanda de riego: Los requerimientos de cultivo se calculan para un sitio de demanda con los procesos hidrológicos y agrohidrológicos simplificados como la precipitación, la evapotranspiración y crecimiento de los cultivos de regadío y haciendo hincapié en la agricultura de temporada. No se produce ni infiltración ni escorrentía.

Precipitación y escorrentía: Calcula con los mismos algoritmos que el método anterior, pero considera los procesos de infiltración y escorrentía que se generan en el suelo.

Método MABIA: Este es un método agregado recientemente a WEAP, consiste en una simulación diaria de la transpiración, la evaporación, las necesidades de riego y la programación, el crecimiento del cultivo y los rendimientos, y permite estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de agua del suelo.

Humedad del suelo: Este es el método utilizado, ya que es el más completo de los cuatro métodos, esto se logra al modelar el suelo en dos capas y permite la representación de la acumulación de nieve:

- En la capa superior del suelo se produce la evapotranspiración, para lo cual considera la precipitación, riego en las tierras agrícolas y no agrícolas, la escorrentía superficial, la subsuperficial y los cambios de la humedad del suelo.
- En la zona profunda se representa el flujo base y cambios de humedad del suelo.

El método de Humedad del suelo permite la caracterización de usos de suelo, pero necesita una mayor cantidad de parámetros, tanto de uso de suelo, como de clima, para simular estos procesos (Sieber, 2011).

El esquema mostrado en la Figura 2-2 corresponde a una representación del modelo de humedad del suelo. Este modelo se verá representado en cada uno de los “sitios de demanda”, estos “sitios de demanda” representan a una cuenca, subcuenca, banda de elevación o bien un área agrícola. En cada uno de estos se ingresa la información de uso de suelo y climática. Los parámetros y variables se muestran en la Tabla 2-1.

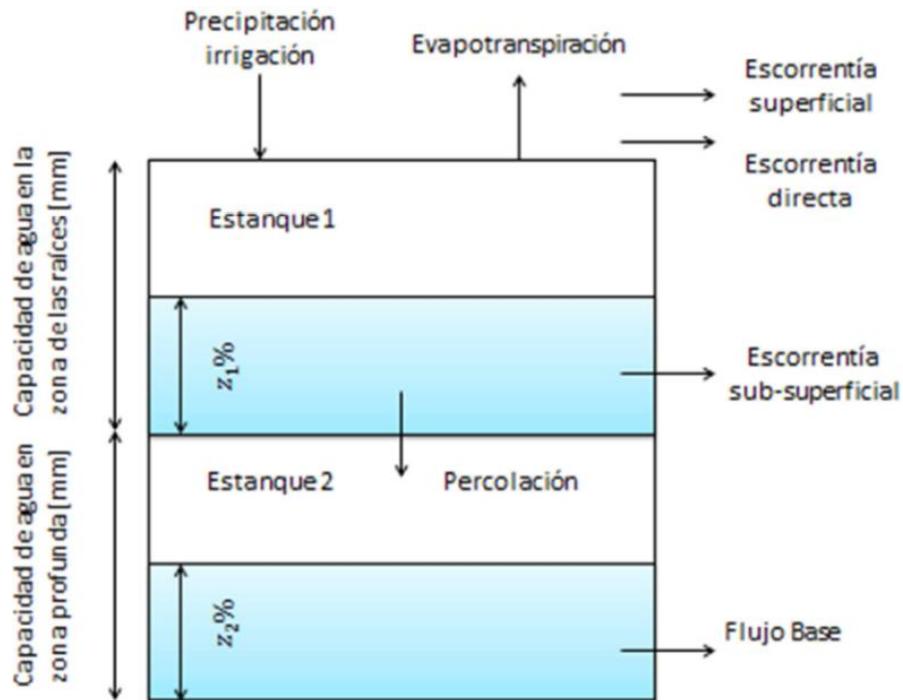


Figura 2-2: Representación modelo de humedad del suelo.

Tabla 2-1: Variables y parámetros del modelo WEAP. Método Humedad del suelo.

	Variables y Parámetros	Símbolo
Meteorología	Precipitación [mm/día]	P
	Temperatura [°C]	T
	Humedad Relativa [%]	HR
	Velocidad del viento [m/s]	u
	Fracción nubosa	FN
	Latitud [°]	Lat
	Nieve inicial [mm/día]	N
	Albedo [-]	Al
	Temperatura de congelamiento del agua [°C]	T_s
	Temperatura de derretimiento de nieve [°C]	T_l
Uso de Suelo	Área [Km ²]	Al
	Coeficiente de cultivo [-]	k_c
	Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces [mm]	Sw
	Capacidad de almacenamiento en la zona profunda [mm]	Dw
	Factor de resistencia a la escorrentía [-]	RRF
	Conductividad de la zona de las raíces [mm/día]	k_s
	Conductividad de la zona profunda [mm/día]	k_d
	Dirección preferencial del flujo [-]	f
	Nivel de humedad inicial en la zona de raíces [%]	Z₁
Nivel de humedad inicial de la zona profunda [%]	Z₂	

Las ecuaciones 2-1 a 2-7 definen los procesos que se observan en los estanques mostrados en la Figura 2-2. Y en las ecuaciones 2-8 y 2-9 se presentan las ecuaciones de balance en el estanque superior e inferior respectivamente.

- Cambio en la humedad del suelo.

$$S_{w_j} \frac{dz_{1,j}}{dt} \quad (2-1)$$

Donde:

S_{w_j} = Capacidad de almacenamiento en la zona de las raíces, en el sitio de demanda j.

$z_{1,j}$ = Porcentaje de humedad inicial en la zona de las raíces, en el sitio de demanda j.

- Precipitación efectiva.

$$P_e(t) \quad (2-2)$$

Donde:

$P_e(t)$ = Precipitación efectiva.

- Evapotranspiración.

$$PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) \quad (2-3)$$

Donde:

$PET(t)$ = Evapotranspiración de referencia en el tiempo t.

$k_{c,j}(t)$ = Coeficiente de cultivo para el sitio de demanda j en el tiempo t.

$z_{1,j}$ = Porcentaje de humedad inicial en la zona de las raíces, en el sitio de demanda j.

- Escorrentía superficial.

$$P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} \quad (2-4)$$

Donde:

$P_e(t)$ = Precipitación Efectiva en el tiempo t.

RRF_j = Factor de resistencia a la escorrentía, en el sitio de demanda j.

$z_{1,j}$ = Porcentaje de humedad inicial en la zona de las raíces, en el sitio de demanda j.

- Escorrentía subsuperficial.

$$f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (2-5)$$

Donde:

f_j = Dirección preferencial del flujo.

$k_{s,j}$ = Conductividad de la zona de las raíces en el sitio de demanda j.

$z_{1,j}$ = Porcentaje de humedad inicial en la zona de las raíces, en el sitio de demanda j.

- Percolación.

$$(1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (2-6)$$

Donde:

f_j = Dirección preferencial del flujo.

$k_{s,j}$ = Conductividad de la zona de las raíces en el sitio de demanda j.

$z_{1,j}$ = Porcentaje de humedad inicial en la zona de raíces, en el sitio de demanda j.

- Flujo Base.

$$k_{d,j} z_{2,j}^2 \quad (2-7)$$

Donde:

$k_{d,j}$ = Conductividad de la zona profunda en el sitio de demanda j.

$z_{2,j}$ = Porcentaje de humedad inicial en la zona profunda, en el sitio de demanda j.

- Estanque superior.

$$S_{W_j} \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t) k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (2-8)$$

Donde:

$S_{W_j} \frac{dz_{1,j}}{dt}$ = Cambio en la humedad del suelo.

$P_e(t)$ = Precipitación efectiva.

$PET(t) k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right)$ = Evapotranspiración.

$P_e(t) z_{1,j}^{RRF_j}$ = Escorrentía superficial.

$f_j k_{s,j} z_{1,j}^2$ = Escorrentía subsuperficial

$(1 - f_j)k_{s,j}z_{1,j}^2 =$ Percolación.

- Estanque inferior.

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_{d,j}z_{2,j}^2 + (1 - f_j)k_{s,j}z_{1,j}^2 \quad (2-9)$$

Donde:

$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} =$ Cambio en la humedad del suelo.

$k_{d,j}z_{2,j}^2 =$ Flujo base.

$(1 - f_j)k_{s,j}z_{1,j}^2 =$ Percolación.

La Evapotranspiración de referencia es calculada por WEAP a través de la expresión de Penman-Monteith, la cual se muestra en la ecuación 2-10.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{\text{mean}} + 273} \right) * u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 * u_2)} \quad (2-10)$$

Donde:

$ET_0 =$ Evapotranspiración de referencia. [Mm/día]

$\Delta =$ Pendiente de la curva presión de vapor [kPa/°C]

$R_n =$ Radiación neta en la superficie [MJ/m²/día].

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

$\gamma =$ Constante psicrométrica [kPa/ °C].

$T_{\text{mean}} =$ Temperatura promedio del aire [°C].

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

$e_s =$ Presión de vapor de saturación [kPa]

$e_a =$ Presión de vapor actual [kPa].

Otras definiciones importantes son el coeficiente de derretimiento (m_c), acumulación de nieve (A_c) y precipitación efectiva (P_e). Las cuales se determinan según se muestra en las ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13.

$$A_{c_i} = A_{c_{i-1}} + (1 - m_c)P_i \quad (2-11)$$

$$P_e = P_i m_c + m_r \quad (2-12)$$

$$m_c = \begin{cases} 0 & (T_i < T_s) \\ 1 & (T_i > T_l) \\ \frac{T_i - T_s}{T_l - T_s} & (T_s \leq T_i \leq T_l) \end{cases} \quad (2-13)$$

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 Introducción.

En el presente capítulo se hace una descripción de la cuenca en estudio, Cuenca del Río Claro, controlada por la estación fluviométrica Río Claro en Tunca, la cual se denomina como Cuenca del Río Claro en Tunca. Esta cuenca se caracteriza por su intensa actividad agrícola, por lo cual es ideal para estudiar las adaptaciones que se deben realizar ante el cambio climático.

Para la caracterización de la cuenca se presentan antecedentes de su ubicación, clima, uso de suelo, hidrografía, etc. Que entregan una caracterización completa de la zona.

3.2 Ubicación y Delimitación de la Cuenca

La cuenca en estudio es delimitada por la Estación fluviométrica Río Claro en Tunca, la cual se encuentra ubicada bajo el puente Zúñiga, en la ruta H-50, a una altitud aproximada de 207 msnm, cercano a la confluencia del Río Claro con el Cachapoal, esta estación se puede observar en la Figura 3-1, obtenida desde Google Earth. Sus coordenadas geográficas son $34^{\circ} 22' S$ y $71^{\circ} 05' W$. mientras que en coordenadas UTM, huso 19, 306.692,09 m E, 6.193.095,57 m S.

Está ubicada en la provincia del Cachapoal al sur de la ciudad de Rancagua, Se encuentra entre los $34^{\circ} 11'$ y $34^{\circ} 36'$ de Latitud Sur y entre los $71^{\circ} 05'$ y $70^{\circ} 29'$ de Longitud Oeste, la ubicación general de la cuenca se exhibe en la Figura 3-2.

La cuenca del Río Claro posee un extenso valle agrícola que cubre la mayor parte de la cuenca, la zona sur-este es la zona más alta de la cuenca alcanzando una elevación de 3690 msnm, con una pendiente de 0,295 y un área total de 936 Km². La Tabla 3-1 muestra los parámetros de la cuenca y la Figura 3-3 presenta la elevación y delimitación de la cuenca.



Figura 3-1: Estación fluviométrica Río Claro en Tunca.



Figura 3-2: Ubicación General de la cuenca Río Claro en Tunca.

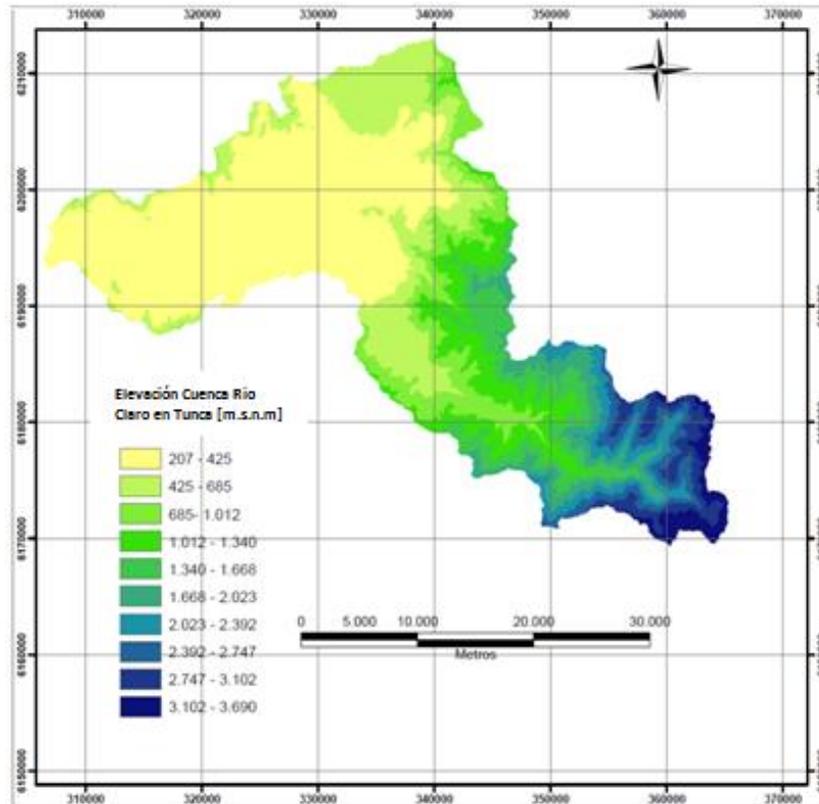


Figura 3-3: Delimitación de la cuenca Río Claro en Tunca.

Tabla 3-1: Parámetros de la cuenca Río Claro en Tunca.

Parámetro	
Área [km ²]	963.5
Elevación media [m]	959.2
Longitud del cauce principal [m]	79.3
Pendiente media	0.295
Altura mínima [m]	207
Altura máxima [m]	3637

3.3 Antecedentes Cuenca Del Río Claro en Tunca.

3.3.1 Clima

Según la Dirección Meteorológica de Chile el relieve de la región influye en la distribución de las precipitaciones manifestándose un aumento de ellas en las laderas occidentales de las cordilleras de los Andes y de la Costa. En la VI Región se presentan tres tipos de climas de los cuales se ahonda en los dos presentes en la cuenca del Río Claro en Tunca:

- a) **Clima templado cálido con estación seca prolongada (7 a 8 meses):** La zona ubicada en la depresión intermedia o en el valle longitudinal de esta región presenta las condiciones de este tipo de clima, mostrando claramente características mediterráneas con veranos cálidos y secos e inviernos lluviosos, frescos y húmedos. Las precipitaciones son algo menores que en el litoral pero las amplitudes térmicas tanto diarias como anuales son mayores. La diferencia de temperatura media mensual entre el mes más cálido y el más frío es del orden de 13° C. en Rancagua. También hay 7 meses con precipitación media inferior a 40 mm, que van de octubre a abril. La cordillera de la Costa limita el alcance de la influencia marítima, lo que se manifiesta en una menor cantidad de días nublados que en el litoral.
- b) **Clima templado cálido con estación seca (4 a 5 meses):** En el sector cordillerano de la Región, por sobre los 800 m, el ascenso del relieve provoca grandes variaciones en el clima, ya que las temperaturas medias en el invierno se aproximan a 0°C y las precipitaciones invernales 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 a 5 meses con precipitación inferior a 40 mm. Las temperaturas medias son del orden de 4°C más bajas que en el valle y la diferencia entre el mes más cálido y el más frío también desciende a unos 11°C.

3.3.2 Hidrografía.

La cuenca del Río Claro en Tunca se inicia a 3690 msnm, en la precordillera de la provincia del Cachapoal, donde se encuentra la laguna Los Cristales, la cual es drenada por el Río Claro, el cual a su vez, recibe aportes de numerosas quebradas, entre las más importantes se consideran: Quebrada la Pandina, Quebrada las Tierras Fofas, Quebrada del Popeta.

Al llegar al valle el Río Claro confluye con el Estero Tipame y al inicio de la cuenca confluye el estero El Cerro, todas estas pequeñas quebradas aportan al cauce principal, conformando una red hidrográfica muy explotada para el uso agrícola, esta red se puede ver en la Figura 3-4. En la Figura 3-5 se presenta la curva de variación estacional para la estación de control fluviométrica Río Claro en Tunca.

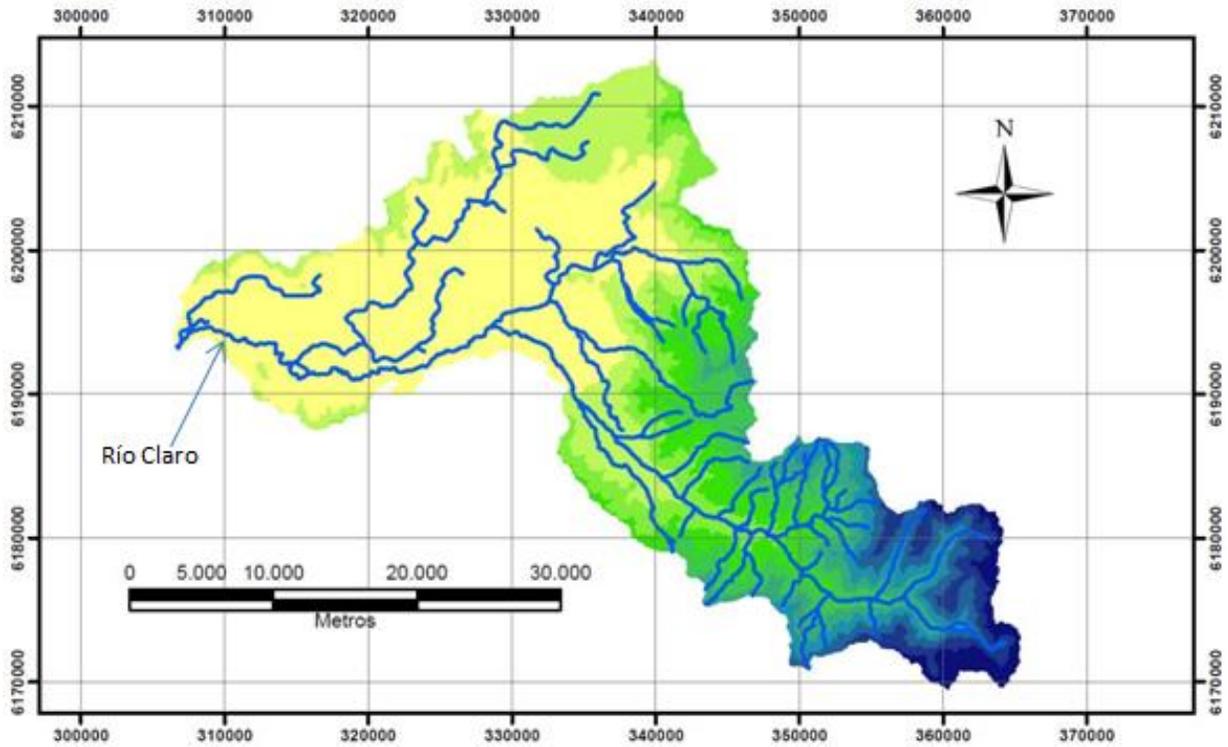


Figura 3-4: Hidrografía de la cuenca Río Claro en Tunca.

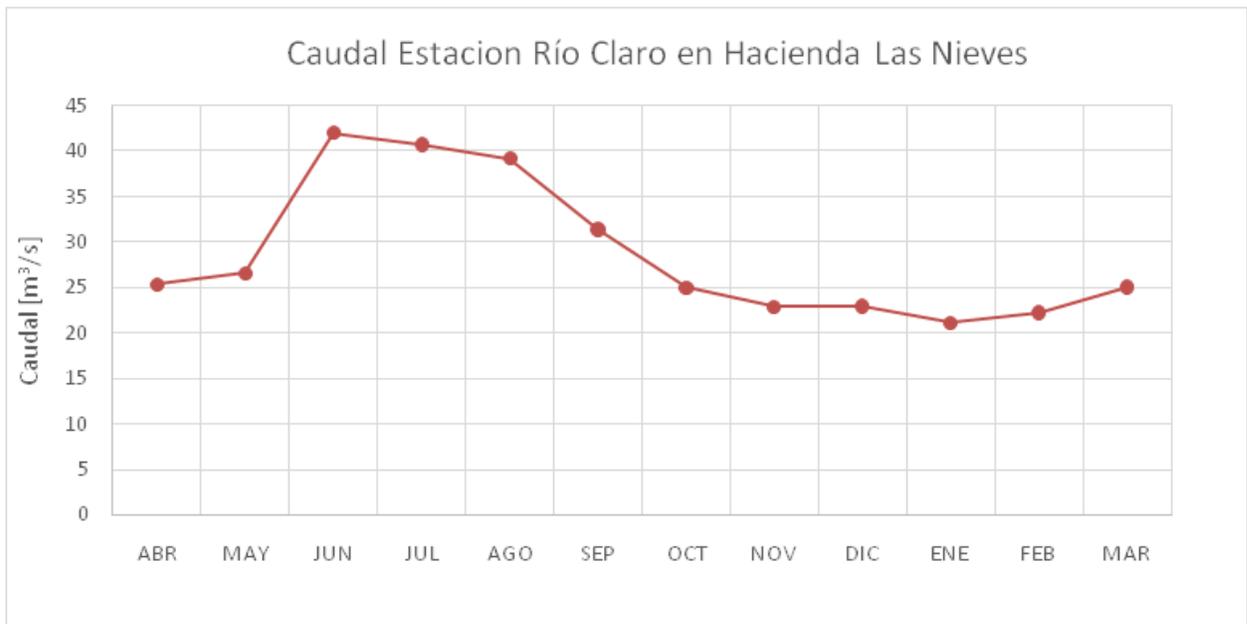


Figura 3-5: Caudal medio mensual estación Río Claro en Tunca.

3.3.3 Aguas Subterráneas.

La cuenca del Río Claro en Tunca, se encuentra ubicada sobre el acuífero denominado Requinoa-Rosario-Rengo-Quinta de Tilcoco, el cual se encuentra conectado con los acuíferos Olivar y Pelequen-Malloa-San Vicente de Tagua-Tagua. La delimitación de estos acuíferos se pueden observar en la Figura 3-6.

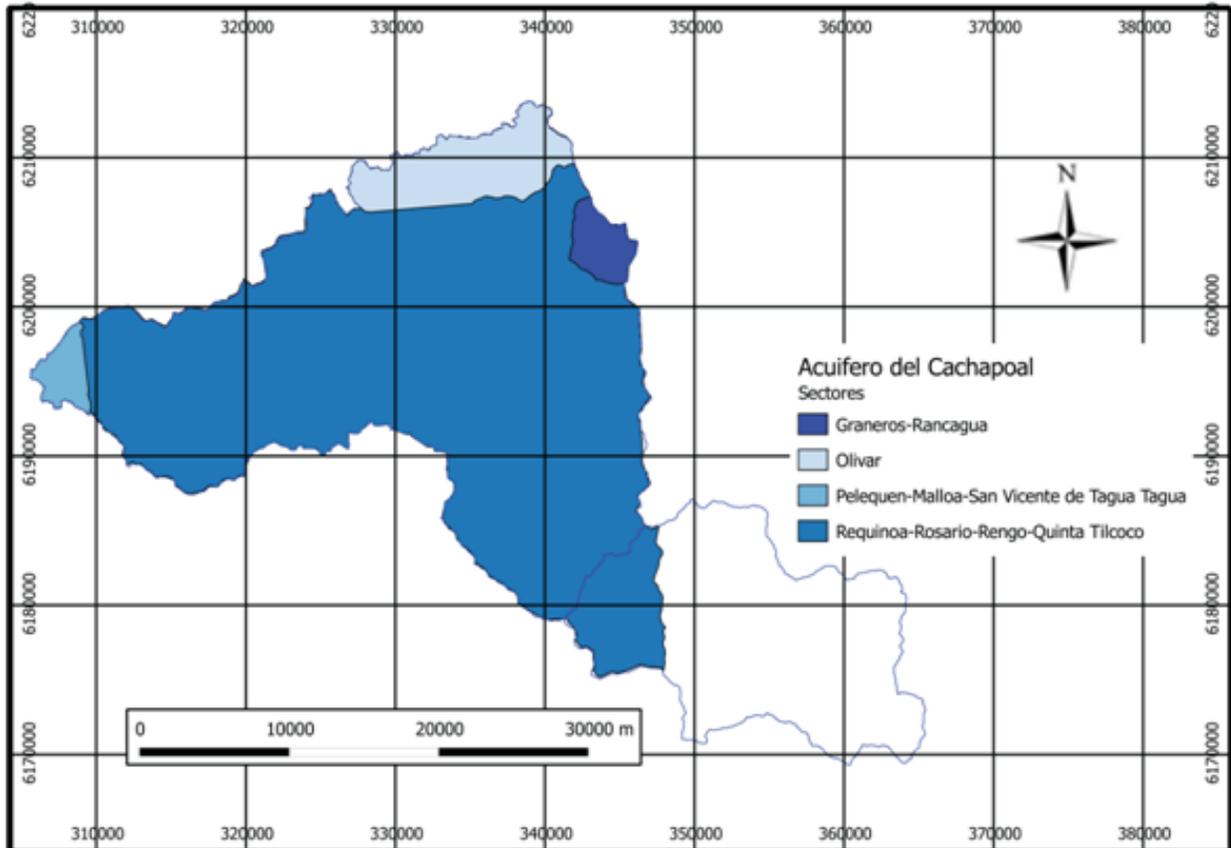


Figura 3-6: Acuíferos de la cuenca Río Claro en Tunca.

3.3.4 Uso de Suelo y Evapotranspiración.

El uso de suelo que predomina es el agrícola, debido a la gran extensión del valle en la zona de Requinoa y Quinta de Tilcoco. En la cuenca no existen grandes ciudades, solo pequeños pueblos en el valle cercano a la Ruta 5 sur, esto se aprecia en la Figura 3-7, junto a los demás usos de suelo presentes que se detallan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Uso de suelo cuenca Río Claro en Tunca.

	Km ²	%
Ciudades	14.99	1.6%
Terreno Agrícola	394.16	41.9%
Praderas	47.29	5.0%
Matorrales	303.71	32.3%
Bosques	57.49	6.1%
Áreas sin vegetación	70.22	7.5%
Nieve y glaciares	52.76	5.6%
Cuerpos de agua	0.33	0.0%
Total	940.95	100.0%

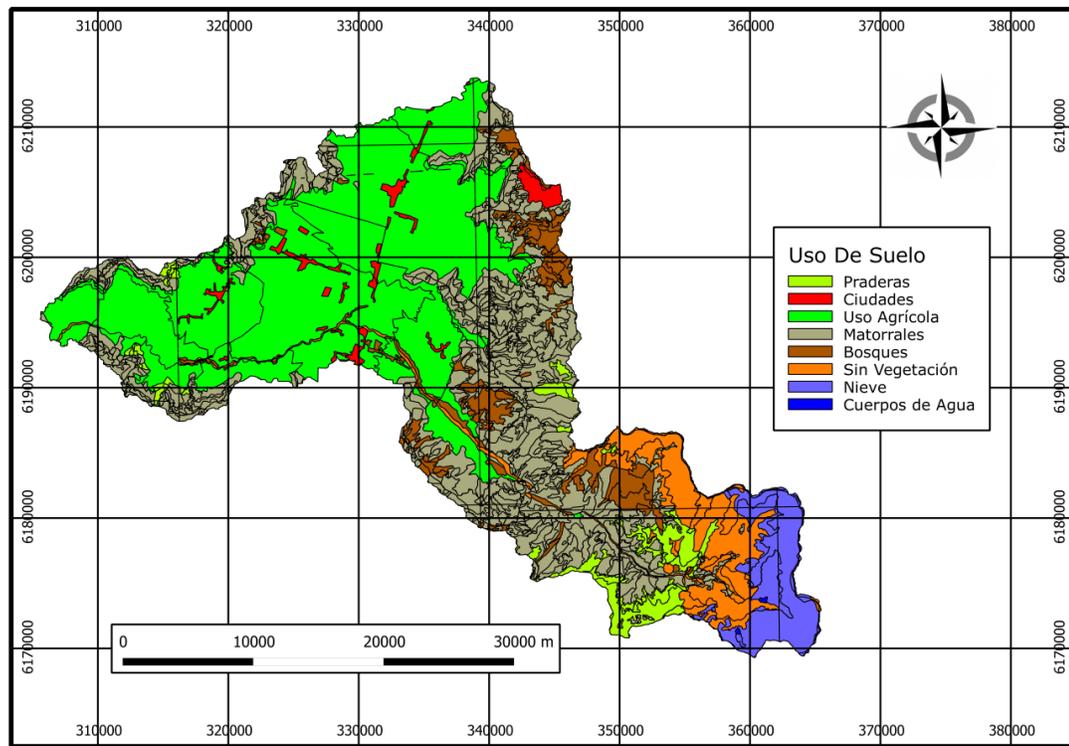


Figura 3-7: Uso de suelo cuenca Río Claro en Tunca.

A partir del estudio de Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile (Ciren, 1997) se obtiene la demandas evapotranspirativa. La cobertura de este estudio es en todo Chile y para los fines específicos del presente estudio se toman los valores de la provincia del Cachapoal en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, estos valores se presentan en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Demanda Evapotranspirativa Provincia del Cachapoal.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
Cachapoal [mm]	95	57	30	20	30	58	95	133	160	171	160	133	1141

3.3.5 Economía

La economía de la cuenca es principalmente agrícola como se observa en la Figura 3-7, donde predominan los cultivos de frutales, vides y hortalizas, un detalle de los cultivos que se producen en la cuenca del Río Claro en Tunca se presenta en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Distribución porcentual de los cultivos en la Cuenca Río Claro en Tunca.

