



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**IMPLEMENTACION Y USO DEL MODELO WEAP EN CUENCAS NIVALES DE LA IV  
REGION PARA EL ANALISIS DEL CAMBIO CLIMATICO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL**

**GABRIEL ANTONIO MARDONES MORALES**

PROFESOR GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISION:  
JAMES MCPHEE TORRES  
DAMARIS ORPHANÓPOULOS STEHR

SANTIAGO DE CHILE  
ENERO 2009

## “IMPLEMENTACION Y USO DEL MODELO WEAP EN CUENCAS NIVALES DE LA IV REGION PARA EL ANALISIS DEL CAMBIO CLIMATICO”

Los recursos hídricos forman una parte importante en el desarrollo económico del país, más aun en regiones en las cuales se tiene un amplio desarrollo del área agrícola como el caso de la IV región.

El objetivo principal de este trabajo es simular mediante el modelo WEAP los caudales futuros en los períodos 2036 – 2065 y 2071 - 2100 en las cuencas nivales de la IV Región Elqui en Algarrobal y Hurtado en San Agustín.

Se construyeron los modelos de ambas cuencas, los cuales fueron calibrados y validados obteniendo coeficientes de Nash - Sutcliffe del orden de 0,7, a los cuales posteriormente se les aplicaron condiciones futuras de temperatura y precipitación.

Para simular las condiciones meteorológicas futuras se han desarrollado posibles escenarios de emisión de gases de efecto invernadero y aerosoles, basándose en distintas directrices de desarrollo de la población mundial. En el presente estudio se utilizaron los resultados del modelo PRECIS para el escenario A2 generados por el departamento de geofísica de la Universidad de Chile.

Las variables generadas por el modelo PRECIS en la zona de estudio, sobrestiman las precipitaciones y entregan datos de temperatura más bajos que los registrados en las estaciones para el período de observación, por lo que fue necesario realizar correcciones de estos datos mediante métodos estadísticos.

Las correcciones a los datos meteorológicos del modelo PRECIS muestran una disminución en las precipitaciones medias anuales. En la cuenca Elqui en Algarrobal de 140 mm/año entre los años 1979-2005 a 130 mm/año entre los años 2071-2100, y en la cuenca Hurtado en San Agustín de 175 mm/año entre los años 1977-2005 a 125 mm/año entre los años 2071-2100 y un aumento de 6°C en la temperatura media anual para el periodo 2071-2100, lo que se traduce en una disminución de los caudales futuros en ambos periodos analizados (aproximadamente 30% menos en el periodo 2071-2100), y lo que es aun más grave, es el aumento del estrés hídrico y periodos más prolongados de sequías, debido principalmente a un cambio de régimen hidrológico en ambas cuencas, originado por un adelantamiento en el derretimiento de nieve.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo durante mis años de estudio. A mis papas, a René, Andrés, Paula y a mi abuela Gaby que desde arriba siguió formando parte de esto.

También agradecer a la profe Ximena por el apoyo, tiempo y disposición para el desarrollo de este trabajo, como también a los miembros de la comisión James McPhee y Damaris Orphanópoulos por las observaciones realizadas.

Agradecimientos también para los “Ercillanos-beauchefianos”: Hadad, guru, topo, mono, gonchi, gato, Riquelme y Carrasco que hicieron mi estadía en la universidad aun más amena.

A los nuevos amigos que conocí en la escuela: Mena, Cesar, Carlos, Pedro, Jp, Plubins, Jimmy y Pelado.

Y finalmente a mi polola Catalina, un pilar fundamental en mi vida en mis últimos años de estudio.

# TABLA DE CONTENIDOS

<b><u>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 MOTIVACION</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
<b>1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME</b> .....	<b>3</b>
<b><u>CAPÍTULO 2 : DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA</u></b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 CAMBIO CLIMATICO Y ESCENARIOS DE EMISION</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2 GENERALIDADES DE LOS MODELOS</b> .....	<b>5</b>
2.2.1 Modelo WEAP .....	6
<b><u>CAPÍTULO 3 : CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</u></b> .....	<b>18</b>
<b>3.1 CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL</b> .....	<b>18</b>
3.1.1 Ubicación .....	18
3.1.2 Clima .....	19
3.1.3 Geología y Volcanismo .....	20
3.1.4 Recursos Superficiales y Subterráneos .....	21
3.1.5 Uso de Suelo.....	22
3.1.6 Régimen Hidrológico.....	23
<b>3.2 CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTIN</b> .....	<b>24</b>
3.2.1 Ubicación .....	24
3.2.2 Clima .....	26
3.2.3 Geología y Volcanismo .....	26
3.2.4 Recursos Superficiales y Subterráneos .....	27
3.2.5 Uso de Suelo.....	28
3.2.6 Régimen Hidrológico.....	28
<b><u>CAPÍTULO 4 : APLICACIONES Y RESULTADOS</u></b> .....	<b>30</b>
<b>4.1 CREACION DE MODELOS</b> .....	<b>30</b>
4.1.1 Preparación de los datos .....	30

4.1.2	Cuenca Elqui en Algarrobal .....	34
4.1.3	Cuenca Hurtado en San Agustín .....	36
<b>4.2</b>	<b>RESULTADOS DE CALIBRACION Y VALIDACION .....</b>	<b>39</b>
<b><u>CAPÍTULO 5 : GENERACION DE ESCENARIOS FUTUROS.....</u></b>		<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>48</b>
<b><u>CAPÍTULO 6 : RESULTADOS .....</u></b>		<b>56</b>
<b>6.1</b>	<b>RESULTADOS CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL .....</b>	<b>56</b>
<b>6.2</b>	<b>RESULTADOS CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTIN .....</b>	<b>62</b>
<b><u>CAPÍTULO 7 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</u></b>		<b>67</b>
<b>7.1</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>
7.1.1	Modelo WEAP .....	67
7.1.2	Generación de Escenarios Futuros.....	67
7.1.3	Resultados Futuros .....	68
<b>7.2</b>	<b>COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>69</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1	CLASIFICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS .....	6
FIGURA 2.2	DIAGRAMA CONCEPTUAL Y ECUACIONES INCORPORADAS AL MODELO DE ESTANQUES .....	13
FIGURA 3.1	UBICACIÓN CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL .....	18
FIGURA 3.2	DELIMITACIÓN CUENCA .....	19
FIGURA 3.3	MAPA AGROCLIMÁTICO .....	20
FIGURA 3.4	CAUCES PRINCIPALES .....	21
FIGURA 3.5	ACUÍFEROS.....	22
FIGURA 3.6	USO DE SUELO .....	23
FIGURA 3.7	CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL (1979-2005) .....	24
FIGURA 3.8	UBICACIÓN CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTÍN .....	25
FIGURA 3.9	DELIMITACIÓN CUENCA .....	25
FIGURA 3.10	MAPA AGROCLIMÁTICO .....	26
FIGURA 3.11	CAUCES PRINCIPALES .....	27
FIGURA 3.12	ACUÍFEROS HURTADO SAN AGUSTÍN .....	27
FIGURA 3.13	USO DE SUELO .....	28
FIGURA 3.14	CURVA VARIACIÓN ESTACIONAL HURTADO EN SAN AGUSTÍN (1977-2005) .....	29
FIGURA 4.1	ESTACIONES DE TEMPERATURA.....	30
FIGURA 4.2	GRADIENTE EN PERÍODO DE INVIERNO.....	31
FIGURA 4.3	GRADIENTE EN PERÍODO DE DESHIELO .....	32
FIGURA 4.4	ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN .....	32
FIGURA 4.5	BANDAS DE ALTURA CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTÍN .....	33
FIGURA 4.6	POLÍGONOS DE THIESSEN .....	35
FIGURA 4.7	MODELO DE LA CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL .....	36
FIGURA 4.8	DISCRETIZACIÓN HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	37
FIGURA 4.9	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL VS ALTURA.....	38
FIGURA 4.10	MODELO HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	39
FIGURA 4.11	VOLUMEN ANUAL SIMULADO Y OBSERVADO CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL .....	40

FIGURA 4.12 PROMEDIO DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES SIMULADOS Y OBSERVADOS CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL.....	41
FIGURA 4.13 CAUDALES MEDIOS MENSUALES SIMULADOS Y OBSERVADOS CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL.....	42
FIGURA 4.14 CORRELACIÓN CAUDALES MEDIOS MENSUALES SIMULADOS Y OBSERVADOS CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL.....	42
FIGURA 4.15 VOLUMEN ANUAL SIMULADO Y OBSERVADO CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	44
FIGURA 4.16 PROMEDIO DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES SIMULADOS Y OBSERVADOS CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	45
FIGURA 4.17 CAUDALES MEDIOS MENSUALES SIMULADOS Y OBSERVADOS CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	46
FIGURA 4.18 CORRELACIÓN CAUDALES MEDIOS MENSUALES SIMULADOS Y OBSERVADOS CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	46
FIGURA 5.1 ANÁLISIS DE FRECUENCIA PRECIPITACIÓN MENSUAL PRECIS LA LAGUNA EMBALSE.....	49
FIGURA 5.2 ANÁLISIS DE FRECUENCIA PRECIPITACIÓN MENSUAL ESTACIÓN LA LAGUNA EMBALSE.....	50
FIGURA 5.3 CORRELACIÓN PRECIPITACIÓN PRECIS ESTACIÓN LA LAGUNA EMBALSE.....	50
FIGURA 5.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIA TEMPERATURA MES DE ABRIL PRECIS JUNTAS.....	51
FIGURA 5.5 ANÁLISIS DE FRECUENCIA TEMPERATURA MES DE ABRIL ESTACIÓN JUNTAS.....	51
FIGURA 5.6 CORRELACIÓN TEMPERATURA MES DE ABRIL PRECIS ESTACIÓN JUNTAS.....	52
FIGURA 5.7 TENDENCIA PRECIPITACIÓN ELQUI EN ALGARROBAL.....	53
FIGURA 5.8 TENDENCIA TEMPERATURA ELQUI EN ALGARROBAL.....	53
FIGURA 5.9 TENDENCIA PRECIPITACIÓN HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	54
FIGURA 5.10 TENDENCIA TEMPERATURA HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	55
FIGURA 6.1 PROMEDIO MENSUAL PRESENTE Y FUTURO CAUDALES ELQUI EN ALGARROBAL.....	56
FIGURA 6.2 MÁXIMO CAUDAL MEDIO MENSUAL PRESENTE Y FUTURO CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL.....	57
FIGURA 6.3 ESTRÉS HÍDRICO PRESENTE Y FUTURO PARA $Q_{75\%}$ .....	58
FIGURA 6.4 ESTRÉS HÍDRICO PRESENTE Y FUTURO PARA $Q_{85\%}$ .....	59
FIGURA 6.5 ESTRÉS HÍDRICO PRESENTE Y FUTURO PARA $Q_{95\%}$ .....	59
FIGURA 6.6 CURVAS DURACIÓN DEL ESTRÉS PARA $Q_{75\%}$ .....	60
FIGURA 6.7 CURVAS DURACIÓN DEL ESTRÉS PARA $Q_{85\%}$ .....	61
FIGURA 6.8 CURVAS DURACIÓN DEL ESTRÉS PARA $Q_{95\%}$ .....	61
FIGURA 6.9 PROMEDIO MENSUAL PRESENTE Y FUTURO CAUDALES HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	62
FIGURA 6.10 MÁXIMO CAUDAL MEDIO MENSUAL PRESENTE Y FUTURO CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	63
FIGURA 6.11 ESTRÉS HÍDRICO PRESENTE Y FUTURO PARA $Q_{75\%}$ .....	64
FIGURA 6.12 ESTRÉS HÍDRICO PRESENTE Y FUTURO PARA $Q_{85\%}$ .....	64
FIGURA 6.13 ESTRÉS HÍDRICO PRESENTE Y FUTURO PARA $Q_{95\%}$ .....	64
FIGURA 6.14 CURVAS DURACIÓN DEL ESTRÉS PARA $Q_{75\%}$ .....	65
FIGURA 6.15 CURVAS DURACIÓN DEL ESTRÉS PARA $Q_{85\%}$ .....	66
FIGURA 6.16 CURVAS DURACIÓN DEL ESTRÉS PARA $Q_{95\%}$ .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 ESTACIONES DE TEMPERATURA.....	5
TABLA 2.2 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN MODELO WEAP.....	16
TABLA 4.1 ESTACIONES DE TEMPERATURA.....	31
TABLA 4.2 ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN.....	32
TABLA 4.3 CARACTERÍSTICAS SUBCUENCAS MODELO ELQUI EN ALGARROBAL.....	34
TABLA 4.4 COEFICIENTES DE PRECIPITACIÓN BANDAS HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	38
TABLA 4.5 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN ELQUI EN ALGARROBAL.....	43
TABLA 4.6 PARÁMETROS QUE SE VARIARON MENSUALMENTE.....	43
TABLA 4.7 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN HURTADO SAN AGUSTÍN.....	47
TABLA 4.8 PARÁMETROS DE VARIACIÓN MENSUAL.....	47
TABLA 6.1 CAUDALES DE ESTRÉS CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL.....	58
TABLA 6.2 CAUDALES DE ESTRÉS CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTÍN.....	63

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 MOTIVACION

El cambio climático puede generar dramáticas variaciones en el régimen hidrológico de una cuenca. Según los resultados del último informe del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático), del año 2007:

- Once de los 12 últimos años (1995 – 2006) se posicionan entre los 12 años más calientes de los años en que se tienen registros instrumentales de temperaturas promedios globales de superficie (desde 1850).
- Los glaciares de montañas y capas de nieve han declinado en promedio en ambos hemisferios.
- Se han observado sequías más largas e intensas sobre áreas cada vez más extensas desde los años 70, particularmente en los trópicos y sub-trópicos. El aumento de sequedad vinculado con temperaturas más altas y menores precipitaciones, ha contribuido a las sequías. También se han observado cambios en la temperatura superficial del mar, patrones de vientos, y cubiertas de nieve disminuidas en espesor y extensión han contribuido a las sequías.

En lo que respecta a las proyecciones realizadas para Chile, según el estudio “Variaciones climáticas en Chile Para el siglo XXI”, realizado el 2007 por el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, para los escenarios de emisión A2 y B2<sup>1</sup>, se espera que para fines del siglo XXI se produzca un aumento de la temperatura en todas las regiones del país, siendo mayores las del escenario A2. El cambio de temperatura media del escenario A2 respecto al clima actual sobre Chile continental varía entre 2° y 4°C, siendo más acentuado hacia las regiones andinas y disminuyendo de norte a sur. Estacionalmente el calentamiento es mayor en verano excediendo los 5°C en algunos sectores altos de la Cordillera de los Andes.

Las precipitaciones en las cumbres andinas marcan un contraste entre ambas laderas con un aumento en la ladera oriental (Argentina) y una disminución en la ladera occidental (Chile

---

<sup>1</sup> Los escenarios A2 y B2 son dos de los escenarios de emisiones futuros definido por el SRES (Special Reports on Emission Scenarios).

continental y el Pacífico adyacente), particularmente en latitudes medias y en las estaciones de verano y otoño. Este contraste se manifiesta más acentuado en el escenario A2 durante el verano, en que la precipitación sobre ciertos sectores de Chile centro-sur se reducen a la mitad e incluso a un cuarto del valor actual, al mismo tiempo que la precipitación futura se duplica (respecto a la actual) inmediatamente al este de la cordillera de los Andes.

Ante la posibilidad de que pudieran ocurrir en el sentido de que lo predicen los modelos del cambio climático, es conveniente anticiparse y desarrollar herramientas que permitan estimar los efectos que estos cambios podrían tener sobre el régimen hidrológico, en especial en los sectores donde el recurso es escaso.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

El principal objetivo del presente estudio radica en analizar el efecto del cambio climático mediante el modelo WEAP en los recursos hídricos de las cuencas nivales Elqui en Algarrobal y Hurtado en San Agustín, ubicadas en la IV Región de Coquimbo.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Dentro de los objetivos específicos se puede mencionar:

- Implementación (Calibración y Validación) del modelo WEAP en ambas cuencas.
- Uso del modelo para predecir series futuras de caudales bajo el escenario A2 de cambio climático en el período 2035-2065 y 2071-2100.
- Calcular el estrés hídrico presente y futuro.

### **1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME**

En el Capítulo 2 se entregan antecedentes recopilados de la literatura que tienen relación con el cambio climático y los distintos escenarios pronosticados para el futuro. También se incluye la descripción del modelo WEAP y las ecuaciones que utiliza en su funcionamiento.

La descripción de la zona de estudio y sus principales características como son el uso de suelo, cauces principales, régimen hidrológico se presentan en el Capítulo 3.

En el Capítulo 4 se muestran los procedimientos seguidos en la preparación de los modelos de las cuencas, como también los resultados obtenidos para la calibración y validación de estos.

La metodología seguida en la preparación de los datos futuros de entrada al modelo se presenta en el Capítulo 5.

En el Capítulo 6 se entregan los resultados obtenidos para el período futuro, realizando una comparación con los datos actuales.

Finalmente en el Capítulo 7 se exponen los comentarios y conclusiones del presente trabajo, así como también recomendaciones para futuros estudios.

## CAPÍTULO 2 : DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CAMBIO CLIMATICO Y ESCENARIOS DE EMISION

El IPCC escribió los informes especiales sobre escenarios de emisiones (SRES, Special Reports on Emission Scenarios) que fueron realizados con el fin de explorar los futuros desarrollos en el medioambiente enfocándose a la producción de gases de efecto invernadero y aerosoles.

Se desarrollaron cuatro familias de escenarios. Cada una de éstas tiene una descripción de futuro en cuanto a su demografía, sociedad, tecnología y aspectos políticos económicos. Dentro de cada familia hay por lo menos un escenario que explora la energía global, la industria y otros desarrollos y sus implicancias en las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

Los escenarios combinan dos sets de tendencias divergentes: un set con en el que se tendrá una mayor preocupación por temas económicos versus una mayor preocupación en temas medioambientales y otro set donde se enfatiza un crecimiento global en contraposición a uno que tiene su énfasis en un crecimiento regional.

A continuación se muestran las principales características de cada familia de escenarios definida por el SRES:

- **A1:** un mundo futuro de rápido crecimiento económico, bajo crecimiento poblacional y rápida introducción de nuevas y más eficientes tecnologías. Los temas base más importantes son la convergencia económica y cultural y la capacidad de construcción, con una sustancial reducción en las diferencias regionales de los ingresos per cápita. En este mundo, la gente persigue el bienestar personal antes que la calidad ambiental.
- **A2:** un mundo diferenciado. El tema base es el de fortalecimiento de las identidades culturales regionales, con un énfasis en valores familiares y tradiciones locales, gran crecimiento poblacional, y menos preocupación por el rápido crecimiento económico.
- **B1:** un mundo convergente con un rápido cambio de las estructuras económicas, “des-materialización” e introducción de tecnologías limpias. El énfasis está en las soluciones

globales de sustentabilidad medioambiental y social, incluyendo esfuerzos para un rápido desarrollo económico, des-materialización de la economía, y mejoramiento de la equidad.

- **B2:** un mundo en el cual el énfasis está sobre las soluciones locales para la sustentabilidad económica, social, y ambiental. Este es un mundo heterogéneo con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso, pero con un fuerte énfasis en la iniciativa comunitaria y en la innovación social, para encontrar soluciones locales más que globales.

Las características principales de cada grupo de escenarios, se presentan en la Tabla 2.1

**Tabla 2.1 Estaciones de Temperatura**

Estimación del Escenario	1990	SRES Escenarios para 2100			
		A1	A2	B1	B2
Población (billones)	5.252	7,1	15,1	7,2	10,4
Concentración de CO <sub>2</sub> [ppmv]	354	680	834	547	601
Cambio de temperatura media anual global [°C]	---	2,52	3,09	2,04	2,16
Rango [°C]	---	1,70 – 3,66	2,12 – 4,41	1,37 – 2,99	1,45 – 3,14
Elevación del nivel del mar promedio global [cm]	---	58	62	50	52
Rango [cm]	---	23 – 101	27 – 107	19 – 90	20 – 93

Fuente: Carter et al (1999)

## 2.2 GENERALIDADES DE LOS MODELOS

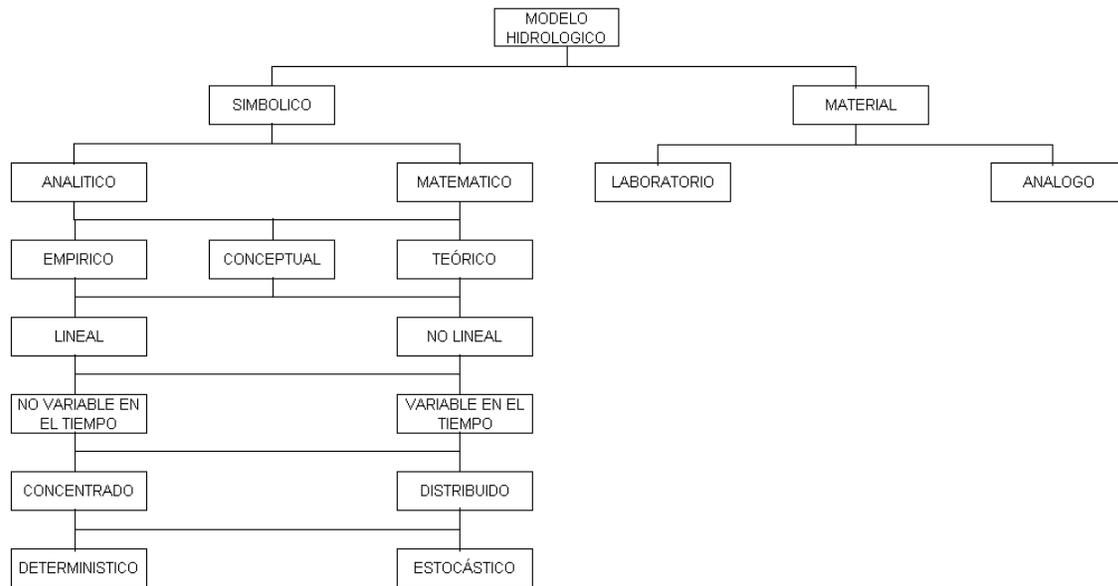
La hidrología trata de los fenómenos naturales complejos encontrados en el ciclo hidrológico. Los procesos como precipitación, evaporación, infiltración y escurrimiento en un río dependen de un gran número de factores que dificultan el análisis cualitativo y cuantitativo de los mismos.

Un modelo es la representación de algún objeto o sistema, en un lenguaje o forma de fácil acceso y uso, con el objetivo de entender y buscar sus respuestas para diferentes entradas. (Tucci, 1998)

## Clasificación de Modelos de simulación Hidrológica

Existen variadas formas de clasificar los modelos de simulación hidrológica. Según Singh estos se dividen en materiales y simbólicos o formales como se muestra en la Figura 2.1:

Figura 2.1 Clasificación de Modelos Hidrológicos



Fuente: Xu, 2002

Modelos materiales: Un modelo material, también llamado modelo físico, es la representación real de un sistema por otro sistema, el cual tiene propiedades similares, pero es mucho más fácil trabajar con él. Los modelos materiales pueden ser clasificados en modelos a escala y modelos análogos. Los modelos a escala representan el sistema en una escala reducida manteniendo las propiedades físicas, en cambio los modelos análogos no necesariamente mantienen la apariencia del sistema, solo lo representan a través de otro sistema con propiedades similares.

Modelos Simbólicos o Formales: Es una expresión simbólica en términos lógicos de una situación idealizada y relativamente simple que comparte las propiedades estructurales del sistema original.

### 2.2.1 Modelo WEAP

WEAP (Water Evaluation And Planning) es una herramienta computacional comercial que provee un enfoque integral a la planificación de los recursos hídricos.

Fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute's Boston Center del Tellus Institute, se encuentra disponible para ser descargado en la página <<http://www.weap21.org>>, existiendo licencias gratuitas para organizaciones académicas, gubernamentales y sin fines de lucro en países en desarrollo.

WEAP se ha aplicado en cuencas de docenas de países, incluyendo los Estados Unidos, México, Brasil, Alemania, Ghana, Burkina Faso, Kenia, Sudáfrica, Mozambique, Egipto, Israel, Omán, Asia central, India, Sri Lanka, Nepal, China, Corea del Sur, y Tailandia.<sup>2</sup>

Las principales características de WEAP son:

- Provee de una estructura común para organizar la información de recursos hídricos a cualquier nivel deseado, esto es desde una cuenca local a un río internacional.
- Se pueden desarrollar escenarios para explorar posibles futuros en la disponibilidad de recursos hídricos.
- Posee un sistema para almacenar información sobre demandas y abastecimientos de agua.
- Evalúa opciones de desarrollo y manejo, y toma en cuenta muchos sistemas de uso de agua.

WEAP posee una interfaz gráfica basada en SIG, a partir de la cual el usuario puede diseñar el modelo esquemático sobreponiendo los componentes del sistema (ríos, nodos de demanda, nodos de entrada, embalses, etc.).

La estructura del modelo WEAP está conformada por cinco vistas principales:

- Esquema: Las herramientas de SIG permiten la configuración del sistema a través de la creación y posicionamiento de los elementos del sistema.
- Datos: Se construye el modelo, generando las variables y relaciones, ingresando supuestos o proyecciones, para esto WEAP posee un vínculo dinámico con Excel®.
- Resultados: Los resultados pueden ser vistos de manera detallada en gráficos, tablas y mapas que permiten ver una visión animada de los resultados a través del tiempo.

---

<sup>2</sup> <http://www.weap21.org/>

- Perspectiva: Se muestra una visión global de los parámetros más importantes del modelo.
- Notas: se documentan los datos y supuestos del usuario.

### **Algoritmos de Cálculo de WEAP**

A continuación se presentan las principales características del modelo WEAP, lo que no necesariamente implica que se utilizaron todas las aplicaciones que incluye el modelo.

El modelo WEAP efectúa un balance de masa tanto para el agua como para los elementos de contaminación, para cada nodo uniéndolo al resto del sistema en un paso de tiempo a nivel mensual.

El agua se entrega al nodo para resolver el tramo de canal y los requerimientos consuntivos, sujeto a las prioridades de la demanda, preferencias de entrega, balance de masa y otras restricciones.

WEAP funciona con un paso de tiempo a nivel mensual, a partir del mes asociado a la temporada definida. Cada mes es independiente del mes anterior, con excepción del almacenamiento en los embalses y los acuíferos presentes. Así, toda el agua que se incorpora al sistema en un mes (por ejemplo, caudales de cabecera, recarga del agua subterránea, o caudales de cuencas laterales) se almacena en un acuífero o un embalse, o sale del sistema antes de fin de mes (por ejemplo, la salida al final del tramo de río, consumo desde el sitio de demanda, almacenamiento o evaporación desde el tramo de río, pérdidas por transmisión y retorno de los flujos asociados al sistema topológico). Debido a que la escala de tiempo es relativamente grande (mensual), se considera que todos los flujos ocurren en forma instantánea. De esta forma, un sitio de demanda puede consumir algo, y eventualmente devolver el resto a una planta de tratamiento de aguas residuales la cual las trata y posteriormente las devuelve al río. Este flujo de vuelta está disponible para el uso en el mismo mes para las demandas hacia aguas abajo.

Para cada mes los cálculos siguen el siguiente orden:

- a. La demanda anual y los requisitos mensuales de la fuente para cada sitio de demanda y los requerimientos de flujo.

- b. Escorrentía e infiltración desde las cuencas, sin considerar entradas por riego.
- c. Entradas y salidas de agua para cada nodo y conexión con el sistema. Esto incluye el cálculo de salidas desde la fuente para resolver la demanda, y eventualmente enviar a almacenamiento. Este paso es solucionado mediante programación lineal (PL), lo cual permite optimizar la cobertura de las demandas y los requisitos de flujo del tramo de río, conforme a las prioridades de demanda definidas, suministro de preferencias, balance de masa y otras restricciones.
- d. Generación de contaminación debido a los puntos de demanda, flujos y tratamiento de contaminantes, y concentración de estos contaminantes en los ríos.
- e. Generación de hidroelectricidad.
- f. Capital, gastos de operación y ganancias.

Las ecuaciones de balance son resueltas a nivel mensual: entradas igual a salidas más un cambio en el volumen de almacenamiento (embalses o acuíferos). Cada nodo y conexión se resuelve por la ecuación de balance de masa, y algunas otras ecuaciones con restricciones para estos flujos. Por ejemplo, la entrada a un sitio de demanda no puede exceder sus requerimientos de abastecimiento, las salidas de un acuífero no pueden exceder su capacidad máxima, pérdidas por tramos como porcentaje del flujo entre otros.

Cada ecuación de balance de masa pasa a ser una restricción en la programación lineal (PL):

$$\sum \text{entradas} = \sum \text{salidas} + \Delta \text{almacenamiento}$$

Las diferencias de almacenamiento sólo son aplicables a los elementos de acuífero y embalses. Por otro lado las salidas incluyen los consumos y las pérdidas.

Cada flujo desde un punto a otro es representado por una variable en la PL. Por ejemplo, si se considera un sitio de demanda "A" a partir de las fuentes "B" y "C" y retornos de agua a estas mismas fuentes, como se presenta en la ecuación de balance de masa 2.1:

$$\text{Entradas}_{B,A} + \text{Entradas}_{C,A} - \text{Salidas}_{A,B} - \text{Salidas}_{A,C} - \text{Consumos}_A = 0 \quad 2.1$$

Donde Entradas<sub>B,A</sub>, son las entradas desde la fuente B al sitio de demanda A. La restricción para la PL sería la fila de la matriz correspondiente, con coeficientes igual a 1 para las entradas y -1 para las variables de salida.

Otro ejemplo puede ser si existen pérdidas en la transmisión (canal o tramo de río) definida como “D”, el cual transporta agua desde la fuente “B” al sitio de demanda “A”, la ecuación 2.2 representa este balance:

$$\text{Entradas}_{B,D} - \text{Salidas}_{D,A} - \text{Pérdidas}_D = 0 \quad 2.2$$

Por otro lado, para cada sitio de demanda se crea una nueva variable para la determinación del sistema de PL. Esta variable es igual al porcentaje de cobertura cuya demanda es satisfecha. Por lo que las entradas a cada sitio de demanda son igual a los requerimientos de suministro por el porcentaje de cobertura como se presenta en la ecuación 2.3.

$$\sum \text{Entradas}_{SDi} = \text{RequerimientoSuministro}_{SDi} \times \text{Cobertura}_{SDi} \quad 2.3$$

Índice SD: Sitio de demanda

Como WEAP intenta satisfacer todos los sitios de demanda con la misma prioridad (en términos del porcentaje de demanda), restricciones adicionales son incorporadas al problema de PL: Todas las variables de cobertura (Cobertura<sub>SDi</sub>) son igualadas a una nueva variable que representa la cobertura final (Cobertura<sub>Final</sub>). Luego todas las demandas son satisfechas en un mismo porcentaje:

$$\begin{aligned} \text{Cobertura}_{Final} &= \text{Cobertura}_{SD1} \\ \text{Cobertura}_{Final} &= \text{Cobertura}_{SD2} \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \text{Cobertura}_{Final} &= \text{Cobertura}_{SDN} \end{aligned}$$

### Prioridades de Demanda

WEAP se esfuerza por maximizar el suministro a los sitios de demanda, sujeto a todas las restricciones y prioridades. A los sitios de demanda se les distribuye el agua dependiendo de

las prioridades de demanda y preferencias de suministro o fuente (superficial o subterránea). De esta forma WEAP itera para cada prioridad y preferencia, tal que las demandas con prioridad 1 son asignadas antes que las con prioridad 2. De esta forma, el PL es resuelto a lo menos una vez para cada prioridad y para cada paso de tiempo. Cuando se resuelve para prioridad 1, WEAP temporalmente “apaga” (en el PL) las asignaciones de demanda con prioridad 2 y menores. Entonces luego que las asignaciones de prioridad 1 son realizadas, se sigue con la prioridad 2 y así sucesivamente, en forma secuencial.

Debido a que la meta es maximizar la tasa de cobertura para todos sitios de demanda, la función objetivo maximiza *Cobertura<sub>Final</sub>*.

En los casos en los que el agua no es suficiente para satisfacer todas las demandas con la misma prioridad, por defecto WEAP satisface todos los requerimientos en el mismo porcentaje de sus demandas.

### **Escorrentía, infiltración y riego**

WEAP posee tres opciones o métodos para simular los procesos en una cuenca aportante tales como evapotranspiración, escorrentía, infiltración y demandas de riego. Estos métodos se refieren a:

- Precipitación – Escorrentía.
- Demandas de riego o evapotranspirativas como una versión del método FAO de requerimientos de cultivos.
- Método de humedad del suelo.

La opción de utilización de algunos de estos métodos, depende del nivel de complejidad o detalle que se desea lograr, conforme el nivel de información disponible.

De estos tres métodos, el de demandas evapotranspirativas es el más simple. Este método utiliza los coeficientes de cultivos para calcular la evapotranspiración potencial en la cuenca y así poder determinar cualquier demanda de riego que pueda ser solicitada para llenar esa porción de requerimiento evapotranspirativo que la lluvia no logra. Este método no simula escorrentía o procesos de infiltración.

El método de precipitación esorrentía, también determina evapotranspiración para el riego de cultivos o vegetación utilizando su coeficiente de cultivo. El resto de la lluvia no consumida por evapotranspiración es simulada como esorrentía hacia el río, o podría ser aportada entre esorrentía al río o flujo subterráneo al sistema acuífero de acuerdo al esquema topológico de la cuenca en estudio.

El método de humedad del suelo es el más complejo de los tres. En este método se representa la cuenca mediante dos capas de suelo, así como el potencial para la acumulación de nieves.

En la capa superior del suelo, se simula la evapotranspiración considerando la lluvia y el riego de suelos agrícolas y no agrícolas, flujo y pérdidas subsuperficiales y cambios en la humedad del suelo.

El flujo base que se dirige al río y los cambios en la humedad del suelo, son simulados en la capa inferior de suelo. Conforme a lo anterior, para simular estos procesos el método requiere una parametrización más completa de los suelos y el clima.

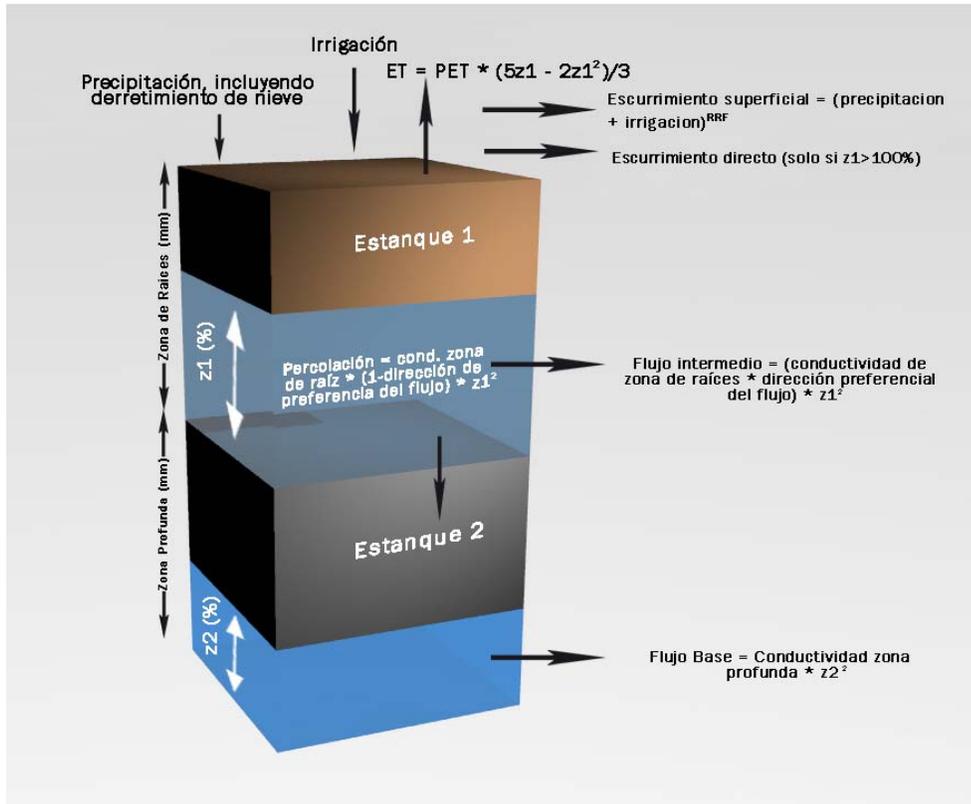
Mediante este método, también se pueden conectar nodos de aguas subterráneas a las cuencas simuladas. En este caso, la capa inferior del suelo es ignorada y las precipitaciones que pasan a través de la capa superficial del suelo se dirigen al acuífero, antes que al flujo base aumentando la humedad del suelo en esta capa inferior.

### **Método de Humedad del Suelo (Estanques)**

Este método es unidimensional, con 2 compartimientos o estanques de suelo, cuyo esquema de medición de la cantidad de humedad del suelo se basa en funciones empíricas que describen evapotranspiración, esorrentía superficial, subsuperficial y percolación profunda para una cuenca. (Figura 2.1)

Este método permite la caracterización del uso del suelo y/o el impacto en los tipos de suelo en los procesos. La percolación profunda al interior de una cuenca podría aflorar a los cuerpos de agua superficiales como flujo base o directamente al almacenamiento del acuífero, siempre y cuando la conexión entre el sistema superficial y subterráneo haya sido apropiada.

Figura 2.2 Diagrama conceptual y ecuaciones incorporadas al modelo de estanques



Fuente: Elaboración propia

La cuenca es dividida en N fracciones de área, representando los diferentes usos / tipos de suelo. El cálculo del balance hídrico se realiza para cada fracción de área, j de N. El clima se considera uniforme sobre cada subcuenca, para lo cual el balance está dado por la ecuación 2.4:

$$Rd_j \cdot \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t) \cdot k_{c,j}(t) \cdot \left( \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) \cdot z_{1,j}^{RRF_j} - f_j \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 - (1 - f_j) \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 \quad 2.4$$

Donde:

$z_{1,j} = [1,0]$  es el almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo de la zona radicular,

$Rd_j$ : Fracción del suelo cubierto j (mm).

$P_e$ : es la precipitación efectiva, la cual incluye derretimiento de nieve del manto nival en las subcuencas.

PET: es la evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia (Penman-Montieth), y  $k_{cj}$  es el coeficiente de cultivo para cada fracción de cobertura del suelo.

El tercer término representa la escorrentía superficial y  $RRF_j$  es el índice de resistencia a la escorrentía de la cobertura del suelo.

Altos valores para el índice  $RRF_j$ , lleva a una menor superficie de escorrentía. El cuarto y quinto término representan los términos del flujo subsuperficial y la percolación profunda, respectivamente.  $k_j$  es una estimación de la conductividad saturada de la zona radicular (mm/tiempo) y  $f_j$  es un coeficiente de partición relacionado al suelo, tipo de cubierta de suelo, y la topografía la cual divide las particiones de agua tanto horizontal como vertical. De esta forma la escorrentía total (RT), para cada subcuenca en el tiempo  $t$  queda representada por la ecuación 2.5:

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j \cdot \left( P_e(t) \cdot z_{1,j}^{RRF_j} + f_j \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 \right) \quad 2.5$$

### Acumulación de nieve

El modelo utiliza la siguiente metodología para el análisis de la nieve.

Define un coeficiente  $m_c$  a partir de la temperatura de derretimiento y congelamiento como:

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

Donde  $T_i$  es la temperatura observada en el período  $i$  y  $T_l$  y  $T_s$  son las temperaturas de derretimiento y congelamiento respectivamente, con la tasa de derretimiento dada por la ecuación 2.6:

$$m_i = \min(Ac_i m_c, Em) \quad 2.6$$

La acumulación de nieve,  $Ac_i$ , es función de  $m_c$  y la precipitación total observada  $P_i$  (ver ecuación 2.7)

$$Ac_i = Ac_{i-1} + (1 - m_c)P_i - m_{i-1} \quad 2.7$$

Em es la energía de derretimiento disponible convertida a una profundidad/tiempo equivalente. La energía disponible se calcula como se muestra en la ecuación 2.8:

$$Em = Rnet + Eother \quad 2.8$$

Rnet es la radiación neta y Eother representan formas adicionales de energía que contribuyen en el derretimiento de nieves a través de la radiación solar incidente. Este parámetro concentrado incluye las energías sensible, latente, advectiva y del suelo. Se calcula como la radiación neta, Rnet, multiplicada por un factor adicional de radiación, Rf, el cual es ajustado durante la calibración. El cálculo de la radiación neta considera el albedo, el cual es modelado usando un algoritmo simple que lo disminuye a través del tiempo para representar la maduración de la superficie de la nieve. El usuario del modelo especifica un valor de albedo para la nieve “nueva”,  $A_N$ , y el valor más bajo para el albedo de la nieve “vieja”,  $A_O$ , como una fracción. El albedo de la nieve “nueva” disminuye en un valor de 0.1 por cada mes de simulación, hasta un valor de nieve “vieja”. Cuando no hay cobertura de nieve presente el valor del albedo utilizado es constante e igual a 0.15 y es usado en el cálculo de Penman-Montieth para la evapotranspiración de referencia.

El porcentaje de derretimiento  $m_r$ , está dado por la ecuación 2.9:

$$m_r = Ac_i m_c \quad 2.9$$

La precipitación efectiva  $P_e$ , se calcula por medio de la siguiente expresión 2.10:

$$P_e = P_i m_c + m_r \quad 2.10$$

Para aplicaciones donde no hay flujo de retorno, se crea una unión (link) desde la cuenca hacia un nodo de acuífero, entonces el flujo base que aflora desde del segundo estanque (profundo), se calcula con la siguiente expresión 2.11:

$$S_{\max} \frac{dz_2}{dt} = \left( \sum_{j=1}^N (1 - f_j) \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 \right) - k_{s,2} \cdot z_2^2 \quad 2.11$$

Donde el flujo de entrada al almacenamiento,  $S_{\max}$  es la percolación profunda desde el almacenamiento superior dado en la ecuación 2.1, y  $k_{s2}$  es la conductividad saturada del almacenamiento inferior (mm/tiempo), el cual está dado por un valor único de la cuenca. Las ecuaciones 2.1 a 2.8 son resueltas con un algoritmo tipo predictor-corrector.

Cuando se introduce en el modelo un acuífero del tipo aluvial y la unión escorrentía/infiltración se establece entre el sistema superficial y el subterráneo, el término de segundo almacenamiento (dado en la ec. 2.11) es ignorado, y la recarga  $R$  (volumen/tiempo) al acuífero es la presentada en la ecuación 2.12.

$$R = \sum_{j=1}^N A_j (1 - f_j) \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 \quad 2.12$$

Donde  $A_j$  es la unidad de cuenca que contribuye al área. La geometría del acuífero queda caracterizada por la altura del nivel freático relativo al río, donde tramos individuales del río pueden ganar o perder agua respecto al acuífero.

### Parámetros de Calibración

En la Tabla 2.2 se presentan los parámetros de suelo y climáticos que se pueden calibrar en el modelo WEAP cuando se realiza la simulación mediante el método de humedad de suelo:

**Tabla 2.2 Parámetros de Calibración modelo WEAP**

<b>Parámetro del Modelo<sup>3</sup></b>
<b>Coefficiente de Cultivo, <math>K_c</math></b>
<b>Indice de resistencia a la escorrentía, <math>RRF</math></b>
<b>Dirección preferida del flujo, <math>f</math></b>
<b>Temperatura de derretimiento, <math>t_l</math> (<math>^{\circ}C</math>)</b>
<b>Temperatura de congelamiento, <math>t_s</math> (<math>^{\circ}C</math>)</b>
<b>Factor de Radiación, <math>Rf</math></b>
<b>Albedo de Nieve nueva, <math>A_N</math></b>
<b>Albedo de Nieve vieja <math>A_O</math></b>

<sup>3</sup> En negrilla se destacan los parámetros más relevantes utilizados en la calibración

<b>Parámetro del Modelo<sup>3</sup></b>
<b>Estanque superior, Capacidad de Zona de Raíces, <math>z_1(mm)</math></b>
<b>Estanque superior, Conductividad de Zona de Raíces, <math>k_j(mm/mes)</math></b>
<b>Estanque inferior, Capacidad del suelo, <math>z_2(mm)</math></b>
<b>Estanque inferior, Conductividad del suelo, <math>Dk_j(mm/mes)</math></b>
<b>Porcentaje de agua inicial en la Zona de Raíces, <math>z_{1\text{ inicial}}(\%)</math></b>
<b>Porcentaje de agua inicial en el Estanque inferior, <math>z_{2\text{ inicial}}(\%)</math></b>
Humedad Relativa, $HR(\%)$
Velocidad promedio del viento, $W(m/s)$
Factor de nubosidad, $CF$
Nieve inicial, $IS(mm)$

Existen además una serie de parámetros de pérdida y reuso, costo, y calidad de agua que no se describen por no ser relevantes en este estudio.

## CAPÍTULO 3 : CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

A continuación se presentan las características de la zona en la que se ubican ambas cuencas

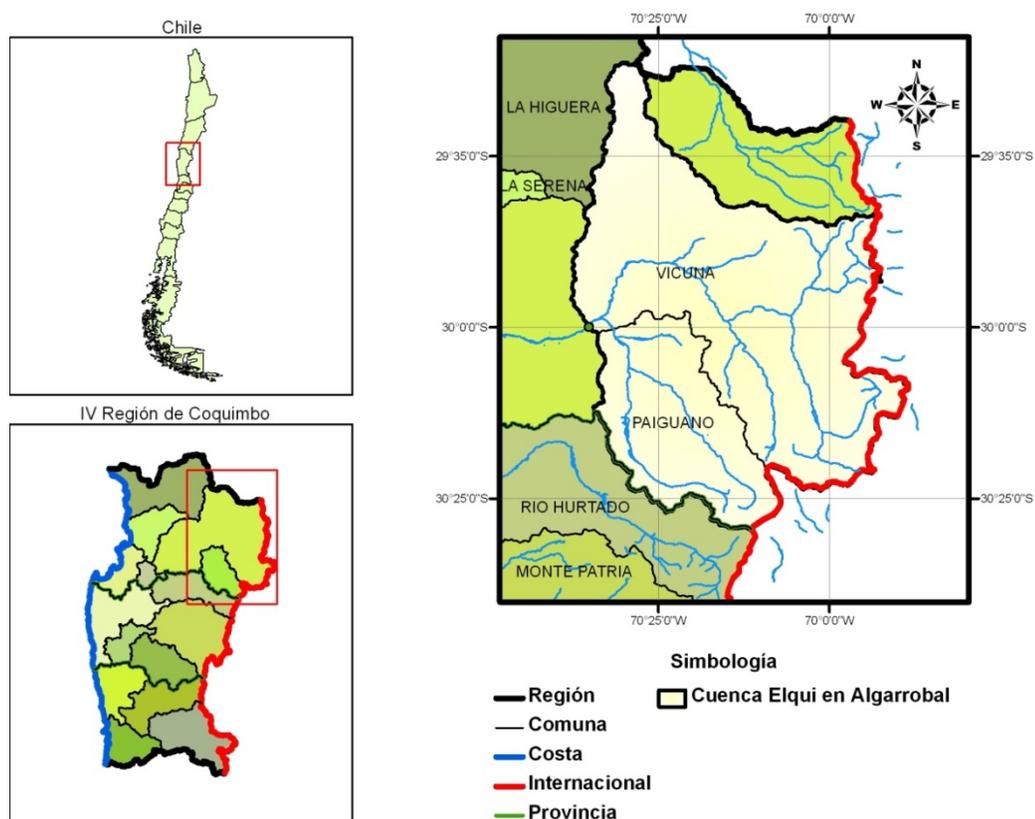
### 3.1 CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL

#### 3.1.1 Ubicación

La cuenca “Elqui en Algarrobal” corresponde a una subcuenca del río Elqui, ubicada aproximadamente a 70 Km. al este de la ciudad de la Serena, IV Región de Coquimbo, Chile. Su punto de salida se ubica 5 Km. aguas abajo de la unión de los ríos Claro o Derecho y el río Turbio. Las coordenadas del punto de salida de la cuenca son 6.680.234 N, 346.946 E H19 (según Datum psad56). En la

Figura 3.1 se muestra lo anteriormente descrito.

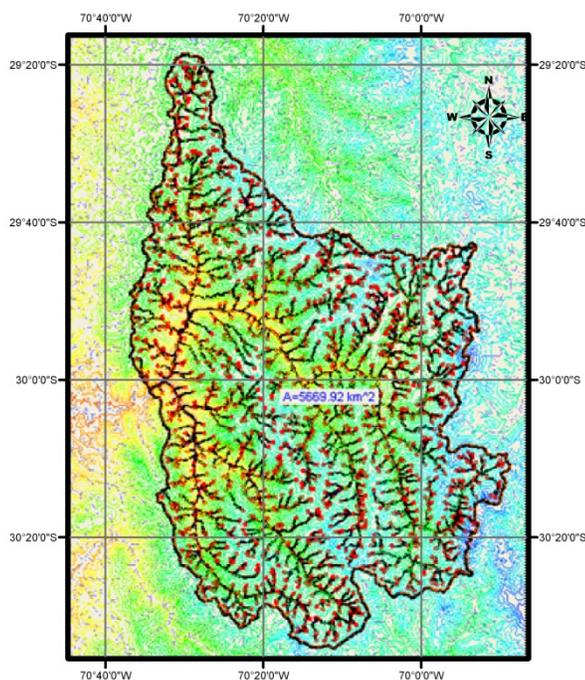
Figura 3.1 Ubicación Cuenca Elqui en Algarrobal



Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 3.2, la cuenca fue delimitada mediante el software WMS y un DEM obtenido de la USGS<sup>4</sup>. (US Geological Survey), resultando un área drenada por la cuenca de 5.670 km<sup>2</sup>. La altura máxima de la cuenca es de 6.068 msnm y su altura mínima de 800 msnm.

**Figura 3.2 Delimitación Cuenca**



Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2 Clima

La cuenca presenta dos tipos climáticos, el Templado frío de altura y estepárico cálido.

Clima Templado Frío de Altura: Este clima se sitúa sobre los 3.000 metros de altitud en la cordillera de los Andes. Sus características principales son las nieves permanentes, altas precipitaciones y bajas temperaturas.

Clima de Estepa Cálido: este clima se localiza en el valle del río Elqui, por sobre los 800 metros. Sus características principales son la ausencia de nubosidad y sequedad del aire.

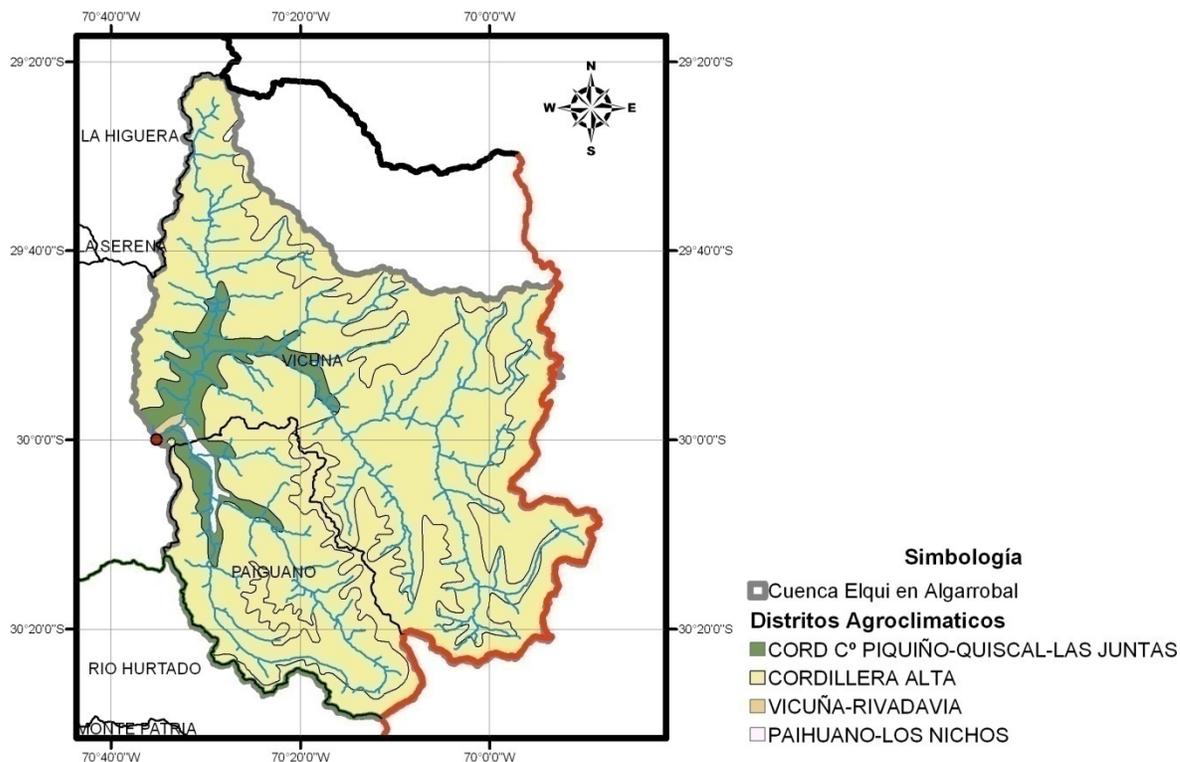
---

<sup>4</sup> <http://seamless.usgs.gov/>

Presenta precipitaciones poco abundantes por lo que los períodos de sequía son característicos.