Cultivo	[%]
Cultivos Anuales	32%
Maíz	28%
Trigo	3%
papas	0%
Otros	0%
Cultivos Permanente	49%
Manzano	23%
Almendro	6%
Durazno	6%
Vides	10%
Kiwis	1%
Guindos	0%
Naranjas	0%
Paltas	0%
Perales	2%
Otros (Nectarines, Nogales)	1%
Hortalizas	6%
Tomates	3%
Cebollas	1%
Ajos	0%
Pimientos	0%
Porotos Verdes	0%
Repollo	0%
Brócoli	0%
Ají	0%
Otros (Zapallos)	0%
Praderas (Alfalfa, Trébol)	13%
TOTAL	100%

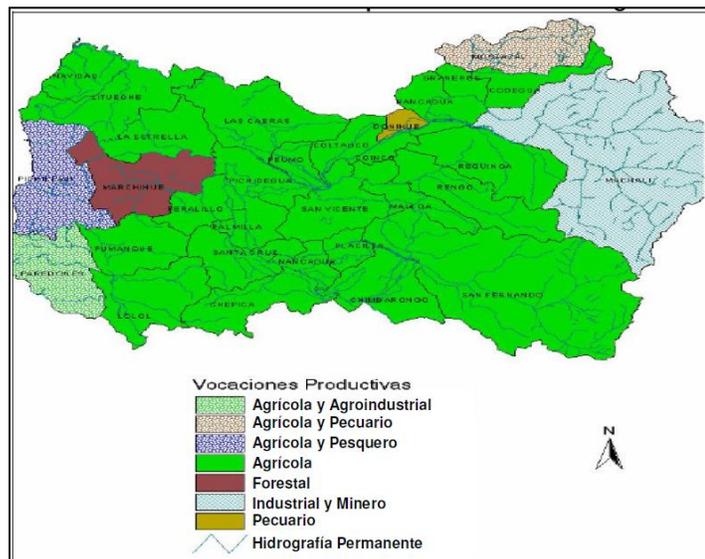


Figura 3-8: Uso de suelo VI Región, DNP 2007.

3.3.6 División Administrativa.

La cuenca está ubicada en su totalidad en la Provincia del Cachapoal, VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, conformada por cinco comunas; Requinoa, Rengo, Quinta de Tilcoco, Malloa y San Vicente, las cuales no están totalmente comprendidas por la delimitación de la cuenca. En la Figura 3-9, se observa las comunas que conforman la cuenca del Río Claro en Tunca.

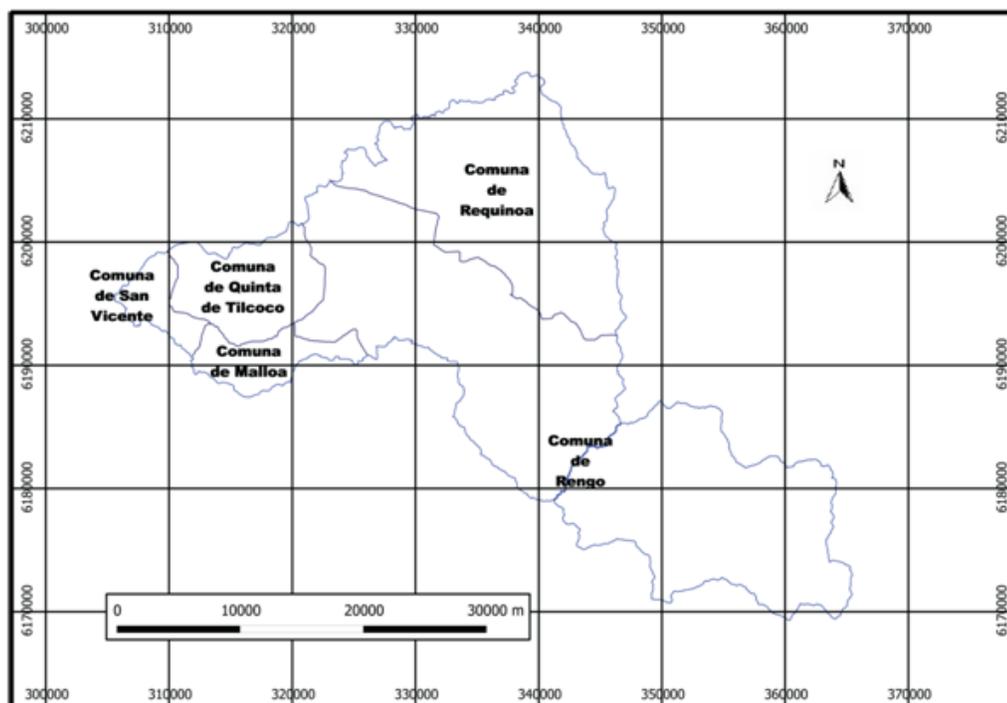


Figura 3-9: División comunal cuenca Río Claro en Tunca.

3.4 Embalse Los Cristales.

Este embalse está ubicado en la cabecera de la cuenca y tiene una capacidad de 8.5 Hm^3 . A partir de la gran sequía del año 1968 las autoridades acordaron bajo un convenio en conjunto con la República de Alemania, la construcción del Embalse Laguna Los Cristales y sus obras complementarias. Con esta obra se aseguró el riego en el valle durante los periodos de verano con una meta de 1500 hectáreas de cultivos permanentes.

El muro que cierra la laguna, es de tipo enrocado con un núcleo de hormigón asfáltico en su interior. La altura máxima del muro principal es de 31 metros sobre la vaguada del río original, lo que permite un almacenamiento de $8,5 \text{ Hm}^3$ útiles.

El coronamiento, en tanto, tiene una longitud de 315 metros y un ancho de 14 metros. La entrega se produce a través de dos tubos de 800 mm, de diámetro entregando un caudal máximo de 4.5 m³/s. Mientras que su vertedero tiene una capacidad de 41.5 m³/s.

La curva de embalse se elabora a partir de datos obtenidos desde la Unidad de Explotación de la Dirección de Obras Hidráulicas y se presenta en la Figura 3-10. La evaporación desde la superficie del embalse se obtiene a partir de valores mensuales provenientes de las estadísticas de la Dirección General de Obras Hidráulicas, la cual se presenta en la Figura 3-11.

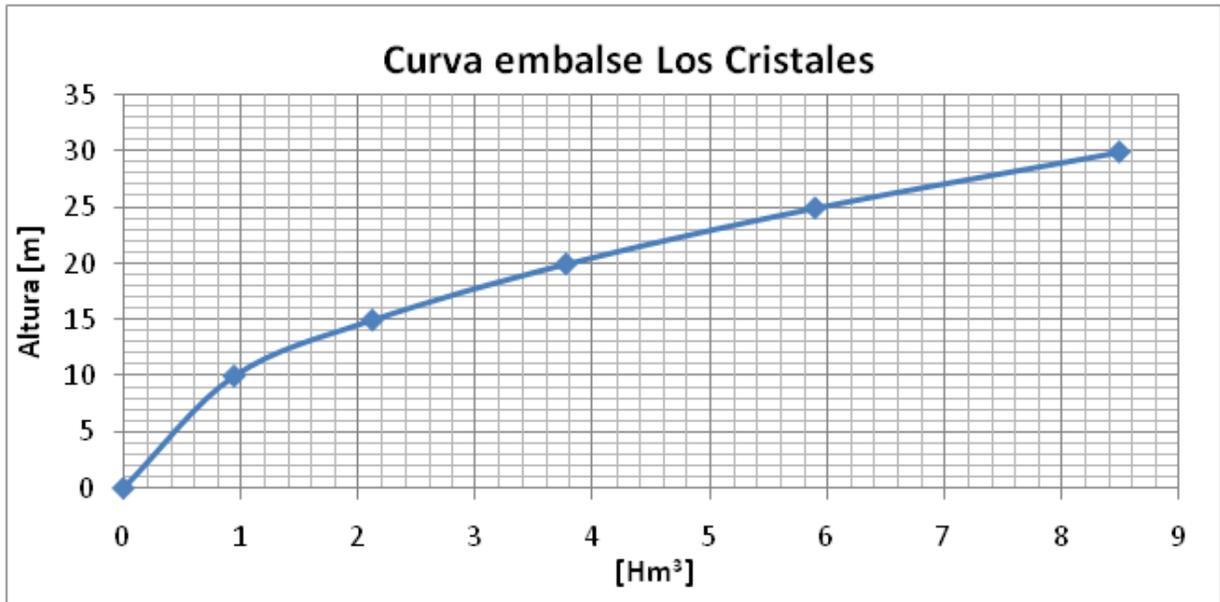


Figura 3-10: Curva de embalse Los Cristales.

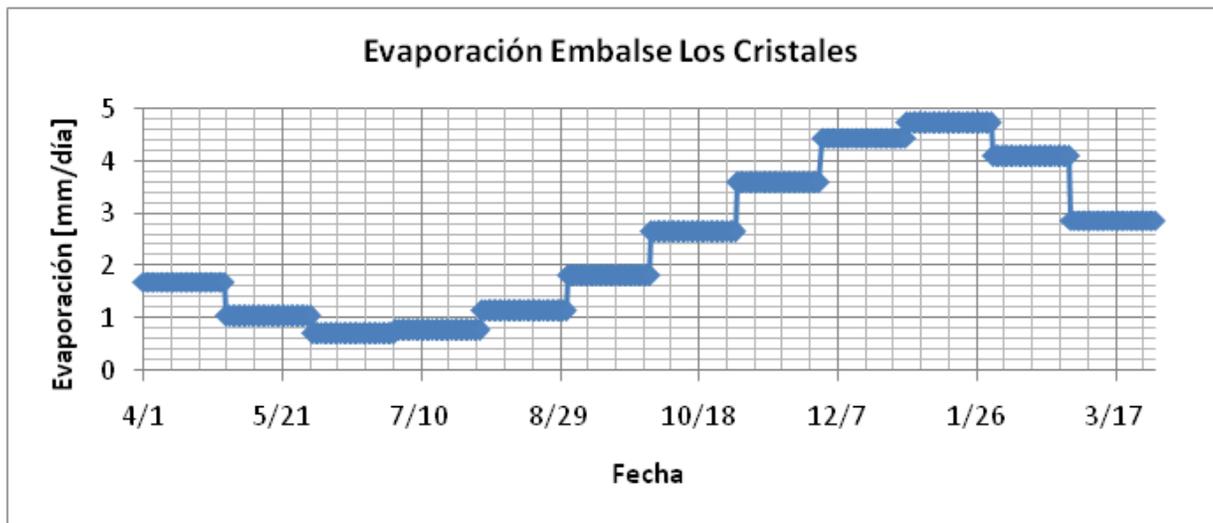


Figura 3-11: Evaporación Embalse Los Cristales.

3.5 Estaciones Disponibles.

En la cuenca del Río Claro en Tunca se cuenta con 4 estaciones meteorológicas y 2 estaciones fluviométricas. Además se dispone de la estación Rengo, que si bien no está en la cuenca, es útil debido a la cercanía que tiene con la zona. En la Tabla 3-5 se presentan las coordenadas de las estaciones ubicadas en la zona y en la Figura 3-12 se observan su ubicaciones, con excepción de la estación Convento Viejo, la cual por su lejanía no se observa.

Tabla 3-5: Estaciones Meteorológicas y Fluviométrica.

Estación	Código DGA	Tipo	UTM N [m]	UTM E [m]	Altitud [msnm]
Río Claro en Hacienda Las Nieves	06013006-K	Meteorológica	6.181.767	343.115	700
Rengo	06015003-6	Meteorológica	6.189.340	328.281	310
Popeta	06013005-1	Meteorológica	6.187.622	336.295	480
Convento Viejo	06034003-K	Meteorológica	6.150.075	304.587	239
Río Claro en Hacienda Las Nieves	06013001-9	Fluviométrica	6.181.574	343.449	720
Río Claro en Tunca	06015001-K	Fluviométrica	6.193.089	306.745	207

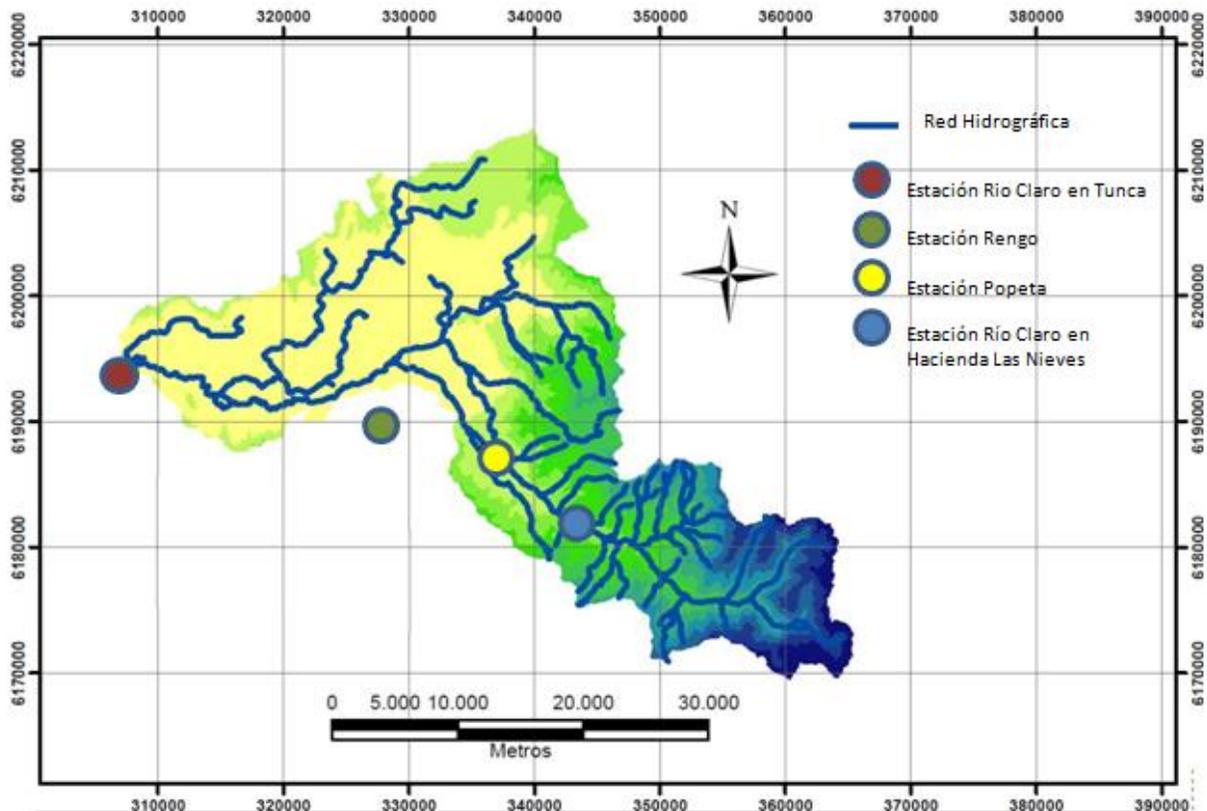


Figura 3-12: Hidrografía cuenca Río Claro en Tunca.

3.6 Estadística Meteorológica.

3.6.1 Precipitación.

La estadística de precipitaciones diarias disponibles en la zona, son los registros de las estaciones Rengo, Popeta y Río Claro en Hacienda Las Nieves. Esta estadística se utilizó para rellenar la serie completa de precipitaciones de la estación Rengo, producto de que esta es la estación más completa. En la Tabla 3-6 se presenta la cantidad de datos disponibles durante el periodo 1971-2010 en la estación Rengo. Para rellenar la estadística faltante se procede dependiendo de la información con la que se cuenta.

Días sin lluvia en la estaciones Popeta y Río Claro en Hacienda Las Nieves: al observar la estadística de las estaciones Popeta, Río Claro en Hacienda Las Nieves y Rengo, se observa que no hay una relación entre los días sin lluvias en las estaciones Popeta y Río Claro en Hacienda Las Nieves y las precipitaciones en la estación Rengo. Por lo cual no se puede suponer la ausencia de lluvia en la estación Rengo, ante esta situación se procede de la siguiente forma para rellenar la estadística en este caso:

- Se crea una función de probabilidad utilizando los datos de la estación Rengo, en los días donde se tiene estadística de precipitación 0 mm en las estaciones Río Claro en Hacienda Las Nieves y Popeta. Con esta función se rellenas los datos de la estación Rengo para los días sin lluvia en la estaciones Río Claro en Hacienda Las Nieves y Popeta.

Días sin lluvia en la estaciones Popeta y sin registro en la estación Río Claro en Hacienda Las Nieves: al observar la estadística de las estaciones Popeta y Rengo, se observa que no hay una relación entre los días sin lluvias en las estaciones Popeta y las precipitaciones en la estación Rengo. Por lo cual no se puede suponer la ausencia de lluvia en la estación Rengo, ante esta situación se procede de la siguiente forma para rellenar la estadística en este caso:

- Se crea una función de probabilidad utilizando los datos de la estación Rengo, en los días donde se tiene estadística de precipitación 0 mm en las estación Popeta. Con esta función se rellenas los datos de la estación Rengo para los días sin lluvia en la estaciones Popeta.

Correlaciones entre la estación Popeta y la estación Rengo: Se realizan correlaciones mensuales con la estadística existente entre la estación Popeta y la estación Rengo con lo cual se completa la serie de precipitaciones diarias para la estación Rengo.

Tabla 3-6: Número de días con estadística de precipitación estación Rengo.

AÑO/MES	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
1971-1972	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	29	31	366
1972-1973	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1973-1974	30	30	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	364
1974-1975	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1975-1976	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	29	31	366
1976-1977	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1977-1978	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1978-1979	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1979-1980	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	29	31	366
1980-1981	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1981-1982	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1982-1983	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1983-1984	30	31	30	31	31	29	31	30	31	31	29	31	365
1984-1985	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1985-1986	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1986-1987	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1987-1988	30	31	30	31	31	29	31	30	31	31	29	31	365
1988-1989	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1989-1990	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1990-1991	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1991-1992	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	29	31	366
1992-1993	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1993-1994	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1994-1995	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
1995-1996	30	31	30	29	31	30	31	30	0	0	0	0	242
1996-1997	0	0	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	304
1997-1998	30	31	30	28	31	30	31	30	31	31	28	31	362
1998-1999	27	29	29	31	31	30	31	30	31	31	28	31	359
1999-2000	30	0	0	0	0	0	31	30	31	31	29	31	213
2000-2001	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
2001-2002	30	31	30	30	31	30	31	30	31	31	28	31	364
2002-2003	30	31	30	31	31	30	30	30	31	31	28	31	364
2003-2004	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	29	31	366
2004-2005	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
2005-2006	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
2006-2007	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
2007-2008	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	29	31	366
2008-2009	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365
2009-2010	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	365

3.6.2 Temperatura.

La estadística de temperaturas diarias de la estación Rengo está incompleta. En la Tabla 3-9 se presenta la cantidad de información disponible durante el periodo 1971-2010. Para rellenar la estadística faltante se procede de dos formas:

Correlación entre estación Convento Viejo y estación Rengo.

Debido a que en las correlaciones de las estaciones Rengo y Convento Viejo se obtienen desviaciones estándar superiores a un 1°C, se procede a considerar la desviación estándar en las correlaciones, utilizando la metodología que se presenta a continuación.

- Se agrupa mes a mes los días en que se cuenta con información en ambas estaciones. Para el periodo 1971-2010.
- Se obtiene la diferencia de temperatura media diaria (ΔX) entre ambas estaciones, para cada día.
- Se calcula el promedio de la diferencia de temperatura media diaria entre estaciones para cada mes ($\overline{\Delta X}$).
- Se calcula la desviación estándar (σ) de la diferencia de temperatura media diaria entre estaciones para cada mes.
- Se obtiene la temperatura media diaria de la estación Rengo se calcula como se presenta en la ecuación 3-1, en donde se agrega un valor aleatorio ε_i el cual se acota entre $-\sigma$ y $+\sigma$.

$$T_{Rengo,j} = T_{ConventoViejo,j} + \overline{\Delta X}_i + \varepsilon_i \quad (3-1)$$

Donde:

j = Día rellenado en la estación Rengo.

i = Mes del que corresponde el día rellenado en la estación Rengo.

$\overline{\Delta X}$ = Promedio de la diferencia de temperatura entre la estación Rengo y la estación Convento Viejo.

ε = Valor aleatorio entre $-\sigma$ y $+\sigma$.

En la Tabla 3-7 se presenta un resumen de los valores utilizados para obtener las correlaciones mensuales.

Tabla 3-7: Estadísticos utilizados en las correlaciones Rengo - Convento Viejo.

	Nº Datos	ΔX (°C)	σ (°C)
ENE	1071	-0.047	1.258
FEB	930	-0.027	1.390
MAR	1054	0.139	1.364
ABR	999	0.225	1.498
MAY	954	0.410	1.561
JUN	861	0.433	1.531
JUL	880	0.527	1.398
AGO	976	0.461	1.323
SEP	1007	0.244	1.253
OCT	1160	0.192	1.327
NOV	1140	0.127	1.355
DIC	1100	-0.149	1.294

Promedio mensual estación Rengo.

En la situación de no contar con estadística en la estación Convento Viejo se utiliza la metodología que se presenta a continuación.

- Se ordena mes a mes los días en que se cuenta con información en la estación Rengo 1971-2010.
- Se calcula el promedio de las temperaturas medias diarias en la estación Rengo para cada mes ($\overline{\Delta X}$).
- Se calcula la desviación estándar (σ) de las temperaturas medias diarias en la estación Rengo para cada mes.
- Se obtiene una correlación como se presenta en la ecuación 3-2.

$$T_{Rengo,j} = \overline{\Delta X}_i + \varepsilon_i \quad (3-2)$$

Donde:

j: Día rellenado en la estación Rengo.

i: Mes del que corresponde el día rellenado en la estación Rengo.

$\overline{\Delta X}$: Promedio de las temperaturas medias diarias en la estación Rengo.

ε : Valor aleatorio entre $-\sigma$ y $+\sigma$.

En la Tabla 3-8 se presenta un resumen de los valores utilizados para obtener las correlaciones mensuales.

Tabla 3-8: Estadísticos utilizados para el relleno de datos, estación Rengo.

	Nº Datos	X (°C)	σ (°C)
ENE	1110	20.918	1.745
FEB	966	20.154	1.800
MAR	1091	18.062	2.304
ABR	1058	14.172	2.362
MAY	996	11.407	2.328
JUN	894	9.540	2.263
JUL	928	9.163	2.240
AGO	1009	10.129	2.199
SEP	1058	11.923	2.254
OCT	1180	14.512	2.444
NOV	1150	17.238	2.535
DIC	1158	19.554	2.076

Tabla 3-9: Cantidad de registros de temperatura media diaria Estación Rengo.

AÑO/MES	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
1971-1972	30	30	25	31	29	30	31	30	31	31	29	31	358
1972-1973	30	31	30	14	27	30	29	30	31	31	21	31	335
1973-1974	30	27	27	30	23	24	30	30	31	31	22	31	336
1974-1975	30	29	19	22	26	26	31	30	31	31	28	31	334
1975-1976	30	31	24	21	25	25	31	30	31	31	29	31	339
1976-1977	29	24	22	20	25	24	31	30	31	31	26	31	324
1977-1978	29	27	27	16	26	29	31	30	31	31	28	31	336
1978-1979	28	22	23	31	20	27	30	30	31	30	0	31	303
1979-1980	30	28	12	15	29	16	27	30	24	0	0	17	228
1980-1981	29	31	28	27	28	30	31	30	31	31	28	31	355
1981-1982	30	31	28	24	30	28	30	30	31	31	28	31	352
1982-1983	30	28	27	30	30	30	31	30	31	31	28	31	357
1983-1984	30	28	17	24	28	28	31	30	31	31	29	31	338
1984-1985	30	25	25	29	26	30	31	30	31	31	28	31	347
1985-1986	27	26	30	27	28	30	31	30	31	31	28	31	350
1986-1987	30	30	27	29	29	27	31	30	31	31	28	31	354
1987-1988	30	24	22	27	26	27	31	30	31	31	29	31	339
1988-1989	30	18	23	19	24	26	31	30	31	31	28	31	322
1989-1990	30	31	26	26	31	29	31	26	31	31	28	31	351
1990-1991	30	28	28	24	31	30	30	30	31	31	28	1	322
1991-1992	30	30	27	26	24	30	30	30	31	31	29	31	349
1992-1993	30	31	25	25	27	29	31	30	31	31	28	31	349
1993-1994	30	28	29	20	23	30	28	30	31	31	28	31	339
1994-1995	29	29	27	24	27	30	31	30	31	31	28	31	348
1995-1996	30	31	30	24	21	29	31	30	0	0	0	0	226
1996-1997	0	0	0	24	30	27	31	30	31	31	28	30	262
1997-1998	29	30	22	24	27	30	31	30	31	30	27	26	337
1998-1999	27	25	22	21	17	25	22	22	30	0	0	0	211
1999-2000	0	0	0	0	0	0	31	30	31	30	28	31	181
2000-2001	26	31	29	23	31	18	26	24	21	28	23	26	306
2001-2002	0	0	0	30	31	29	30	28	31	31	28	30	268
2002-2003	29	28	13	20	29	30	31	30	29	31	28	31	329
2003-2004	30	19	30	21	24	28	31	30	31	31	29	31	335
2004-2005	30	28	28	28	27	30	31	30	31	31	28	31	353
2005-2006	30	30	29	29	30	29	31	30	31	31	28	31	359
2006-2007	30	31	30	27	29	30	31	30	31	31	28	31	359
2007-2008	28	20	13	22	16	29	31	30	31	31	29	31	311
2008-2009	30	25	25	31	27	30	31	30	31	31	28	31	350
2009-2010	28	31	25	23	28	29	31	30	31	31	28	31	346

4. CULTIVOS AGRÍCOLAS.

La cuenca de Río Claro en Tunca en la VI Región, es de uso predominantemente agrícola en donde se observa una gran variedad de cultivos que abarcan una extensión de 6317 hectáreas. Estos cultivos se ubican predominantemente en el valle. Los cultivos permanentes ocupan la mayor extensión de los terrenos como se aprecia en la Figura 4-1. En la zona existe una Junta de Vigilancia, denominada Junta de Vigilancia Río Claro de Rengo 1° Sección, la cual comprende los usuarios del Río Claro aguas arriba de la ruta 5 sur.

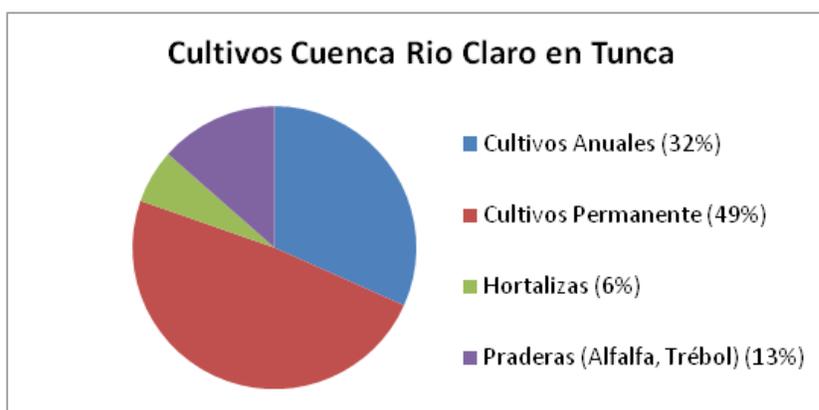


Figura 4-1: Cultivos cuenca Río Claro en Tunca.

4.1 Tipos de Cultivos.

La distribución de cada tipo de cultivos se puede observar en la Figura 4-2 los cultivos anuales donde destacan los cereales maíz y trigo representando casi un 99% de producción de la cuenca. En la Figura 4-3 los cultivos permanentes como son los frutales, tales como vides y manzanos que ocupan una mayor extensión y en la Figura 4-4 las hortalizas como tomates y cebollas. En resumen se observa que el manzano y maíz son los cultivos más producidos en la cuenca y en conjunto representa más del 50% de la producción.

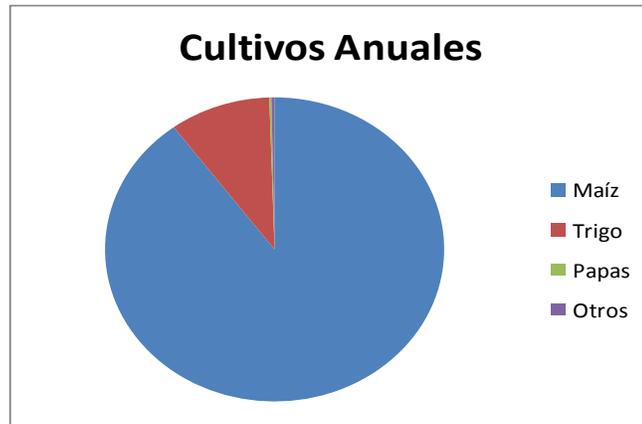


Figura 4-2: Cultivos anuales.

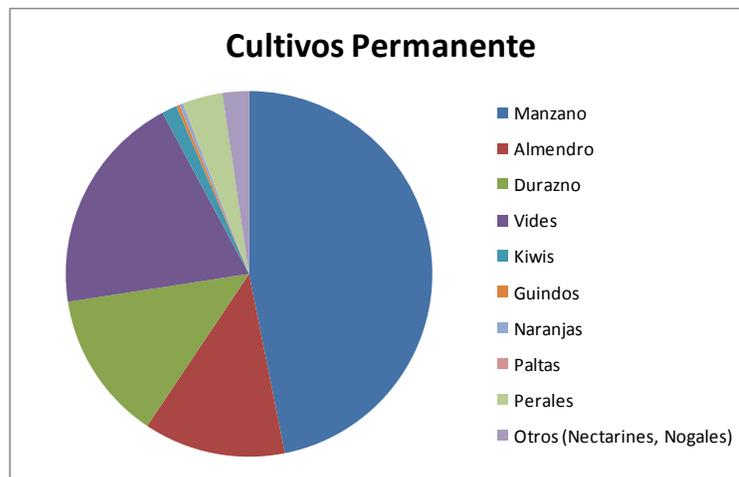


Figura 4-3: Cultivos permanente.

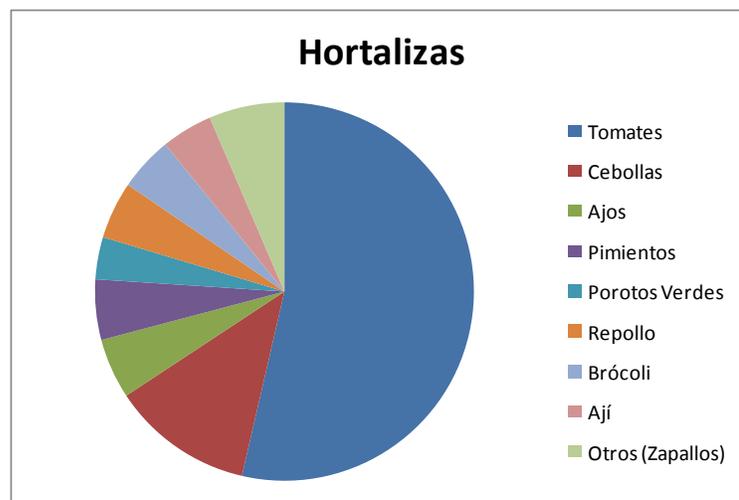


Figura 4-4: Cultivos hortalizas.

En la Figura 4-5 se presenta una comparación de la superficie cultivada en la actualidad y la superficie agrícola que no se encuentra utilizada, se observa que existe una amplia superficie disponible para aumentar la producción agrícola.

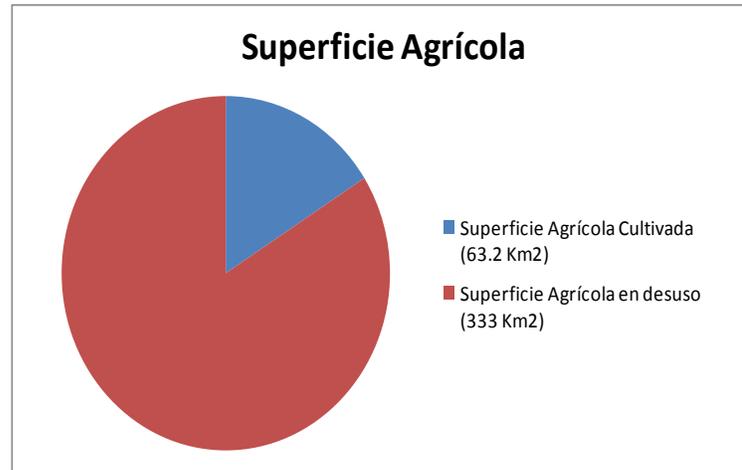


Figura 4-5: Superficie agrícola.

4.2 Coeficiente de Cultivos.

Se han determinado para cada cultivo por mes los Coeficientes de Cultivo (kc). Tanto los valores como en el procedimiento de obtención, se basaron en el FAO Irrigation and Drainage Paper 56 (Allen, 2009). Los coeficientes se presentan en la Tabla 4-1.

El maíz es el cultivo más importante en la zona, el cual tiene su mayor demanda en los meses de enero y febrero, meses donde la oferta hídrica es más baja. El segundo cultivo en importancia es el manzano el cual también posee el máximo de la demanda en los meses de verano. Por otro lado se tienen cultivos como las paltas y naranjas las cuales tienen una demanda pareja durante el año sin máximo en la época seca, lo cual puede ser importante para una redistribución de los cultivos.

Tabla 4-1: Coeficientes de cultivo.

	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
Maíz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.95	1.20	1.20	0.83	0.45	0.00
Trigo	0.55	0.75	0.95	1.15	1.15	1.15	1.04	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
Papas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.85	1.15	0.75	0.00
Otros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.95	1.20	1.20	0.83	0.45	0.00
Manzano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.75	0.90	1.05	1.05	1.05	0.95	0.80
Almendro	0.00	0.00	0.00	0.40	0.55	0.65	0.80	0.90	0.90	0.90	0.78	0.65
Durazno	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	0.75	0.90	1.05	1.05	1.05	0.90	0.75
Vides	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.55	0.75	0.85	0.85	0.85	0.65	0.45
Kiwis	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.65	0.84	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Guindos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.75	0.90	1.05	1.05	1.05	0.95	0.80
Naranjas	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.62	0.60	0.60	0.62	0.64	0.65
Paltas	0.75	0.75	0.60	0.60	0.60	0.65	0.75	0.85	0.85	0.85	0.82	0.78
Perales	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.75	0.90	1.05	1.05	1.05	0.95	0.80
Nectarines, Nogales	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	0.75	0.90	1.05	1.05	1.05	0.90	0.75
Tomates	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.78	0.96	1.15	1.15	0.80	0.00
Cebollas	0.70	0.70	0.85	0.85	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00
Ajos	0.00	0.70	0.80	0.85	0.95	1.00	1.00	0.85	0.75	0.70	0.00	0.00
Pimientos	0.00	0.00	0.00	0.60	0.83	1.05	1.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00
Porotos Verdes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.78	1.05	1.05	0.90	0.00	0.00	0.00
Repollo	0.00	0.00	0.00	0.70	1.05	1.05	1.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00
Brócoli	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.88	1.05	1.05	0.95
Ají	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.78	1.05	1.00	0.90	0.00	0.00	0.00
Zapallos	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.73	0.95	0.95
Alfalfa, Trébol	0.61	0.58	0.61	0.71	0.76	0.80	0.81	0.81	0.75	0.71	0.64	0.64

4.3 Eficiencia de los métodos de riego de los cultivos.

Para obtener la eficiencia de riego de cada cultivo, se obtienen los métodos de riego para el caso de los frutales, los métodos de riego utilizados fueron obtenidos directamente del Catastro Frutícola (CIREN, 2009). En cuanto a los métodos de riego utilizados en cultivos anuales y praderas, éstos fueron estimados en función de otros estudios realizados en la zona por la Dirección de Obras Hidráulicas y la Comisión Nacional de Riego.

Las eficiencias de riego consideradas para los diferentes cultivos asignados en situación actual, corresponden a valores que se producen a nivel potrero. Estas eficiencias varían según el método de riego utilizado, sea éste gravitacional o tecnificado. Los valores presentados se han obtenido de los coeficientes contenidos en la Ley No. 18.450, de subsidio al riego y del informe Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile (DGA, 1996). Las eficiencias consideradas para cada una de los cultivos se presentan en la Figura 4-6.

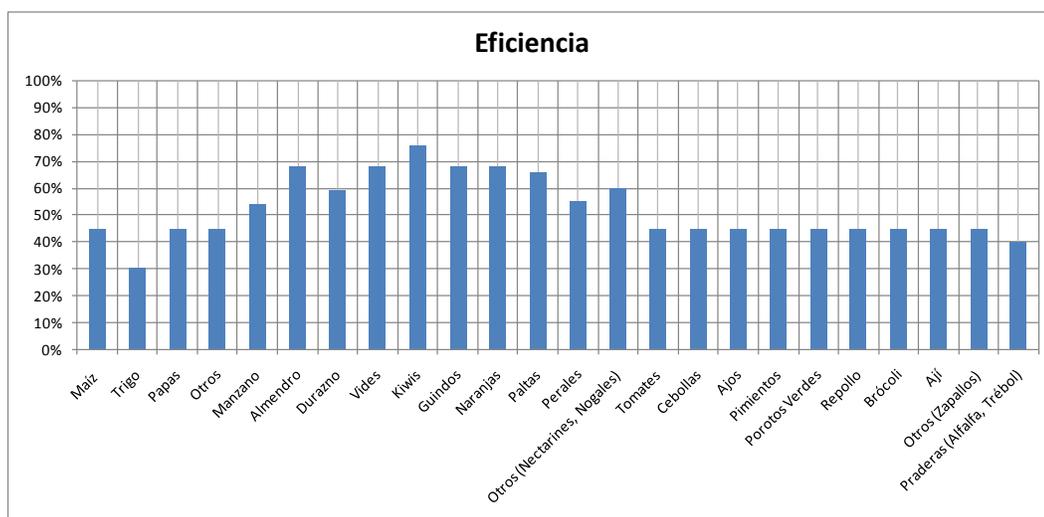


Figura 4-6: Eficiencia de los métodos de riego de los cultivos.

Estas eficiencias son mejorables considerando que en zonas de escasez como Copiapó la eficiencia supera el 70%.

4.4 Demanda de los Cultivos.

La demanda de los cultivos se calcula a través del modelo WEAP, basado en la evapotranspiración de referencia y los coeficientes de cultivo presentados en el presente capítulo. Un análisis más extenso se realiza en el capítulo V.

4.5 Análisis económico de los Cultivos.

Con la finalidad de analizar posibles cambios en los cultivos para una mejor utilización del recurso hídrico, se realizó un análisis económico de algunos cultivos presentes en la zona, a partir de datos obtenidos en diferentes estudios y publicaciones de organismos como; Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) y CIREN-CORFO.

Los cultivos anuales a considerar, serán maíz y papa, las hortalizas de tomates y cebollas y los cultivos permanentes de manzana, palto, vides y almendros. Se han seleccionado estos cultivos porque son predominantes en la zona y se cultivan desde la V a la VII región, lo cual es apropiado para que los cultivos puedan seguir produciéndose en la zona ante posibles cambios climáticos.

4.5.1 Maíz.

En Chile el maíz se cultiva a lo largo de todo el País, la VI Región es la mayor productora alcanzando en la temporada 2006-2007 el 46% del total nacional con 47 mil hectáreas.

La producción nacional, fluctúa entre 6.2 y 15.1 millones de quintales. Esta oferta no logra satisfacer la demanda, por lo cual es necesario importar desde Argentina y Estados Unidos. El autoabastecimiento fluctúa entre el 41% y 63%.

Las importaciones de maíz entre 1990 y el año 2007, en términos de volumen, aumentaron de 89 mil toneladas a 1.75 millones de toneladas. En valor monetario, dicha evolución alcanzó a más de treinta veces, consecuencia del aumento que experimentaron los precios internacionales. En los años siguientes, las internaciones de maíz descendieron debido al aumento de la producción doméstica y al incremento de los precios internacionales.

Al año 2011 las importaciones de este cereal totalizaron 660 mil toneladas provenientes principalmente de Argentina y Uruguay. En los últimos años el precio internacional ha aumentado debido a una relación más ajustada de la oferta y demanda. La producción en los últimos años ha descendido, aun cuando se prevé un aumento en la cosecha mundial se espera que los precios se mantengan firmes, ya que la demanda es estable y el maíz se utiliza como materia prima en la producción de biocombustibles.

4.5.2 Papas.

Este cultivo se distribuye entre la Región de Coquimbo y la Región de Los Lagos. En la temporada 2006/07 en la VI Región se sembraron 1689 hectáreas, el 3.1% del total nacional.

Según la ODEPA la superficie cultivada ha tenido muchas fluctuaciones, entre tanto, los rendimientos han aumentado significativamente lo que se atribuye a la mejora de tecnologías en el cultivo. De hecho en el año 2010/11 se registró la mayor producción, con una superficie cultivada muy baja. La cosecha nacional del tubérculo ha aumentado desde 7.9 a 17 millones de quintales en los últimos trece años.

La producción de papas apunta al consumo interno, las exportaciones de estos tuberculos ha disminuido, así en el año 1993 se enviaron 2,022 toneladas, 1,452 toneladas se exportaron en 1998, y en los últimos años se ha mantenido estable entorno a 673 toneladas.

Tradicionalmente Argentina era el principal demandante de este tubérculo, al año 2000 representaba un 58% de la ventas nacionales. Actualmente es Brasil el que concentra los envíos con un 79% de las ventas. Esto se debe a que Argentina ha potenciado su

producción interna.

4.5.3 Tomates.

El tomate para consumo fresco es una de las hortalizas más importantes cultivadas en el país. Esta especie si bien se extiende por todo el país, se concentra en forma importante en la zona centro.

En la temporada 2006/07 el tomate para consumo fresco en la VI Región abarcó una superficie de 1,066 hectáreas, de las cuales el 8.2% se cultivó en invernadero.

En general, el crecimiento experimentado por esta especie a nivel nacional ha sido consecuencia de las buenas perspectivas de exportación y de la sostenida demanda interna que favorece a esta hortaliza durante todo el año.

Si bien los envíos al exterior de tomate fresco entre 1990 y 2011 han exhibido alzas y bajas, el año 2001 las exportaciones llegaban a 6,530 toneladas. A partir de ese año las exportaciones cayeron a niveles marginales, experimentando en 2004 y 2010 una expansión, hasta situarse en torno a 1,000 toneladas.

En Estados Unidos la cosecha es entre junio y octubre, necesitando importar grandes cantidades en los meses entre enero y mayo lo que coincide con la oferta chilena y los precios en el mercado doméstico son los más bajos.

En Chile el tomate industrial se concentra en la VI y VII Región debido a la cercanía de los centros de procesamiento como Iansafrut, Malloa, Agrozzi. La superficie destinada a tomate industrial de acuerdo al (INE, 1997), pasó de ser en la temporada 1996/97 del orden de 3,388 hectáreas, a 2,630 hectáreas en la temporada 2006/07 monto que representa el 36% de la producción nacional.

Chile se ha transformado en un importante oferente de productos derivados del tomate, tales como pastas, pulpas, conservas y deshidratados. A nivel mundial llega al 4% de la producción total de tomate industrial.

El crecimiento experimentado por el tomate industrial se ha basado en la disminución de tasas arancelarias a las exportaciones en un sin número de países como Canadá, Perú, Ecuador, Colombia, México, Venezuela y Corea. De esta manera las exportaciones chilenas de purés y jugos de tomate en el transcurso de la década de 1990 experimentaron un importante incremento. En 1990 los envíos totalizaron 51 mil

toneladas y en 1999 se logró el mayor nivel de exportaciones, con 112 mil toneladas. Al año 2011 la exportación fue del orden de 92 mil toneladas.

Bajo este contexto, el futuro es positivo siempre que se obtengan altos rendimientos y se aprovechen las ventajas climáticas y tecnológicas que posee Chile.

4.5.4 **Cebolla.**

Es la hortaliza por excelencia que se cultiva en el país; la superficie que se cultiva ha disminuido significativamente pues a comienzos de la década del 90 el área anual superó las 10 mil hectáreas, bajando hacia fines de la década a 5 mil hectáreas. Según cifras del (INE, 2007), en el periodo de 2006/07 ha aumentado a 6 mil hectáreas.

En la VI Región en la temporada 2006/07 registró una superficie de cultivo del orden de 1.866 hectáreas. Esta hortaliza esta cultivada desde la región de Valparaíso hasta la región de la Araucanía pero se concentra en un 75% entre la V y VI Región, incluida el Área Metropolitana.

En términos generales, es preciso indicar que el destino de la producción es mayoritariamente el mercado interno, aunque también una parte se exporta. Las exportaciones de cebollas frescas o refrigeradas han sido bastante fluctuantes a través del tiempo, moviéndose entre 19 mil toneladas en 1993 y 90,000 toneladas en 2008.

Las perspectivas de este rubro dependen de la consolidación en los mercados internacionales, estimándose que los envíos a Europa deberían aumentar al bajar los términos arancelarios desde el 14% a 0%.

En el ámbito de las exportaciones se debe señalar que tanto la V Región como la Metropolitana poseen ventajas comparativas en términos de infraestructura y cercanía a los puertos, en relación al área de estudio, por lo cual se propone el cultivo de cebolla temprana, la que alcanzaría mayores precios en los mercados mayoristas de Santiago.

4.5.5 **Manzana.**

La manzana, en términos de superficie, es la tercera especie frutal en importancia cultivada en el país, después de uva de mesa y palto. Esta especie si bien se distribuye entre la IV y la X Región, se concentra fundamentalmente en la VI y VII Región, las que en conjunto representan casi el 85% del total nacional.

La superficie dedicada a esta pomácea experimentó un significativo incremento, al pasar de 24 a 40 mil hectáreas desde 1990 a 1997. Posteriormente, las plantaciones se estabilizaron, pero en 2007 el INE a través de su VII Censo Nacional Agropecuario da cuenta de una superficie total del orden de 37 hectáreas. De ella, el 76% corresponde a variedades rojas y el 24% a variedades verdes. Se debe indicar que en 2007 del total plantado, el 14% se encontraba en etapa de formación.

Así, según el VII Censo Nacional Agropecuario realizado por INE en 2007, la VI Región cuenta con una superficie de 10,547 hectáreas, lo que representa 28 % del área ocupada por esta especie en el país. El destino de la producción nacional es principalmente la exportación, y los residuos de este comercio se distribuyen entre el consumo interno y la agroindustria.

La tendencia de envíos al exterior de manzana fresca ha sido al alza, manifestándose ya en el año 2011 en exportaciones de más de 800 mil toneladas. Las exportaciones de néctar y jugo de manzana, por su parte, han mostrado fuertes fluctuaciones entre 1990 y el año 2011, pero la tendencia ha sido al alza. La evolución de las transacciones de jugo de manzana en el exterior depende estrechamente del stock de los países consumidores y de la competencia que ha ejercido China en los últimos años.

El futuro de esta fruta, en estado fresco, se basa en el desarrollo del mercado internacional. La agroindustria, por el aumento de las exportaciones, ha subido el precio al productor por la fruta fresca, provocando perspectivas para jugo favorables.

4.5.6 **Palto.**

Hoy el palto es la segunda especie frutal cultivada en Chile en términos de superficie, tras de la uva de mesa.

Según estadísticas del (INE, 2007) para la temporada 2006/07 existía una superficie dedicada a esta especie del orden de 39,303 hectáreas, mientras que en la temporada 1997 solo existían 16,919 hectáreas. En lo que respecta a la región en 2007 existían 2,908 hectáreas cultivadas.

Asimismo, según las estadísticas de ODEPA, la producción ha exhibido una notable expansión, al pasar de 38 mil toneladas en la temporada 1989/90 a 160 mil toneladas en el período 2004/05. Este comportamiento debería continuar con más fuerza en los próximos años, en la medida que se inicien las cosechas de los huertos nuevos, en los que se esperan rendimientos superiores, debido a la adopción de nuevas tecnologías.

El destino de la producción de paltas es fundamentalmente la exportación y, en menor proporción, al mercado interno. No obstante, como se estima una mayor oferta en los próximos años una alternativa para este producto sería la industrialización. En relación a las ventas al exterior, entre 1990 y 2011 la tendencia ha sido al alza. Llegando a 102 mil toneladas en 2011.

Estos datos de crecimientos deberían traducirse en un deterioro de los precios. Por lo cual es prioritario diversificar los mercados de exportación, promover el consumo nacional de esta fruta y optar por el desarrollo de la agroindustria. Aun cuando existen agentes ligados al sector que son optimistas e indican que el consumo per cápita a nivel mundial seguirá su tendencia al alza lo que favorecerá la colocación de grandes volúmenes sin afectar los precios.

4.5.7 Vides.

La uva de mesa es la principal fruta cultivada en el país, se concentra en un 99% entre las III y VI Región.

Según el (INE, 2007) las plantaciones de uva de mesa en la temporada 2006/07 se situaban en torno a 62 mil hectáreas concentradas en 27% en la VI Región. Esto marca un gran crecimiento si se compara con el censo agropecuario del 1997 donde existían 46 mil hectáreas. La misma tendencia se observa en la VI Región que pasó desde 9,104 a 16,923 hectáreas.

La producción de uva de mesa es fundamentalmente de exportación, el resto se comercializa en el mercado interno y la agroindustria de pasas entre otros. Las exportaciones chilenas han tenido una sostenida tendencia al alza, en el año 2011 con 853 mil toneladas en tanto que en el año 1991 eran de 425 mil toneladas.

En lo que respecta al cultivo de la vid vinífera se localizan entre la VI y la VIII Región, las que en conjunto representan más del 85% de la superficie dedicada a este rubro. En el año 1993 la superficie cultivada alcanzaba 53 mil hectáreas, esta superficie aumentó hasta que el año 2004 abarcaba 110 mil hectáreas. Posteriormente según el (INE, 2007) el área dedicada a vid vinífera abarcaba 118 mil hectáreas.

En 2007 en la VI Región la superficie ascendía a 34 mil hectáreas, Cabe señalar que las plantaciones de uva vinífera en esta región, sufrieron una importante expansión desde 11 mil hectáreas en el año 1997 hasta 34 mil en el año 2007.

El principal producto exportado son los vinos con denominación de origen, cuyas ventas en ese período se elevaron desde 22 millones de litros a 397 millones de litros.

En el plano nacional el consumo interno de vino experimentó un fuerte aumento pasando de 13,1 litros en 1997 a 22,3 litros en 2003 per cápita.

Esta evolución, junto a la experimentada por las exportaciones, confirman las expectativas favorables para este sector. En general la tendencia es hacia una expansión de las plantaciones de esta especie, y el objetivo es la exportación de vinos finos con denominación de origen.

No obstante lo anterior, el fuerte aumento de la producción de vinos finos y la creciente competencia internacional, se recomienda ser muy conservador en la promoción de nuevas plantaciones. Sólo la producción de vinos de alta calidad podrá competir con éxito en el mercado internacional.

4.5.8 Almendro.

Las plantaciones de almendros han exhibido una evolución, en la década del 90 el crecimiento fue en torno del 45%, con una superficie ocupada de 5.7 mil hectáreas (INE, 1997), luego para el 2007 ascendía a 7.7 mil hectáreas. De los cuales el 28% se encontraba en formación y el 72% en producción (INE, 2007). En la VI Región el incremento del área plantada con almendros alcanzó a 32,8%, entre los años 1997 y 2007.

Las exportaciones de almendras sin cáscara han aumentado sostenidamente en los últimos años, ya que desde 1990 a 2011 se expandieron en casi 16 veces, al pasar desde 555 toneladas a 8.800 toneladas. En lo que respecta a las exportaciones de almendras con cáscara han sido más erráticas que las anteriores, la tendencia ha sido al alza.

4.6 Perspectivas de desarrollo de los cultivos.

La gran cantidad de acuerdos de libre comercio o de tasas preferentes para las exportaciones chilenas han sido beneficiosos para el sector agrícola y lo seguirán siendo aún más ya que las exportaciones esperan importantes crecimientos.

Un plano negativo a considerar es que la Unión Europea y Estados Unidos subsidian las producciones agrícolas exportadas tales como cereales, azúcar y lácteos, lo cual dificulta la competitividad de los productos chilenos que no son subsidiados. Pero con la firma de los TLC, foros de APEC y la Ronda de Doha, se ha instalado la eliminación de estos subsidios que se espera se concreten en el corto plazo.

Debido a la rebaja de aranceles de internación las exportaciones de vino, frutas frescas como también hortalizas frescas deberían continuar la tendencia de una demanda creciente y estable.

En la Tabla 4-2 se recopila las perspectivas en el largo plazo para los cultivos analizados en el presente capítulo y además de otros cultivos que se ha podido recabar información desde los Censos agropecuarios del INE o bien desde los informes de la ODEPA.

Tabla 4-2: Perspectivas para los cultivos.

Cultivo	Perspectiva
Maíz Grano	Negativa
Papa Semilla	Positiva
Papa Consumo	Positiva
Trigo	Negativa
Ajo	Positiva
Cebolla	Positiva
Tomate	Positiva
Almendra	Positiva
Durazno	Positiva
Limón	Positiva
Naranja	Positiva
Manzanas	Positiva
Nectarines	Positiva
Paltas	Positiva
Peras	Positiva
Uva de Mesa	Positiva
Vinos	Positiva

Asimismo en el mundo de la agricultura existe una preocupación internacional, en especial en países de la Unión Europea ante el continuo aumento de los productos transgénicos y sus posibles efectos en la salud. Por lo cual los agricultores deben procurar mantener productos de buena calidad y confiables para la comunidad internacional privilegiando el uso de semillas sin alteraciones genéticas y el uso de fertilizantes y plaguicidas aprobados y aceptados por los países importadores, o de lo contrario las proyecciones podrían cambiar vertiginosamente al cerrarse mercados que no admitan producciones de este tipo.

5. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO WEAP.

La cuenca del Río Claro cuenta con dos estaciones fluviométricas en la zona de estudio; Río Claro en Tunca y Río Claro en Hacienda las Nieves. Estas estaciones se utilizan para calibrar y validar el modelo, para lo cual se emplean los registros de caudales medios diarios de los años 1993-2006 para la estación Río Claro en Hacienda las Nieves y 1994-2006 para la estación Río Claro en Tunca.

A partir de las estaciones meteorológicas Rengo y Hacienda Las Nieves, se obtuvo la estadística de precipitaciones y de la estación Rengo las temperaturas necesarias para modelar la cuenca, en el periodo 1989-2006. La modelación se realiza en base a bandas de elevación, a las cuales se le asigna un uso de suelo, precipitaciones, temperatura, entre otras variables meteorológicas.

La división en bandas se muestra en la Figura 5-1 y la información de las bandas en la Tabla 5-1, la nomenclatura para nombrar en las bandas hace referencia a la subcuenca, las que pertenecen las bandas LC corresponden a la cuenca aportante al embalse Los Cristales, las bandas RHN son aquellas que aportan a la estación fluviométrica Río Claro en Hacienda Las Nieves y las bandas RCT son las cuencas que aportan solamente a la estación fluviométrica Río Claro en Tunca.

Tabla 5-1: Bandas de Elevación zona de Estudio.

Banda	Elevación Banda [m]	Elevación media [m]	Área [Km²]
RCT01	207-425	316	57.63
RCT02	425-685	555	175.88
RCT03	685-1012	849	200.19
RCT04	1012-1340	1176	125.1
RCT05	1340-1668	1504	90.76
RCT06	1668-2023	1846	37.74
RHN07	2023-2392	2208	40.13
RHN08	2392-2747	2570	73.94
RHN09	2747-3102	2925	86.22
LC09	2747-3102	2925	7.09
LC10	3102-3543	3323	21.55
RHN10	3102-3690	3396	21.53

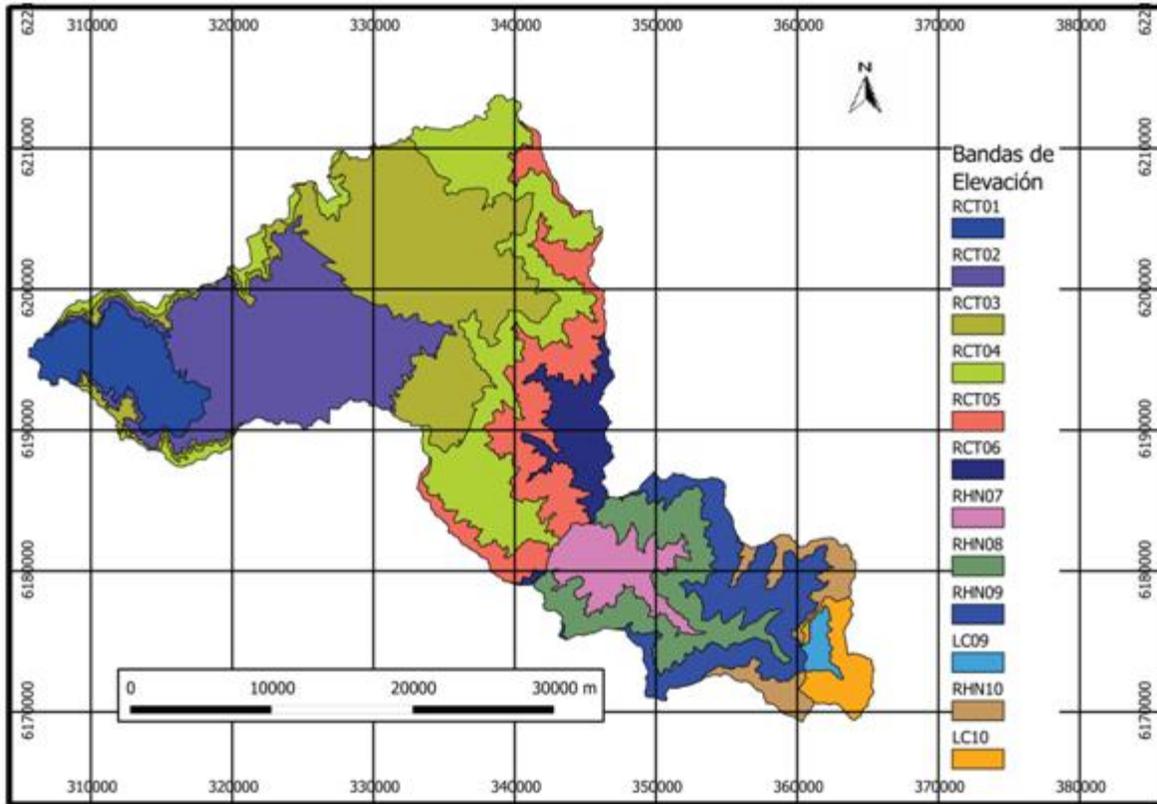


Figura 5-1: División en bandas de elevación cuenca Río Claro en Tunca.

5.1 Distribución de parámetros meteorológicos.

A partir de los datos de la estación Meteorológica Rengo se distribuyen los valores para las diez bandas a partir de un gradiente (G_j) y la variación de elevación, con respecto a la estación Rengo (Δh_j), para la variable meteorológica a distribuir.

5.1.1 Temperatura

La distribución de temperaturas se realiza utilizando la ecuación 5-1.

$$T_{banda,día} = T_{Rengo,día} + G_{día} * \Delta h_{banda} \quad (5-1)$$

Para obtener el gradiente de temperatura se utiliza la ecuación 5-2.

$$\begin{aligned} G_{día} &= GTS \quad (\text{para día sin lluvia}) \\ G_{día} &= GTC \quad (\text{para día con lluvia}) \end{aligned} \quad (5-2)$$

Donde GTS y GTC es el gradiente de temperatura para días sin lluvia y con lluvia respectivamente, calculado por (Figueroa, 2008) y corresponden a -0.21 [$^{\circ}\text{C}/100$ m] para los días con lluvia y -0.54 [$^{\circ}\text{C}/100$ m] para los días sin lluvia.