En la Figura 3.3 se presentan los distintos distritos agroclimáticos presentes en la cuenca (CIREN-CORFO, 1990).

**Figura 3.3 Mapa Agroclimático**



Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3 Geología y Volcanismo

Todos los cauces se encuentran sobre formaciones geológicas constituidas por depósitos no consolidados y rellenos de depósitos fluviales; gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.

### 3.1.4 Recursos Superficiales y Subterráneos

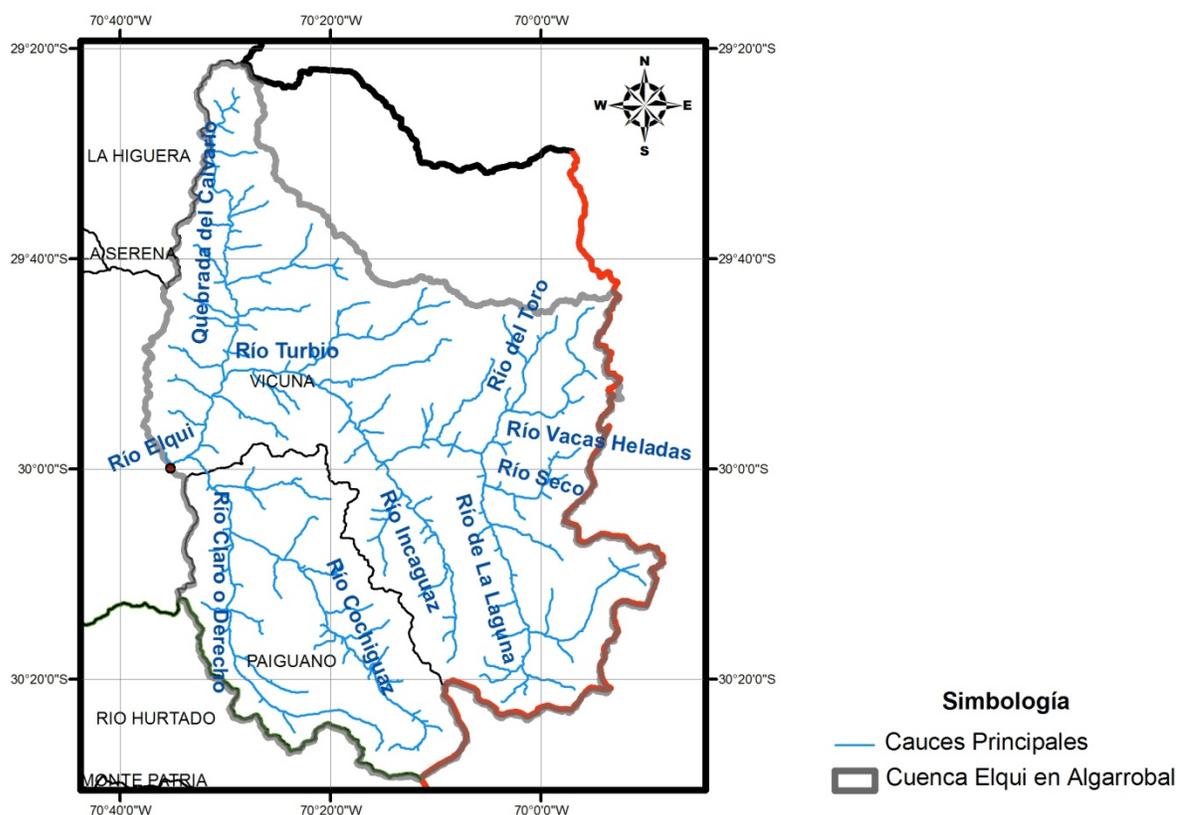
Los principales cauces de la cuenca Elqui en Algarrobal son los ríos Turbio y Claro o Derecho, los cuales confluyen 2 km aguas arriba de Rivadavia formando el río Elqui a 815 m.s.n.m.

El río Turbio se forma de la confluencia de los ríos La Laguna y del Toro a 1.370 m.s.n.m. Drena un área de 4.196 km<sup>2</sup> y sus principales afluentes son el río Incaguaz, el estero Guanta y la Quebrada del Calvario.

El río Claro o Derecho nace en la alta cordillera y su único afluente es el río Cochiguaz. El área que drena es de 1.512 km<sup>2</sup>.

En la Figura 3.4 se presentan los cauces principales de la cuenca.

Figura 3.4 Cauces Principales



Fuente: Elaboración Propia

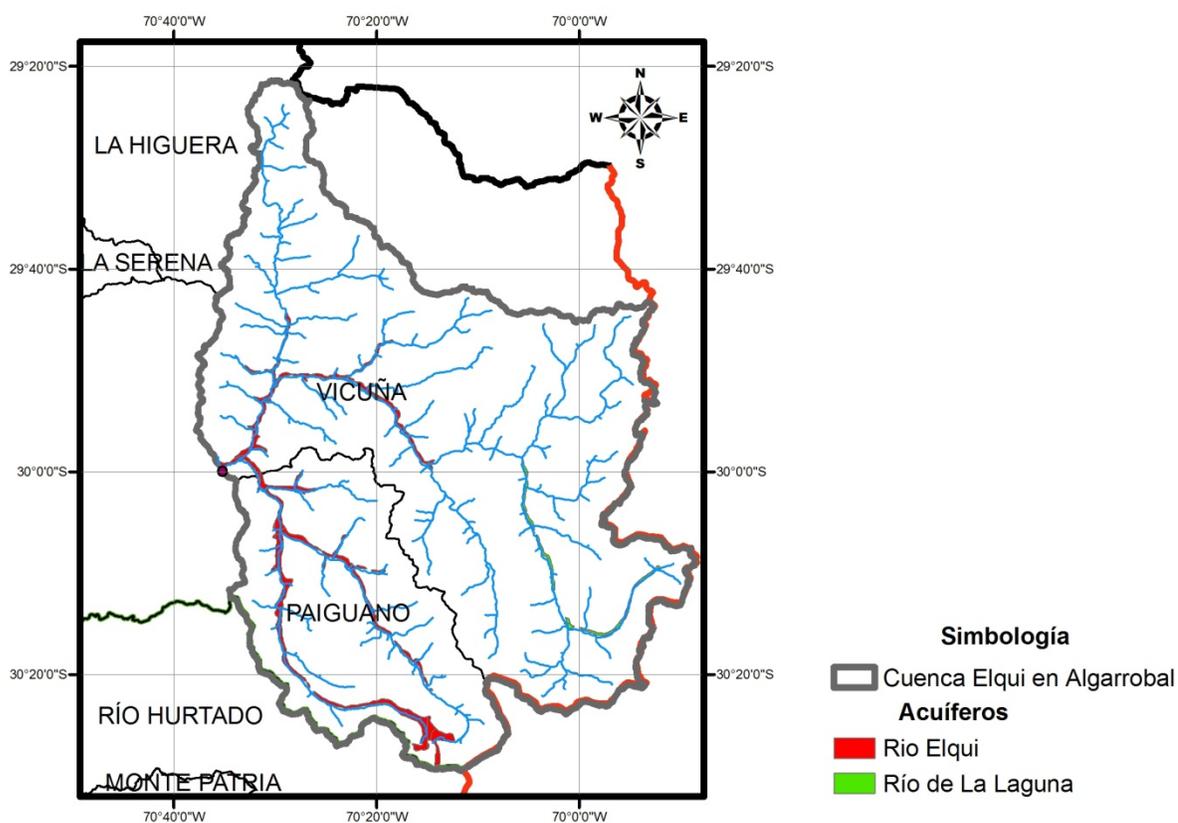
La cuenca Elqui en Algarrobal presenta dos acuíferos de importancia que escurren paralelos a los cauces. Estos acuíferos son Río de La Laguna ubicado en la parte alta de la cuenca bajo el

Río La Laguna y el acuífero Río Elqui que desarrolla principalmente bajo los ríos Turbio, río Cochiguaz y río Claro.

El acuífero Río Elqui tiene un coeficiente de almacenamiento de 0,04 y un espesor de 18 m, mientras que el acuífero Río de La Laguna posee un coeficiente de almacenamiento 0,002 y un espesor de 9 m. (DGA/CADE-IDEPE, 2004)

En la Figura 3.5 se presentan los acuíferos del sistema.

**Figura 3.5 Acuíferos**

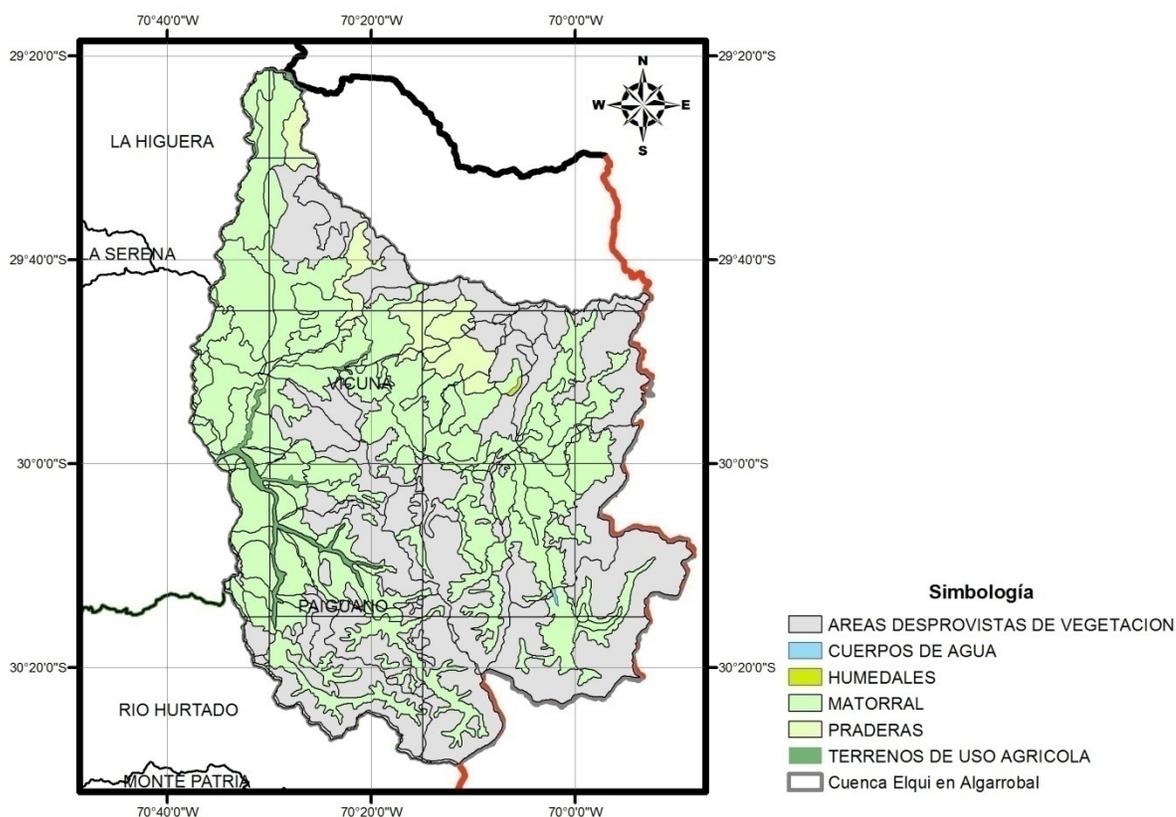


Fuente: Elaboración propia

### 3.1.5 Uso de Suelo

En la Figura 3.6 se aprecia que la extensión de terrenos agrícolas es muy reducida, pero se logra desarrollar una pequeña superficie en algunos sectores del río Claro y el río Cochiguaz afluente de este último. (DGA/CADE-IDEPE, 2004)

**Figura 3.6 Uso de Suelo**



Fuente: Elaboración propia

La agricultura que se desarrolla en la zona se caracteriza por terrenos agrícolas de bajo riego con cultivos anuales, terrenos agrícolas de secano y terrenos agrícolas de viñas y frutales.

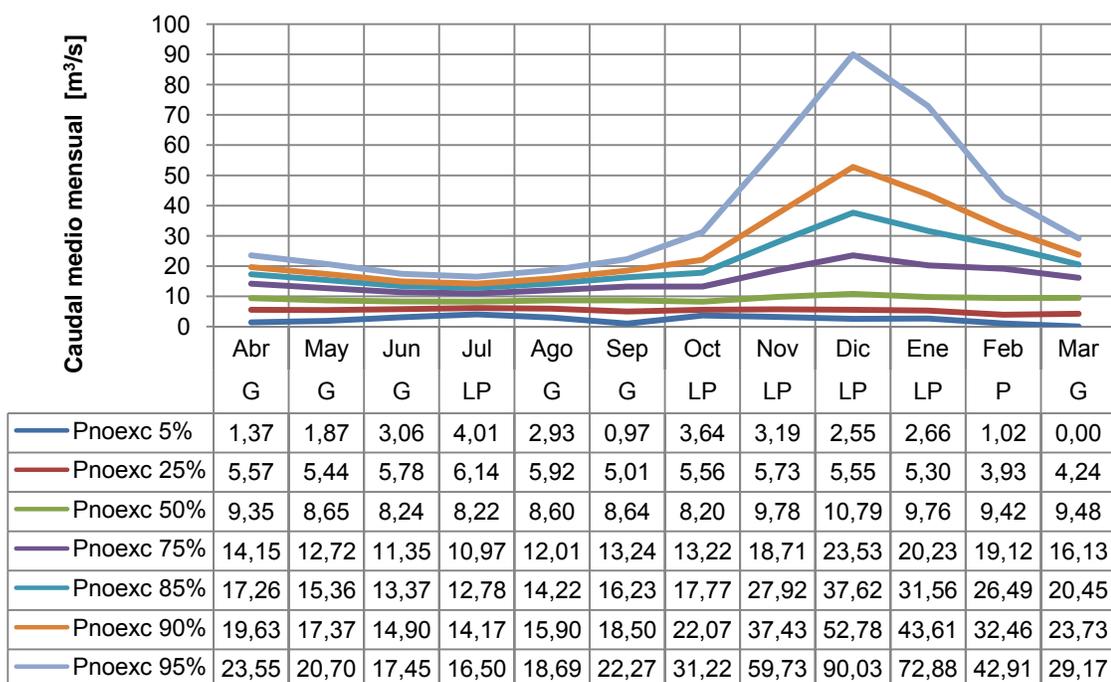
### 3.1.6 Régimen Hidrológico

Tal como se aprecia en las curvas de variación estacional de la Figura 3.7, la cuenca presenta un régimen nival, ya que sus mayores caudales ocurren en los meses de verano.

En años húmedos los mayores caudales se presentan entre noviembre y enero, producto de los deshielos, mientras que los menores ocurren entre mayo y septiembre.

En años secos los caudales se distribuyen de manera más homogénea, sin mostrar variaciones de consideración.

Figura 3.7 Curva de Variación estacional (1979-2005)



Donde:

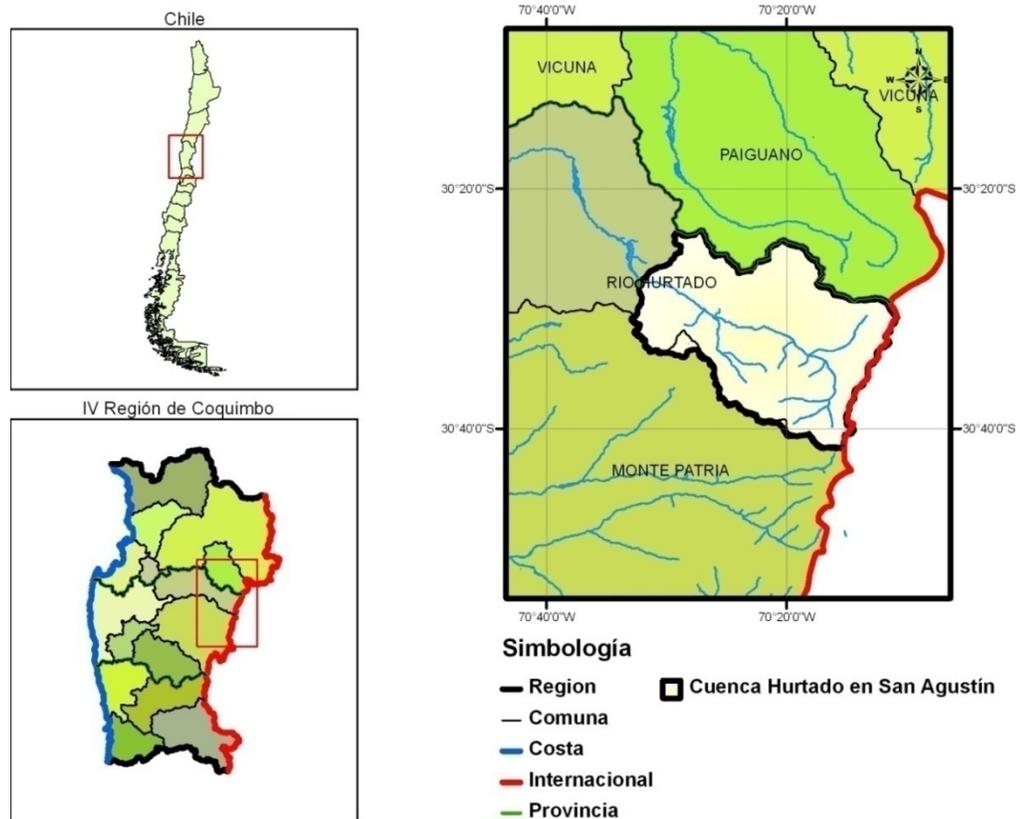
<b>Símbolo</b>	<b>Distribución</b>
N:	Normal
LN:	Log-Normal
P:	Pearson
LP:	Log-Pearson
G:	Gumbel

## 3.2 CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTIN

### 3.2.1 Ubicación

La cuenca “Hurtado en San Agustín” corresponde a una subcuenca del río Limarí, al sur este de la ciudad de Coquimbo, IV Región. Su punto de salida se ubica en el río Hurtado a una altura de 2035 m.s.n.m. en las coordenadas 6.628.560 N, 352.398 E H19 (Según Datum psad56), como se muestra en la Figura 3.8.

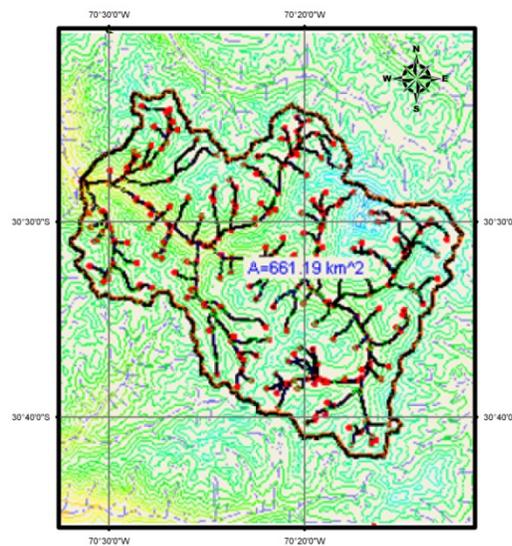
**Figura 3.8 Ubicación Cuenca Hurtado en San Agustín**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.9 se presenta la delimitación de la cuenca.

**Figura 3.9 Delimitación Cuenca**



Fuente: Elaboración propia

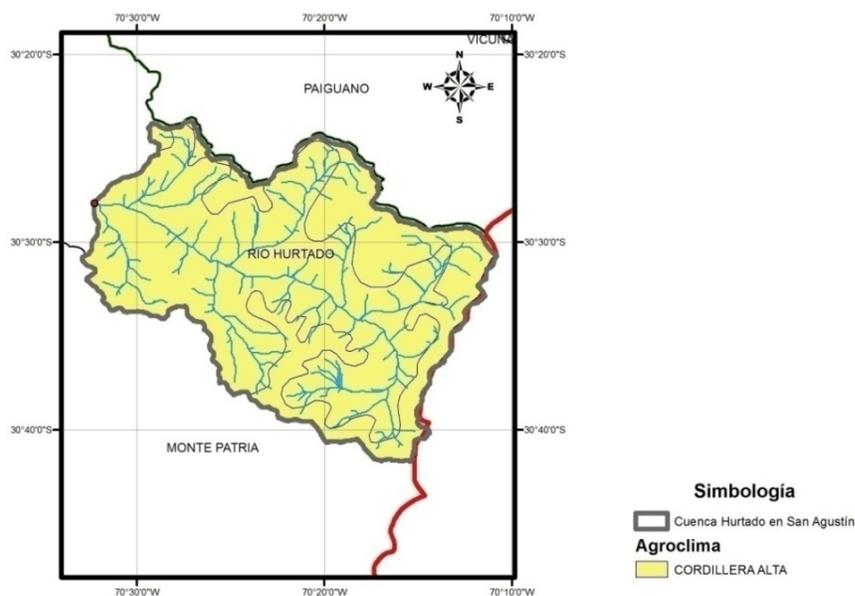
Como puede apreciarse en la Figura 3.9, la cuenca fue delimitada mediante el software WMS y un DEM obtenido de la USGS. (US Geological Survey), resultando un área drenada por la cuenca de 661 km<sup>2</sup>. La altura máxima de la cuenca es de 5.450 msnm y su altura mínima de 2.050 msnm.

### 3.2.2 Clima

La cuenca presenta principalmente un clima Semiárido Frío con lluvias invernales. Se caracteriza por altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes que constituyen un aporte significativo de agua en el período estival.

En la Figura 3.10 se presenta el único agroclima presente en la cuenca (CIREN-CORFO, 1990).

**Figura 3.10 Mapa Agroclimático**



Fuente: Elaboración propia

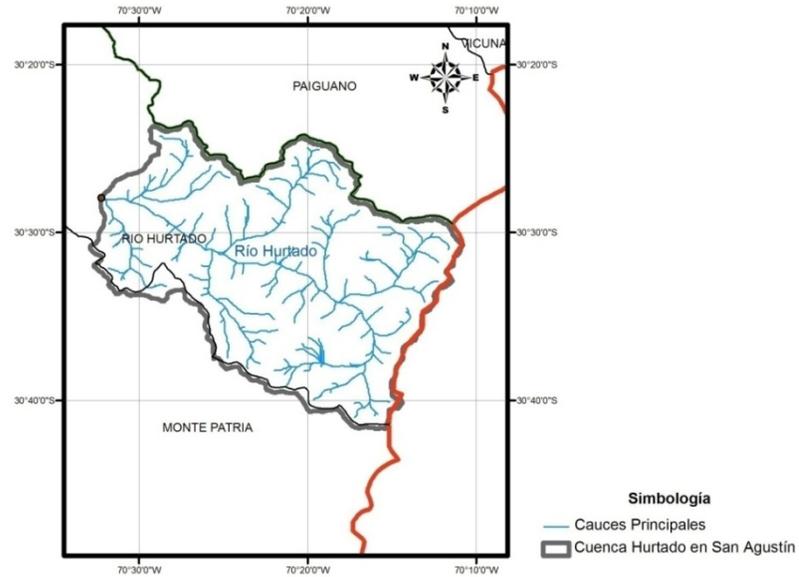
### 3.2.3 Geología y Volcanismo

Todos los cauces se encuentran sobre formaciones geológicas constituida por depósitos no consolidados y rellenos de depósitos fluviales; gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.

### 3.2.4 Recursos Superficiales y Subterráneos

Como se observa en la Figura 3.11, la cuenca solo presenta al río Hurtado como su escurrimiento superficial relevante.

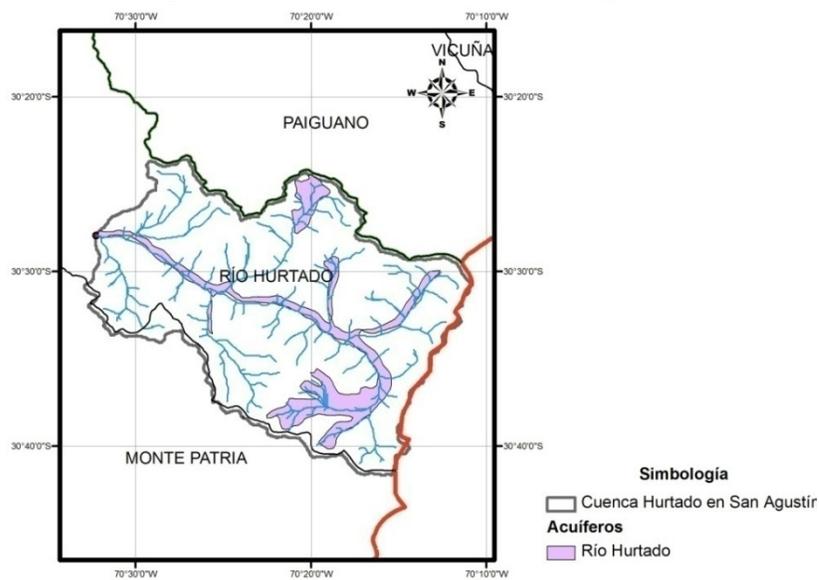
**Figura 3.11 Cauces Principales**



Fuente: Elaboración propia

Tal como se presenta en la Figura 3.12 la cuenca presenta un acuífero que se extiende bajo el río Hurtado y sus afluentes. Este acuífero posee un coeficiente de almacenamiento de 0,02 y en espesor de 11 m. (DGA/CADE-IDEPE, 2004).