5.1.2 Precipitación

La distribución de precipitaciones se realiza utilizando la ecuación 5-3, para cada estación. Para la cuenca superior, a partir de una altura de 700 msnm, se utiliza la estación Río Claro en Hacienda las Nieves. En las bandas más bajas que 700 msnm se utiliza la estación Rengo.

$$\begin{aligned} Pp_{banda,día} &= Pp_{Rengo,día} + G_{día} * \Delta h_{banda} \\ Pp_{banda,día} &= Pp_{chn,día} + F * G_{día} * \Delta h_{banda} \end{aligned} \quad (5-3)$$

Para el cálculo del gradiente $G_{día}$ se utiliza los datos de precipitación de las estaciones Popeta, Río Claro en Hacienda las Nieves y Rengo, a partir de las cuales se calculan los gradientes diarios de precipitación, a partir de la ecuación 5-4, para la estadística rellena entre los años 1976-2010.

$$G_i = \frac{Pp_a - Pp_b}{H_b - H_a} \quad (5-4)$$

Donde a y b son las tres estaciones con estadística de precipitaciones. Con estos gradientes diarios se calculan los gradientes mensuales, los cuales son presentados en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Gradiente de precipitación mensual.

Mes	Gradiente [mm/100 m]
Enero	0.44
Febrero	0.81
Marzo	0.19
Abril	1.17
Mayo	1.40
Junio	1.39
Julio	1.50
Agosto	1.17
Septiembre	0.88
Octubre	0.73
Noviembre	0.94
Diciembre	0.66

Debido a que el gradiente disminuye a medida que aumenta la altura se procede a utilizar el factor F, para atenuar el gradiente para la zona alta, este factor se calibra para obtener el volumen de salida de la cuenca medida en las estaciones fluviométricas de control. Estos factores se indican en la Tabla 5-3 para cada banda de elevación.

Tabla 5-3: Factores de corrección gradiente de Precipitación.

Banda	RCT05	RHN07	RCT06	RHN08	RHN09	LC09	RHN10	LC10
F	0.74	0.71	0.57	0.54	0.30	0.23	0.06	0.02

5.1.3 Humedad Relativa

La humedad relativa obtuvo de las estadísticas de la estación meteorológica de Rengo, la cual tiene un promedio anual del 70%. Esta variable se supone igual en cada una de las bandas debido a la ausencia de más estaciones para formar un gradiente que permita distribuir de mejor forma el parámetro en la cuenca en estudio.

5.1.4 Viento

Se utiliza la estadística de viento desde el año 1980 (Observatorio Eólico, 2013), para cada banda de elevación en un intervalo diario de datos. Este explorador eólico es una herramienta creada por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para el Ministerio de Energía que ha sido desarrollada para promover la energía eólica en nuestro país, en el marco del desarrollo de las energías renovables no convencionales.

5.2 Embalse Los Cristales.

El embalse Los Cristales regula el régimen natural de la cuenca del Río Claro en Tunca. Es por eso que se ha delimitado el área aportante al embalse, para poder considerar las amortiguaciones que provoca en el flujo del Río Claro. En la Figura 5-2 se observa la configuración para modelar el Embalse, la cual es un objeto de Reserva, denominado Embalse y dos áreas aportantes a este RCC1 y RCC2.

Para caracterizar el embalse se utiliza la curva de embalse, caudal máximo de salida y la evaporación que se presentaron en el capítulo III. La regla de uso supuesta es llenar el embalse en los meses de lluvia y utilizar este flujo en los meses de febrero, marzo, y abril con un caudal constante de 3 m³/s.

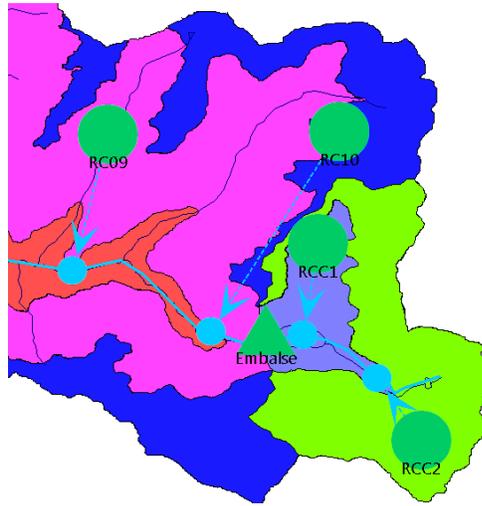


Figura 5-2: Caracterización zona del embalse Los Cristales en WEAP.

En estas consideraciones el embalse se comporta en los años de calibración y validación como se muestra en la Figura 5-3, mientras en la Figura 5-4 se aprecia el caudal de salida del embalse los Cristales en el mismo periodo.

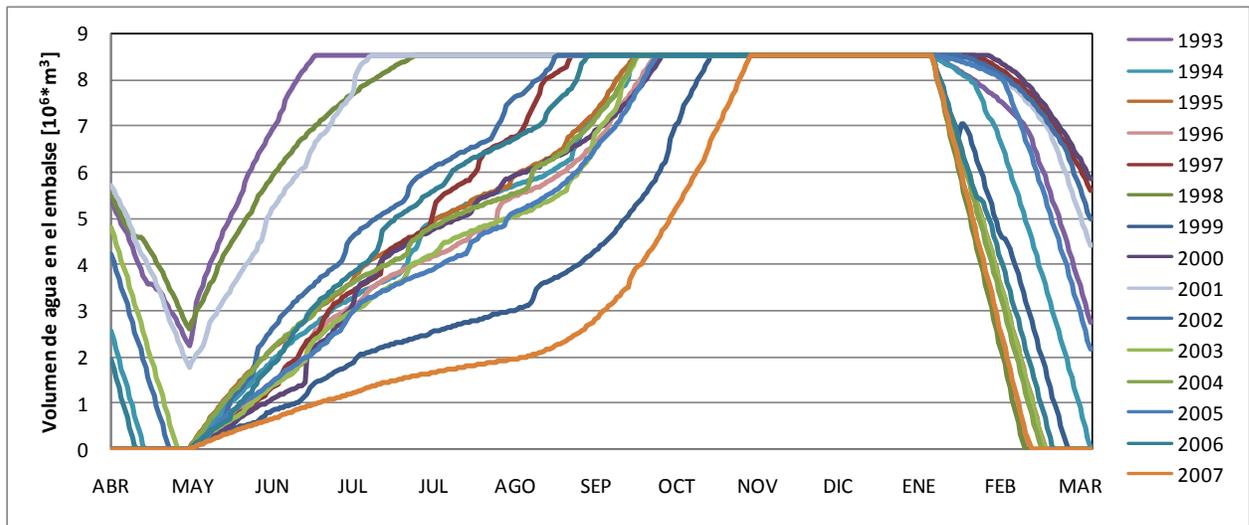


Figura 5-3: Almacenamiento en embalse Los Cristales periodo de calibración y validación.

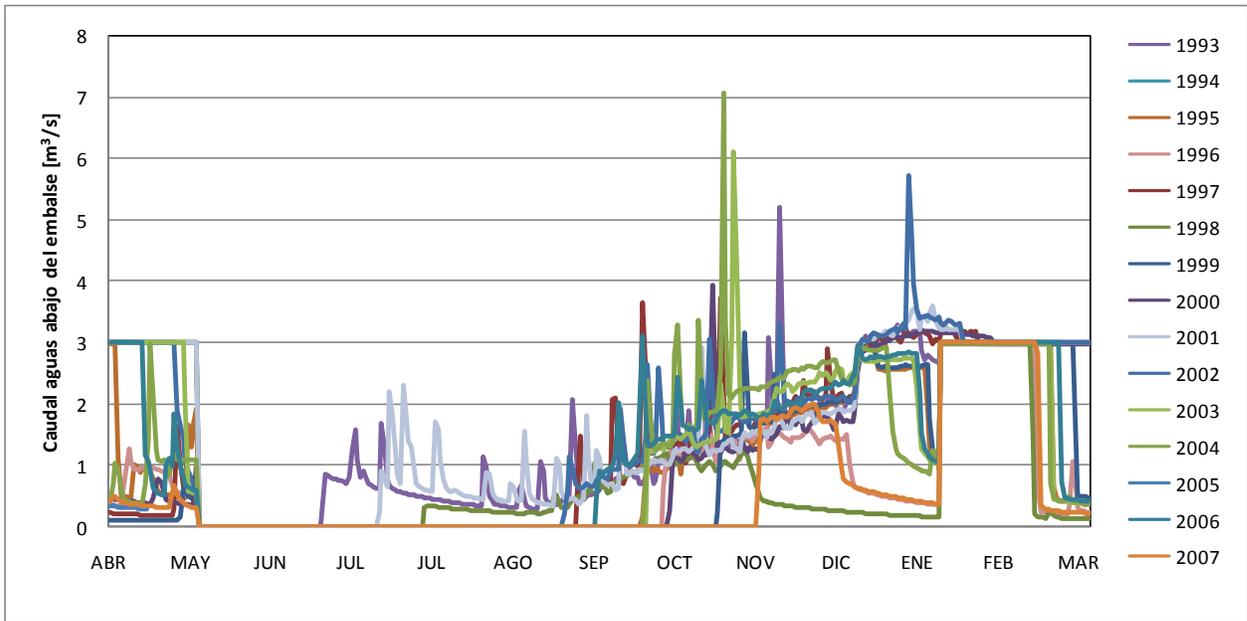


Figura 5-4: Caudales de entrega del embalse en el periodo de calibración y validación.

5.3 Demanda Agrícola.

Se crearon “sitios de demanda” especiales para las bandas donde existe superficie agrícola. Estas bandas deben ser creadas ante la imposibilidad de WEAP para regar un porcentaje del “sitios de demanda”, solo permite regarlo completamente o bien no regarlo, por lo cual se crean 5 “sitios de demanda” en las bandas donde existen zonas agrícolas, estos “sitios de demanda” cuentan con un enlace desde el río y otro hacia el río para los recursos hídricos no utilizados. En el enlace proveniente del río se indican las restricciones debido a los derechos de agua de cada banda, los cuales se muestran en la Tabla 5-4, y han sido obtenidos por (Salgado, 2011).

En la Figura 5-5 se observan los “sitios de demanda” definidos por las bandas de elevación y los “sitios de demanda” definidos para la agricultura, la nomenclatura usada para estos sitios es agregarle una “A (1)” a la nomenclatura respectiva de la banda de elevación.

Tabla 5-4: Demanda de agua por banda de Elevación.

Banda	Q (m³/s)
Banda RC01A	4.26
Banda RC02A	12.23
Banda RC03A	13.04
Banda RC04A	2.94
Banda RC07A	0.02

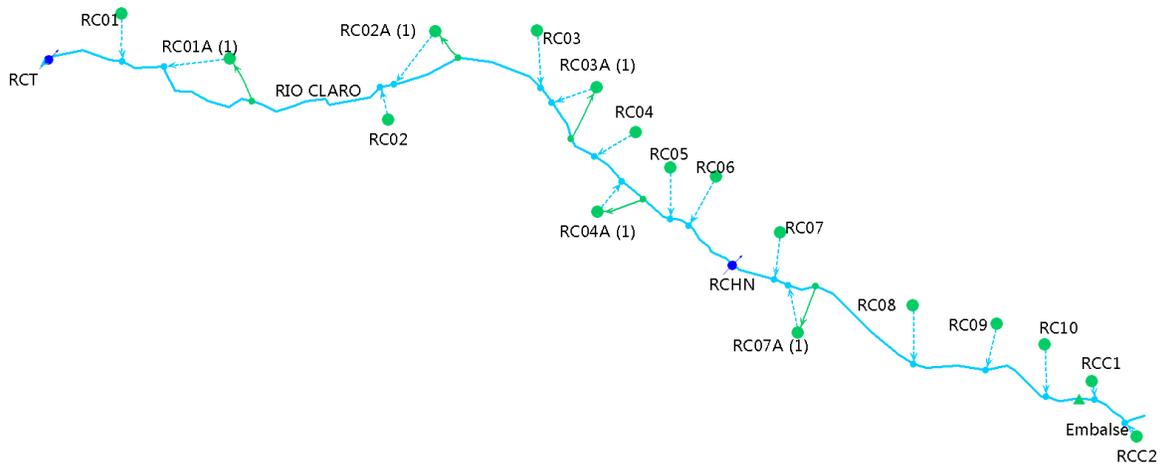


Figura 5-5: Sitios de demanda Agrícola.

La demanda de los cultivos es calculada a través de la demanda evapotranspirativa de los cultivos calculada por WEAP, y la eficiencia se calcula a partir de esta demanda y la cantidad de agua entregada en cada “sitios de demanda”.

Se ha modelado los “sitios de demanda” de esta manera de tal forma que se pueda analizar la variación de la demanda que se producen debido a los cambios de precipitaciones y temperaturas en los escenarios futuros. La opción de disponer una demanda fija calculada previamente fue desechada ya que no es útil para analizar los cambios en las temperaturas y precipitaciones.

La eficiencia para la cuenca se ha estimado en un 51%, por lo cual se busca obtener esta relación entre la provisión entregada, Figura 5-6, y la demanda de los cultivos, Figura 5-7.

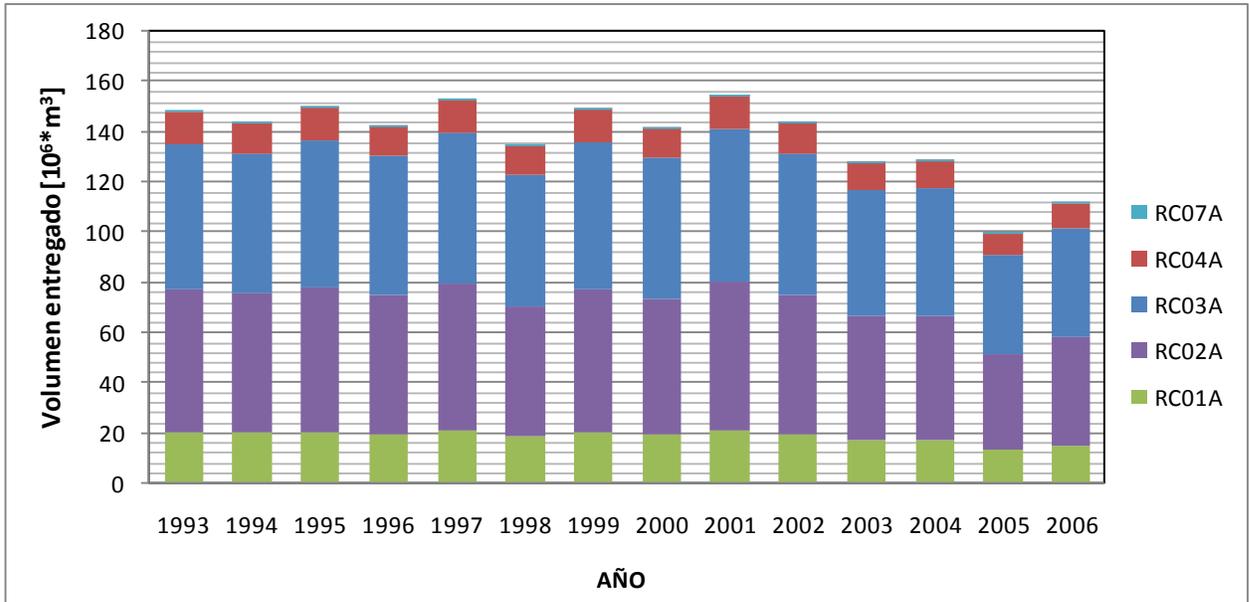


Figura 5-6: Provisión entregada en cada banda en el periodo de calibración y validación.

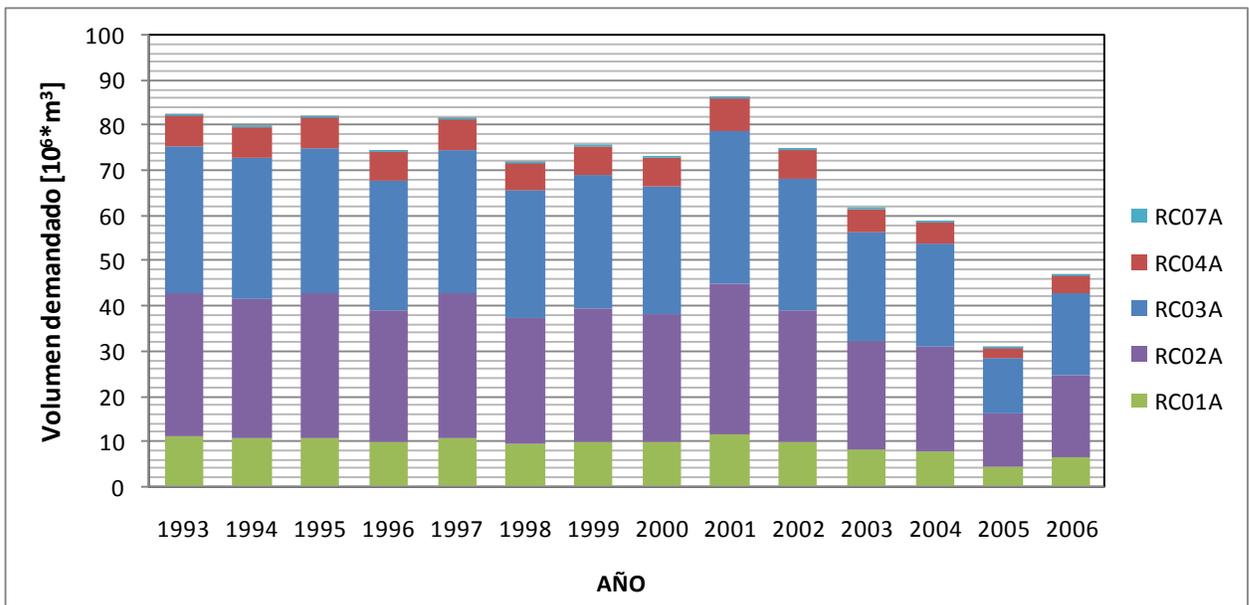


Figura 5-7: Demanda de los cultivos en cada banda en el periodo de calibración y validación.

5.4 Calibración y Validación.

Para calibrar y validar el modelo se utiliza el índice de Nash-Sutcliffe, el cual mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación, si la simulación fuera perfecta el coeficiente de Nash-Sutcliffe sería 1; por el contrario si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio el coeficiente de Nash-Sutcliffe sería 0. En

la Tabla 5-5, se presenta valores referenciales del criterio de Nash Sutcliffe, según (Molnar, 2011).

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum(Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5-5)$$

Donde:

NS = Criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe

Q_{sim_i} = Caudal simulado para la estación fluviométrica [m^3/s].

Q_{obs_i} = Caudal observado en la estación fluviométrica [m^3/s].

$\overline{Q_{obs}}$ = Caudal observado promedio en la estación fluviométrica [m^3/s].

Tabla 5-5: Valores referenciales del criterio Nash Sutcliffe.

NS	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 -0.4	Satisfactorio
0.4 -0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy Bueno
>0.8	Excelente

5.4.1 Cuenca Río Claro en Hacienda las Nieves.

La cuenca del Río Claro en Hacienda Las Nieves ha sido delimitada a partir de la estación con el mismo nombre y está formada por seis bandas, dos de las cuales forman la subcuenca aportante al embalse de los Cristales. En la Figura 5-8, se observa el esquema utilizado en el software WEAP para modelar la cuenca de cabecera.

El periodo de calibración comprende desde abril del año 1993 hasta marzo del año 1999, mientras que el periodo de validación comprende desde abril del año 2000 hasta marzo del año 2006. Estos periodos se han seleccionado por la estadística de caudales que se cuentan en la estación fluviométrica.

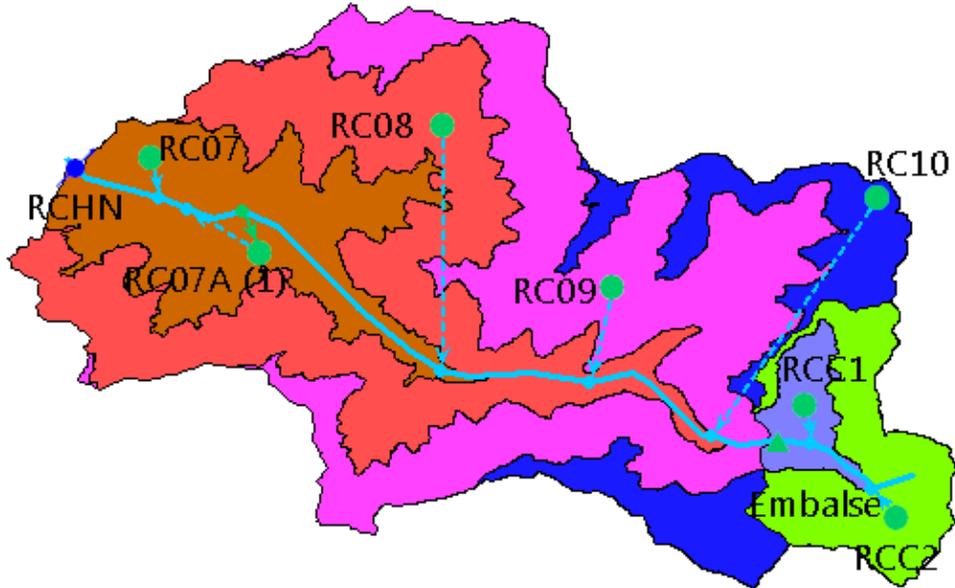


Figura 5-8: Esquema Cuenca Río Claro en Hacienda las Nieves.

Durante estos periodos se ha obtenido un coeficiente de Nash Sutcliffe de 0.68 y 0.61 respectivamente. En la Tabla 5-6 se observan los parámetros que se han calibrado para tal efecto y los valores asignados para lograr el mejor ajuste con la estadística que se cuenta.

Tabla 5-6: Calibración de variables Río Claro en Hacienda las Nieves.

Variable	Parámetro	Rango
Meteorología	Fracción nubosa	0.1-0.76
	Albedo [-]	0.66-0.74
	Temperatura de congelamiento del agua [°C]	-3.1
	Temperatura de derretimiento de nieve [°C]	7.5
Uso de Suelo	Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces [mm]	205
	Capacidad de almacenamiento en la zona profunda [mm]	965
	Factor de resistencia a la escorrentía [-]	15.3-16.15
	Conductividad de la zona de las raíces [mm/día]	96
	Conductividad de la zona profunda [mm/día]	44
	Dirección preferencial del flujo [-]	0.27-0.53
	Nivel de humedad inicial en la zona de las raíces [%]	20
	Nivel de humedad inicial de la zona profunda [%]	25

En la Figura 5-9 se observa la correspondencia entre los datos de la estación Río Claro en hacienda las Nieves en el periodo de calibración con los resultados de la modelación. La Figura 5-10 se presenta la relación entre los datos de la estación Río Claro en Hacienda las Nieves en el periodo de validación con los resultados de la modelación.

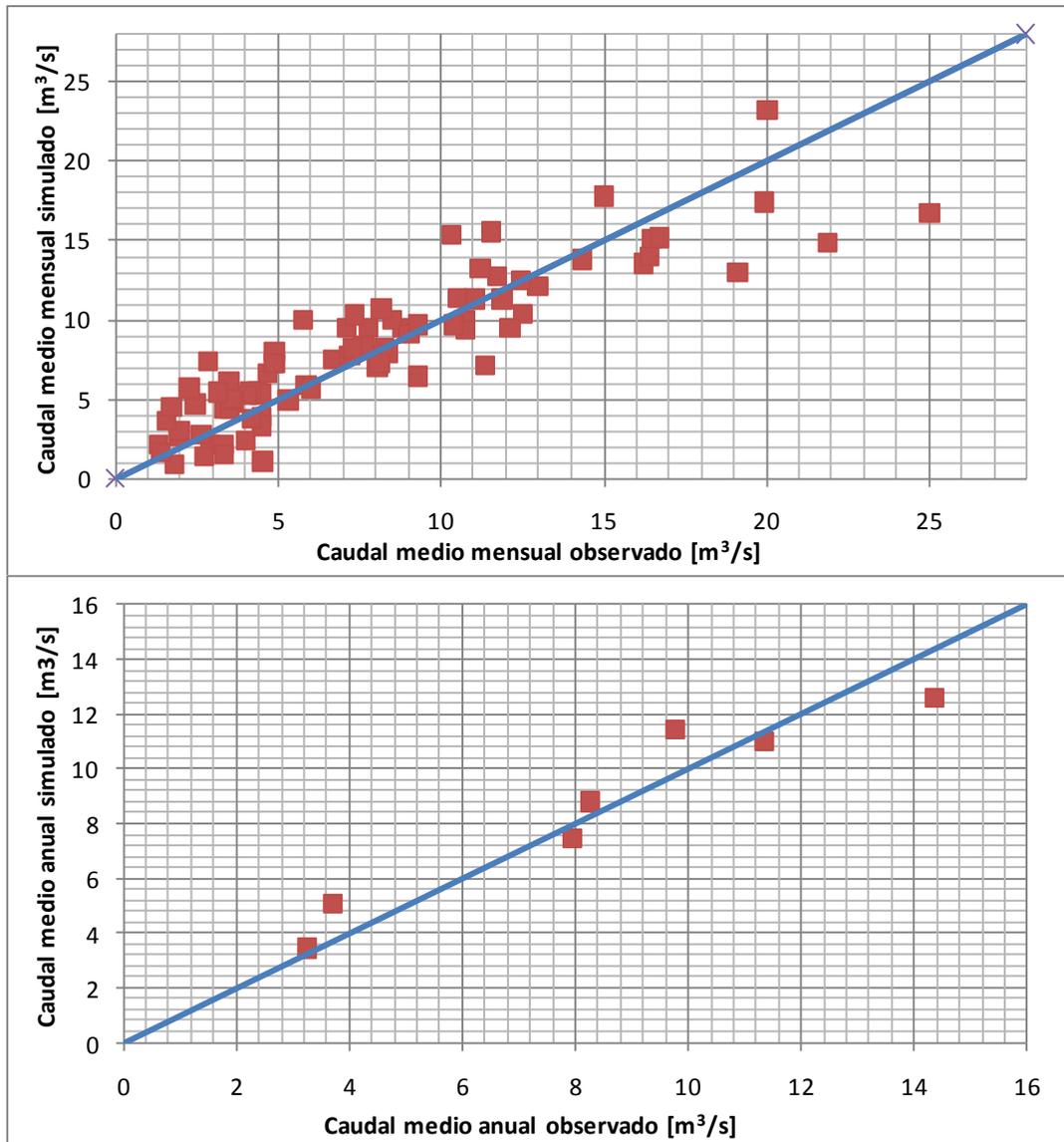


Figura 5-9: Correlación entre caudales simulados versus caudales observados, periodo de calibración.

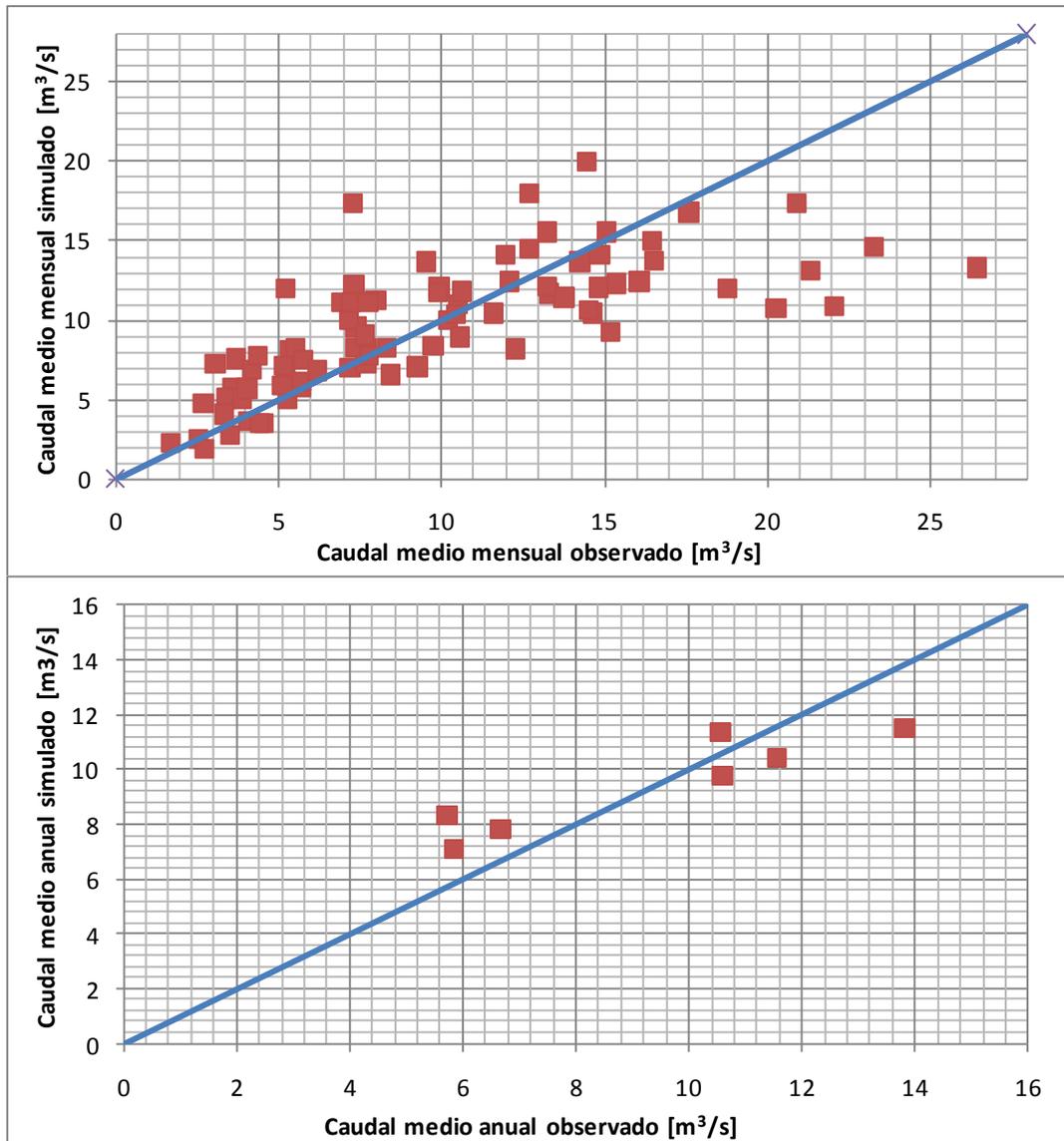


Figura 5-10: Correlación entre caudales simulados versus caudales observados, periodo de validación.