**Figura 3.12 Acuíferos Hurtado San Agustín**

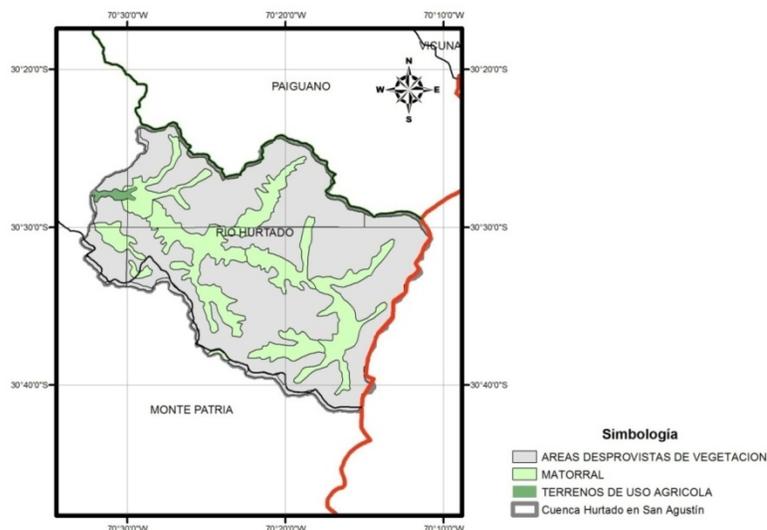


Fuente: Elaboración propia

### 3.2.5 Uso de Suelo

Como se aprecia en la Figura 3.13, la cuenca presenta una casi nula intervención humana. Presenta principalmente terrenos desprovistos de vegetación, matorrales en la ribera de los cauces y un pequeño sector de uso de suelo agrícola en la parte baja de la cuenca. (DGA/CADE-IDEPE, 2004)

**Figura 3.13 Uso de Suelo**

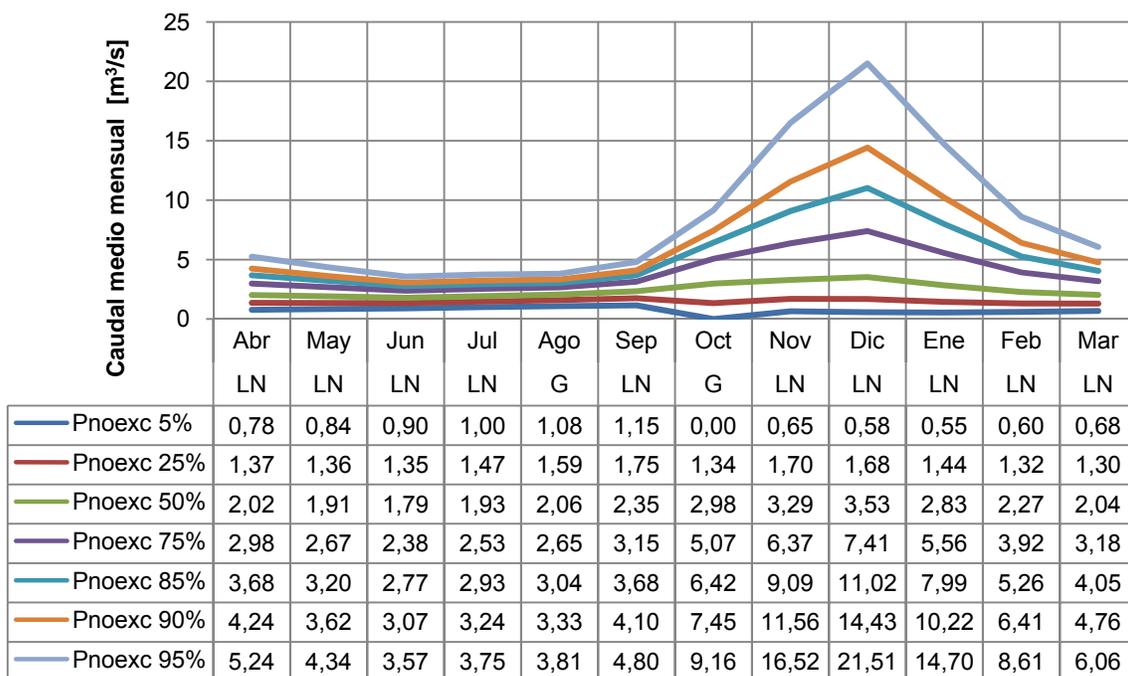


Fuente: Elaboración propia

### 3.2.6 Régimen Hidrológico

Como se muestra en la Figura 3.14, la cuenca presenta un régimen netamente nival, con sus mayores caudales entre octubre y enero, producto de deshielos. Y una muy poca influencia pluvial, salvo en el caso de años muy secos, en los cuales los caudales son muy uniformes a lo largo del año, presentándose los mayores entre julio y septiembre, producto de lluvias invernales.

Figura 3.14 Curva Variación estacional Hurtado en San Agustín (1977-2005)



Donde:

<b>Símbolo</b>	<b>Distribución</b>
N:	Normal
LN:	Log-Normal
P:	Pearson
LP:	Log-Pearson
G:	Gumbel

## CAPÍTULO 4 : APLICACIONES Y RESULTADOS

### 4.1 CREACION DE MODELOS

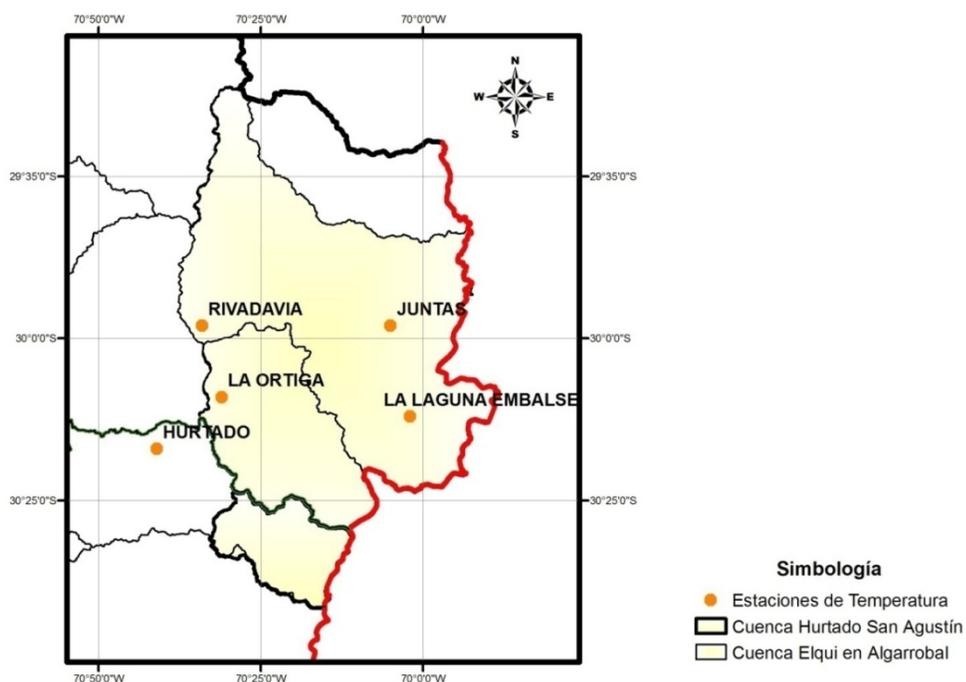
A continuación se presentan las metodologías seguidas en la construcción de los modelos de las cuencas nivales Hurtado en San Agustín y Elqui en Algarrobal. Además de los resultados de calibración y validación.

#### 4.1.1 Preparación de los datos

Por lo general la información de datos meteorológicos como temperatura y precipitación no se encuentran completos, por lo que se procedió de la siguiente forma para rellenar las series de datos.

**Temperatura:** Los datos solicitados y entregados por DGA, corresponden a las temperaturas medias mensuales en las estaciones presentadas en Figura 4.1 y Tabla 4.1.

Figura 4.1 Estaciones de Temperatura



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.1 Estaciones de Temperatura**

Estación	Cota [m.s.n.m]	Latitud S	Longitud W	Información
La laguna Embalse	3160	30° 12'	70° 02'	1976-2007
Juntas	2150	29° 58'	70° 05'	1990-2007
La Ortiga	1560	30° 11'	70° 28'	1979-2007
Hurtado	1100	30° 41'	70° 05'	1979-2007
Rivadavia	820	29° 58'	70° 33'	1973-2007

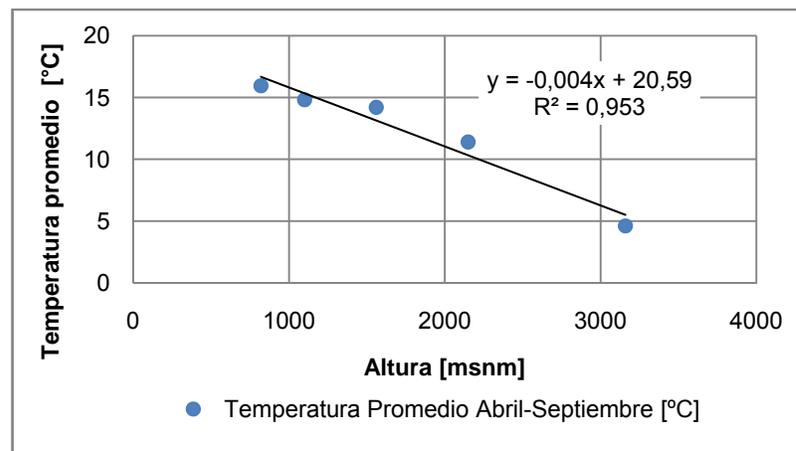
El período utilizado para la calibración corresponde a Abril 1979 – Marzo 1999, por lo que fue necesario extender la serie de la estación Juntas. Utilizando la estación La Laguna Embalse se extendió la serie de temperatura media mensual de la estación Juntas con la cual se tenía la mejor correlación ( $R^2= 0,89$ ). Para el relleno de los meses sin medición de las demás estaciones meteorológicas se utilizó el criterio de completar la serie a partir de la estación con la cual se presentara mejor correlación.

Los gráficos de correlaciones mencionados en el párrafo anterior se muestran en Gráfico A. en Anexo.

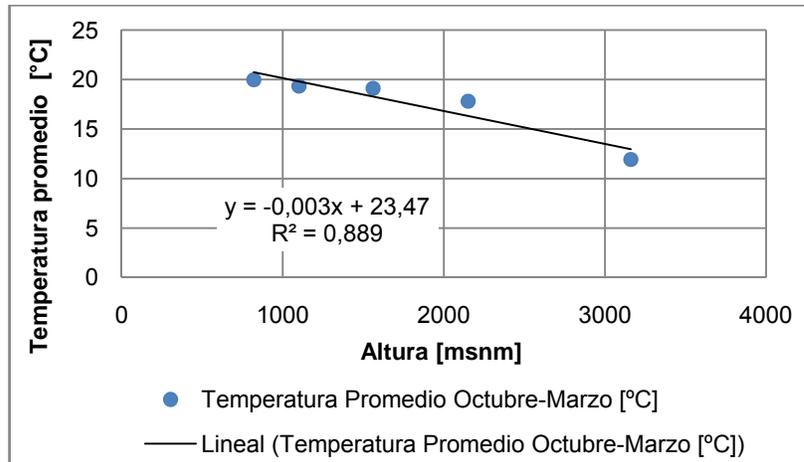
Los datos aislados faltantes se rellenaron utilizando la estación que tuviera mejor correlación con la estación que poseía el dato faltante.

Una vez completadas las series de temperaturas facilitadas por DGA, se construyó el gradiente de temperatura con la altura. Se calculó el gradiente de temperatura mes a mes, como también un gradiente para el período de deshielo (Octubre-Marzo) y otro para el período de invierno (Abril-Septiembre). En la modelación se utilizaron los gradientes estacionales mostrados en la Figura 4.2 y Figura 4.3.

**Figura 4.2 Gradiente en Período de Invierno**



**Figura 4.3 Gradiente en Período de Deshielo**

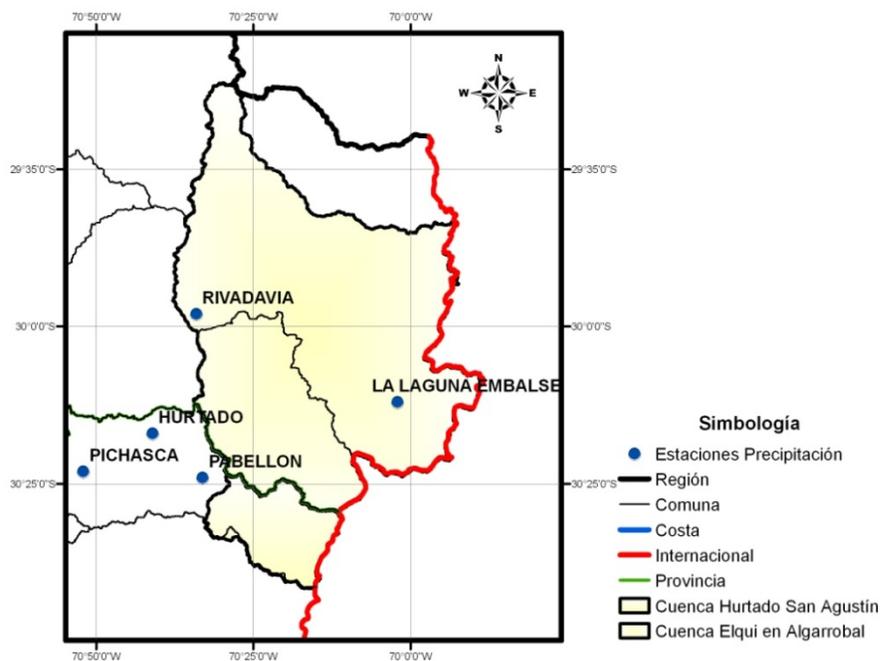


**Precipitación:** Para la precipitación se utilizaron las estaciones señaladas en la Tabla 4.2

**Tabla 4.2 Estaciones de Precipitación**

Estación	Altura [msnm]	Latitud S	Longitud W	Información
La Laguna Embalse	3.160	30° 12'	70° 02'	1964-2007
Pabellón	1.920	30° 24'	70° 33'	1968-2007
Hurtado	1.100	30° 41'	70° 05'	1950-2007
Rivadavia	820	29° 58'	70° 33'	1954-2007
Pichasca	725	30° 23'	70° 52'	1950.2007

**Figura 4.4 Estaciones de Precipitación**



Fuente: Elaboración propia

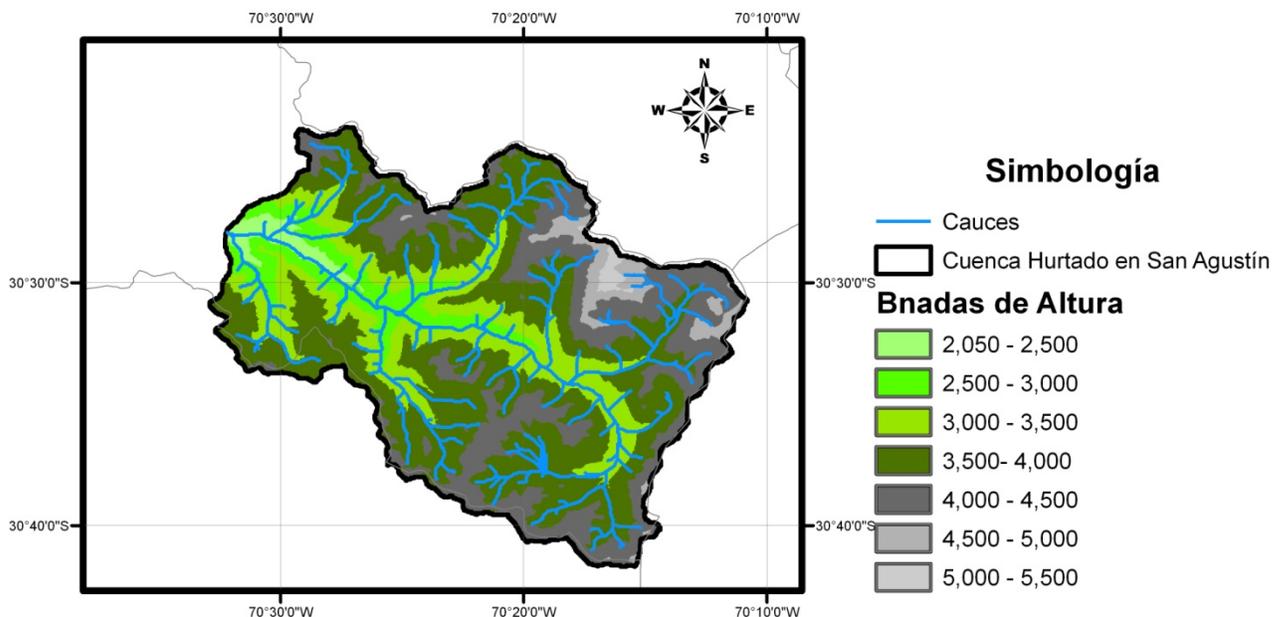
A diferencia de las series de temperatura, las series de precipitación mensual se encontraban completas para el período definido como de observación, por lo que no fue necesario el proceso de relleno de datos faltantes.

**Discretización de las Cuencas:** WEAP al ser un modelo semidistribuido, necesita que los datos sean ingresados a partir de una subdivisión de la cuenca que se quiere analizar.

La cuenca Elqui en Algarrobal se dividió en las 6 subcuencas más importantes, las que se delimitaron mediante el software WMS, el cual posee la opción de guardar las subcuencas en formato shape<sup>5</sup> (.shp) de modo que pueden ser visualizadas en el modelo WEAP.

Debido a que en la cuenca Hurtado en San Agustín se posee menos información que en la cuenca Elqui en Algarrobal, se prefirió discretizar la cuenca por bandas de altura cada 500 metros, resultando 7 bandas las que se presentan en Figura 4.5.

**Figura 4.5 Bandas de Altura cuenca Hurtado en San Agustín**



Fuente: Elaboración propia

<sup>5</sup> Formato de datos geográficos vectoriales desarrollado por ESRI® e implementado en numerosas aplicaciones (ArcView™, ArcGIS™, etc.) Es un formato de gran versatilidad, cuya estructura ha sido publicada. Aunque tiene el enorme inconveniente de no ser topológico, su solución es muy parecida a una topología real, lo que le hace ideal para la difusión de bases de datos geográficas con atributos asociados.

**Caracterización de las subcuencas:** Para cada subcuenca o banda de altura, se definieron características como altura y área mediante ArcGIS.

Para determinar la altura media de cada subcuenca o banda, se creó un archivo tipo Raster<sup>6</sup> a partir de las curvas de nivel obtenidas de las capas de información geográficas. (CNR, 2002)

### **Creación de la topología en WEAP**

En WEAP se definen nodos de influencia denominados “catchments”. Estos representan un área geográfica en la cual las propiedades del suelo son específicas. También los datos meteorológicos se asumen uniformes sobre el área que define el catchment.

#### **4.1.2 Cuenca Elqui en Algarrobal**

En base a los principales cauces se dividió la cuenca Elqui en Algarrobal en 6 subcuencas para la modelación. En la Tabla 4.3 se presenta el código utilizado para cada subcuenca, el área y la altura media.

**Tabla 4.3 Características Subcuencas modelo Elqui en Algarrobal**

Subcuenca	Area [km <sup>2</sup> ]	Altura media [msnm]
Sub1	1.623	2.932
Sub2	286	2.475
Sub3	1.241	3.342
Sub4	1.047	3.461
Sub5	938	3.801
Sub6	534	4.282

### **Precipitación**

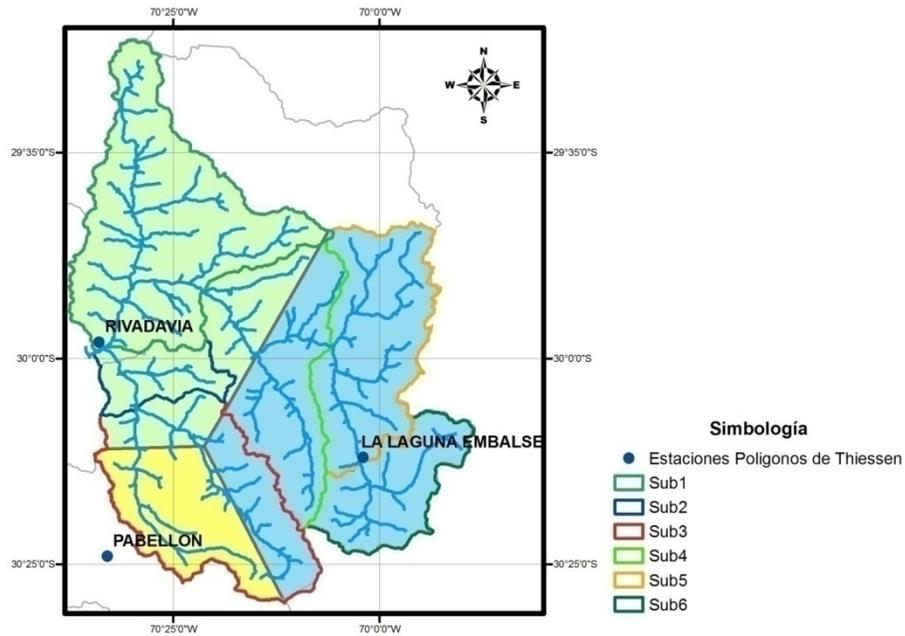
A partir de esta discretización de la cuenca se calculó la precipitación media mensual para cada subcuenca utilizando el método de los polígonos de Thiessen.

En la Figura 4.6 se presentan los polígonos creados:

---

<sup>6</sup> Modelo de datos geográfico que representa la información a través de una malla regular de tipo un mosaico, donde cada celda (píxel) es la unidad mínima de información que lleva asociado un número. Este número se corresponde con el valor de un fenómeno geográfico en el punto de la superficie terrestre que representa la celda.

**Figura 4.6 Polígonos de Thiessen**



Fuente: Elaboración propia

## Temperatura

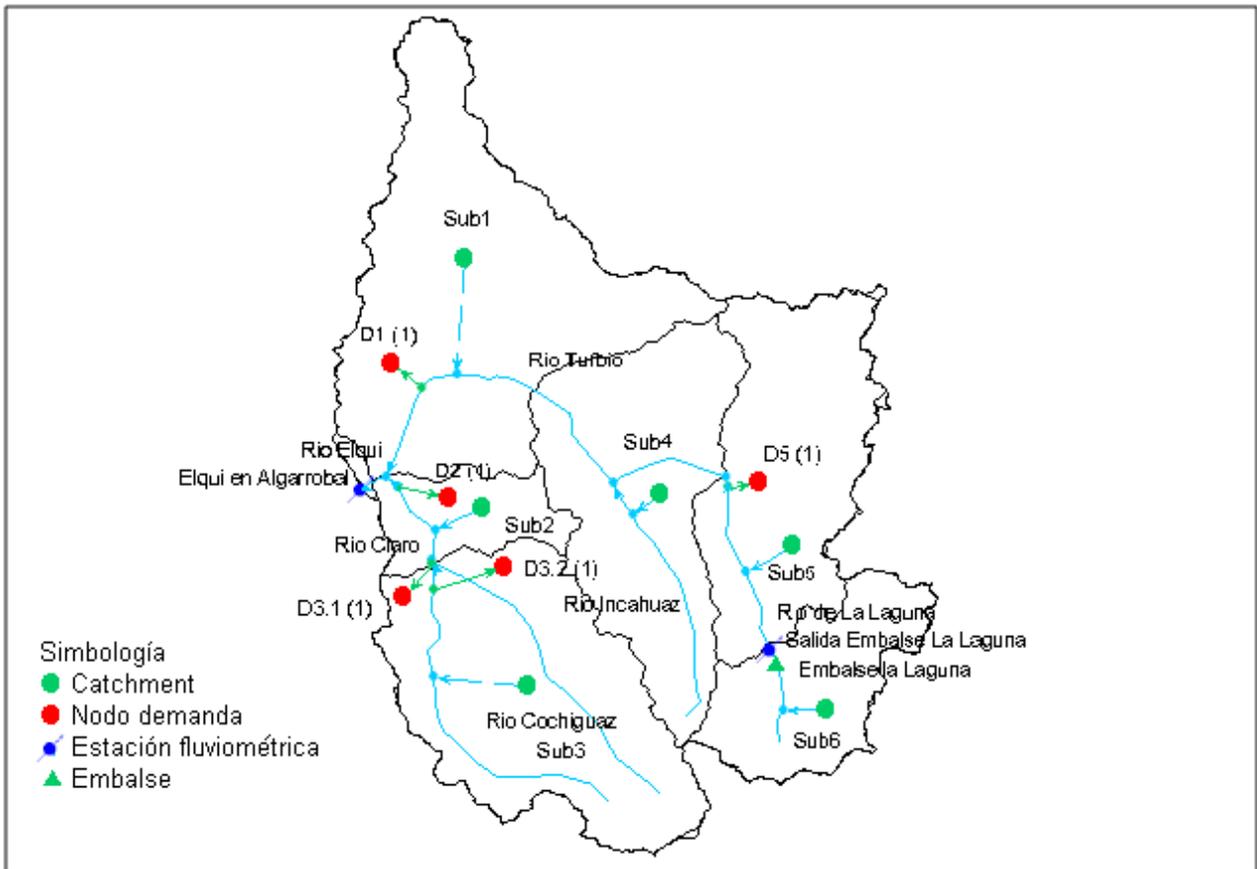
Se calculó la serie de temperatura media mensual en cada subcuenca a partir de los gradientes estacionales y la altura media de cada subcuenca.

## Demanda de Agua

Inicialmente se intentó estimar la demanda a partir de los derechos de agua otorgados en la zona, metodología que no dio resultados debido a lo incompleta de la información. Después de consultar distintos estudios realizados en la zona, la demanda se obtuvo a partir del estudio "Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua. Estudio de caso en la región de Coquimbo" (CAZALAC/RODHOS, 2006).

El modelo de la cuenca utilizado en WEAP se presenta en la Figura 4.7.

Figura 4.7 Modelo de la cuenca Elqui en Algarrobal



A la salida de la cuenca se ubica un nodo con la información fluviométrica registrada en el periodo de observación.

Se simuló la operación del Embalse la Laguna mediante un volumen de conservación y un volumen de inactividad mensual buscando obtener una buena representación de los promedios mensuales.

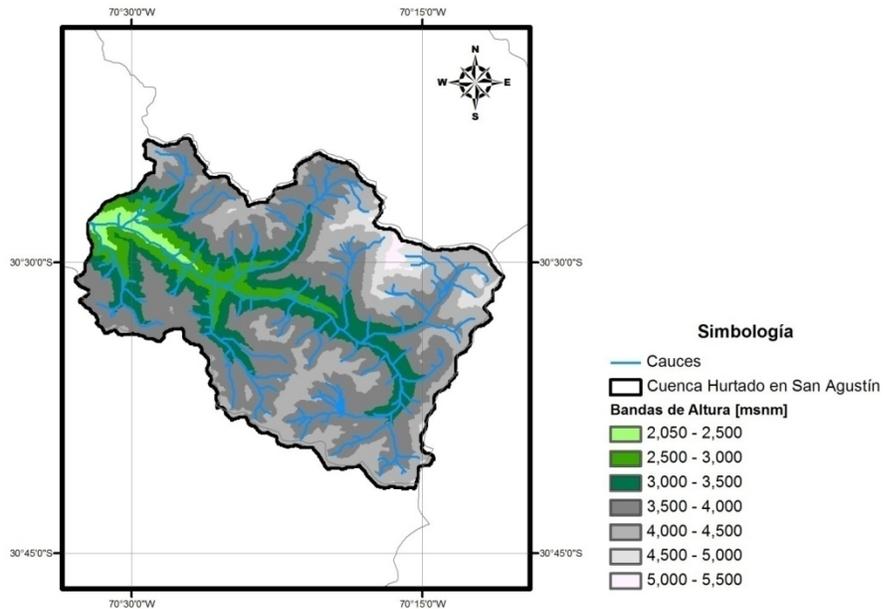
#### 4.1.3 Cuenca Hurtado en San Agustín

Es relevante mencionar que la cuenca Hurtado es una cuenca andina y que su punto más bajo se encuentra en la cota 2.050 m.s.n.m.

La cuenca Hurtado en San Agustín se dividió en 7 bandas de altura, discretizando cada 500 m, para lograr una mejor representación de lo que ocurre a las distintas alturas de la cuenca.

En la Figura 4.8 se muestra la discretización utilizada en la cuenca Hurtado en San Agustín y el archivo Raster utilizado para la caracterización de éstas.

**Figura 4.8 Discretización Hurtado en San Agustín**



Fuente: Elaboración propia

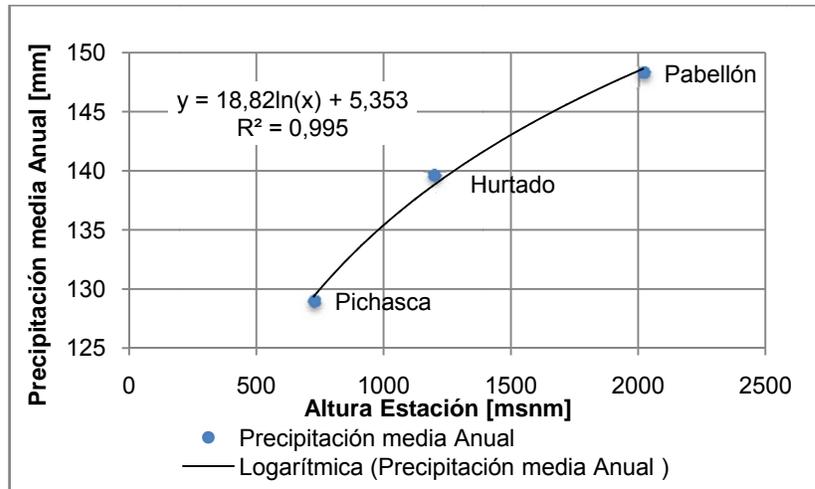
Cada banda de altura fue representada en el modelo mediante un catchment, donde se ingresaron datos de precipitación, temperatura, área aportante y principales características del suelo.

## Precipitación

Dado que dentro de la cuenca no hay estaciones meteorológicas, fue necesario definir algún método para estimar la precipitación que cae sobre la cuenca. Luego, con las estaciones Pabellón, Rivadavia y Hurtado que son las más cercanas a la cuenca se verificó como variaba la precipitación media anual en función de la altura, lo que se muestra en la Figura 4.9

La relación encontrada para la precipitación en la cuenca, es que esta varía en función del logaritmo de la altura.

**Figura 4.9 Precipitación Media Anual vs Altura**



A partir de la curva se obtuvo la precipitación media anual de las siete bandas definidas para la modelación, luego ponderando la precipitación mensual de la estación Pabellón por la el cociente de precipitación media anual de la subcuenca y la estación, se obtuvo la serie de precipitaciones mensuales en el período Abril 1977-Marzo 2005 en cada una de las subcuencas definidas. (Ecuación 4.1)

$$P_{m \text{ Ban}} = \frac{P_{a \text{ Ban}}}{P_{a \text{ Pabellón}}} \cdot P_{m \text{ Pabellón}} \quad 4.1$$

Donde:

$P_{m \text{ Sub}}$  : Precipitación mensual en Subcuenca

$P_{a \text{ Sub}}$  : Precipitación media anual en la cota media de la banda

$P_{m \text{ Pabellón}}$  : Precipitación mensual Pabellón

$P_{a \text{ Pabellón}}$  : Precipitación anual Pabellón

En la Tabla 4.4 se presenta el coeficiente  $\frac{P_{a \text{ Ban}}}{P_{a \text{ Pabellón}}}$  utilizado en cada banda:

**Tabla 4.4 Coeficientes de precipitación bandas Hurtado en San Agustín**

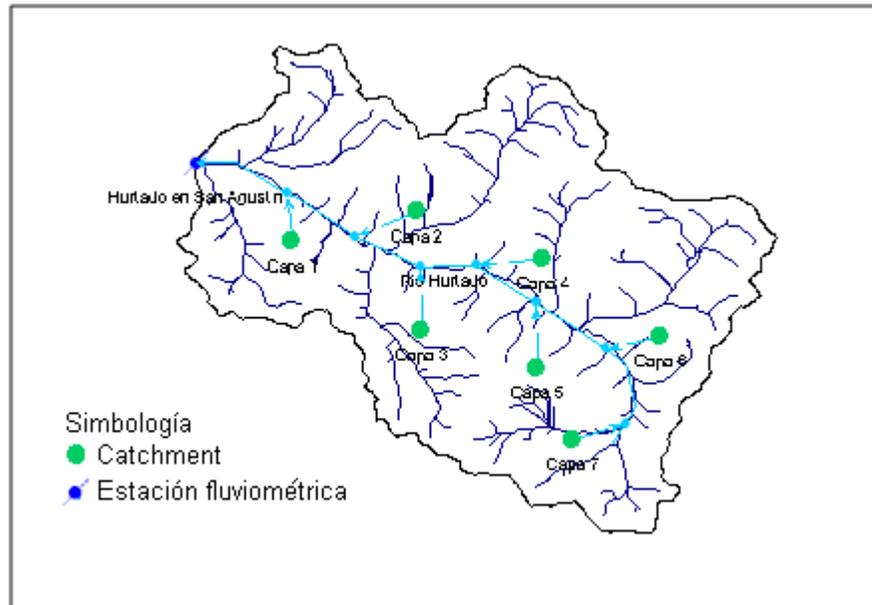
Banda	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
Altura [msnm]	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	4000-4500	4500-5000	5000-5500
Coeficiente	1,018	1,042	1,063	1,081	1,097	1,111	1,124

## Temperatura

Utilizando los gradientes estacionales mostrados en la Figura 4.2 y Figura 4.3, se calculó la serie de temperaturas para las bandas de altura definidas.

El modelo queda representado en la Figura 4.10:

**Figura 4.10 Modelo Hurtado en San Agustín**



Otro elemento agregado en la topología del modelo, fue un nodo con información de caudales medios mensuales a la salida de la cuenca mediante el cual se realizó la comparación entre los caudales simulados y los caudales observados en la estación Hurtado en San Agustín.

## 4.2 RESULTADOS DE CALIBRACION Y VALIDACION

Se utilizó la última versión oficial del modelo WEAP (Versión: 2.2056, Julio 9, 2008). Esta versión agrega al modelo el efecto de la radiación y su incidencia en el derretimiento de nieve.

### 4.2.1 CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL

El período de calibración utilizado fue de Abril 1979 a Marzo 1999, mientras que el período de validación es el comprendido entre los meses Abril 1999 a Marzo 2005. La calibración se realizó manualmente basada en el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

El criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe se define como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_i (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad 4.2$$

Donde:

$Q_{sim_i}$  : Caudal simulado en el mes i.

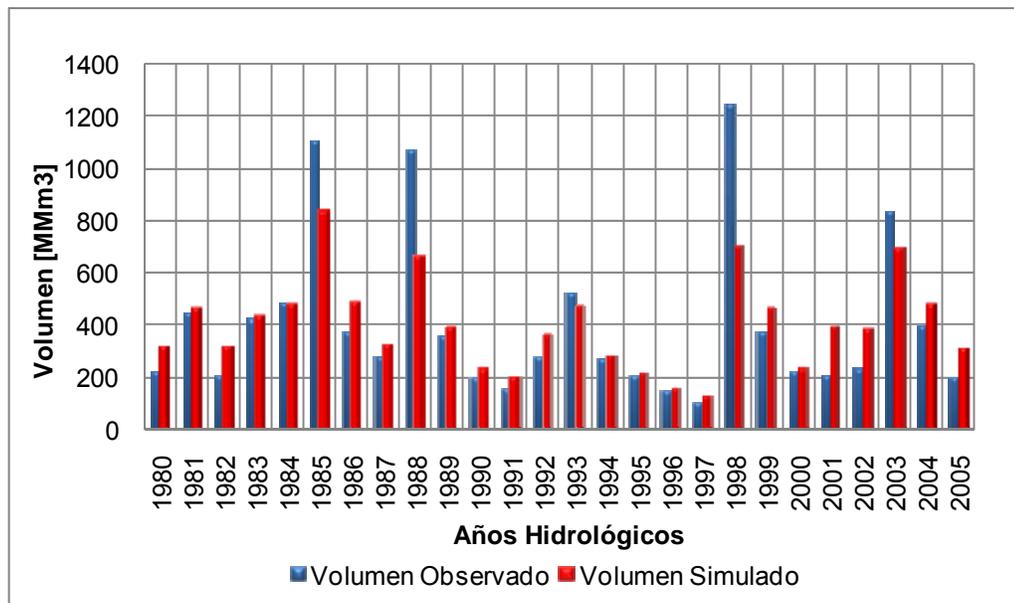
$Q_{obs_i}$  : Caudal observado en el mes i.

$\overline{Q_{obs}}$  : Promedio caudales observados en el periodo de análisis.

El coeficiente de Nash-Sutcliffe obtenido fue de 0.76 en la calibración y de 0.71 en la validación.

En las Figuras 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14 se presentan gráficamente en conjunto los resultados obtenidos en el proceso de calibración y validación del modelo hidrológico a nivel de volumen anual, promedio mensual y la serie de caudales medios mensuales junto los datos de entrada de precipitación.

**Figura 4.11 Volumen Anual simulado y observado Cuenca Elqui en Algarrobal**

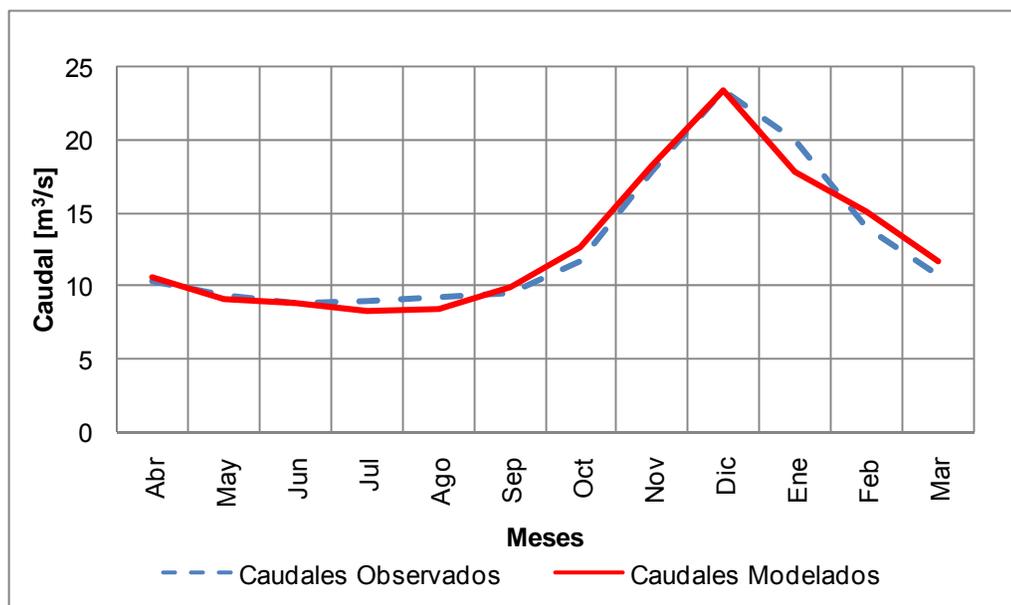


De acuerdo a lo que se observa en la Figura 4.11 el modelo hidrológico logra una buena representación de los volúmenes anuales.

Si bien el volumen total simulado por el modelo es un 4,2% inferior al registrado en la estación fluviométrica, existen años en que el modelo hidrológico entrega una respuesta que difiere de lo observado. En años en que el volumen anual es superior a los 600 millones de m<sup>3</sup> el modelo entrega valores muy inferiores. Para los 4 años en que se excede este volumen, se subestima en promedio su valor en un 30,7%, lo que se debe tener en consideración al realizar el análisis para los años de mayor volumen en las series simuladas para el futuro.

En la Figura 4.12 se observa la buena aproximación que logra el modelo hidrológico para el promedio mensual de los caudales. Enero es el mes en que mas difiere el promedio mensual simulado del observado, promedio que es subestimado en un 11.5%.

**Figura 4.12 Promedio de Caudales medios mensuales simulados y observados Cuenca Elqui en Algarrobal**



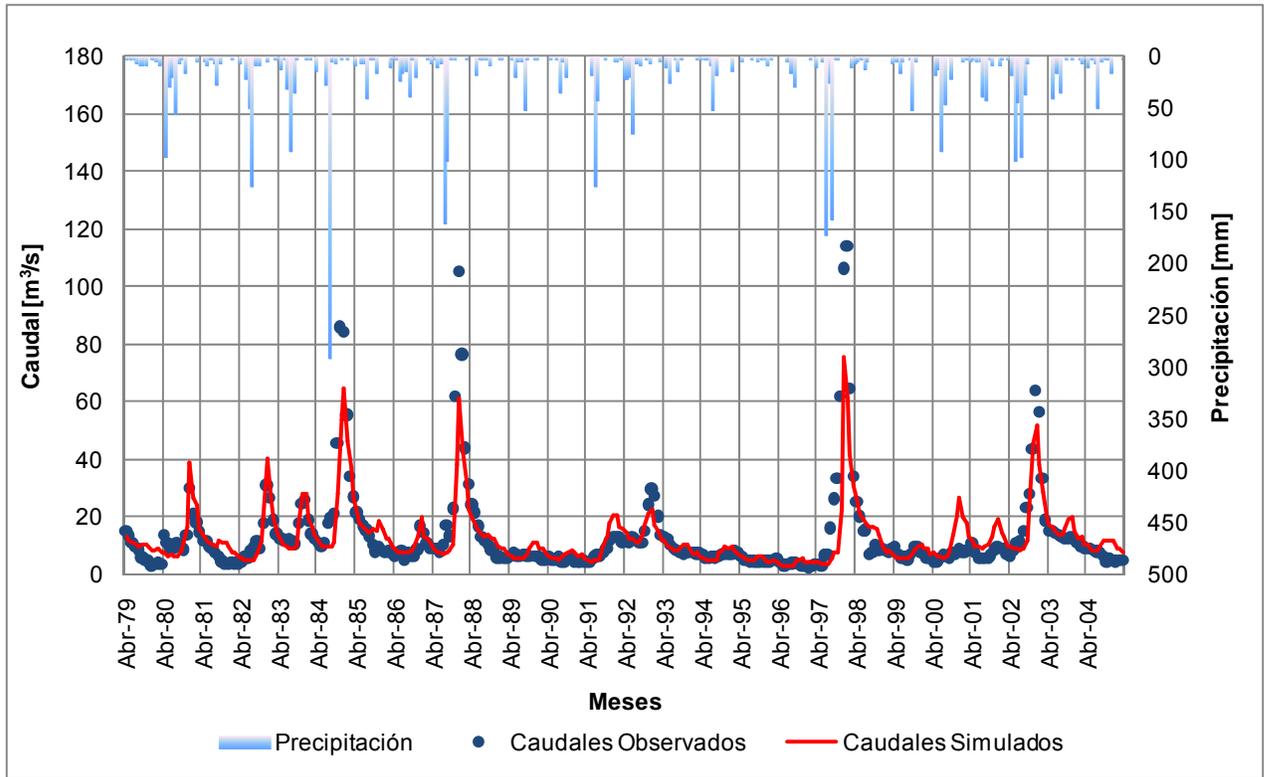
En la

Figura 4.13 se muestra la comparación de los caudales mensuales generados por el modelo hidrológico con los registrados en la estación fluviométrica Elqui en Algarrobal. Además en el eje secundario se presenta la precipitación mensual de entrada al modelo generada según la metodología explicada en el punto 4.1.2. En la Figura 4.14 se presenta la recta de la simulación perfecta y los caudales generados por el modelo.

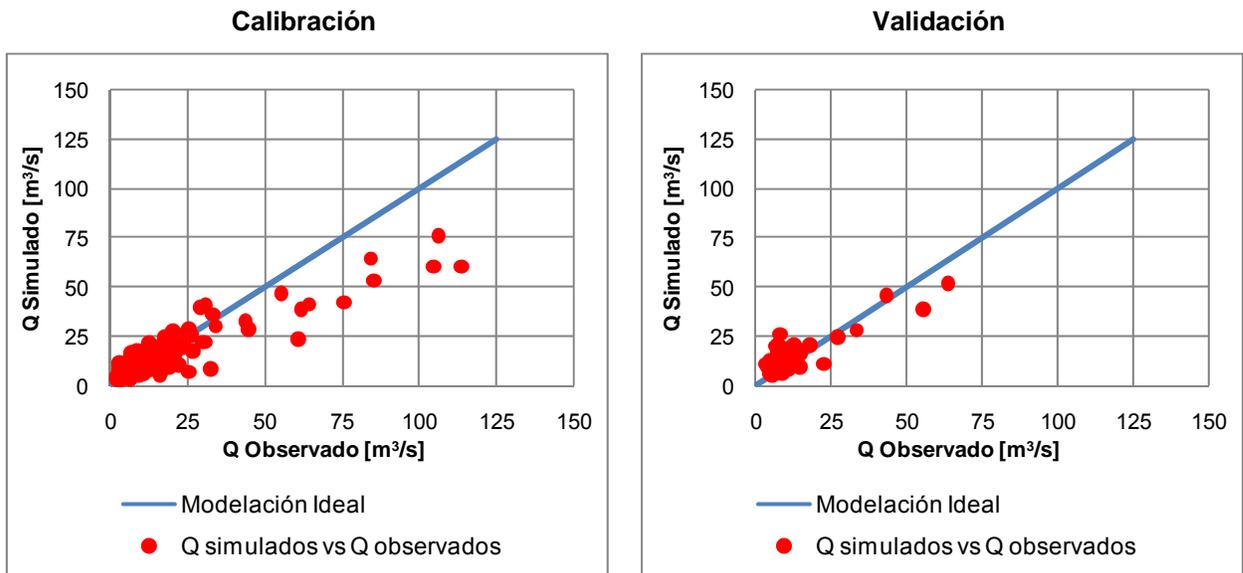
Se aprecia que los caudales simulados representan bien los caudales medios y bajos, lo que no ocurre para los caudales peak de la serie, donde el modelo entrega una subestimación de estos.

En gráfico I de anexo se presenta el resultado obtenido de la calibración cuando se intenta simular los caudales máximos de la serie, donde los periodos de secos dejan de ser bien representados y los máximos menores son sobrestimados.

**Figura 4.13 Caudales medios mensuales simulados y observados Cuenca Elqui en Algarrobal**



**Figura 4.14 Correlación Caudales medios mensuales simulados y observados Cuenca Elqui en Algarrobal**



En la Figura 4.14 se aprecia que para los caudales observados mayores a 45 m<sup>3</sup>/s el modelo entrega valores inferiores en aproximadamente un 30%.

En la Tabla 4.5 se presentan los parámetros utilizados en la calibración de la cuenca Elqui en Algarrobal.

**Tabla 4.5 Parámetros de Calibración Elqui en Algarrobal**

Parámetro del Modelo	Rango de Valores <sup>7</sup>
Coefficiente de Cultivo, $K_c$	0 – 0,8
Indice de resistencia a la escorrentía, $RRF$	0,8-2,1
Dirección preferida del flujo, $f$	0,6-0,8
Temperatura de derretimiento, $t_l$ (°C)	12,35
Temperatura de congelamiento, $t_s$ (°C)	3,4
Factor de Radiación, $Rf$	5
Albedo de Nieve nueva, $A_N$	0.7
Albedo de Nieve vieja $A_o$	0.3
Estanque superior, Capacidad de Zona de Raíces, $z_1$ (mm)	1.307-1.824
Estanque superior, Conductividad de Zona de Raíces, $k_j$ (mm / mes)	700
Estanque inferior, Capacidad del suelo, $z_2$ (mm)	4.800
Estanque inferior, Conductividad del suelo $Dk_j$ (mm / mes)	300

Los parámetros que se variaron mensualmente se muestran en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Parámetros que se variaron mensualmente**

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
$K_c$	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,70	0,52
$Z_1$	1368	1414	1414	1672	1824	1444	1368	1338	1322	1307	1353	1353
RRF	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,4	2,0	2,1	2,1	2,1	1,7	1,2

La dirección preferida del flujo, se varió dependiendo de la subcuenca, con un valor de 0,8 para la subcuenca 6 y de 0,78 para el resto de las subcuencas.

<sup>7</sup> Algunos parámetros se presentan como rango de valores, debido a que se variaron dependiendo de la subcuenca, como también algunos se variaron mensualmente.

El resultado del ajuste de los promedios mensuales para los caudales de salida del embalse la Laguna se muestra en Anexo Digital.

#### 4.2.2 CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTIN

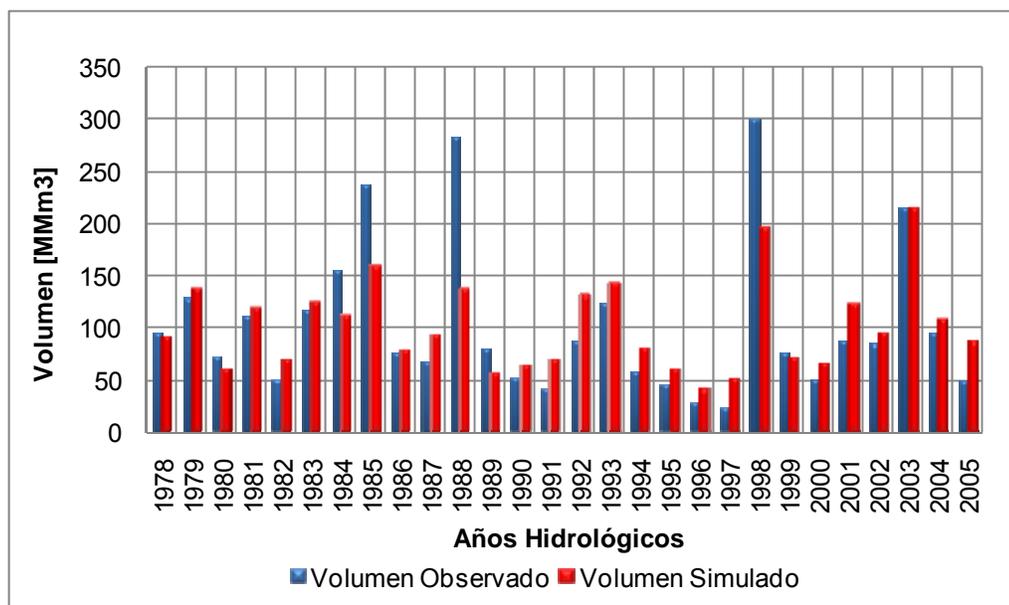
El período de calibración utilizado fue de 264 meses, desde Abril 1977 a Marzo 1999 y el de validación de 72 meses, desde Abril 1999 – Marzo 2005. El coeficiente de Nash-Sutcliffe obtenido fue de 0,70 en la calibración y de 0,69 en la validación.

En las Figuras 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 se presentan gráficamente en conjunto los resultados de mayor relevancia en la calibración y validación del modelo hidrológico.

De acuerdo a lo que se observa en la Figura 4.15 el modelo hidrológico logra una buena representación de los volúmenes anuales.

El volumen total simulado por el modelo es un 2,2% inferior al registrado en la estación fluviométrica. En general para años secos el modelo entrega una sobrestimación del volumen anual, en cambio en años lluviosos este valor es subestimado.

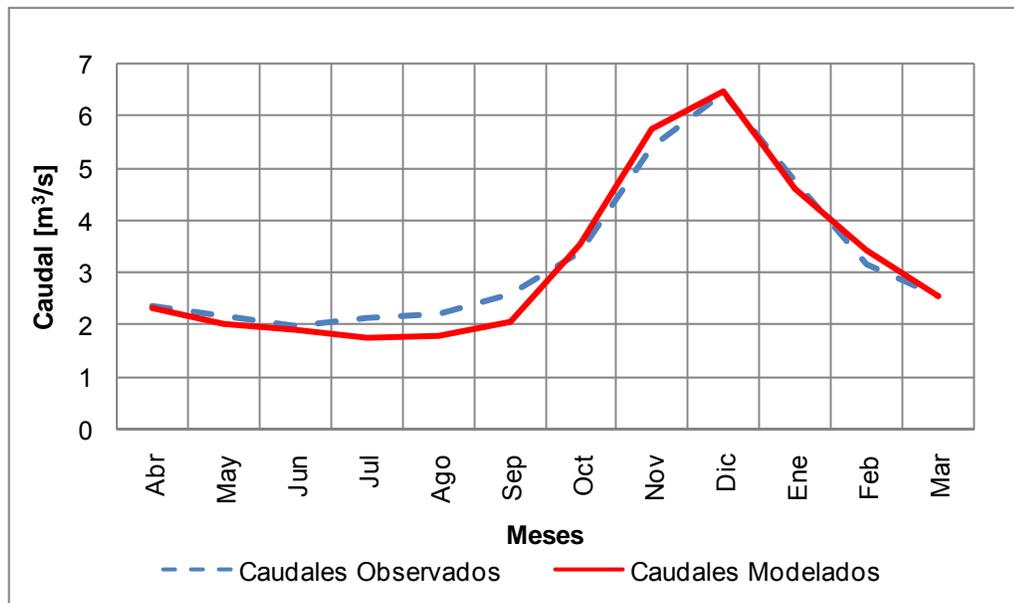
**Figura 4.15 Volumen Anual simulado y observado Cuenca Hurtado en San Agustín**



En la Figura 4.16 se muestra la comparación de promedios mensuales entre caudales simulados y observados para la totalidad de la serie analizada. Se aprecia que en los meses de

Mayo a Septiembre los caudales medios mensuales generados por el modelo hidrológico son en promedio un 11% inferior a los observados en la estación fluviométrica, mientras que para los meses de Octubre a Marzo, exceptuando Enero, los caudales son sobrestimados en promedio en un 4,2%.