En la Figura se aprecia la calibración del modelo en régimen diario durante los años de calibración y en la Figura 5-12 se presenta el ajuste logrado en el periodo de validación. Estos datos han sido contrastados con los datos fluviométricos obtenidos en la estación Río Claro en Hacienda las Nieves.

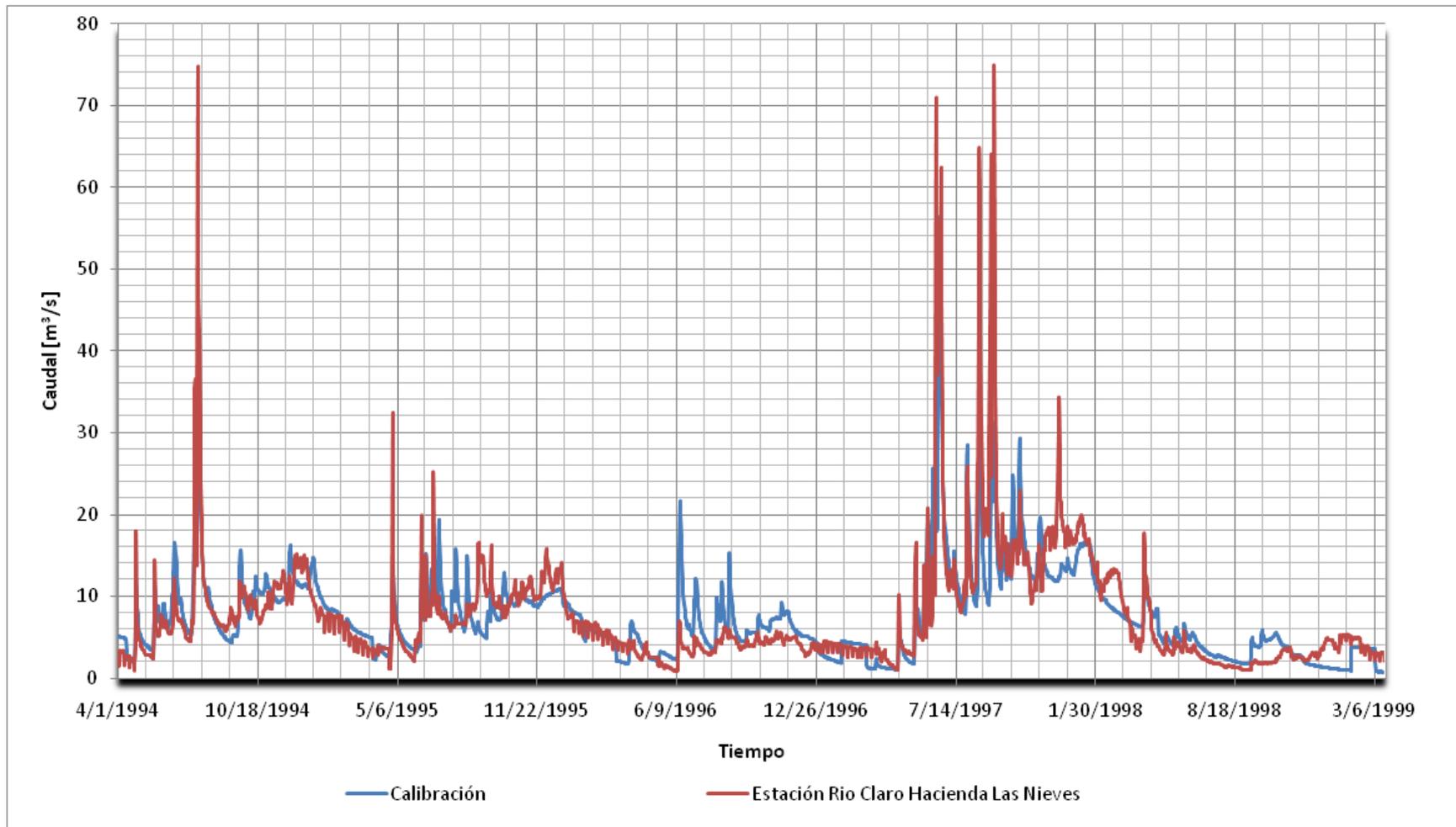


Figura 5-11: Calibración cuenca Río Claro en Hacienda Las Nieves.

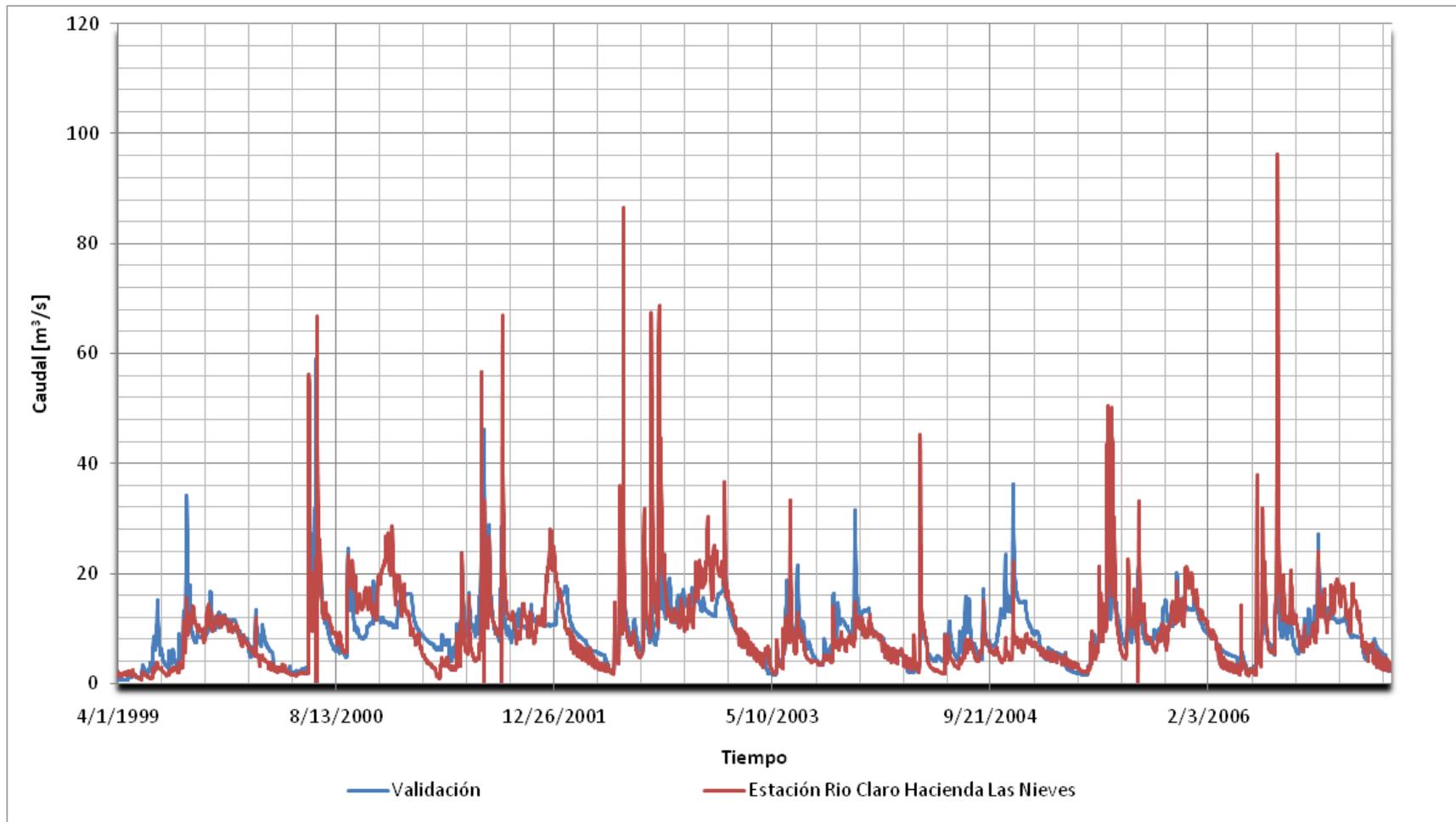


Figura 5-12: Validación Cuenca Río Claro en Hacienda Las Nieves.

5.4.2 Cuenca Río Claro en Tunca.

La cuenca del Río Claro en Tunca ha sido delimitada a partir de la estación con el mismo nombre y está formada por doce bandas, seis de las cuales forman la subcuenca aportante del Río Claro Hacienda las Nieves. En la Figura 5-13, se observa el esquema utilizado en el software WEAP para modelar la cuenca en estudio.

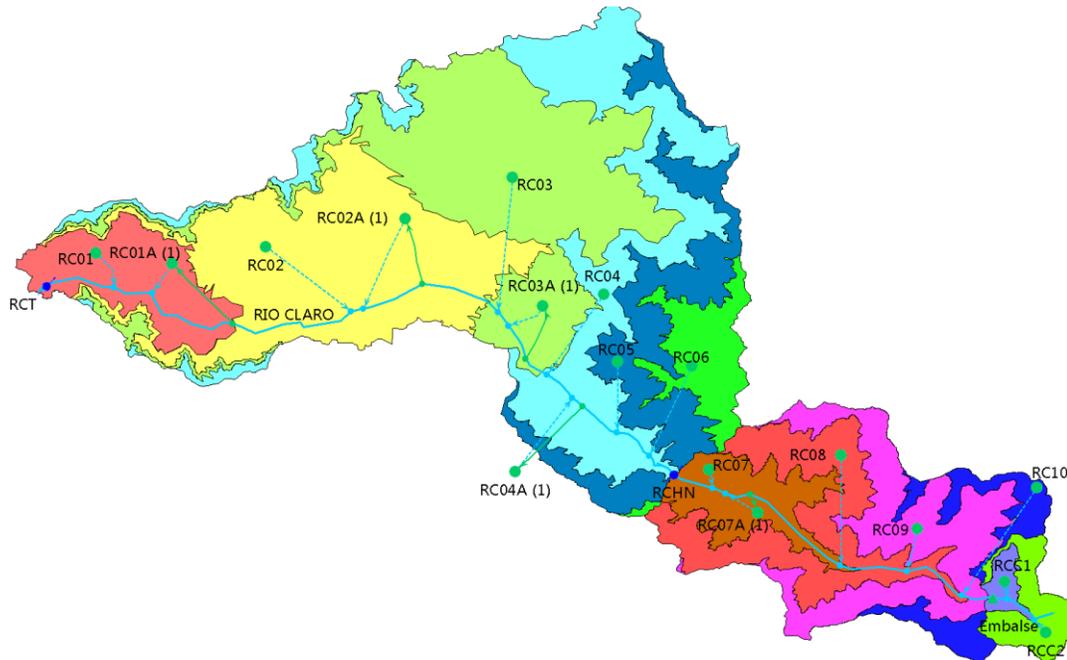


Figura 5-13: Esquema cuenca Río Claro en Tunca.

El periodo de calibración comprende desde abril del año 1994 hasta abril del año 1999, mientras que el periodo de periodo de validación comprende desde abril del año 2000 hasta marzo del año 2006. Estos periodos se han seleccionado por la estadística de caudales que se cuentan en la estación fluviométrica.

Durante estos periodos se ha obtenido un coeficiente de Nash Sutcliffe de 0.65 y 0.66 respectivamente. En la Tabla se observan las variables que se han calibrado para tal efecto y los valores asignados para lograr el mejor ajuste con la estadística que se cuenta.

En la Figura 5-14 se observa la correlación obtenida entre los datos simulados y observados. La Figura 5-15 presenta la relación entre los datos de la estación Río Claro en Tunca en el periodo de validación con los resultados de la modelación.

Tabla 5-7: Calibración de variables Cuenca Río Claro en Tunca.

Variable	Parámetro	Valores
Meteorología	Fracción nubosa	0-0.76
	Albedo [-]	0.66-0.74
	Temperatura de congelamiento del agua [°C]	-4.5
	Temperatura de derretimiento de nieve [°C]	6,5
Uso de Suelo	Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces [mm]	430
	Capacidad de almacenamiento en la zona profunda [mm]	12500
	Factor de resistencia a la escorrentía [-]	32.4-61.2
	Conductividad de la zona de las raíces [mm/día]	117
	Conductividad de la zona profunda [mm/día]	45
	Dirección preferencial del flujo [-]	0.2-0.5
	Nivel de humedad inicial en la zona de las raíces [%]	20
	Nivel de humedad inicial de la zona profunda [%]	35

En la Figura 5-16 se aprecia la calibración del modelo en régimen diario durante los años de calibración y en la Figura 5-17 se presenta el ajuste logrado en el periodo de validación. Estos datos han sido contrastados con los datos fluviométricos obtenidos en la estación Río Claro en Tunca.

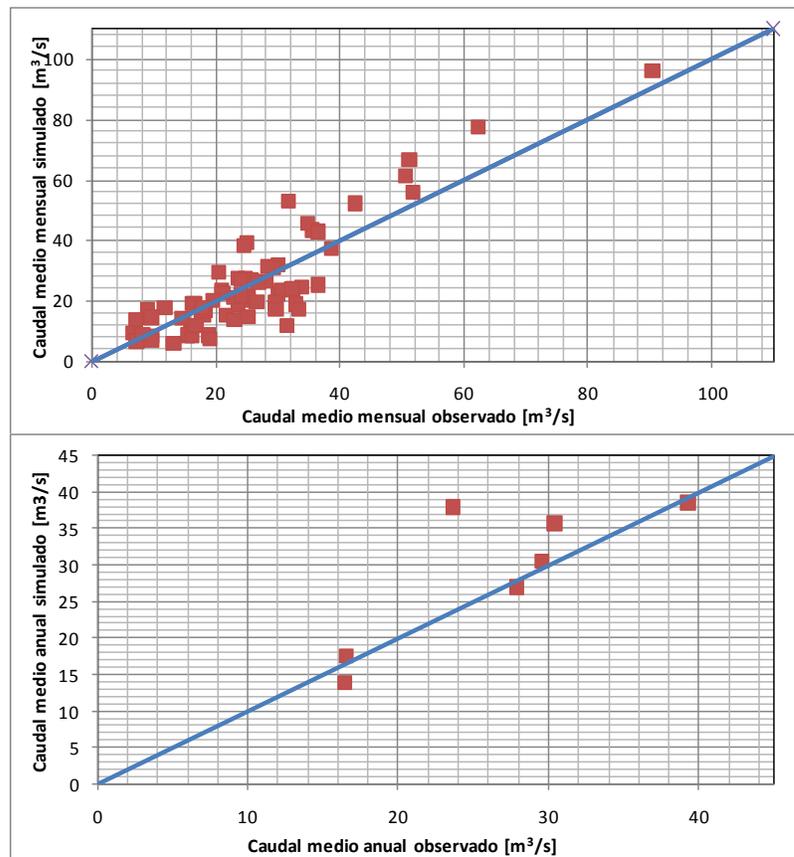


Figura 5-14: Correlación entre caudales modelados versus estación Río Claro en Tunca, periodo de calibración.

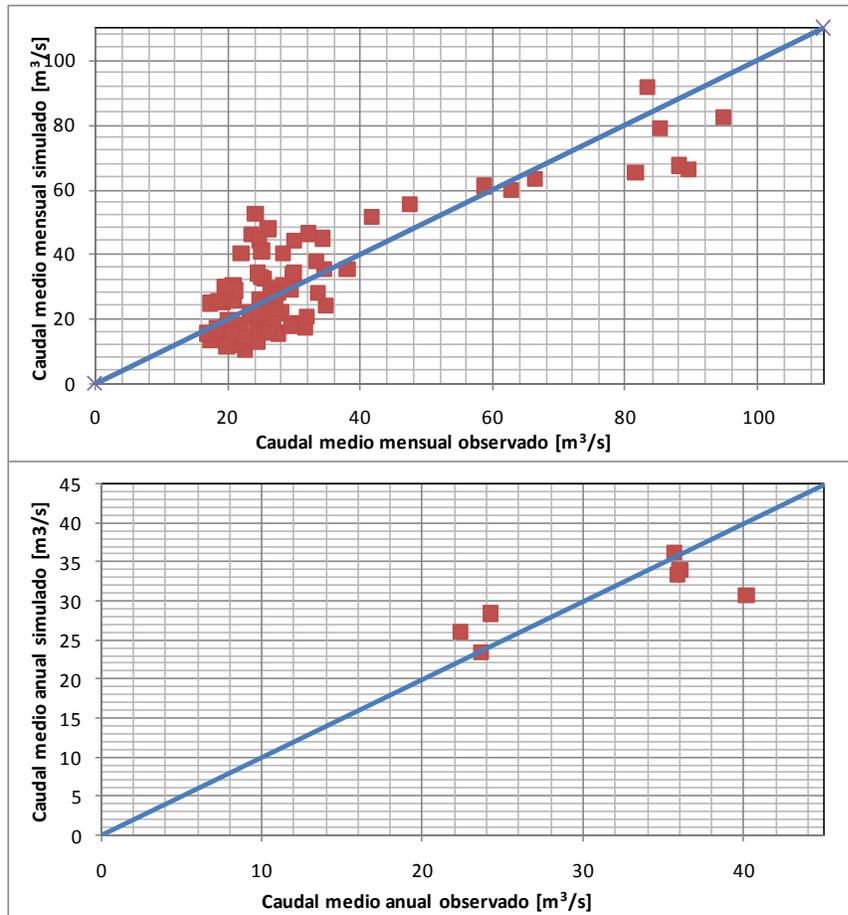


Figura 5-15: Correlación entre caudales modelados versus estación Río Claro en Tunca, periodo de validación.

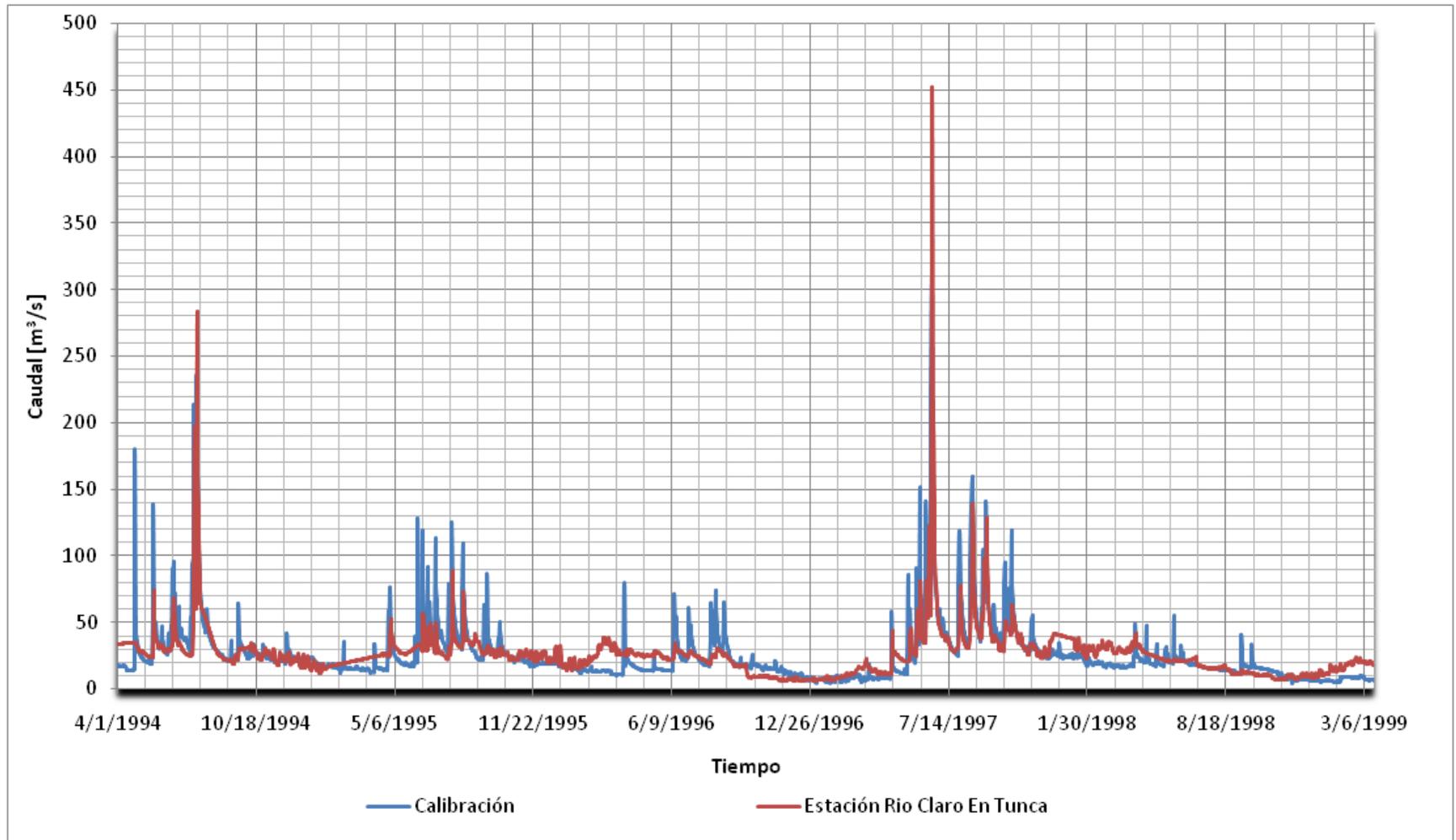


Figura 5-16: Calibración cuenca Río Claro en Tunca.

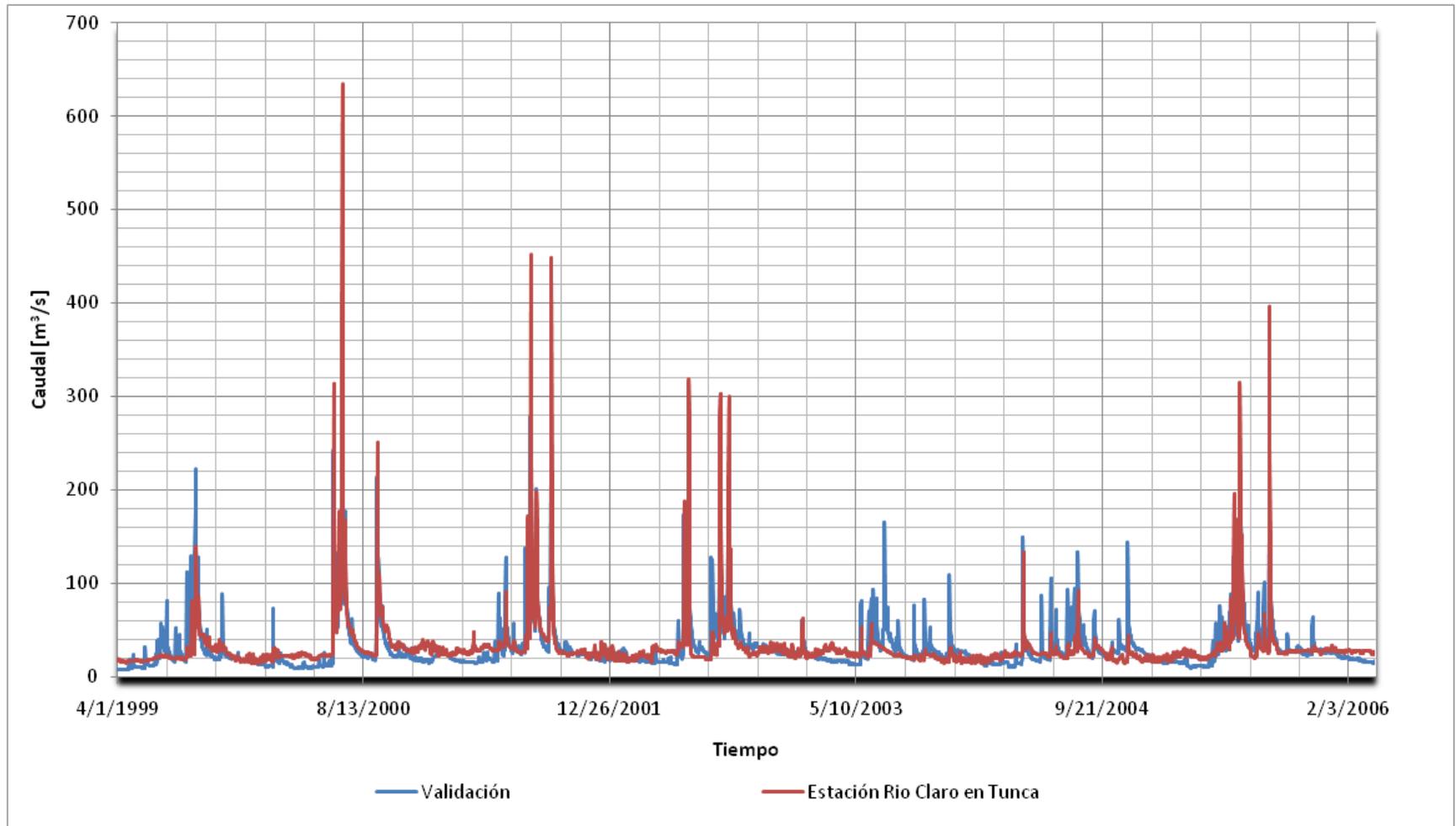


Figura 5-17: Validación cuenca Río Claro en Tunca.

5.5 Comentarios sobre Calibración y Validación.

La cuenca en estudio cuenta con una completa información de precipitaciones y temperaturas a nivel diario, pero existen falencias en la estadística pluviométrica en las dos estaciones utilizadas. En lo que respecta a la estadística fluviométrica de la estación Río Claro en Tunca está incompleta, por lo cual se considera que la cantidad de datos no es la óptima para una mejor calibración y validación del modelo. Esto es porque siempre es deseable contar con una mayor diversidad de años: secos, lluviosos, etc., para que el modelo represente la alta variabilidad de las precipitaciones en la zona.

En lo que representa a las correlaciones se observa que tanto para el periodo de calibración como de validación el caudal medio anual tiene un buen ajuste para ambas estaciones fluviométricas.

Las correlaciones para los caudales medios mensuales se observa un buen ajuste para los periodos de calibración y validación, solo en el periodo de validación para la estación Río Claro en Hacienda Las Nieves se observa que se subestiman los caudales superiores a $20 \text{ m}^3/\text{s}$ lo cual nos indica que los años lluviosos estarán subestimados.

En la simulación diaria de caudales para ambas estaciones se observa que el caudal base se representa bien en ambos periodos, y los caudales máximos también se representan, lo cual indica que la variabilidad en el flujo se ve representada por la simulación de la cuenca.

En lo que respecta a la sensibilidad de los parámetros calibrados, los valores que presentan mayor sensibilidad son el Factor de Resistencia a la Escorrentía, la dirección preferencial del flujo y las temperaturas de congelamiento del agua y de derretimiento de la nieve. Las variables de niveles de humedad inicial en la zona de las raíces y la zona profunda, son irrelevantes para la modelación puesto que afectan solo a los primeros dos años de modelación, los cuales han sido desechados, producto que el modelo requiere varios años para estabilizarse y producir resultados más acorde con la estadística que se cuenta.

La cuenca en análisis esta afecta a intervención humana, esto debido a la cantidad de derechos de aguas entregados y a la presencia del embalse Los Cristales. Estos aspectos afectan una mejor modelación del sistema debido a los supuestos que se deben realizar tales como: eficiencia de los cultivos, satisfacción de la demanda y regla de funcionamiento del embalse, ya que esto cambia año a año y existe poco información al respecto, lo cual puede llevar a que los supuestos adoptados sean inexactos.

6. ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL.

Para determinar la disponibilidad del recurso hídrico se requiere contar con estadística de precipitaciones y temperaturas para el periodo 2015-2074, esta es obtenida del modelo de circulación global de la atmosfera PRECIS-DGF, el cual cuenta con una grilla con espaciamiento de 0.25 grados lo que equivale a aproximadamente 25 Km, y ha sido forzado en sus bordes laterales por el modelo global ECHAM5. Esta modelación contiene las variables de precipitación y temperatura para el periodo 1971-2079.

Para utilizar las variables del modelo PRECIS-DGF se debe realizar, en primera instancia un escalamiento espacial para llevar los valores desde la grilla a la estación Rengo y posteriormente un escalamiento temporal, del tal forma de lograr que las variables reflejen de manera adecuada los datos observados en la estación Rengo.

6.1 Escalamiento Espacial.

Para utilizar este modelo se realiza un escalamiento espacial a la estación Rengo, procediendo de acuerdo al método propuesto por (Vargas, X. & Lagos M, 2011), el cual consiste en ponderar los datos más cercanos de la grilla por el inverso de la distancia y obtener los valores de la variable en la estación deseada, generando así una serie representativa de la estación Rengo. Los puntos de la grilla del modelo PRECIS-DGF y la ubicación de la estación Rengo se observan en la Figura 6-1 y en Tabla 6-1 se observan la distancia existente entre los puntos de la grilla y la estación Rengo.

Tabla 6-1: Distancia puntos de la grilla a estación Rengo.