**Figura 4.16 Promedio de Caudales medios mensuales simulados y observados Cuenca Hurtado en San Agustín**



En la Figura 4.17 se presenta la comparación de los caudales mensuales generados por el modelo hidrológico con los registrados en la estación fluviométrica Hurtado en San Agustín.

Se observa que en general se obtuvo una buena representación del comportamiento de la cuenca, donde se lograron simular los peaks medios y menores como también períodos en los cuales se tenía un flujo con pocas variaciones. Los peaks mayores en cambio, no lograron ser simulados de la mejor forma, ya que los caudales mayores a 15 m<sup>3</sup>/s son subestimados en aproximadamente un 30 %. En la Figura 4.18 se presenta la comparación entre la simulación perfecta versus los caudales generados por el modelo, donde es posible apreciar las mismas diferencias descritas para la Figura 4.17.

Al igual que en la cuenca Elqui en Algarrobal cuando se intenta obtener una buena representación de los caudales máximos de la serie, se sobrestiman los caudales medios y mínimos.

Figura 4.17 Caudales medios mensuales simulados y observados Cuenca Hurtado en San Agustín

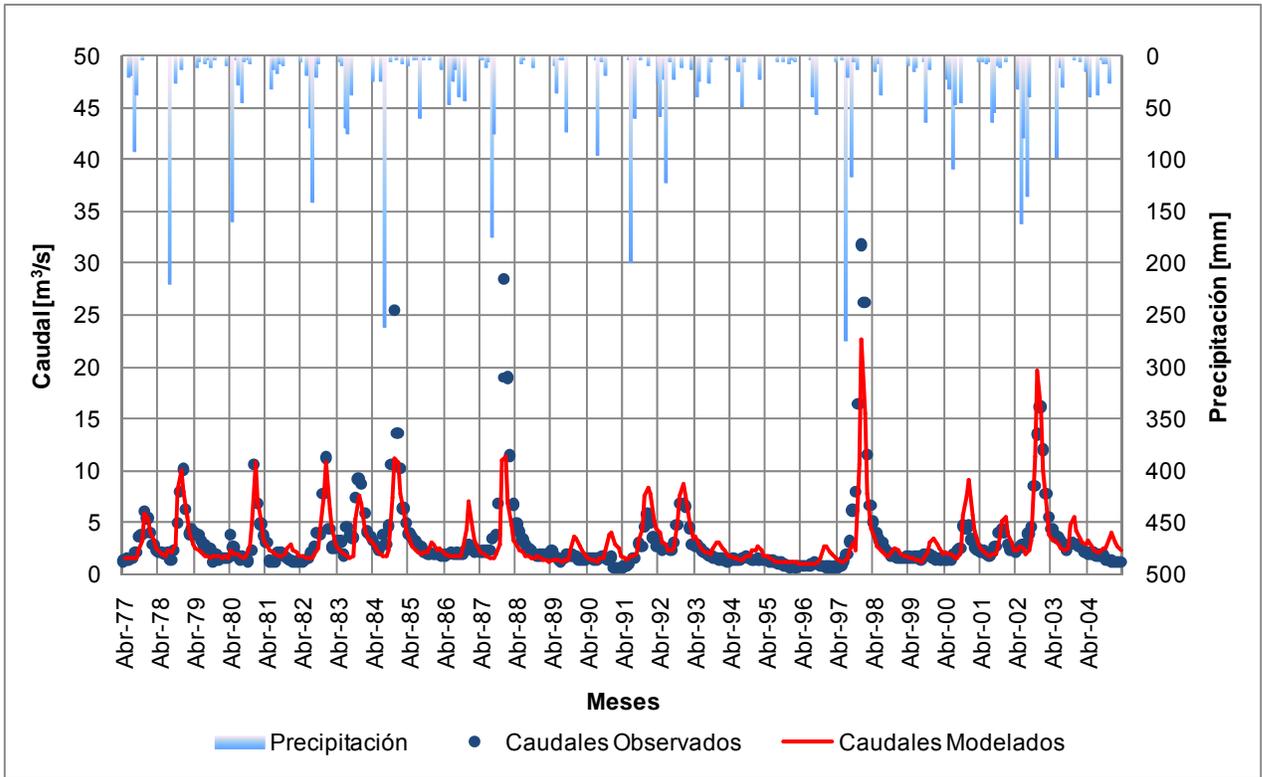
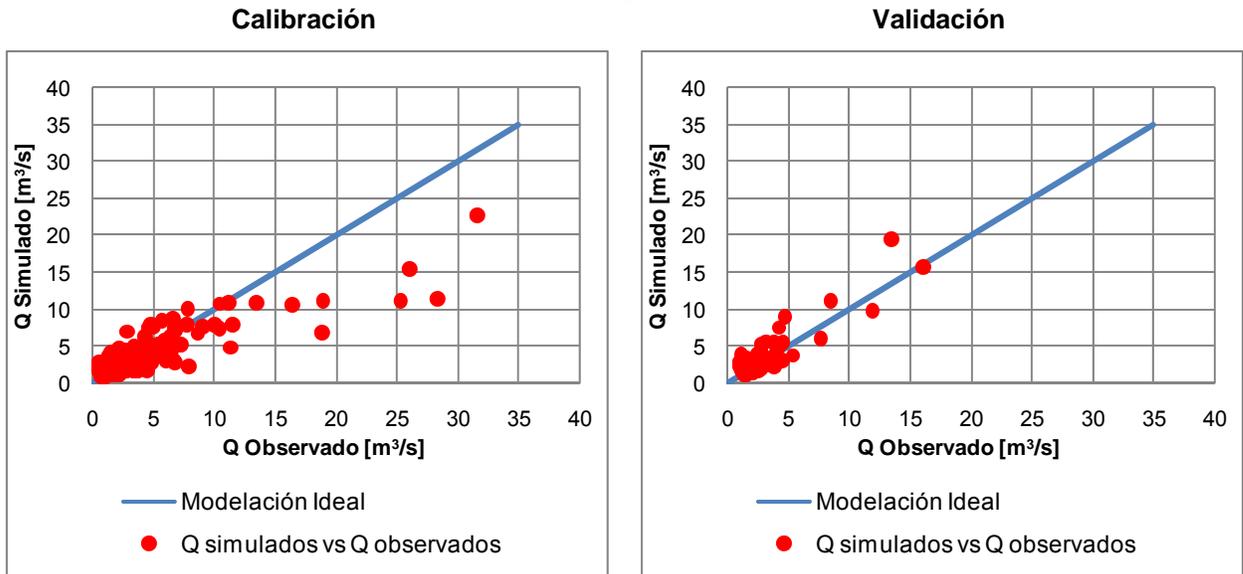


Figura 4.18 Correlación Caudales medios mensuales simulados y observados Cuenca Hurtado en San Agustín



En la Tabla 4.7 se presentan los parámetros utilizados en la calibración de la cuenca Hurtado San Agustín.

**Tabla 4.7 Parámetros de Calibración Hurtado San Agustín**

Parámetro del Modelo	Rango de Valores <sup>8</sup>
Coefficiente de Cultivo, $K_c$	0 – 0,34
Índice de resistencia a la escorrentía, $RRF$	1 – 1,25
Dirección preferida del flujo, $f$	0,62
Temperatura de derretimiento, $t_l(^{\circ}C)$	11
Temperatura de congelamiento, $t_s(^{\circ}C)$	3,1
Factor de Radiación, $Rf$	5
Albedo de Nieve nueva, $A_N$	0,8
Albedo de Nieve vieja $A_O$	0,2
Estanque superior, Capacidad de Zona de Raíces, $z_1(mm)$	610
Estanque superior, Conductividad de Zona de Raíces, $k_j(mm/mes)$	980
Estanque inferior, Capacidad del suelo, $z_2(mm)$	3.100
Estanque inferior, Conductividad del suelo $Dk_j(mm/mes)$	400

Los parámetros utilizados en cada capa fueron los mismos. Solo se utilizó una variación mensual en los parámetros  $K_c$  y  $RRF$ .

En la Tabla 4.8 se presentan los parámetros de variación mensual.

**Tabla 4.8 Parámetros de variación mensual**

Parámetro/mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
$K_c$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,23	0,30	0,30	0,30	0,00
$RRF$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,07	1,08	1,08	1,10	1,11	1,00

<sup>8</sup> Algunos parámetros se presentan como rango de valores, debido a que se variaron dependiendo de la banda de altura, como también algunos se variaron mensualmente.

# CAPÍTULO 5 : GENERACION DE ESCENARIOS FUTUROS

## 5.1 METODOLOGIA

Para la evaluación de los impactos del cambio climático en el período futuro se utilizaron los resultados obtenidos por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile en el proyecto Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI financiado por la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). En dicho proyecto, se realizó una estimación de escenarios climáticos para diferentes regiones de Chile para el período 2071-2100, en una grilla con espaciamiento horizontal de 25 km empleando el modelo PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies), lo que permite generar series de variables atmosféricas en una ubicación específica del territorio nacional. El software disponible en Internet<sup>9</sup> entrega la serie de la variable atmosférica, a nivel diario o mensual, considerando los resultados generados por el modelo PRECIS en el punto de la grilla más cercano, tanto para los escenarios futuros A2 y B2 como en el escenario base correspondiente al período 1960-1990.

Las variables de interés para el presente estudio corresponden a precipitaciones mensuales y temperaturas mensuales.

Antes de utilizar las variables para el escenario futuro estudiado, que corresponde al escenario A2, fue necesario validar la información del modelo PRECIS para las variables de interés en las localizaciones de las estaciones utilizadas para la calibración y validación de los modelos de simulación hidrológica. La metodología utilizada para dichos efectos se resume a continuación:

- Se extrae la información de la variable simulada con el modelo PRECIS, Sp, en el período concurrente con información observada en la estación, So.
- Se realiza el análisis de frecuencia a los valores mensuales de la serie Sp.
- Se realiza el análisis de frecuencia a los valores mensuales de la serie observada en la estación, So.
- Para valores prefijados de probabilidad de excedencia se extraen los valores asociados de cada muestra y se establece la relación entre ambos valores.<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> (<http://mirasol.dgf.uchile.cl/conama/>)

<sup>10</sup> Para la temperatura se establecieron relaciones mes a mes, lo que no fue posible de realizar con la precipitación debido a la existencia de meses en que el 90% de los valores mensuales eran igual a 0, por lo que se estableció una relación global, como también se estableció una relación para el total anual.

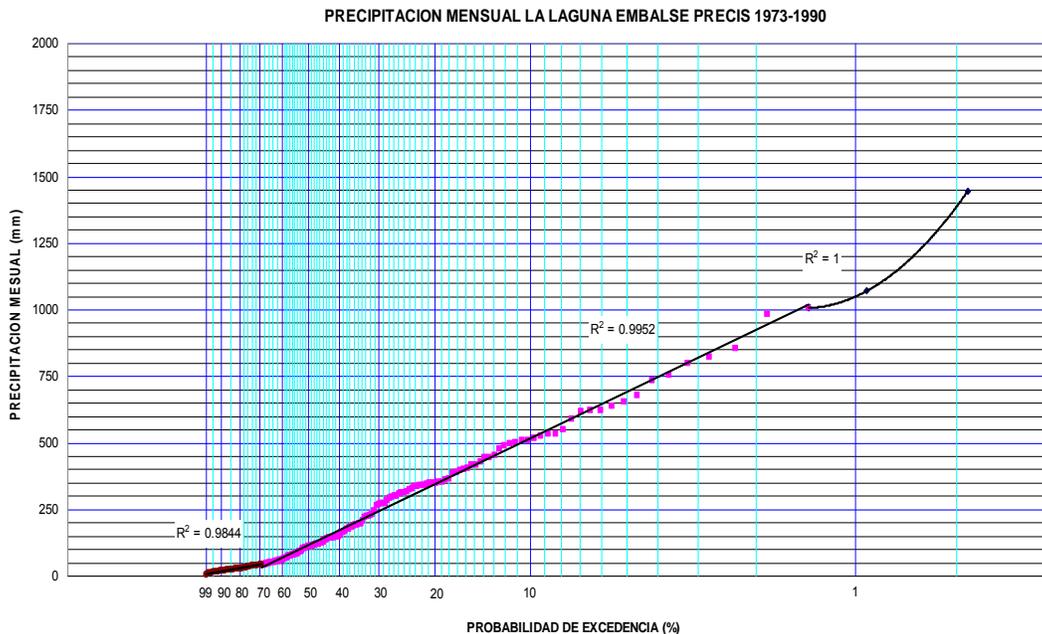
- La relación establecida se considera válida para cualquier situación futura.

En el caso de la precipitación se debió realizar análisis de frecuencia para los valores de precipitación total anual, tanto para los valores de la línea base de PRECIS, como también para los valores observados en cada estación. Se estableció una relación con la que se corrigieron proporcionalmente los valores mensuales de precipitación.

En el anexo digital se incluyen las distintas relaciones establecidas, presentándose a continuación algunos ejemplos de los análisis de frecuencia realizados para cada variable de interés en el período base generada tanto con el modelo PRECIS como lo observado en el período concurrente y la relación establecida para hacer representativa de la estación el resultado del modelo PRECIS.

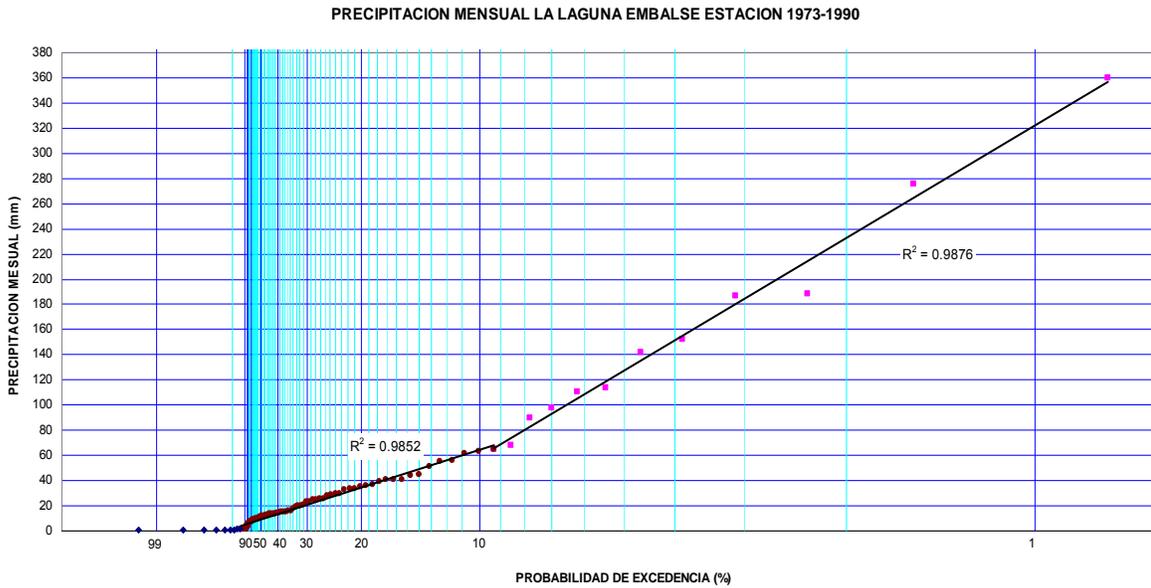
En la Figura 5.2 y Figura 5.3 se muestran los análisis de frecuencia realizados a partir de los datos observados y del baseline<sup>11</sup> de PRECIS para establecer la relación que se muestra en la Figura 5.3.

**Figura 5.1 Análisis de Frecuencia Precipitación mensual PRECIS La Laguna embalse**



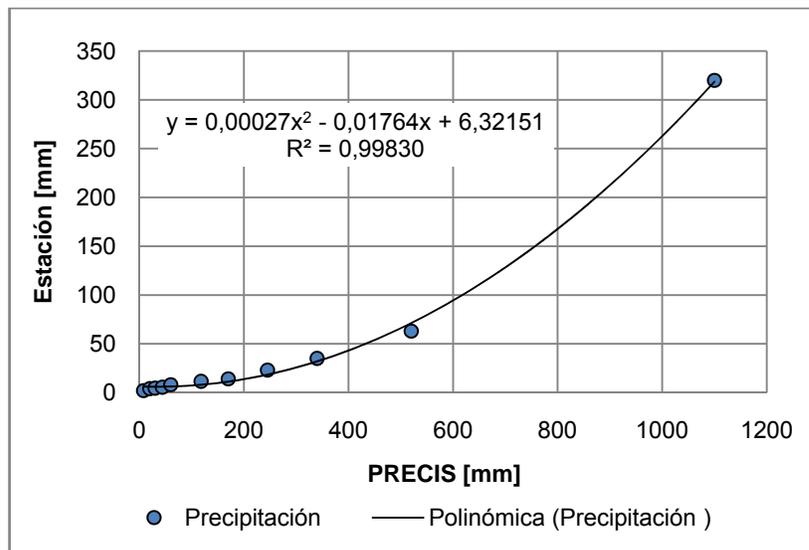
<sup>11</sup> Baseline: periodo utilizado como base en el modelo PRECIS, en el cual se simulaban valores para las variables meteorológicas en el período 1960-1990 a partir de las emisiones de gases de efecto invernadero de la época.

**Figura 5.2 Análisis de Frecuencia Precipitación mensual Estación La Laguna embalse**



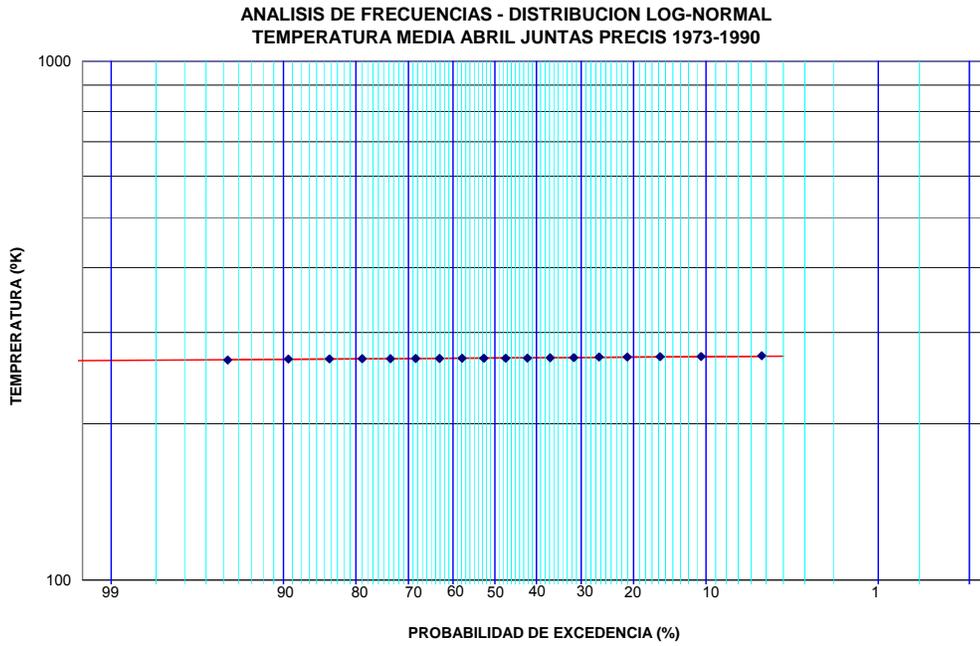
La Figura 5.3 se construye a partir de la precipitación para distintas probabilidades de excedencia en la estación meteorológica y en la línea base del PRECIS.

**Figura 5.3 Correlación Precipitación PRECIS estación La Laguna embalse**



En la Figura 5.4 y Figura 5.5 se presentan los análisis de frecuencias realizados a partir de los datos observados y de la línea base de PRECIS para establecer la relación que se muestra en la Figura 5.6 entre los datos de temperatura en la estación Juntas.

**Figura 5.4 Análisis de Frecuencia Temperatura mes de Abril PRECIS Juntas**



**Figura 5.5 Análisis de Frecuencia Temperatura mes de Abril Estación Juntas**

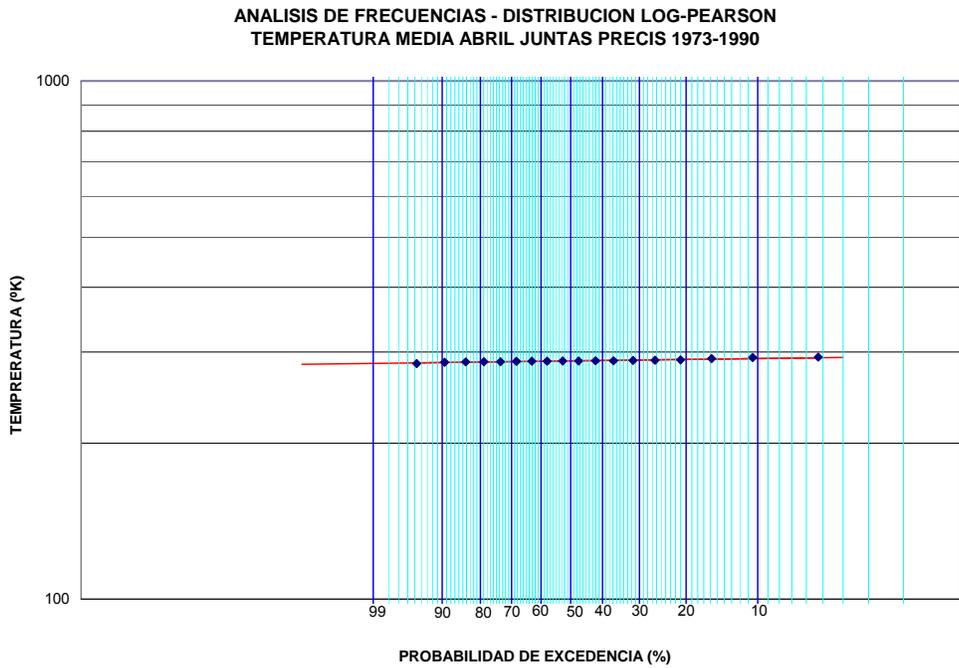
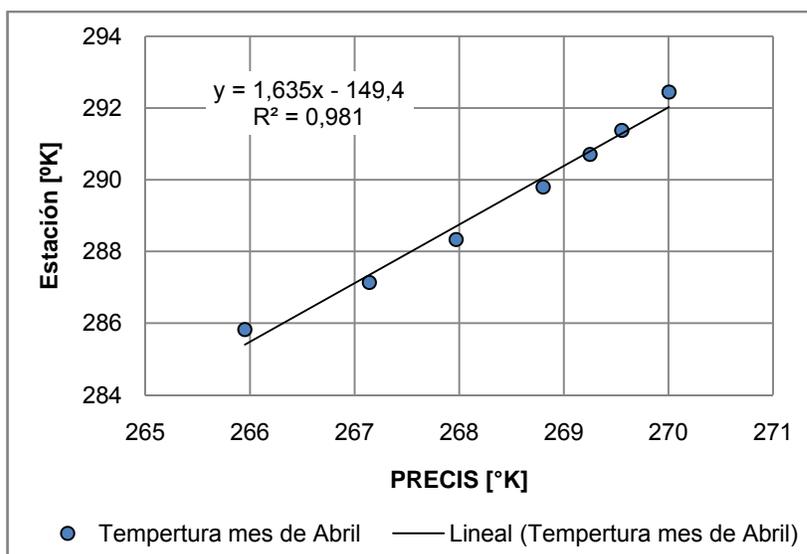


Figura 5.6 Correlación Temperatura mes de Abril PRECIS estación Juntas



Los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) tanto para la temperatura como para la precipitación fueron mayores a 0,95 en todos los casos, por lo que se considera que la relación encontrada puede ser aplicada.

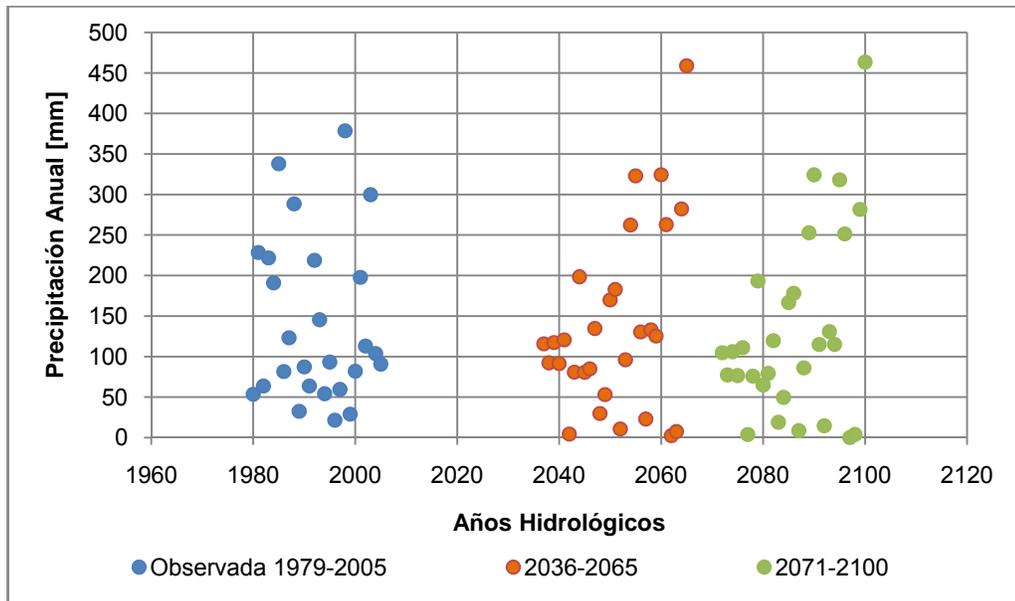
Para obtener los valores de las variables en el período 2035-2065, se hizo necesario evaluar las tendencias de las series simuladas en el período base 1960-1990 a 2071-2100. La metodología establecida para generar las series de las variables atmosféricas en el período de interés 2035-2065 se resume a continuación:

- Se analizaron las tendencias y los promedios mensuales ( $\mu_i$ ) de cada variable y sus desviaciones ( $\sigma_i$ ) en ambos períodos, lo que permitió también establecer el coeficiente de variación ( $C_{vi} = \sigma_i / \mu_i$ ).
- Para cada mes se calculó la tendencia en la media y en el coeficiente de variación, lo que permitió establecer los valores ( $\mu_i, \sigma_i$ ) mensuales correspondientes al período de interés 2035-2065.
- Se generó para el período 2071-2100 la serie de la variable estandarizada  $(x - \mu_i) / \sigma_i$  utilizando los estadísticos ( $\mu_i, \sigma_i$ ) de dicho período.
- Dicha serie fue desestandarizada utilizando los estadísticos del período de interés 2035-2065.