Longitud [°]	Latitud [°]	Distancia [m]
71.00	34.25	22,596
70.75	34.25	21,966
71.00	34.50	14,878
70.75	34.50	13,889

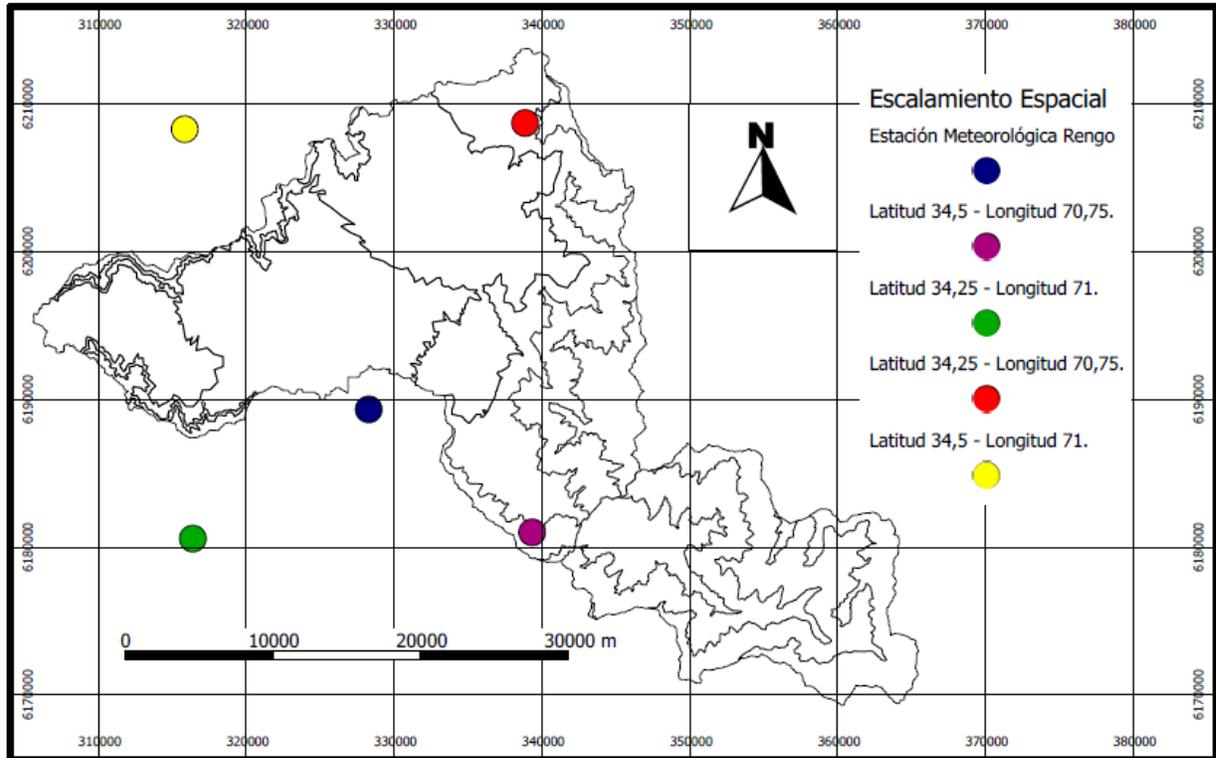


Figura 6-1: Escalamiento espacial estación Rengo.

6.2 Escalamiento Temporal.

6.2.1 Precipitaciones.

Los valores estimados por el modelo PRECIS-DGF, luego del escalamiento espacial, no se ajustan a lo observado en la estación Rengo, por lo cual se requiere el escalamiento temporal de acuerdo a la siguiente metodología:

- Se agrupan por mes los datos de precipitación con que se cuenta en la estación Rengo.
- Se agrupan por mes los datos de precipitación obtenidos del escalamiento espacial del modelo PRECIS-DGF para la estación Rengo.
- Se organiza estas estadísticas de mayor a menor y se elabora el gráfico variable observada en la estación Rengo versus variable PRECIS-DGF.
- A través de estos gráficos se procede a encontrar relaciones lineales como la ecuación 6-1 en distintos intervalos de precipitaciones predichas en el modelo PRECIS-DGF. Estos gráficos se presenta en detalle en el Anexo A.

$$Pp_{Rengo} = a * Pp_{precis-DGF} + b \quad (6-1)$$

- Se utilizan las relaciones, que se observan en la Tabla 6-2, para escalar las precipitaciones pronosticadas por el modelo PRECIS-DGF, para el periodo 2015-2074.

Tabla 6-2: Relaciones lineales, Escalamiento temporal de precipitaciones.

	a	b [mm]	R²	Intervalo
DIC	1.514	-17.91	0.95	[11.83,∞ [
ENE	0.307	-6.863	0.937	[22.8,∞ [
FEB	1.877	-46.95	0.967	[28,∞ [
	0.304	-4.572	0.84	[15.04,28[
MAR	0.254	7.683	0.938	[20.6,∞ [
	0.884	-5.914	-0.959	[6.7,20.6[
ABR	1.068	-2.109	0.889	[17.6,∞ [
	0.97	-3.487	0.972	[2.53,17.6[
MAY	1.259	20.26	0.904	[15.7,∞ [
	2.657	-1.928	0.988	[0.73,15.7[
JUN	0.111	81.26	0.998	[33.8,∞ [
	1.903	14.96	0.968	[12.9,33.8[
	3.373	-0.747	0.995	[0.27,12.9[
JUL	0.998	29.13	0.958	[12.7,∞ [
	3.211	-1.548	0.99	[0.5,12.7[
AGO	2.721	-9.852	0.914	[14.8,∞ [
	2.8	-5.489	0.969	[2,14.8[
SEP	1.739	3.086	0.914	[9.1,∞ [
	2.233	-4.491	0.969	[2.01,9.1[
OCT	1.946	-8.035	0.921	[7.5,∞ [
	1.629	-5.255	0.943	[3.2,7.5[
NOV	0.762	13.92	0.902	[25.3,∞ [
	3.564	-42.33	0.982	[13.5,25.3[
	0.514	-2.913	0.891	[5.7,13.5[

En la Figura 6-2 se grafica la precipitación media mensual en la estación Rengo, para los datos PRECIS-DGF escalados espacialmente a la estación Rengo y los datos PRECIS-DGF escalados temporalmente. En la Figura 6-3 se observa las precipitaciones para el periodo utilizado en el escalamiento temporal 1971-2010 y las precipitaciones previstas en los decenios futuros.

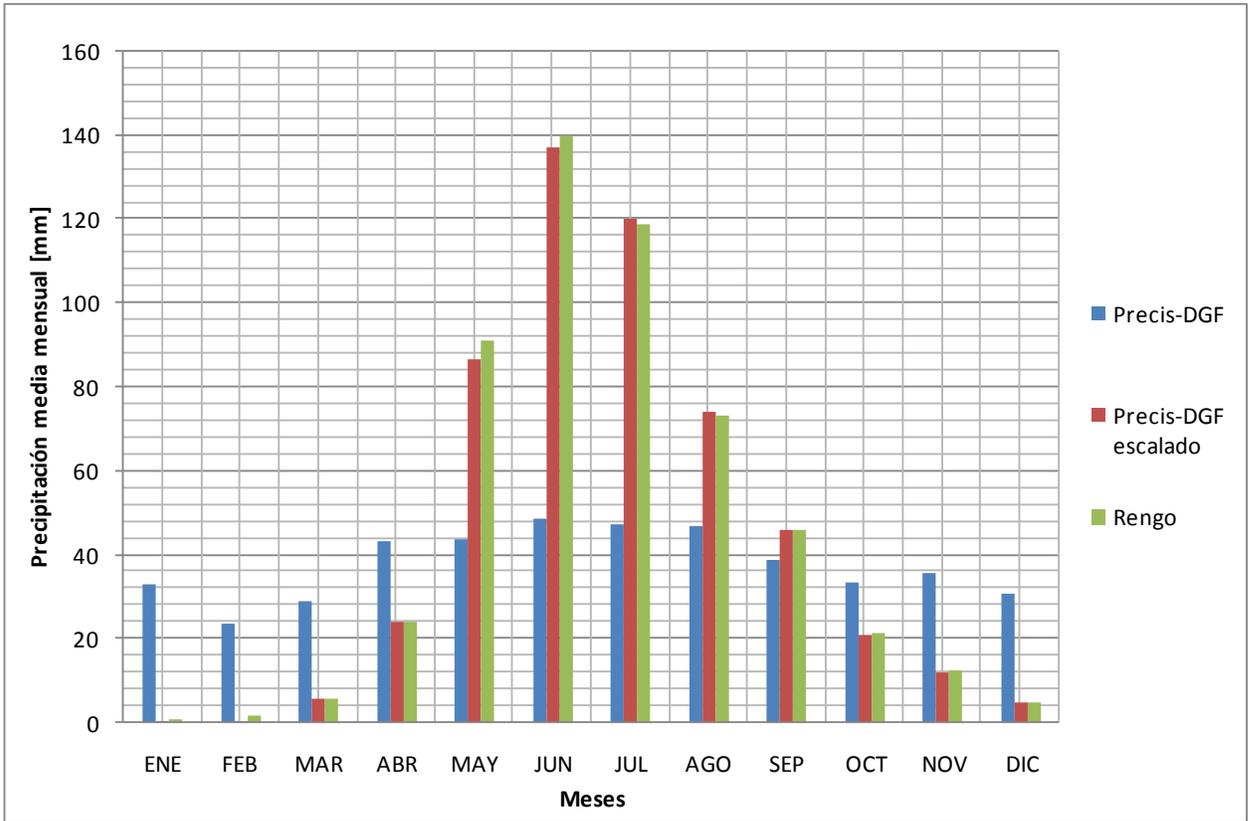


Figura 6-2: Precipitación media mensual.

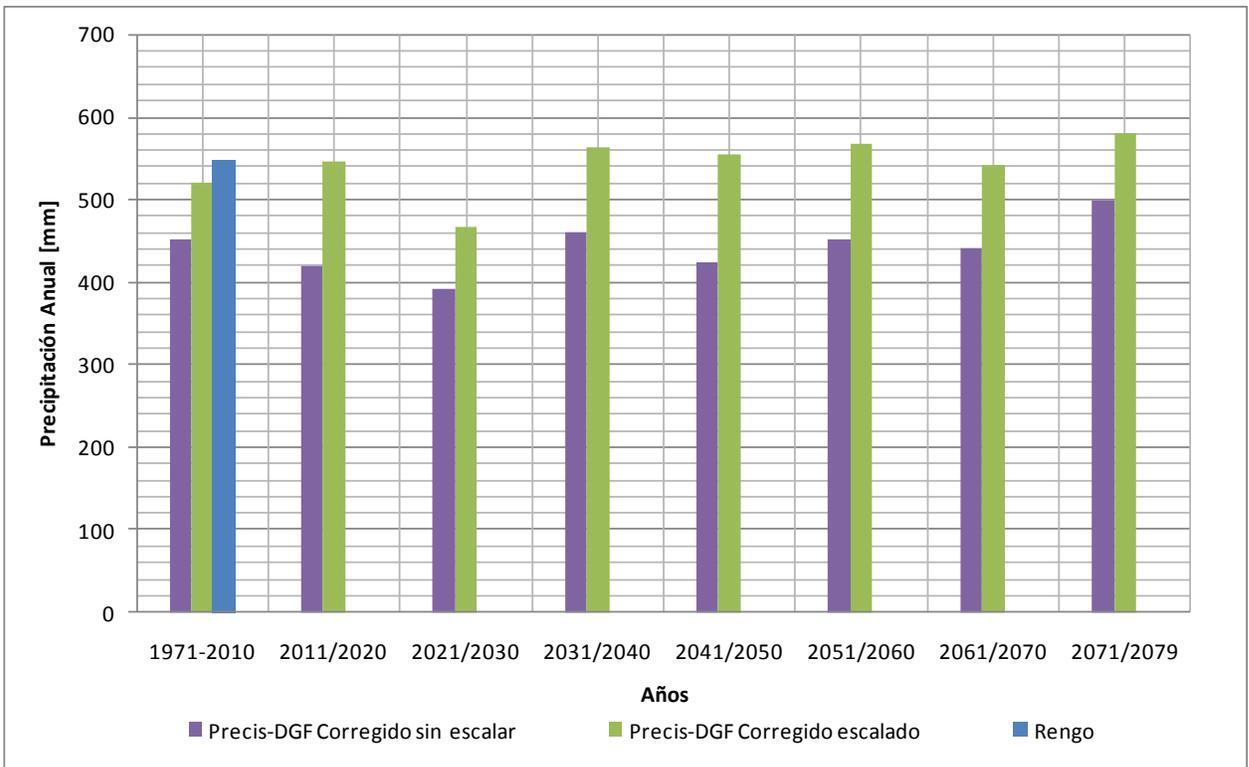


Figura 6-3: Precipitación media anual.

6.2.2 Temperaturas.

Los valores estimados por el modelo PRECIS-DGF no se adecuan correctamente a lo observado en la estación Rengo por lo cual se requiere escalar de acuerdo a la siguiente metodología:

- Se agrupan por mes los datos de temperatura con que se cuenta en la estación Rengo, para el periodo 1972-2010.
- Se agrupan por mes los datos de temperatura obtenidos del escalamiento espacial del modelo PRECIS-DGF para la estación Rengo, para el periodo 1972-2010.
- Se organiza esta estadística de mayor a menor y se realiza el gráfico Variable Observada en la estación Rengo versus variable PRECIS-DGF.
- A través de estos gráficos se procede a encontrar relaciones lineales como la ecuación 6-2 en distintos intervalos de precipitaciones predichas en el modelo PRECIS-DGF.

$$T_{Rengo} = a * T_{Precis-DGF} + b \quad (6-2)$$

- Se utilizan las relaciones, que se observan en la Tabla 6-3, para escalar las precipitaciones pronosticadas por el modelo PRECIS-DGF para el periodo 2015-2074.

Tabla 6-3: Relaciones lineales, Escalamiento temporal de temperaturas.

MES	a	b [°C]	R2	Intervalo
ABR	1.848	-13.965	0.965	[0,∞ [
MAY	1.728	-9.662	0.995	[10.07,∞ [
	4.781	-41.183	0.971	[0,10.07[
JUN	2.395	-13.545	0.986	[9,∞ [
	4.580	-33.161	0.992	[0,9[
JUL	2.653	-11.355	0.976	[8.5,∞ [
	4.502	-26.980	0.989	[0,8.5[
AGO	4.092	-19.873	0.958	[8.10,∞ [
	6.266	-34.747	0.974	[6.49,8.10[
SEP	3.792	-16.909	0.993	[0,∞ [
OCT	2.988	-12.779	0.990	[10.13,∞ [
NOV	2.251	-9.413	0.997	[13.77,∞ [
DIC	1.927	-9.017	0.991	[0,∞ [
ENE	1.791	-10.121	0.998	[0,∞ [
FEB	2.139	-18.865	0.965	[0,∞ [
MAR	2.359	-23.388	0.995	[0,∞ [

En la Figura 6-4 se observa la comparación de las correlaciones entre temperaturas medias mensuales de la estación Rengo, con respecto a los datos obtenidos de PRECIS-DGF tanto sin escalamiento temporal, como con escalamiento temporal.

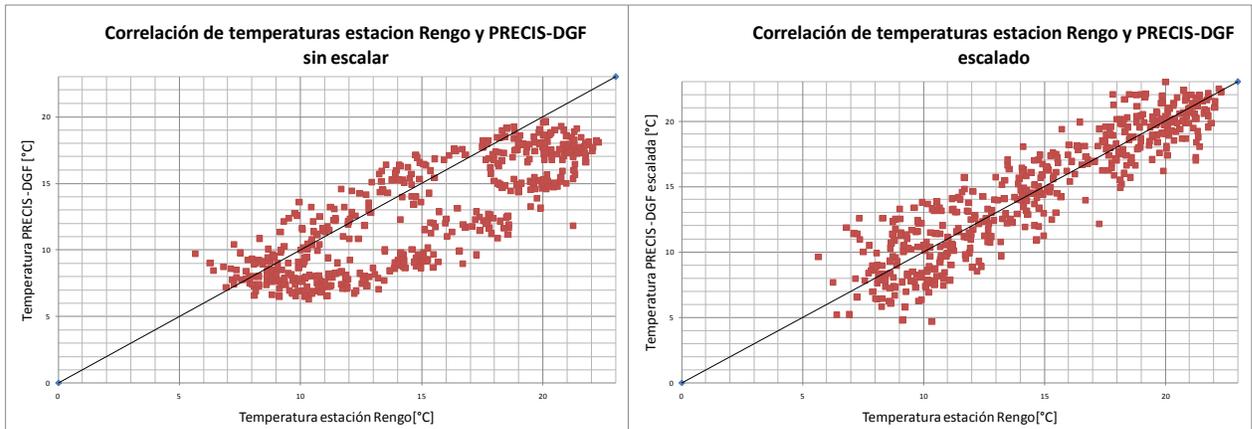


Figura 6-4: Temperatura media mensual, periodo 1972-2010, estación Rengo, Modelo PRECIS-DGF no escalado temporalmente y escalado temporalmente.

En la Figura 6-5 se presenta una comparación estacional entre la estación Rengo, los datos del PRECIS-DGF sin escalamiento temporal y los datos del PRECIS-DGF con escalamiento temporal.

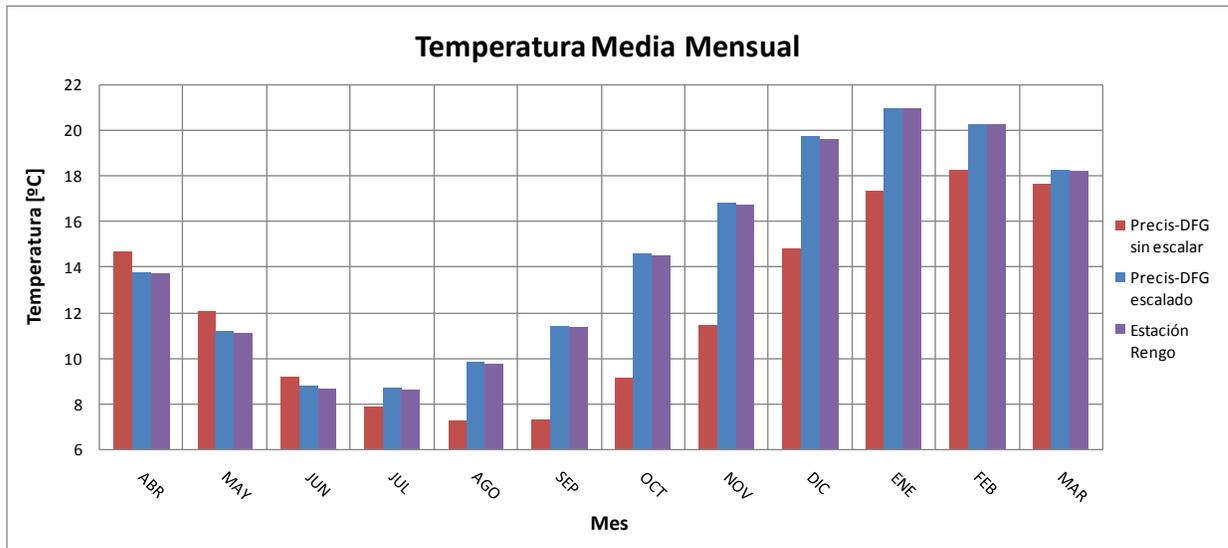


Figura 6-5: Temperatura media mensual, periodo 1971-2010, estación Rengo, Modelo PRECIS-DGF y PRECIS-DGF corregido.

En la Figura 6-6 se grafica el efecto del cambio climático en el periodo 1971- 2010, para la estación Rengo. Y finalmente en la Figura 6-7 se observa la evolución de las temperaturas medias anuales según el modelo PRECIS-DGF escalado para la estación Rengo.

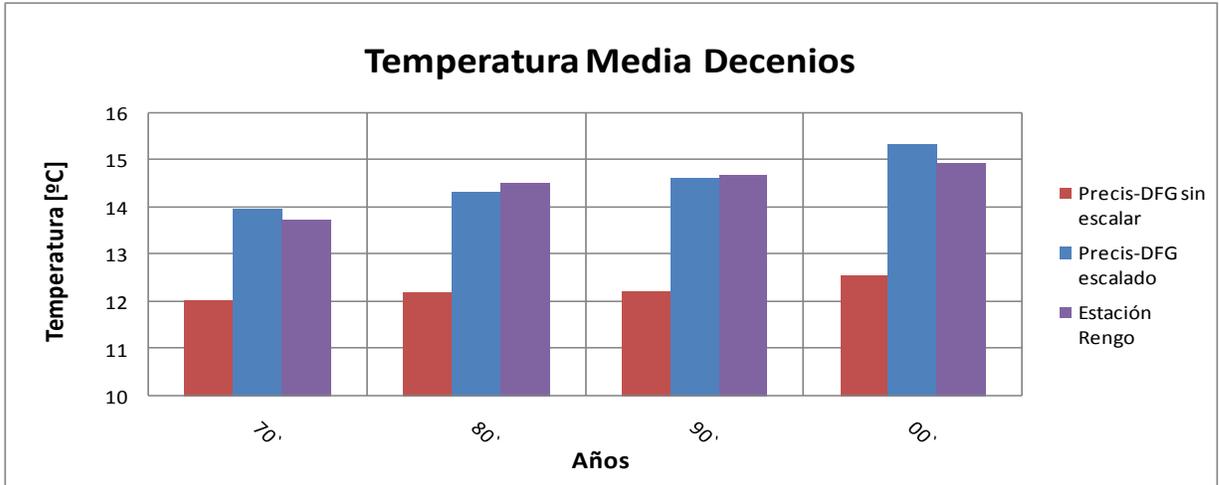


Figura 6-6: Temperatura media decenios, periodo 1972-2010, estación Rengo, Modelo PRECIS-DGF y PRECIS-DGF corregido.

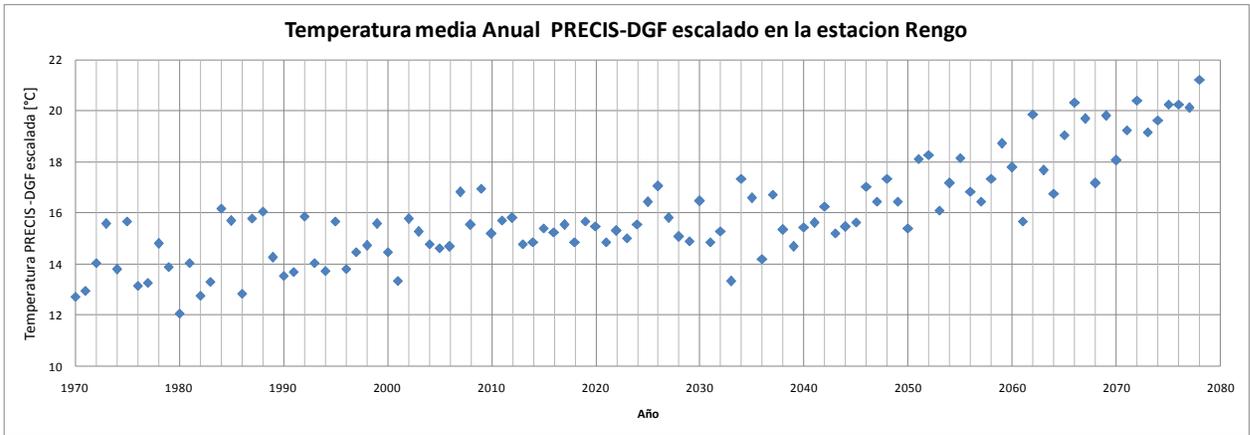


Figura 6-7: Temperatura media anual, estación Rengo según PRECIS-DGF escalado.

6.3 Consideraciones del Escalamiento del modelo PRECIS-DGF.

6.3.1 Precipitaciones.

En lo que respecta a las precipitaciones se observa que en el periodo 1971-2010 las precipitaciones predichas por el modelo PRECIS-DGF, no tienen una buena correlación con la estadística registrada en la estación Rengo, ni representa de un modo adecuado la estacionalidad de estas, la distribución de precipitaciones es más o menos homogénea con leve incremento en los meses de invierno, muy alejado de la estacionalidad característica de la zona central de Chile.

Esto se corrige al realizar el escalamiento temporal para cada mes, de esta manera se logra describir las precipitaciones altas de la temporada invernal y las casi nulas precipitaciones de la temporada estival.

En el futuro se mantendrían en el mismo orden de magnitud con una variación de $\pm 10\%$ de la precipitación media anual con respecto al periodo 1971-2010.

6.3.2 Temperaturas.

En tanto para las temperaturas, se aprecia que en el periodo 1971-2010 el modelo PRECIS-DGF, sin escalamiento temporal, estima las temperaturas en aproximadamente 2 [°C] menos que las estadísticas de la estación Rengo. Al realizar el escalamiento temporal este ajuste se mejora.

En el periodo futuro las temperaturas aumentarían en aproximadamente 0.5 [°C] por cada 10 años llegando en el último periodo a temperaturas medias anuales superiores a los 20 [°C] lo cual producirá un cambio sustancial en el clima de la cuenca. Esto permite representar el efecto del cambio climático en el periodo 1971- 2079.

Las temperaturas medias mensuales se ajustan de mejor manera a lo observado en la estación Rengo aplicando el escalamiento temporal a los datos, así también se observa como los datos PRECIS-DGF escalados describen adecuadamente la estacionalidad de la temperatura media.

7. ESCENARIOS FUTUROS.

Para analizar el comportamiento de la cuenca Río Claro en Tunca se consideraran 4 escenarios probables estos son:

- **Escenario 1: Situación actual sin cambios.** Se mantendrían las condiciones de los periodos de calibración y validación, considerando la misma cantidad de hectáreas cultivadas, los mismos cultivos e idénticas características del embalse Los Cristales.
- **Escenario 2: Aumento del área de cultivos en un 100%.** Se Aumentarían las hectáreas cultivadas en un 100%, y se mantendrían la misma distribución de cultivos e idénticas características del embalse Los Cristales.
- **Escenario 3: Aumento en la capacidad del embalse.** Se aumentaría la altura del muro del embalse en 10 metros, logrando un aumento desde 8.5 Hm³ a 15.1 Hm³. En este escenario se considerara el aumento de área agrícola que se presenta en el escenario 2. Junto con esto se aumenta la capacidad de las tuberías de evacuación en un 50%, para poder evacuar un mayor caudal a nivel diario.
- **Escenario 4: Cambios en los tipos de cultivos.** Se supone un escenario en donde se incentiva el crecimiento de cultivos como las paltas, naranjas y hortalizas que demanda agua en la época de invierno y tienen mejores perspectivas de desarrollo, la nueva distribución de los cultivos se observa en la Tabla 7-1. En este escenario se considera el resto de las condiciones indicadas en el escenario 3.

Estos escenarios se analizan en 2 periodos de 30 años, respectivamente:

- **Periodo I:** Abril de 2014 a marzo de 2044.
- **Periodo II:** Abril de 2044 a marzo de 2074.

Tabla 7-1: Distribución de los cultivos en el escenario 4.

Cultivos	Porcentaje [%]
Cultivos Anuales	24%
Maíz	16%
Trigo	8%
Cultivos Permanente	64%
Manzano	11%
Almendro	2%
Durazno	3%
Vides	8%
Naranjas	20%
Paltas	20%
Hortalizas	6%
Tomates	2%
Cebollas	2%
Ajos	2%

Los ejes que se analizan para cada escenario son los siguientes:

- **La disponibilidad del recurso hídrico:** se analiza los caudales medios anuales y medios mensuales en la estación Rio Claro en Tunca para los dos periodos.
- **Comportamiento del embalse Los Cristales:** Se observa el comportamiento de entrega del embalse Los cristales y la variación del volumen almacenado de este.
- **Altura de nieve en las cuencas cabeceras:** Se observa el comportamiento de la altura máxima de nieve. Esta comparación se realizara solo para el escenario 1, para ver la evolución de esta en el tiempo.
- **Satisfacción de la demanda:** se compara la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración actual, para observar si los cultivos cuentan con la suficiente agua para ser regados.
- **Cambios en la demanda de los cultivos:** se compara la demanda evapotranspirativa de los cultivos para el periodo calibración-validación y los periodos I y II.

7.1 Escenario 1: Situación actual sin cambios.

7.1.1 Disponibilidad del recurso hídrico.

En el periodo de calibración el caudal anual de salida es de 29.1 m³/s, mientras que en el Periodo I sería de 33.4 m³/s y para el Periodo II sería de 36.2 m³/s, en la Figura 7-1 se observa el caudal medio anual para ambos periodos.

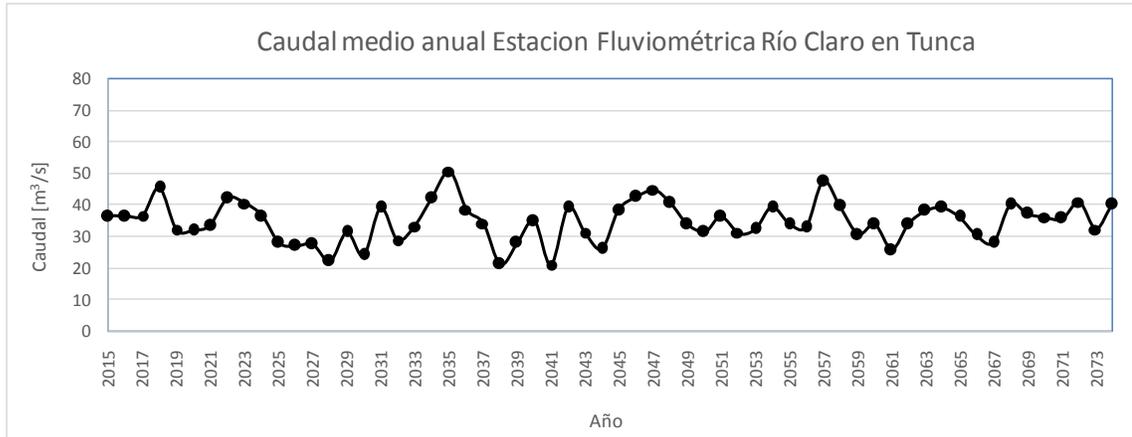


Figura 7-1: Caudal medio anual, estación Río Claro en Tunca, escenario 1.

El caudal medio mensual para la estación Río Claro en Tunca durante el periodo de calibración-validación y para los periodos I y II se grafica en la Figura 7-2.

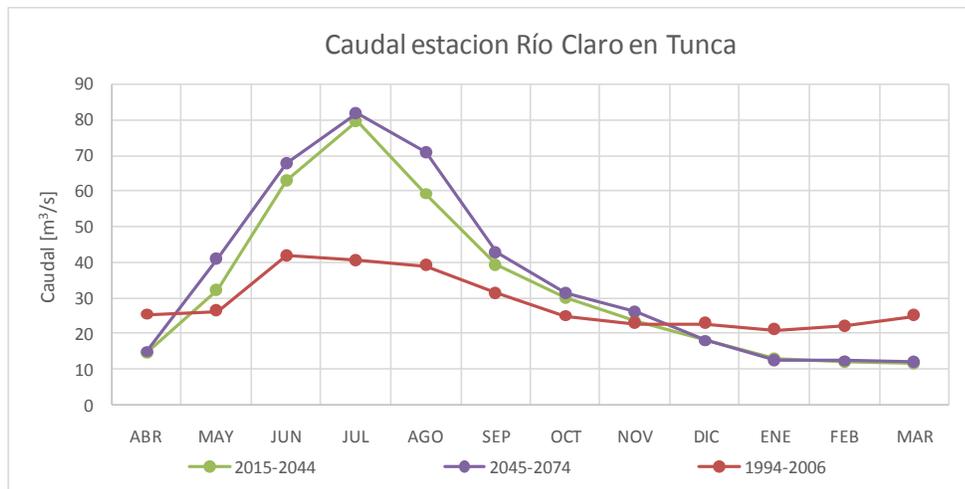


Figura 7-2: Variación estacional para la estación Río Claro en Tunca, escenario 1.

En general vemos que el caudal de salida iría en aumento con respecto al periodo 1994-2006, en un orden del 10% para el Periodo I y entorno del 20% para el Periodo II. Los cambios en los caudales medios mensuales provocarían un aumento de los caudales invernales y una disminución en los caudales estivales.

7.1.2 Embalse Los Cristales.

En el periodo de 1994-2006 el caudal anual de salida del embalse Los Cristales es de 1.2 m³/s, mientras que para el periodo I el caudal anual sería de 1.91 m³/s y periodo II el caudal anual sería de 2.02 m³/s. La variación anual del caudal de salida del embalse Los Cristales se grafica en la Figura 7-3.

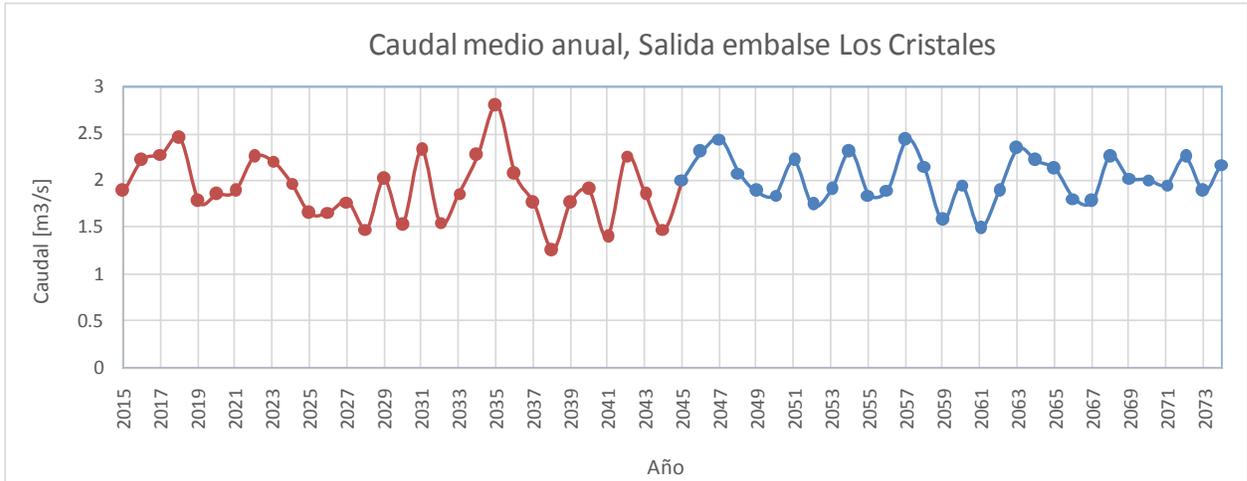


Figura 7-3: Variación caudal de salida embalse Los Cristales, escenario 1.

En la Figura 7-4 se presenta el volumen que se almacenaría en un año seco y un año húmedo para cada periodo. Se observa que tanto para los años secos como los húmedos el embalse tendría un ciclo anual de llenado y vaciado.

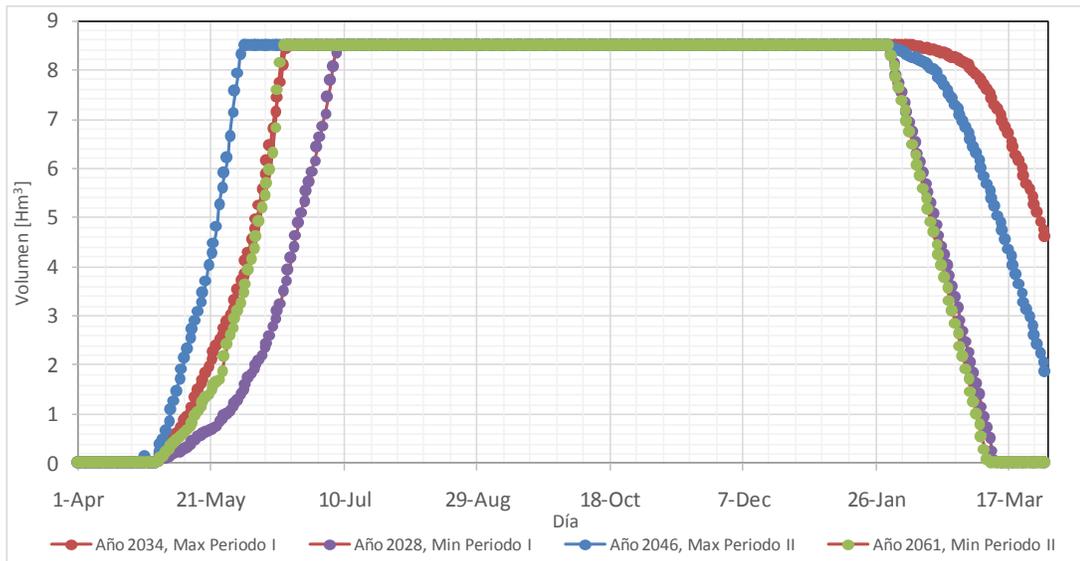


Figura 7-4: Volumen almacenado embalse Los Cristales, escenario 1.

7.1.3 Altura de nieve en las bandas cabeceras.

En la Figura 7-2, se observó el descenso del caudal en el Río Claro, para el periodo estival, lo cual se corrobora con la Figura 7-5, en donde se muestra la baja que se produciría en la acumulación de nieve en las bandas cabecera de la cuenca. Este descenso llegaría hasta la disminución en un 40% de acumulación de nieve, para el caso de la cuenca superior.

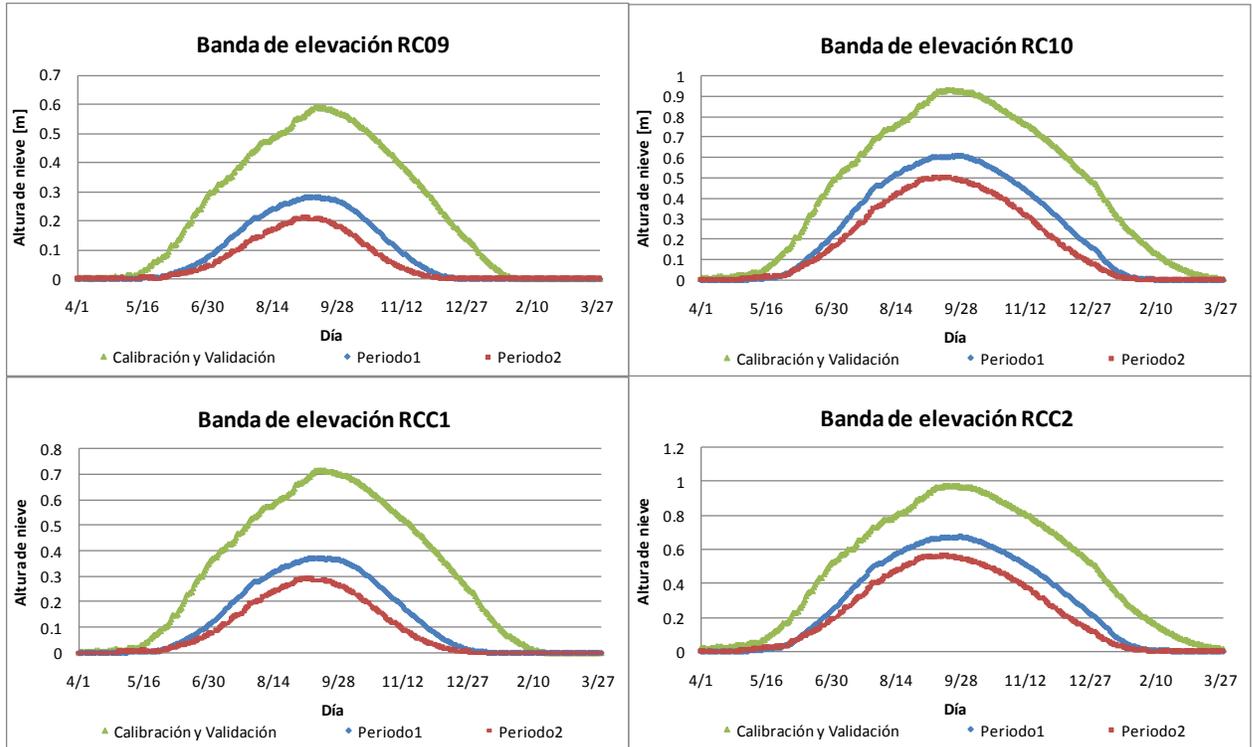


Figura 7-5: Altura de nieve en las bandas cabeceras, escenario 1.

7.1.4 Satisfacción de la demanda.

Se presenta en la Figura 7-6 la satisfacción de la demanda, la cual se satisface para todos los años sobre el 98.4%. Esto es aceptable ya que por lo general los proyectos de riego buscan satisfacer la demanda por sobre el 85%, considerándose sobre esto una oferta satisfactoria.

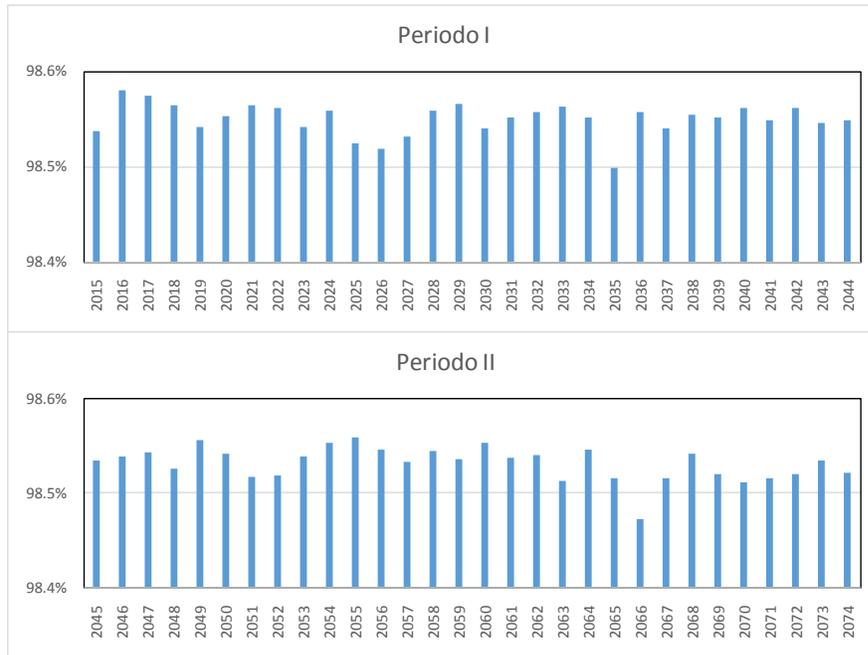


Figura 7-6: Satisfacción de la demanda en los Periodos I y II, escenario 1.

7.1.5 Cambios en la demanda de los cultivos.

En la Figura 7-7 se presentan los cambios en la demanda hídrica de los cultivos, donde se produciría una variación del 34% para el periodo I y 40% para el periodo II, con respecto al periodo de 1994-2006. Esto se debe al aumento de las temperaturas que se producirían en la cuenca, y que propiciarían un aumento de la demanda de cultivos aun cuando los cultivos sigan siendo los mismos.

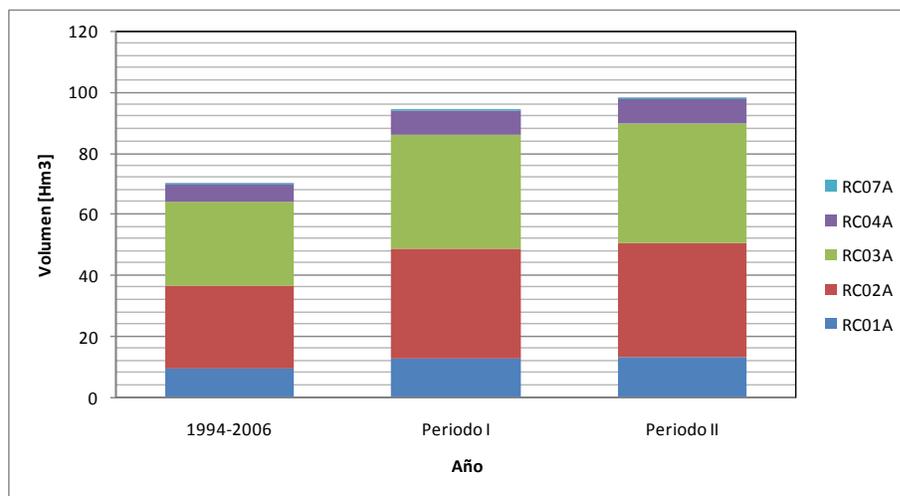


Figura 7-7: Demanda de cultivos en los periodos de calibración-validación y los periodos I y II, escenario 1.

7.2 Escenario 2: Aumento del área de cultivos en un 100%.

7.2.1 Disponibilidad del recurso hídrico.

En el periodo de calibración el caudal anual de salida es de 29.1 m³/s, mientras que en el Periodo I sería de 28.2 m³/s y para el Periodo II sería de 30.9 m³/s, en la Figura 7-8 se compara el caudal medio anual para ambos periodos para los escenarios 1 y 2. Se apreciaría una pérdida de en promedio 5 m³/s, en el caudal de salida de la Cuenca Río Claro en Tunca.

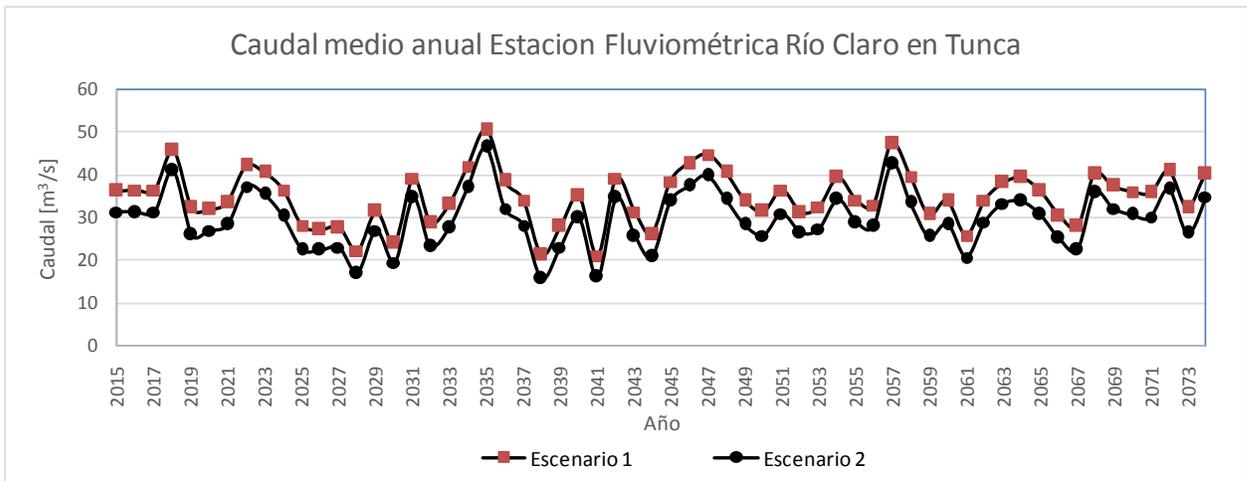


Figura 7-8: Caudal medio anual, estación Río Claro en Tunca, escenario 2.

El caudal medio mensual para la estación Río Claro en Tunca durante los periodos I y II, para los escenarios 1 y 2 se grafican en la Figura 7-9. En general vemos que el caudal de salida disminuiría en la temporada estival y se mantendría en la temporada invernal.

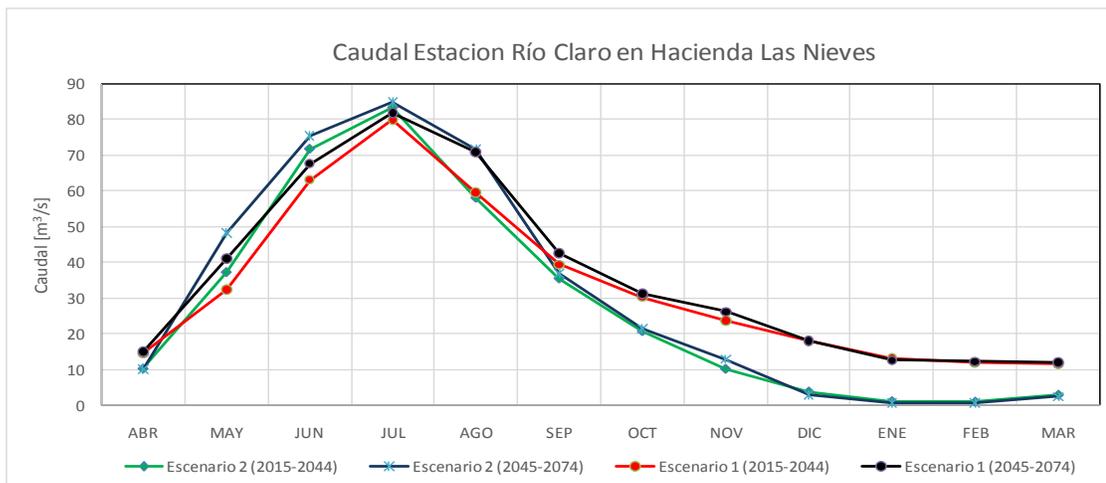


Figura 7-9: Variación estacional para la estación Río Claro en Tunca, escenario 2.

7.2.2 Embalse Los Cristales.

En el periodo I el caudal anual sería de 1.91 m³/s y periodo II el caudal anual sería de 2.02 m³/s. La variación anual del caudal de salida del embalse Los Cristales se grafica en la Figura 7-10. En esta se observa que no existe diferencia considerable entre el escenario 1 y el escenario 2.

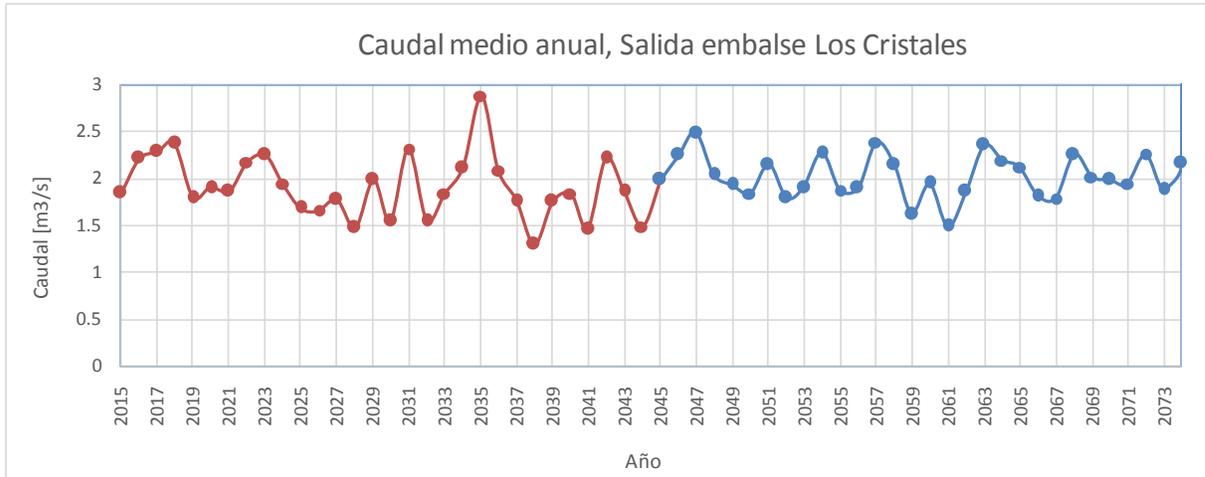


Figura 7-10: Variación caudal de salida embalse Los Cristales, escenario 2.

En la Figura 7-11 se presenta el volumen que se almacenaría en un año seco y un año húmedo de cada periodo. Se observa que tanto para los años secos como los húmedos el embalse tendría un ciclo anual de llenado y vaciado. Con respecto al vaciado este se produciría más rápido que en el escenario 1 y permanece vacío un mayor periodo.

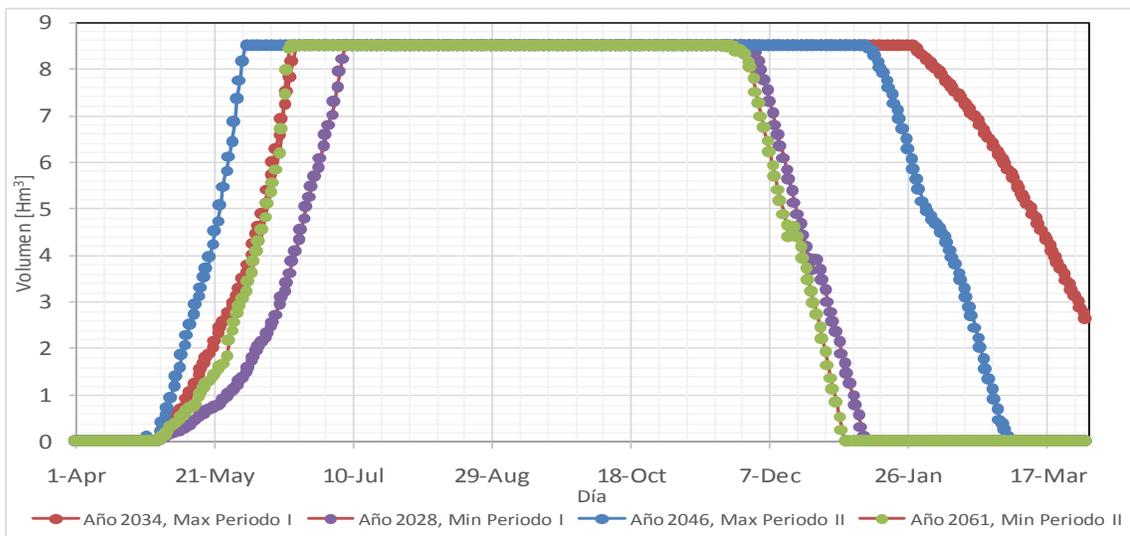


Figura 7-11: Volumen almacenado embalse Los Cristales, escenario 2.

7.2.3 Satisfacción de la demanda.

Se Presenta en la Figura 7-12 la satisfacción de la demanda, la cual no se satisface para 4 años del periodo I y para 2 años del periodo II, en estos años la satisfacción de la demanda no alcanza el 85%.

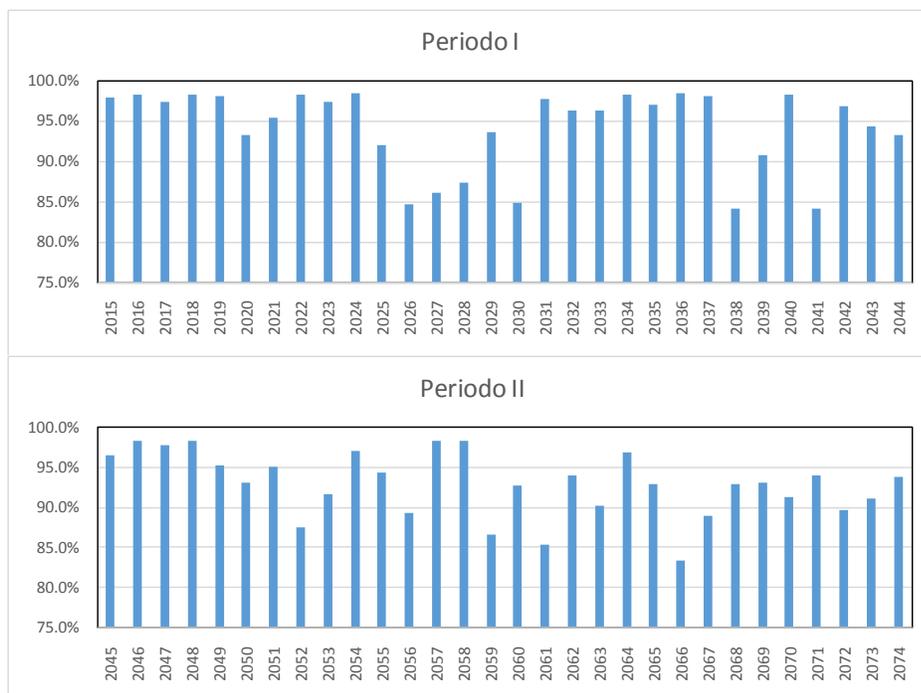


Figura 7-12: Satisfacción de la demanda en los Periodos I y II, escenario 2.

7.2.4 Cambios en la demanda de los cultivos.

En la Figura 7-13 se presentan los cambios en los cultivos, donde se produciría una variación del 285% para el periodo I y 301% para el periodo II, con respecto al periodo de 1994-2006. Esto se debe al aumento de las temperaturas, pero primordialmente al aumento del área cultivada

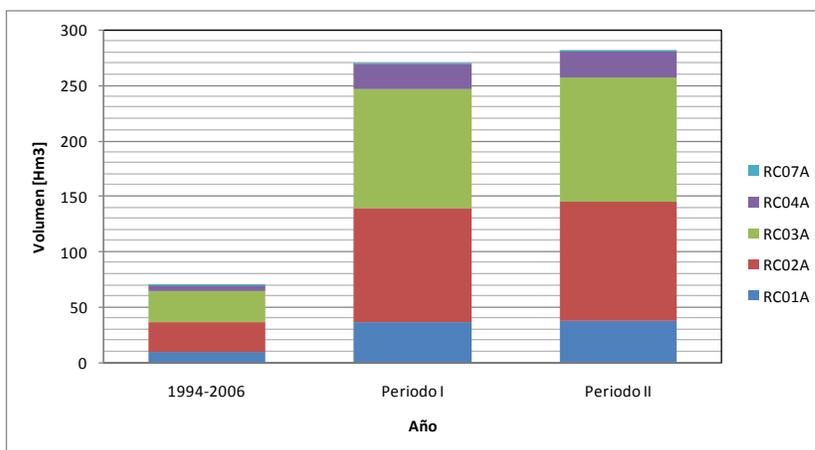


Figura 7-13: Demanda de cultivos en los periodos de calibración-validación y los periodos I y II, escenario 2.

7.3 Escenario 3: Aumento en la capacidad del embalse.

7.3.1 Disponibilidad del recurso hídrico.

En el periodo de calibración el caudal anual de salida es de 29.1 m³/s, mientras que en el Periodo I sería de 28.3 m³/s y para el Periodo II sería de 31 m³/s, en la Figura 7-14 se observa el caudal medio anual para ambos periodos.

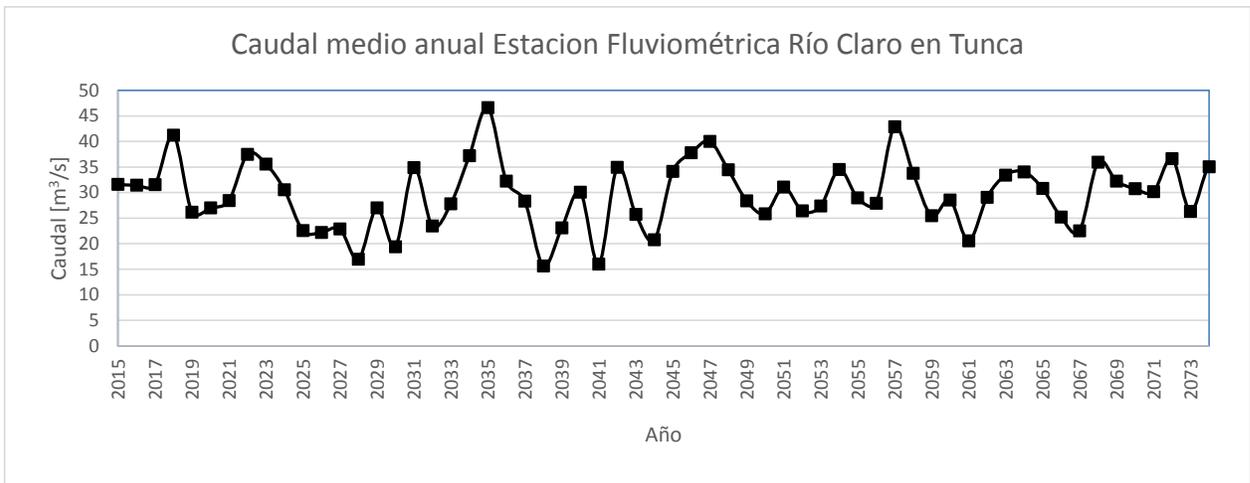


Figura 7-14: Caudal medio anual, estación Río Claro en Tunca, escenario 3.

El caudal medio mensual para la estación Río Claro en Tunca durante los periodos I y II, para los escenarios 1 y 2 se grafican en la Figura 7-15.

En general vemos que el caudal de salida volvería a ser semejante al escenario 1 evitando la considerable baja en los caudales estivales visto en el escenario 2, mientras que se mantendría en la temporada invernal.