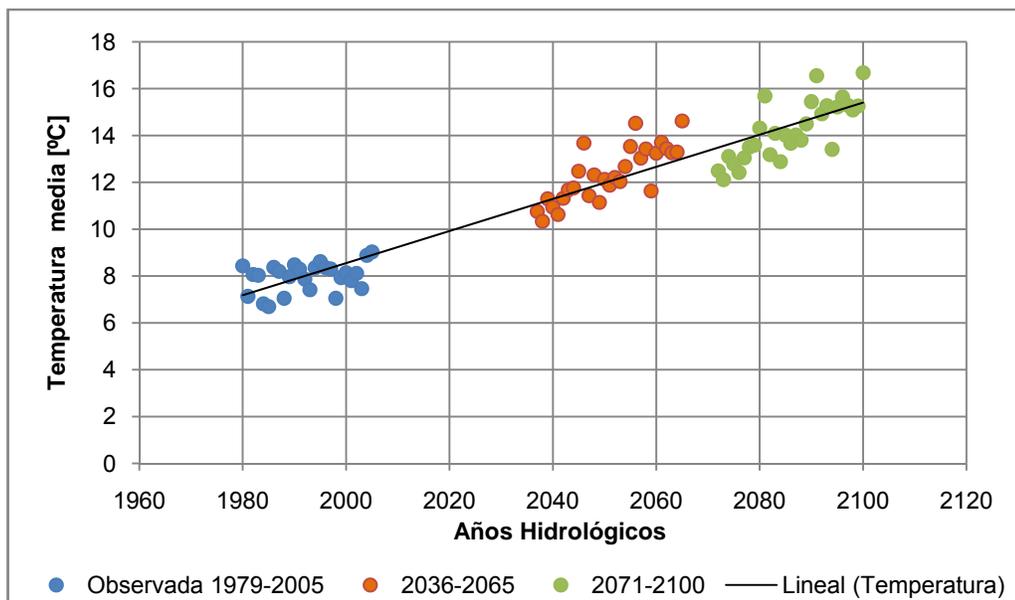
- Para generar la serie mensual en el punto geográfico de interés para la simulación hidrológica, se utiliza la relación previamente establecida en el período base.

A continuación en las Figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 se muestra la tendencia de los datos de entrada al modelo hidrológico para ambas cuencas una vez que se han realizado todas las correcciones a los datos entregados por el modelo PRECIS.

**Figura 5.7 Tendencia Precipitación Elqui en Algarrobal**



**Figura 5.8 Tendencia Temperatura Elqui en Algarrobal**



Como se aprecia en la Figura 5.7 no existe una tendencia clara de las precipitaciones en la cuenca, sin embargo se produce una disminución del promedio de las precipitaciones anuales en cada período. En el período 1978-2005 el promedio de precipitación anual es de 140,75 mm, mientras que para el período 2036-2065 es de 137,90 mm y en el período 2071-2100 disminuye a 130,69 mm

A diferencia de las precipitaciones, en la Figura 5.8 se observa que existe un claro aumento en las temperaturas medias anuales. El promedio de los datos observados en el período 1979-2005 es de 7,95 [°C], aumentando a 12,36 [°C] en el período 2036-2065 y a 14,21 [°C] en el período 2071-2100.

Como se aprecia en la Figura 5.9 existe una tendencia a la disminución de las precipitaciones en la cuenca Hurtado en San Agustín desde un valor promedio anual de 175,28 mm que se tiene para los datos observados en el período 1977-2005, a un valor de 125,20 mm en el período 2071-2100.

En la

Figura 5.10 se observa un aumento importante en las temperaturas medias anuales en la cuenca Hurtado en San Agustín. Para los datos observados el promedio de la temperatura media anual es de 5,87 [°C]. Para el período 2035-2065 la temperatura media sobre la cuenca se elevará a un valor de 10,30 [°C], y para el período 2071-2100 a 12,13 [°C]

**Figura 5.9 Tendencia Precipitación Hurtado en San Agustín**

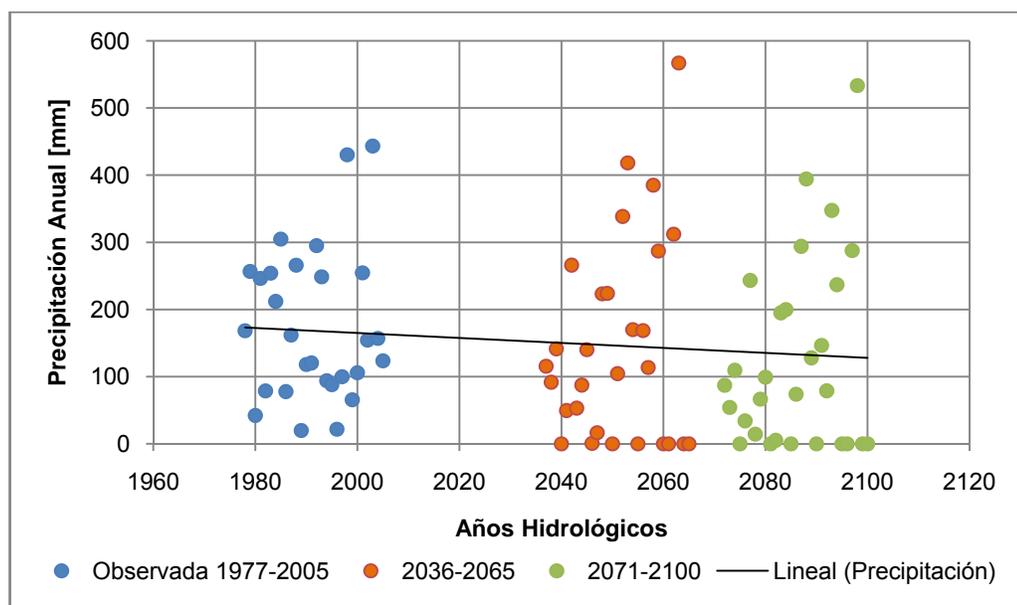
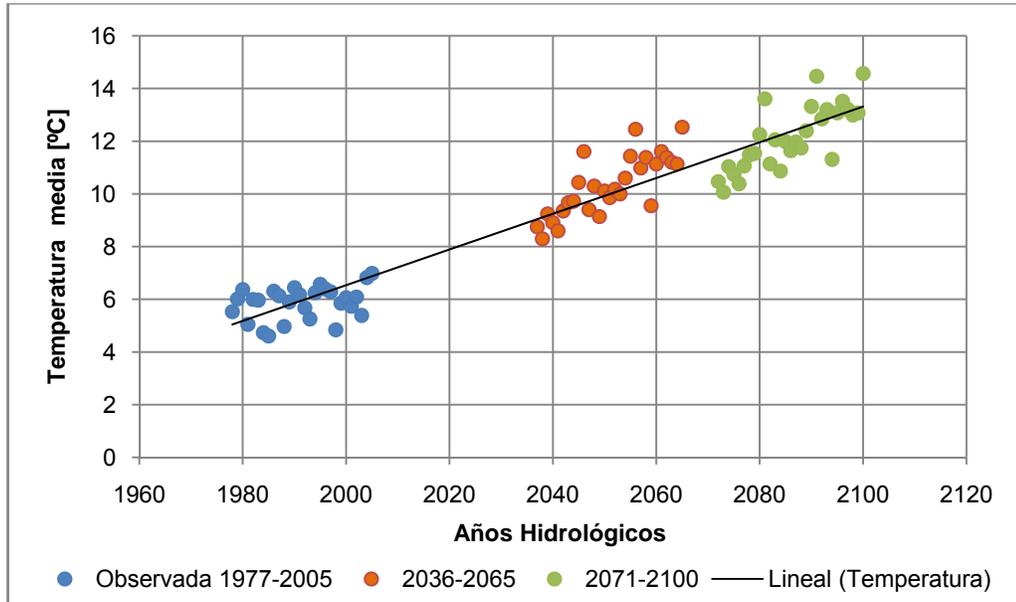


Figura 5.10 Tendencia Temperatura Hurtado en San Agustín



## CAPÍTULO 6 : RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan los resultados del modelo WEAP en la estimación de caudales medios mensuales para el período 2036-2065 y 2071-2100 en comparación a los caudales observados en las cuencas Elqui en Algarrobal y Hurtado en San Agustín bajo el escenario A2. Se realiza un análisis de los caudales medios mensuales, frecuencia de ocurrencia del caudal medio mensual máximo y el estrés hídrico en la cuenca.

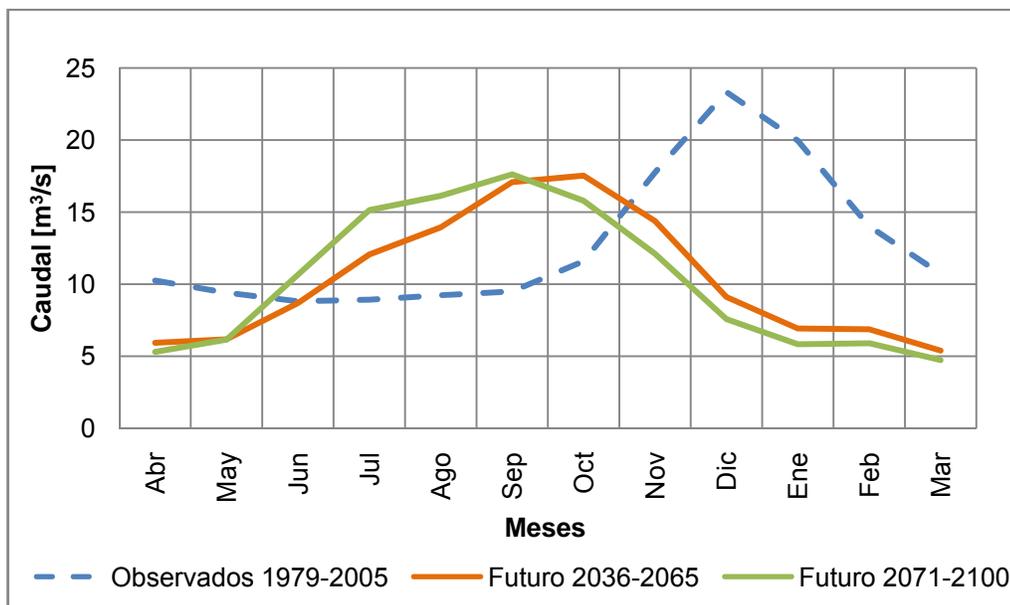
Basado en los valores de caudal disponibles en el período observado. Se compararon las situaciones presentes y futuras analizando la distribución mensual de las fallas y la duración de éstas.

Se define como falla al mes en que no se supera un cierto caudal correspondiente a una probabilidad de excedencia observada. El análisis se realizó con los caudales observados de probabilidad de excedencia 75%, 85% y 95%.

### 6.1 RESULTADOS CUENCA ELQUI EN ALGARROBAL

En la Figura 6.1 se presenta el promedio mensual de los caudales en el periodo de observación, como también en las simulaciones futuras.

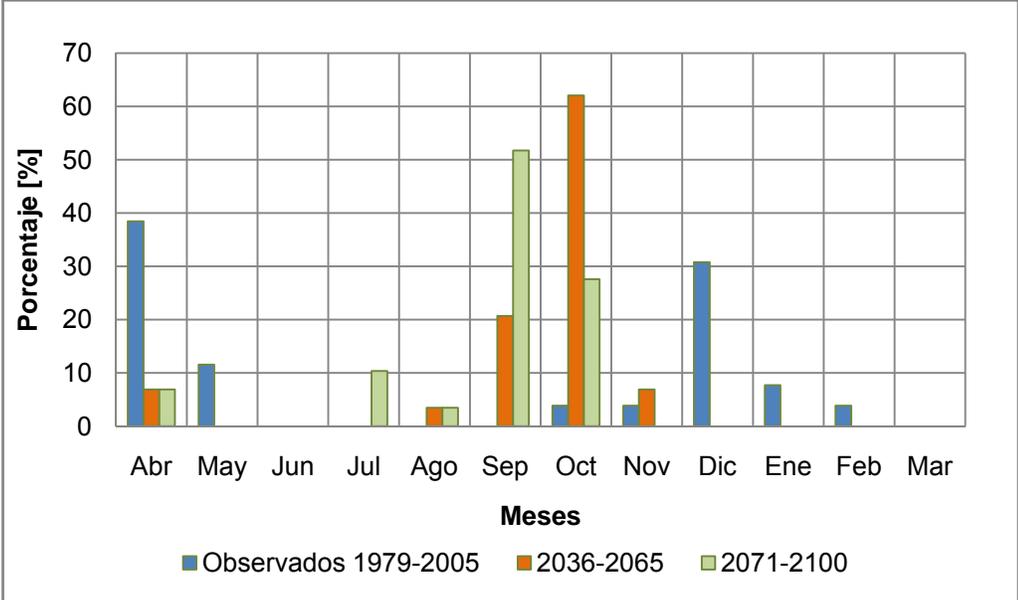
Figura 6.1 Promedio mensual Presente y Futuro Caudales Elqui en Algarrobal



Como se observa en la Figura 6.1 existe una variación del régimen en la cuenca. En línea azul (segmentada) se muestran los caudales medios mensuales para los datos observados en el período Abril 1979 - Marzo 2005, donde se aprecia el régimen nival de la cuenca, con mayores caudales en el mes de Diciembre con un valor de 23,2 m<sup>3</sup>/s en promedio. En línea roja, se muestran los caudales medios simulados para el período Abril 2036 – Marzo 2065, donde además de producirse un desplazamiento del peak hacia el mes de Octubre, este disminuye a 17,33 m<sup>3</sup>/s, se observa que los caudales aumentan en el período de invierno y primavera, pero disminuyen en forma considerable para los meses de deshielo. En color verde, se muestran los caudales simulados para el período Abril 2071 - Marzo 2100, donde se observa que el mayor valor medio se produce en el mes de Septiembre, 17,48 m<sup>3</sup>/s. Además se aprecia un aumento más marcado de los caudales en los meses de invierno y un descenso en los meses de verano.

Para los caudales máximos, se analizó y comparó la frecuencia de ocurrencia de los mayores valores ocurridos anualmente en el período observado y en el futuro. En la Figura 6.2 se muestra, en porcentaje, la cantidad de veces en que el caudal máximo de un año hidrológico ocurrió en el mes.

**Figura 6.2 Máximo Caudal medio mensual Presente y Futuro Cuenca Elqui en Algarrobal**



### 6.1.1 Estrés Hídrico Cuenca Elqui en Algarrobal

El análisis del estrés hídrico se realizó a partir de los datos de caudales medios mensuales observados en el período 1979-2005. Para esto se obtuvo la curva duración de donde se extrajeron los caudales de probabilidad de excedencia 75%, 85% y 95%. Luego, tanto para los caudales observados como para los simulados en los períodos futuros, para cada valor medio mensual se determinó si se encontraba o no por sobre estos caudales, definiendo como una situación de estrés a los meses en que estos no eran superados.

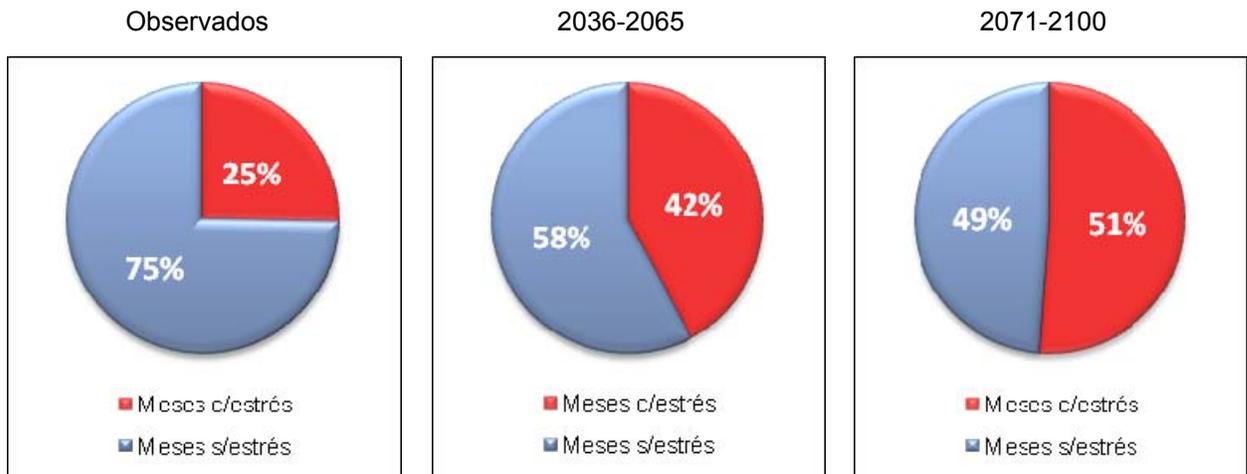
Los caudales de probabilidad de excedencia 75%, 85% y 95% se presentan en la Tabla 6.1

**Tabla 6.1 Caudales de Estrés Cuenca Elqui en Algarrobal**

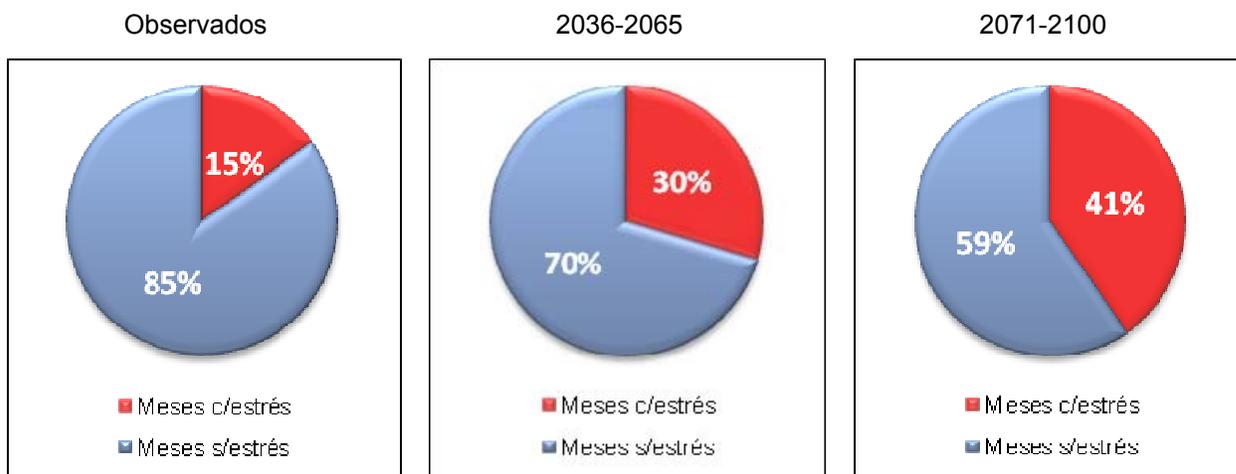
Probabilidad de excedencia	Q <sub>75%</sub>	Q <sub>85%</sub>	Q <sub>95%</sub>
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	5,7	4,6	3,5

En las Figuras 6.3, 6.4 y 6.5 se muestra el estrés hídrico presente y futuro para los caudales de probabilidad de excedencia antes señalados.

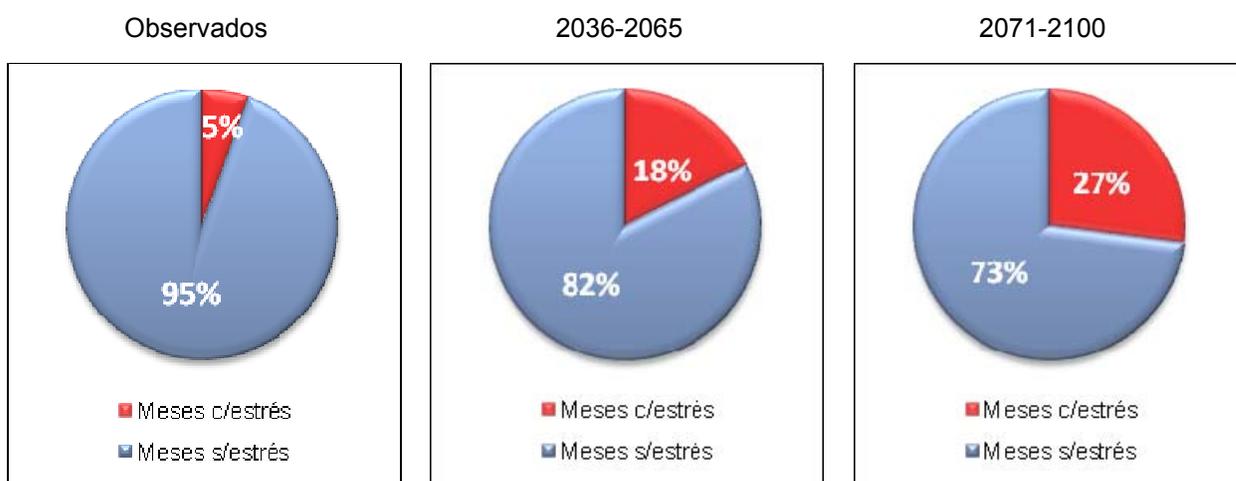
**Figura 6.3 Estrés Hídrico Presente y Futuro para Q<sub>75%</sub>**



**Figura 6.4 Estrés Hídrico Presente y Futuro para  $Q_{85\%}$**



**Figura 6.5 Estrés Hídrico Presente y Futuro para  $Q_{95\%}$**



Se observa que se tiene un claro aumento del estrés hídrico, donde el 42% de los meses en el período 2036-2065 y el 51% de los meses en el período 2071-2100 no superarían el caudal de probabilidad de excedencia de 75%. Es decir, para el período 2071-2100 casi se duplicaría la cantidad de meses en que no se alcanza un caudal de  $5,7 \text{ m}^3/\text{s}$ . En las Figuras 6.4 y 6.5 se aprecia la misma tendencia de aumento en la cantidad de meses con estrés observada para el caudal de probabilidad de excedencia 75%, donde para el período 2071-2100 el 41% de los meses no superaría un caudal de  $4,6 \text{ m}^3/\text{s}$  y un 27% de los meses no superaría un caudal de  $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En la Figura A. II en Anexo se presenta el porcentaje de veces que se produce el estrés hídrico en cada mes.

Para analizar la severidad del estrés hídrico se construyó la curva de duración del déficit donde se da cuenta de la probabilidad de que ocurra una cierta cantidad de meses con estrés hídrico. La metodología utilizada se describe a continuación:

- Se definió como un evento  $e_i$  al intervalo de meses continuos con estrés hídrico, donde  $i$  representa la duración en meses del evento.
- Se calculó la probabilidad de que ocurriera un evento  $e_i$  como casos favorables/casos totales para cada uno de los tres períodos. Donde los casos favorables corresponden al número de eventos de duración  $i$  y los casos totales al número de intervalos de duración  $i$  en el período analizado.

$$CT = N - i + 1 \quad 6.1$$

Donde:

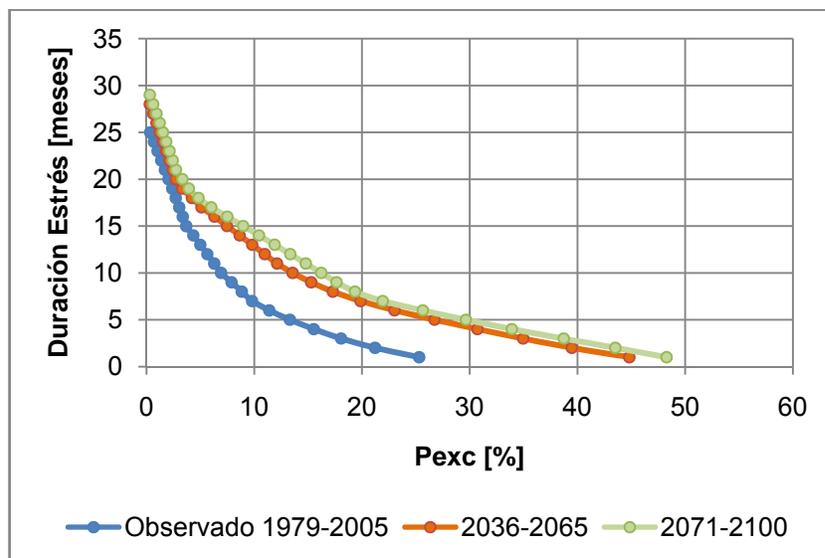
CT: Casos Totales.

N: Numero de meses del período.

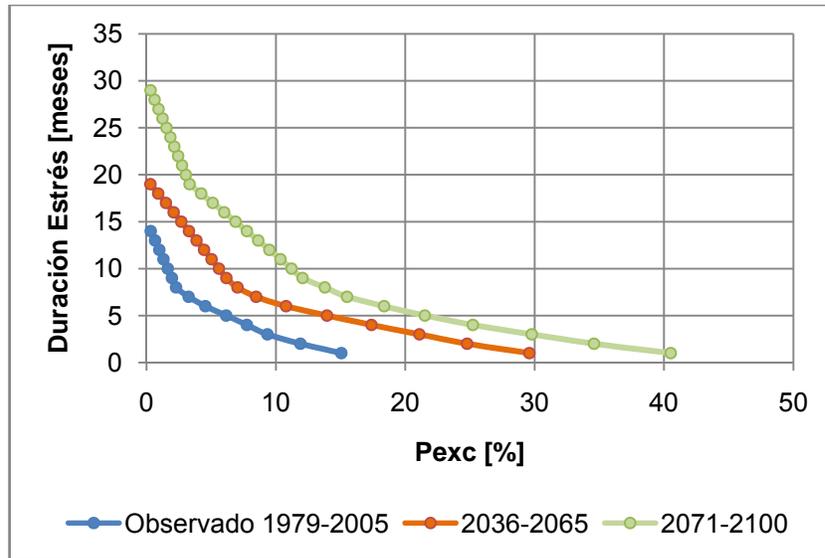
i: Duración en meses del evento.