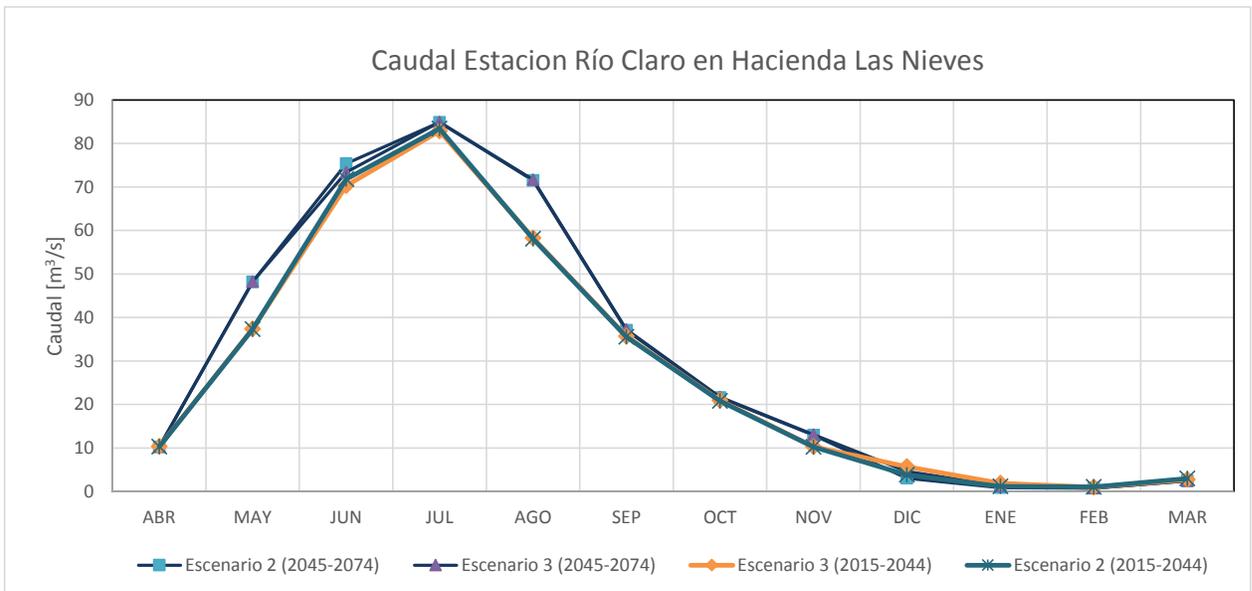


Figura 7-15: Variación estacional para la estación Río Claro en Tunca, escenario 3.

7.3.2 Embalse Los Cristales.

En el periodo de 1994-2006 el caudal anual de salida del embalse Los Cristales es de 1.2 m³/s, mientras que para el periodo I el caudal anual sería de 1.92 m³/s y periodo II el caudal anual sería de 2.02 m³/s. La variación anual del caudal de salida del embalse Los Cristales se grafica en la Figura 7-16.

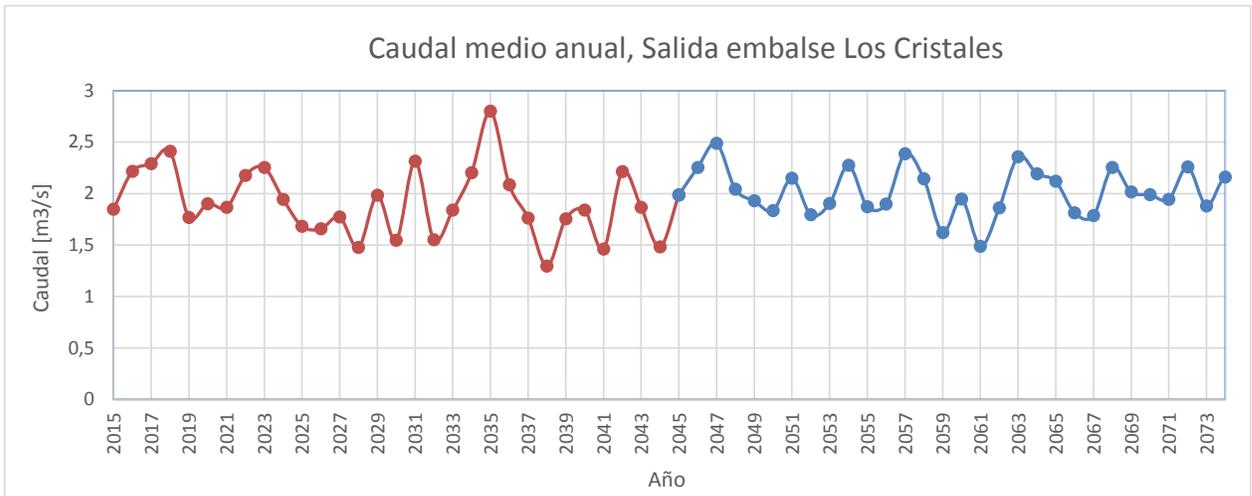


Figura 7-16: Variación caudal de salida embalse Los Cristales, escenario 3.

En la Figura 7-17 se presenta el volumen que se almacenaría en un año seco y un año húmedo para cada periodo. Se observa en esta figura que tanto para los años secos como los húmedos el embalse tiene un ciclo anual de llenado y vaciado.

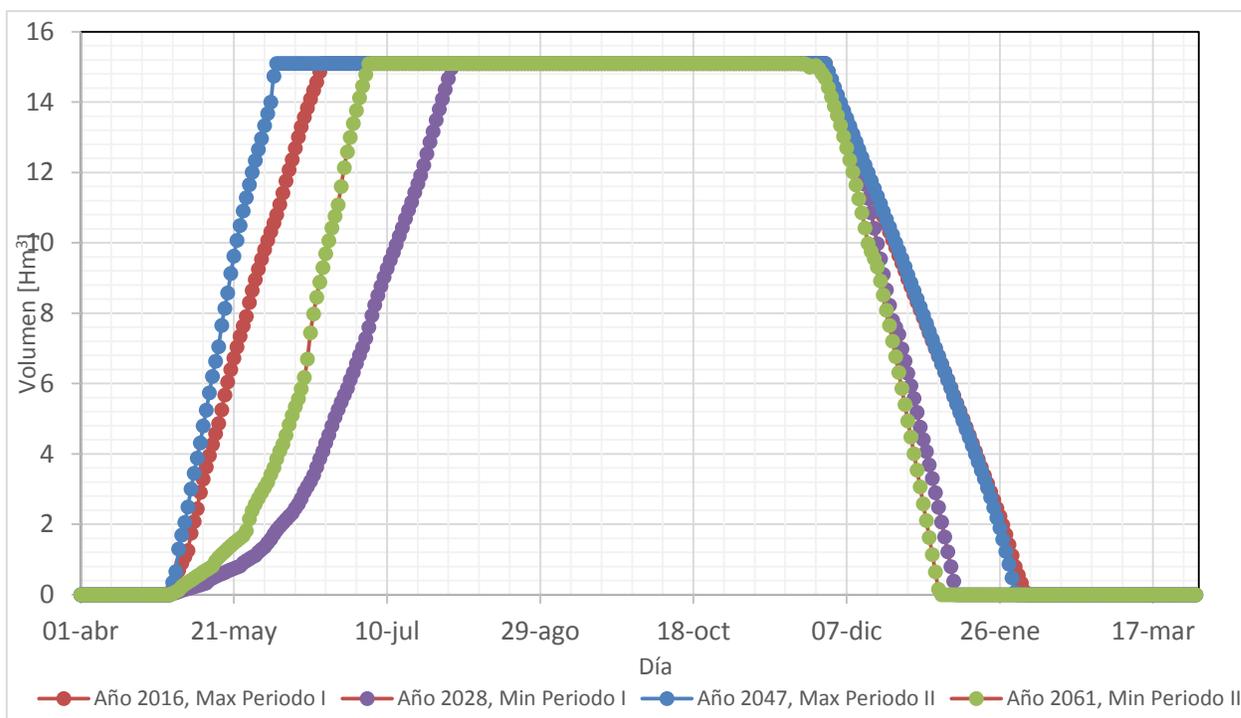


Figura 7-17: Volumen almacenado embalse Los Cristales, escenario 3.

7.3.3 Satisfacción de la demanda.

Se Presenta en la Figura 7-18 la satisfacción de la demanda, la cual se satisface para todo el periodo I y II, en año más crítico es el 2066 donde la demanda se satisfacen en un 85%.

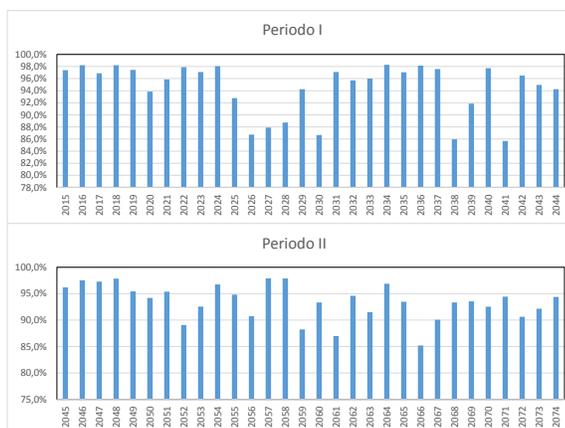


Figura 7-18: Satisfacción de la demanda en los Periodos I y II, escenario 3.

7.3.4 Cambios en la demanda de los cultivos.

En la Figura 7-19 se presentan los cambios en los cultivos, donde se produciría una variación del 285% para el periodo I y 301% para el periodo II, con respecto al periodo de 1994-2006. Esto se debe al aumento de las temperaturas. Esto se debe al aumento de las temperaturas, pero primordialmente al aumento del área cultivada

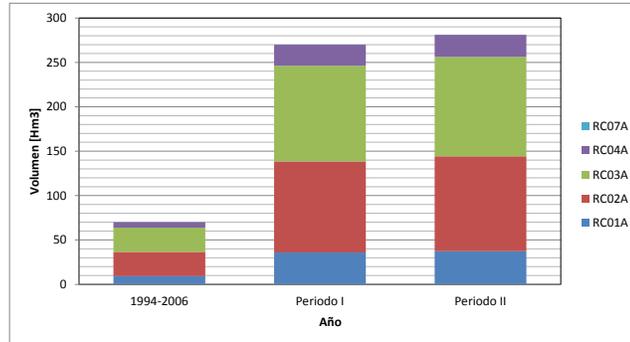


Figura 7-19: Demanda de cultivos en los periodos de calibración-validación y los periodos I y II, escenario 3.

7.4 Escenario 4: Cambios en los tipos de cultivos.

7.4.1 Disponibilidad del recurso hídrico.

En el periodo de calibración el caudal anual de salida es de 29.1 m³/s, mientras que en el Periodo I sería de 28.6 m³/s y para el Periodo II sería de 31.3 m³/s, en la Figura 7-20 se observa el caudal medio anual para ambos periodos.

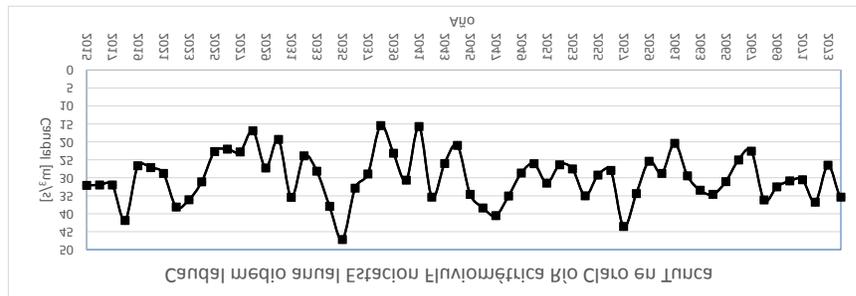


Figura 7-20: Caudal medio anual, estación Río Claro en Tunca, escenario 3.

El caudal medio mensual para la estación Río Claro en Tunca durante el periodo de calibración-validación y para los periodos I y II se grafica en la Figura 7-21.

En general vemos que el caudal de salida iría en aumento con respecto al periodo 1994-2006, en un orden del 10% para el Periodo I y entorno del 20% para el Periodo II. Los cambios en los caudales medios mensuales provocarían un aumento de los caudales invernales y una disminución en los caudales estivales.

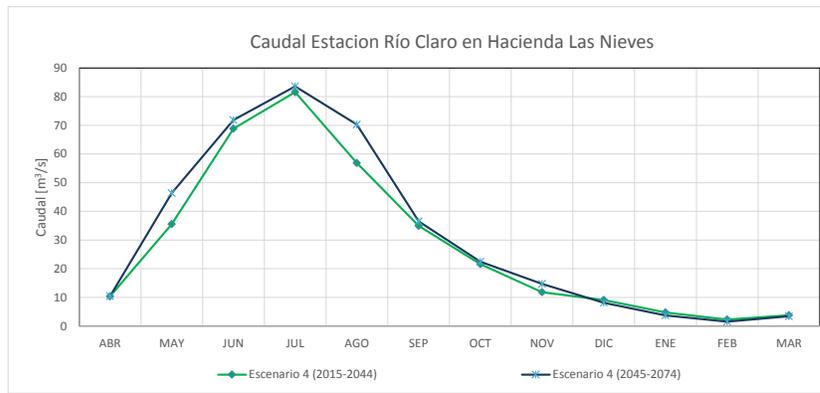


Figura 7-21: Variación estacional para la estación Río Claro en Tunca, escenario 3.

7.4.2 Embalse Los Cristales.

En el periodo I el caudal anual sería de 1.91 m³/s y periodo II el caudal anual sería de 2.02 m³/s. La variación anual del caudal de salida del embalse Los Cristales se grafica en la Figura 7-22.

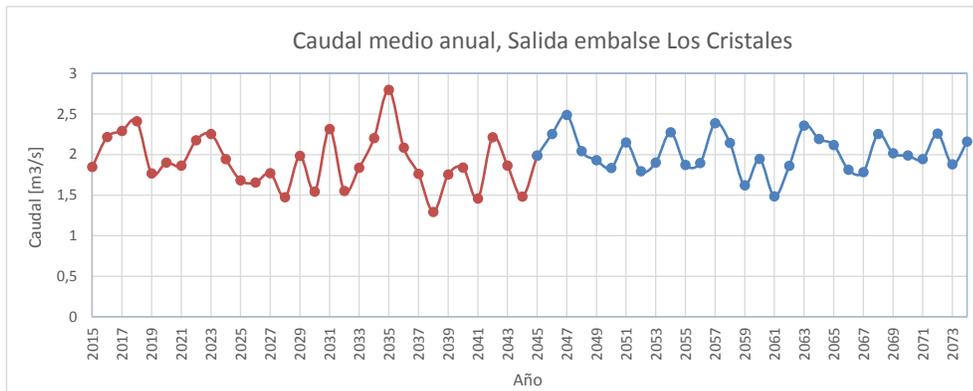


Figura 7-22: Variación caudal de salida embalse Los Cristales, escenario 3.

En la Figura 7-23 se presenta el volumen que se almacenaría en un año seco y un año húmedo para cada periodo. Se observa en esta figura que tanto para los años secos como los húmedos el embalse tiene un ciclo anual de llenado y vaciado.

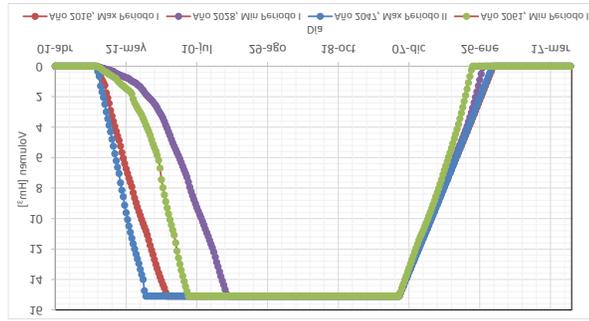


Figura 7-23: Volumen almacenado embalse Los Cristales, escenario 3.

7.4.3 Satisfacción de la demanda.

Se Presenta en la Figura 7-24 la satisfacción de la demanda, la cual se satisface para todos los años sobre el 93%.

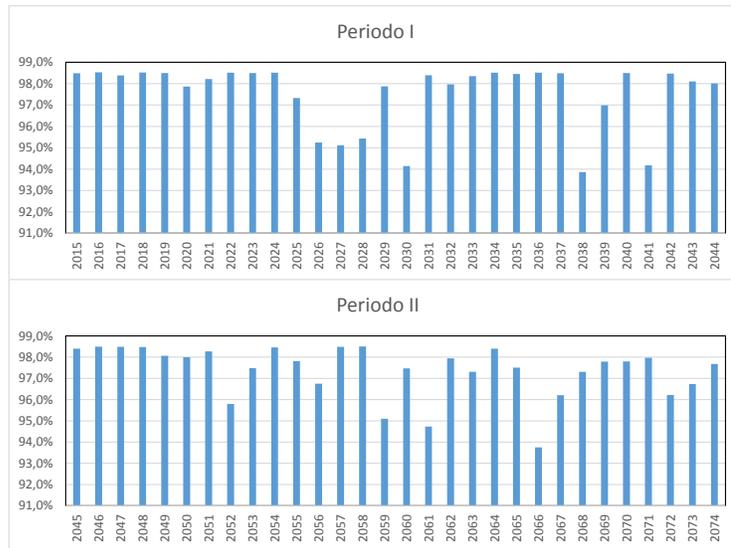


Figura 7-24: Satisfacción de la demanda en los Periodos I y II.

7.4.4 Cambios en la demanda de los cultivos.

En la Figura 7-25 se presentan los cambios en los cultivos, donde se produciría una variación del 257% para el periodo I y 272% para el periodo II, con respecto al periodo de 1994-2006. Esto se debe al aumento de las temperaturas y al cambio de los cultivos que se producirían en la cuenca.

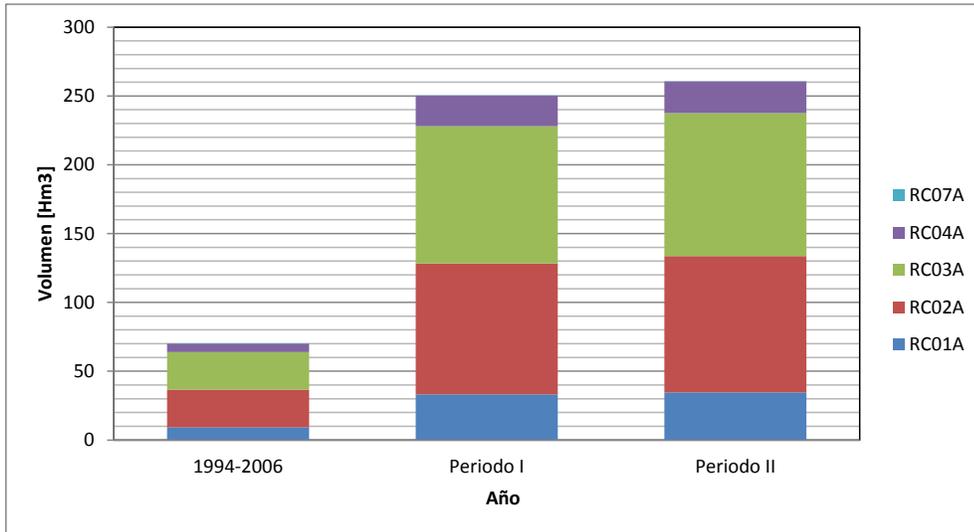


Figura 7-25: Demanda de cultivos en los periodos de calibración-validación y los periodos I y II, escenario 3.

7.5 Análisis de escenarios.

Para el escenario 1 tendríamos respecto al periodo de calibración-validación, la cuenca está aportando más caudal aguas abajo de la estación Río Claro en Tunca, al observar la gráfica de caudales mensuales, este aumento de caudales se produce en la época invernal, lo cual nos indica que en la situación actual es imposible aprovechar estos recursos ya que es el periodo en el que el embalse Los Cristales está a toda capacidad y la demanda de cultivos está satisfecha.

El embalse en el escenario 1, asegura el abastecimiento para los cultivos en el periodo estival, su capacidad permitiría abastecer a la cuenca hasta mediados de marzo, para luego a mediados de abril empezar nuevamente a almacenar para el periodo seco.

La altura de nieve en las cuencas para el escenario 1, descenderían en un 40% esto indica que la cuenca disminuye sus caudales en la época estival, lo cual haría a los cultivos más dependientes del embalse Los Cristales.

En el escenario 1 la satisfacción de la demanda estaría ampliamente cubierta superando por amplio margen el 85% de satisfacción. Esto es inclusive considerando el aumento en la demanda por el efecto del aumento de la temperatura media de la cuenca.

Ante el escenario 2 tendríamos que con respecto al escenario 1, la cuenca está aportando menos caudal aguas abajo de la estación Río Claro en Tunca, al observar la gráfica de caudales mensuales, esta disminución de caudales se produce en la época estival, lo cual ratifica que el estrés hídrico se produce en este periodo.

El embalse en el escenario 2, el comportamiento es más variable, ya que se registra años secos donde el embalse se vacía a mediados de enero, en cambio en los años húmedos el embalse no se vacía en ningún momento del año.

En el escenario 2 la satisfacción de la demanda estaría cubierta a excepción de 4 años en el periodo I y 2 años en el periodo II. Además se observa que la satisfacción de la demanda disminuye, con respecto al escenario 1, en todos los años simulados. Esto es esperado al considerar que la demanda de cultivos aumentaría por efectos de la temperatura y del aumento del área cultivada.

8. CONCLUSIONES.

8.1 Calibración y validación.

El proceso de calibración y validación del modelo en un régimen diario es más complejo que un proceso semejante a régimen mensual, esto es debido a la variabilidad diaria que se observa en los valores de las precipitaciones, muy distinta a la variación mensual mucho más atenuada y en el caso de la zona con un régimen nivo-pluvial, con un máximo en invierno y otro suavizado en los meses de deshielo.

Entre los aspectos que dificultó el proceso de calibración y validación es la ausencia de datos del funcionamiento del embalse los Cristales, el cual debió ser estimado a partir de datos de volumen disponible en el embalse. Un segundo hecho que dificultó la calibración es la baja cantidad de datos fluviométricos en la estación Río Claro en Tunca.

No obstante a estos dos hechos se ha logrado valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe definidos como muy buenos en ambas calibraciones y validaciones, con respecto a las estaciones fluviométricas de Claro en Tunca y Claro en Hacienda las Nieves.

8.2 Escalamiento de estadística PRECIS-DGF.

El modelo PRECIS-DGF para la variable precipitación a nivel diario, trae consigo el problema de no representar de forma adecuada la estacionalidad de las precipitaciones y la ausencia de periodos con precipitación nula, afecta una buena representación de los datos estadísticos, esto sin embargo se logra corregir con el escalamiento temporal, logrando que los valores tengan la estacionalidad de los datos observados en las estaciones meteorológicas, aun así la representación de años lluviosos y años secos no es la deseada. Ante esto quizás sería provechoso estimar escenarios posibles donde las precipitaciones disminuyan un porcentaje con respecto al periodo con estadísticas.

Por otro lado la variable temperatura al tener poca variación en la escala diaria ha podido representar la estacionalidad con el escalamiento temporal y ha reflejado de una forma

adecuada la tendencia a través de los años de las temperaturas en la cuenca por lo cual este ajuste es muy satisfactorio.

8.3 Perspectivas de la agricultura.

El aumento de las temperatura se ve reflejado en un aumento de la demanda evapotranspirativa de los cultivos en un 34% para el periodo I y 40% para el periodo II, con respecto al periodo de calibración-validación.

La ausencia de lluvias en la temporada estival y la disminución de la acumulación de nieve en la cabecera de la cuenca, configuran un inminente escenario de estrés hídrico para los años secos primordialmente en verano. Esto acarrea baja en la calidad y pérdidas de rendimiento de los cultivos.

En la VI Región los cultivos predominantes son maíz, 90% de los cultivos anuales, el manzano, 47% de los cultivos permanentes y tomate, 54% de las hortalizas, lo cual marca una muy baja diversificación de los cultivos en la zona. Esto podría explicarse por la demanda de estos productos, pero como se ve en el Capítulo IV existe una gran variedad de cultivos donde la oferta es menor que la demanda y existe oportunidades económicas para diversificar la oferta.

Sin embargo la calidad de los suelos, el tipo de clima y la ubicación de la cuenca, muy cercana a las grandes urbes y los puertos, sugieren que esta zona continuará siendo explotada agrícolamente de una manera intensiva y creciente, el único factor limitante que se aprecia es la falta del recurso hídrico.

8.4 Disponibilidad del recurso hídrico.

Se ha concluido que las precipitaciones anuales no se verían alteradas, no así las temperaturas, las cuales aumentarían su valor medio año a año. Estos cambios climáticos no inciden de mayor medida la disponibilidad de recursos hídricos anuales, pero si cambia su disponibilidad estacional, en los periodos futuros se tendría un aumento de los caudales en la estación invernal y una disminución de los caudales en el periodo estival.

El embalse Los Cristales es una gran herramienta para mejorar la disponibilidad del recurso hídrico de la Cuenca del Río Claro en Tunca, pero para ello se requiere contar con información actualizada del sistema agrícola y las necesidades hídrica de los actores de la cuenca, de tal manera de administrar de manera eficiente los recursos hídricos disponibles.

8.5 Medidas de Adaptaciones Recomendadas.

El análisis de escenarios futuros para la cuenca de Río Claro indica que habría una baja de recurso hídrico en el periodo estival y un aumento de estos en el periodo invernal, además de un aumento en la demanda hídrica de los cultivos, producto del aumento en la temperatura media de la cuenca. Ante este escenario se proponen algunas adaptaciones que se debiesen implementar, a continuación se presentaran primero las dos medidas que han sido evaluadas en el Capítulo VII y otras que si bien no han sido analizadas, sin duda contribuyen a mejorar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del Río Claro en Tunca.

Aumentar el volumen de embalse Los Cristales.

El aumento del embalse aumenta la seguridad de riego y permite el aumento de las áreas a regar, pero lo más importante es que es capaz de regular los cambios que se presentarían en la disponibilidad del recurso hídrico. También existe la posibilidad de crear otro embalse en la zona y no necesariamente peraltar el embalse existente. Si bien esta no fue la solución analizada, apunta a lo mismo; regular los caudales en la cuenca.

Si bien esta medida requiere una alta inversión económica, son sumamente necesarias para la adaptación de esta cuenca y de las cuencas de secano que son abastecidas por el Río Claro y con claridad estas inversiones se recuperarán, debido a la creciente demanda agrícola que se prevé, tanto nacional como internacional.

Diversificar los cultivos.

Al diversificar los cultivos se privilegia a los que tenga una demanda hídrica más semejante a la oferta presente en la cuenca, de esta forma podemos utilizar mejor la oferta hídrica disponible, tal es el caso de los frutales como manzanos, naranjos, paltos o cereales como el trigo, que como se ha visto tienen una alta demanda en el mercado y se venden a muy buenos precios. De esta forma se asegura una buena rentabilidad de los cultivos y un menor riesgo económico para los agricultores.

Este escenario es un poco complejo, debido a que los agricultores optan por repetir sus cultivos temporada a temporada por temas culturales, pero la creciente demanda de frutas para la exportación y la agroindustria han aumentado los precios de estas frutas. Por ello, la motivación por cultivar estos frutales que tienen una demanda hídrica más homogénea durante el año se espera que siga en aumento. Sumado a esto se deben agregar políticas públicas que incentiven la diversificación de los cultivos que sean eficientes hídricamente.

Eficiencia en el regadío

El sistema de riego en la VI Región están en una eficiencia alrededor del 50%, esto depende del tipo de cultivo, pero aun así se debe avanzar en mejorar esta eficiencia a niveles cercanos al 60%, aumentando el riego tecnificado, como el riego por goteo que tiene una eficiencia del 90%, o bien el micro-jet o micro-aspersión e ir dejando atrás métodos como el de surcos que tienen eficiencias del 40%. El recubrimiento de los canales de riego de tal forma de evitar pérdidas en el transporte del recurso es fundamental.

Plan de manejo integrado de recursos hídricos.

Crear un plan de manejo integrado de recursos hídricos, en donde se contemple tanto la Cuenca del Río Claro en Tunca, como las cuencas a las que esta sirve con recursos hídricos y considere todos los usos de agua, derechos entregados, etc. Este plan de manejo debiese considerar a lo menos los siguientes aspectos:

- Aumentar la eficiencia en la utilización del embalse Los Cristales afinando una regla de explotación del embalse acorde al nuevo escenario.
- Revisar la utilización de estos derechos de agua y crear leyes que fomenten la eficiencia imponiéndola como requisito para entregar nuevos derechos de agua en la zona o de lo contrario las cuencas aguas abajo se verán afectadas con esta ineficiencia en el uso del recurso.
- Utilizar modelos predictivos del clima, aun cuando estos tengan las dificultades ya mencionadas, son sumamente necesarios para propiciar trabajos que analizan escenarios probables, ya que las medidas de adaptación demoran años en ser implementadas o construidas. Además los planes de manejo de los recursos hídricos se deben realizar a largo plazo teniendo en cuenta el desarrollo sustentable de los sistemas hídricos en juego y deben estar a cargo del Estado de tal forma de velar por la maximización de los beneficios de todos los actores involucrados

9. REFERENCIAS.

- AGRIMED. (2008). *Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.*
- Allen R., P. P. (2009). *Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. Utah State University Logan, Utah, U.S.A.*
- Climático, O. e. (2008). *Plan nacional de adaptación al cambio climático. Ministerio de medio ambiente, España.*
- Figuroa, 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.* Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente.
- 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.*
- IPCC. (1992). *Informe complementario al primer informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Río de Janeiro, Brasil.*
- IPCC. (1995). *Segundo 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. Departamento de Ingeniería Civil, 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. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*
- Molnar, P. (2011). *"Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.*

Raddatz, D. (2011). *Efecto del cambio climático en la seguridad hidrológica de obras hidráulicas. Análisis en cuencas pluviales de la zona Central de Chile para el escenario A2. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*

Salgado, B. (2011). *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. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*

Sieber, J. (2011). *Water Evaluation And Planning System, User Manual.* Stockholm Environment Institute, U.S. Center-

Stern. (2007). *La economía del cambio climático. Foreign and Commonwealth Office, United Kingdom.*

Vargas, X. & Lagos M. (2011). *Variación de eventos extremos de precipitación diaria proyectos a mediados del siglo XXI, resultados en regiones de Coquimbo y Maule.* Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XX Congreso Chileno de Hidráulica.

WEAP. (2012). *Bienvenidos a WEAP. Sistema de Evaluación y Planificación del Agua.* <http://www.weap21.org/>.