Las curvas duración del déficit se presentan en las Figuras 6.6, 6.7 y 6.8.

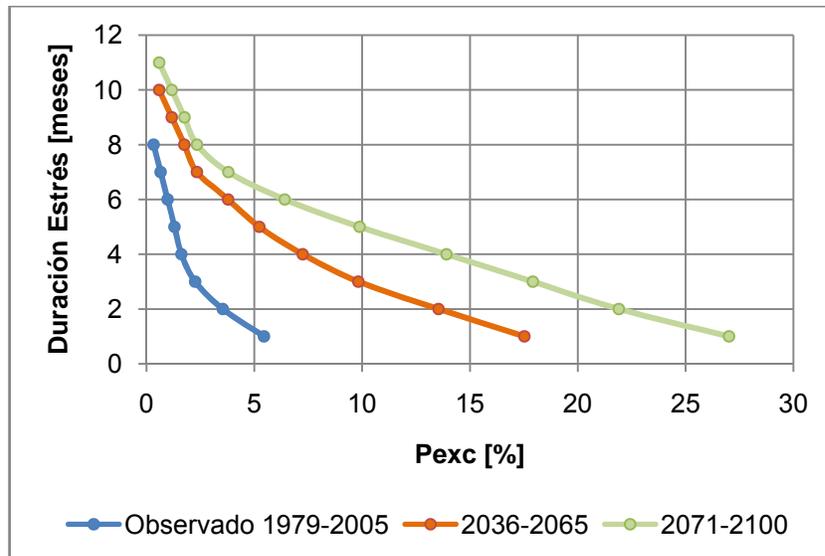
**Figura 6.6 Curvas Duración del Estrés para  $Q_{75\%}$**



**Figura 6.7 Curvas Duración del Estrés para  $Q_{85\%}$**



**Figura 6.8 Curvas Duración del Estrés para  $Q_{95\%}$**

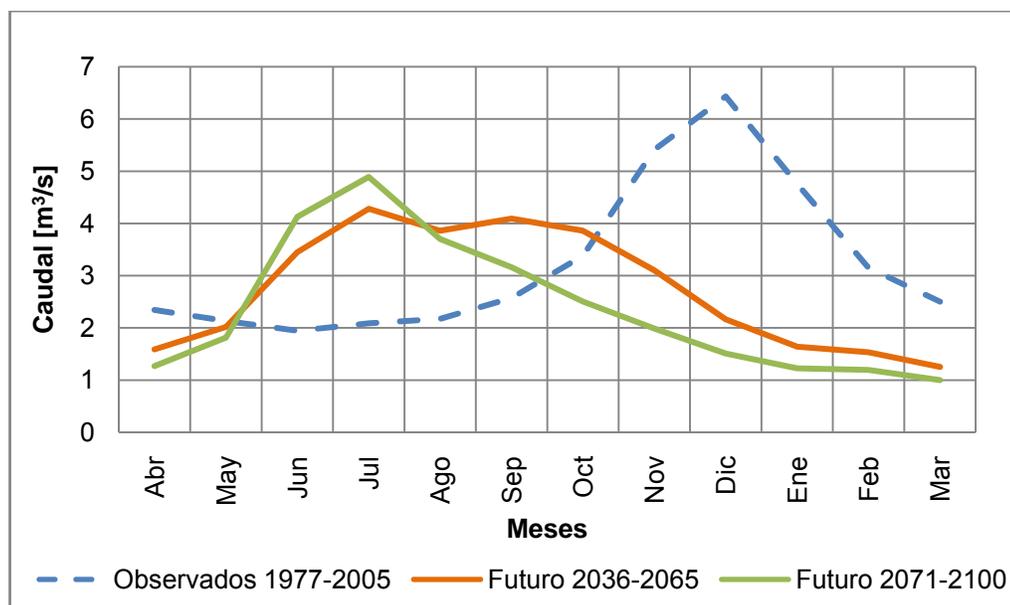


Como se muestra en las Figuras 6.6, 6.7 y 6.8 las duraciones del déficit tenderían a incrementarse en el futuro. Para el caudal de estrés 75%, la probabilidad de que exista un período de 12 meses consecutivos en que se tenga déficit es de un 5,6% para los datos observados, mientras que se este valor se incrementaría fuertemente a un valor de 10,1% y 16% para los períodos 2036-2065 y 2071-2100 respectivamente. Para el caudal de estrés 85% el aumento de esta probabilidad es aun más drástico, donde para la probabilidad de que ocurra un evento de déficit de 12 meses a partir de los datos observados es de un 1%, de 4,5% en el período 2036-2065 y de 9,5% en el período 2071-2100.

## 6.2 RESULTADOS CUENCA HURTADO EN SAN AGUSTIN

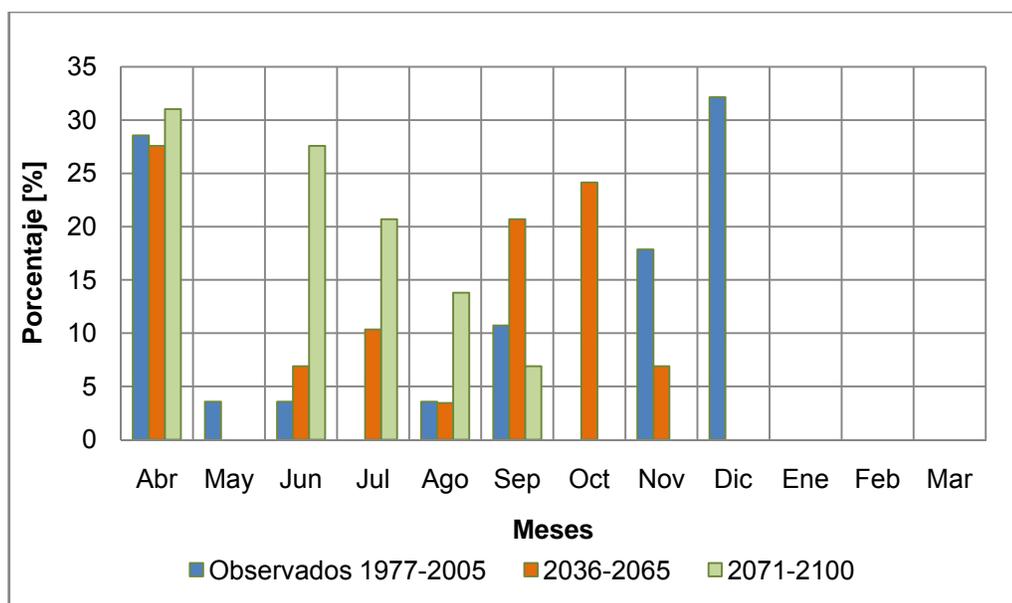
En la Figura 6.9 se muestra la variación del régimen en la cuenca. En línea azul (segmentada) se muestran los caudales medios mensuales para los datos observados en el período Abril 1977 - Marzo 2005, donde se aprecia claramente el régimen nival de la cuenca. En línea roja, se presentan los caudales medios simulados para el período Abril 2036 – Marzo 2065, donde se produciría un desplazamiento del peak hacia el mes de Julio, además de generarse un nuevo peak inferior y menos definido en el mes de Septiembre, se observa también un aumento en los caudales de los meses de invierno y de comienzos de primavera. En color verde, se muestran los caudales simulados para el período Abril 2071 - Marzo 2100, donde además de presentar inferiores caudales en diez de los doce meses del año a los simulados en el período 2036-2065, se alcanzaría su mayor valor medio para el mes de Julio, presentando un régimen marcadamente pluvial.

Figura 6.9 Promedio mensual Presente y Futuro Caudales Hurtado en San Agustín



En la Figura 6.10 se presenta la probabilidad de que anualmente el caudal medio mensual máximo ocurra en un mes dado.

**Figura 6.10 Máximo Caudal medio mensual Presente y Futuro Cuenca Hurtado en San Agustín**



Basado en la Figura 6.10, el caudal medio mensual máximo dejaría de presentarse mayormente en el mes de Diciembre, ocurriendo más frecuentemente en el mes de Abril. Sin embargo, aunque Abril es un mes importante en la frecuencia de ocurrencia en el caudal medio máximo tanto para los datos observados como para los simulados futuros, la magnitud de estos es muy inferior a los caudales máximos que se presentan en los meses de deshielo para la serie observada y sería muy inferior a los caudales máximos registrados en los meses de invierno y primavera para los meses simulados en el Futuro.

### 6.1.2 Estrés Hídrico Cuenca Hurtado en San Agustín

Siguiendo la misma metodología expuesta en el punto 6.1.1 se analizó el nivel de estrés hídrico presente y futuro para la cuenca Hurtado en San Agustín.

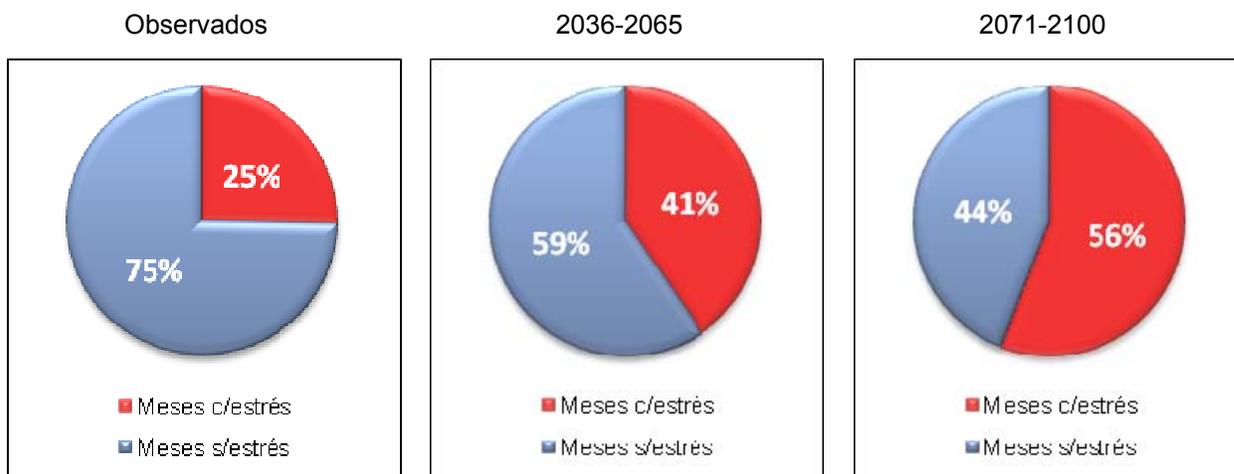
Los caudales definidos para el estrés hídrico en la cuenca son los presentados en la Tabla 6.2

**Tabla 6.2 Caudales de Estrés Cuenca Hurtado en San Agustín**

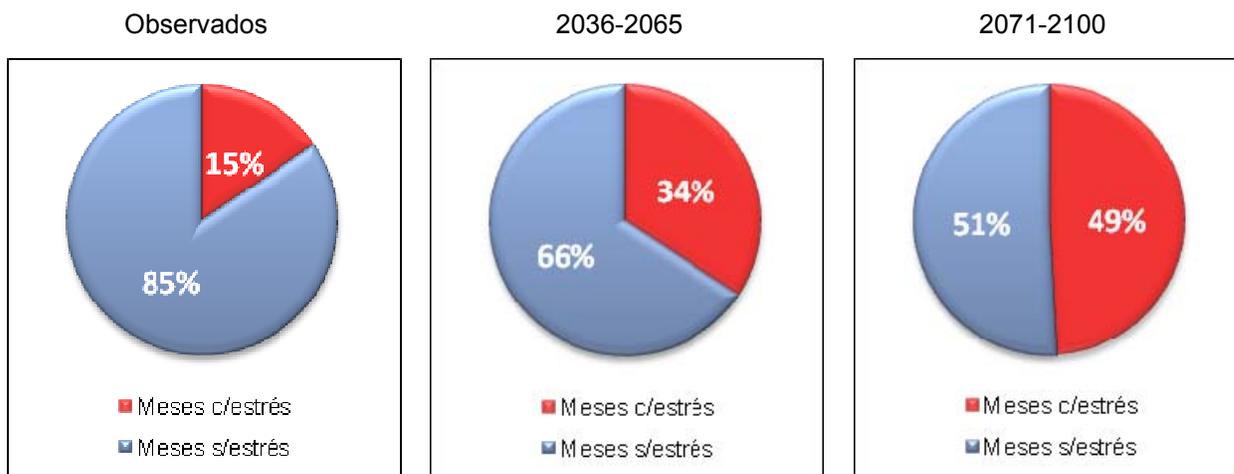
Probabilidad de excedencia	Q <sub>75%</sub>	Q <sub>85%</sub>	Q <sub>95%</sub>
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	1,4	1,3	0,7

En las Figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se muestra el estrés hídrico presente y futuro para los caudales de probabilidad de excedencia de la Tabla 6.2.

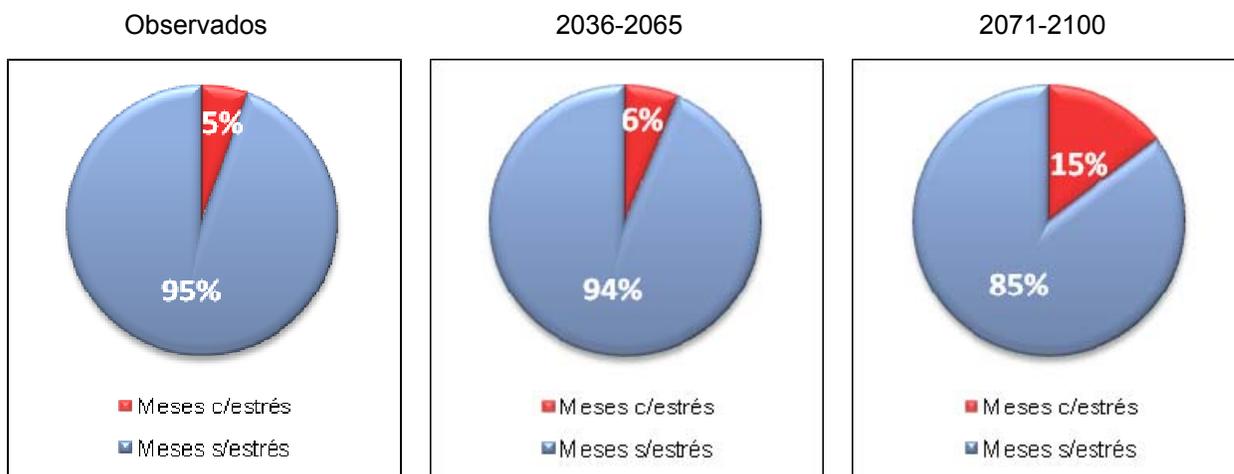
**Figura 6.11 Estrés Hídrico Presente y Futuro para Q<sub>75%</sub>**



**Figura 6.12 Estrés Hídrico Presente y Futuro para Q<sub>85%</sub>**



**Figura 6.13 Estrés Hídrico Presente y Futuro para Q<sub>95%</sub>**

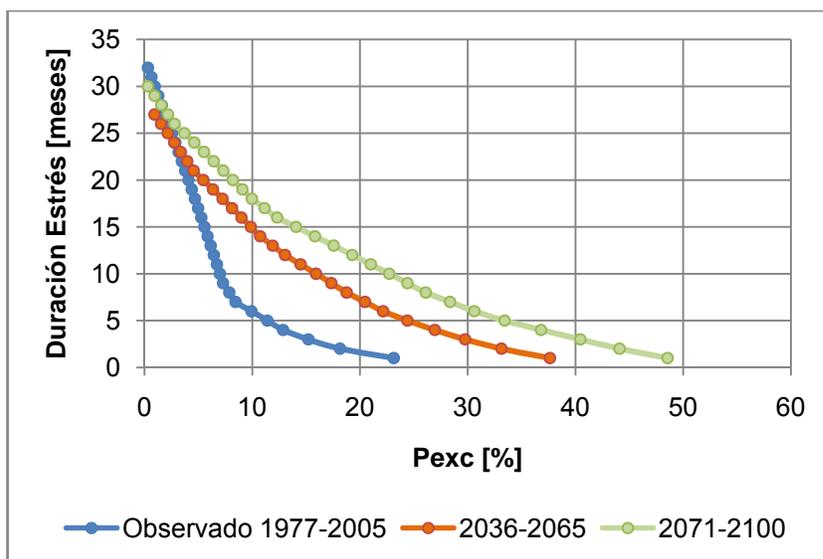


Al igual que en la Cuenca Elqui en Algarrobal se observa un aumento en la cantidad de meses con estrés donde el caudal de probabilidad de excedencia 75% no sería superado en el 41% y 56% de los meses para el período 2036 – 2065 y 2071 – 2100 respectivamente. También se verían incrementados el número de meses con estrés para el caudal de probabilidad de excedencia 85%, donde el 49% de los meses presentarían estrés en el período 2071 – 2100. Para el caudal de estrés de probabilidad de excedencia 95%, 0,7 m<sup>3</sup>/s, el déficit se incrementaría sólo en un 1% para el período 2036 – 2065 y en un 10% para el período 2071 – 2100.

En la Figura A. III en Anexo se presenta el porcentaje de veces que se produce el estrés hídrico en cada mes.

En las Figuras 6.14, 6.15 y 6.16 se muestran las curvas duración del déficit construidas a partir de la metodología presentada en 6.1.1.

**Figura 6.14 Curvas Duración del Estrés para  $Q_{75\%}$**



Como se observa en la Figura 6.14, aunque la probabilidad de que existan períodos prolongados de déficit (mayor a 24 meses) es mayor para los datos observados que en el futuro. Si se toman en cuenta la totalidad de los eventos de estrés, existiría una mayor probabilidad de que se presenten eventos de estrés de duraciones menores a los 24 meses para el período 2036 - 2100, lo que se acrecentaría aun mas para el período 2071 – 2100.

Figura 6.15 Curvas Duración del Estrés para  $Q_{85\%}$

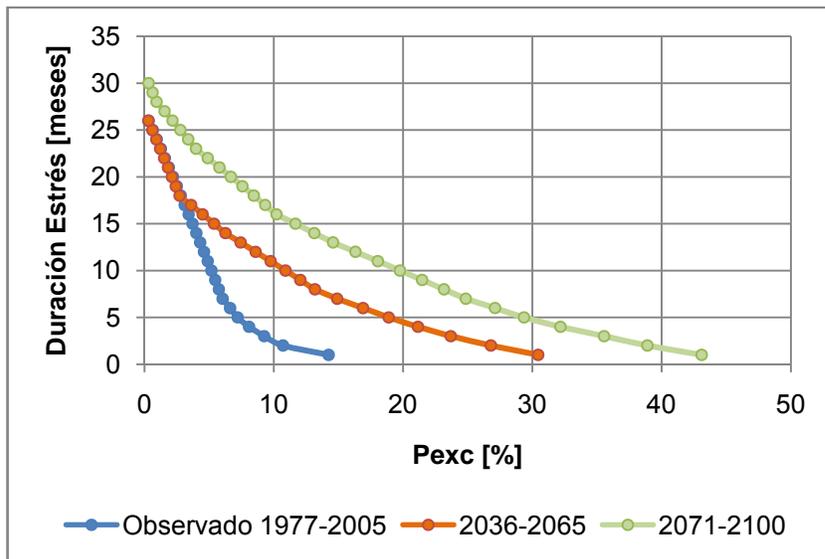
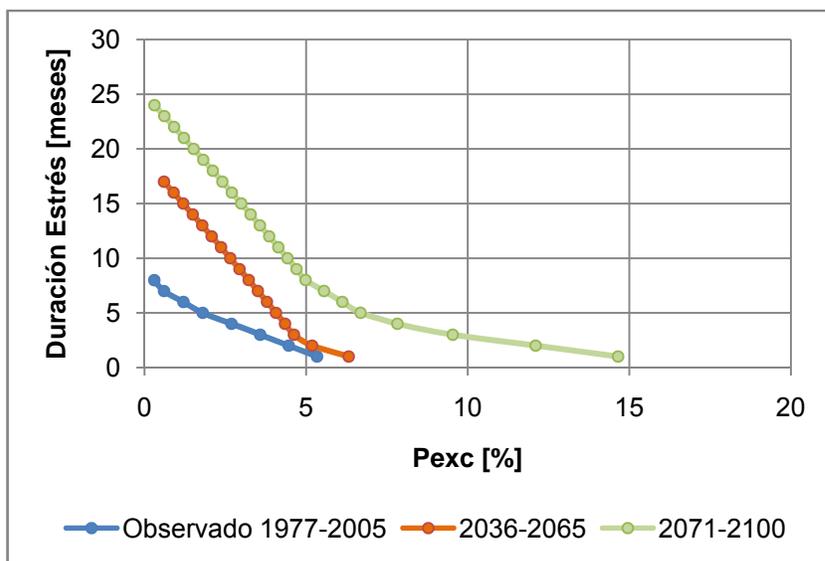


Figura 6.16 Curvas Duración del Estrés para  $Q_{95\%}$



Las Figura 6.15 y 6.16 dan cuenta del aumento de la probabilidad de que se presenten eventos de estrés de mayor duración, como también del aumento en la probabilidad de eventos de estrés para una duración dada.

## **CAPÍTULO 7 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este capítulo se presentan conclusiones y recomendaciones con respecto a los resultados obtenidos.

### **7.1 CONCLUSIONES**

#### **7.1.1 Modelo WEAP**

A través del modelo WEAP se logró obtener una buena modelación para los caudales medios mensuales en ambas cuencas estudiadas, obteniendo un coeficiente de Nash –Sutcliffe de 0,76 en el período de calibración y de 0,71 en el período de validación en la cuenca Elqui en Algarrobal. En la cuenca Hurtado en San Agustín los coeficientes de Nash –Sutcliffe logrados fueron de 0,70 y 0,69 en calibración y validación respectivamente.

En ambas cuencas se obtuvo una buena representación de los caudales medios y bajos, lo que no fue posible lograr para los caudales más altos de la serie, donde el modelo subestimó el valor de estos caudales en aproximadamente un 30 %.

Los parámetros que utiliza el modelo no representan necesariamente las condiciones reales de las cuencas, ya que existen parámetros de los cuales no se tienen mucha información, o que varían significativamente frente a un cambio espacial dentro de la cuenca.

Debido al gran número de parámetros que es necesario calibrar, escapa a los tiempos de este estudio el efectuar un análisis de sensibilidad. Sin embargo, durante el proceso de calibración se observó que dos de los parámetros más importantes para el caso de una cuenca nival son el de temperatura de derretimiento y temperatura de congelamiento, ya que frente a pequeños cambios se producía una variación considerable en el régimen de la cuenca.

#### **7.1.2 Generación de Escenarios Futuros**

Para generar los datos futuros de entrada al modelo, se utilizaron los datos para el escenario A2, realizando correcciones a partir de los datos de la línea base y los datos observados en las distintas estaciones meteorológicas. Las relaciones establecidas entre la línea base de PRECIS y los datos observados en las distintas estaciones meteorológicas, se pueden considerar como válidas, ya que los valores de correlación ( $R^2$ ) siempre fueron mayores a 0,95.

Para generar datos meteorológicos futuros en el período 2036-2065, fue necesario evaluar las tendencias de las series simuladas en el período base 1960-1990 a 2071-2100 y generar datos de precipitación y temperatura mediante métodos estadísticos. Cabe destacar que para los datos de precipitación se debió realizar una doble corrección, ya que a pesar de mostrar una tendencia de disminución en las precipitaciones entre los del período observado y el futuro, la corrección mediante la estadística entregaba mayores precipitaciones para el período intermedio, por lo que además se realizó una corrección mediante la precipitación anual.

### **7.1.3 Resultados Futuros**

De acuerdo a los caudales futuros simulados en ambas cuencas, se tendría una clara disminución de la disponibilidad de los recursos hídricos provocando una mayor cantidad de meses con estrés hídrico y un aumento en la frecuencia de ocurrencia de períodos de sequía.

#### **Cuenca Elqui en Algarrobal**

De acuerdo con la modelación realizada, a pesar de que la disminución de las precipitaciones sobre la cuenca sería de una 2,03% en el período 2036-2065 y de un 7,15% en el período 2071-2100, la disminución en los volúmenes de agua sería aun más drástica, donde se observaría una disminución de un 17,66% y 23,60% para los períodos 2036-2065 y 2071-2100 respectivamente. Esto se debería principalmente al aumento de la evapotranspiración provocada por el aumento de las temperaturas sobre la cuenca, la que aumentaría en 4,40 °C y 6,25 °C para los períodos 2036-2065 y 2071-2100 respectivamente.

Además de la disminución general de los caudales, se produciría un cambio en el régimen de la cuenca, adelantándose el derretimiento de nieves, generando que el mayor promedio mensual pase del mes de Diciembre como se observa de los datos registrados, a Octubre para el caso del período 2036-2065 y a Septiembre en el período 2071-2100.

#### **Cuenca Hurtado en San Agustín**

En la cuenca Hurtado en San Agustín se observaría una disminución en las precipitaciones anuales de un 15,89% y un aumento en la temperatura media anual de 4,44 °C para el período 2036-2065, mientras que para el período 2071-2100 la disminución en las precipitaciones sería de un 28,57% y 6,27 °C el aumento de la temperatura media anual.

La disminución del volumen total anual sería de un 15,46% y de un 28,04% para los períodos 2036-2065 y 2071-2100 respectivamente, lo que concuerda con la disminución en las precipitaciones sobre la cuenca.

La cuenca presentaría una variación en su régimen. Pasando de un régimen nival a uno que en el período 2036-2065 presentaría un desplazamiento del peak hacia el mes de Julio y un nuevo peak inferior y menos definido en el mes de Septiembre. Y en el período 2071-2100, presentando un régimen pluvial con su mayor valor medio en el mes de Julio.

## **7.2 COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES**

Se debe considerar que en el presente estudio solo se utilizó un modelo meteorológico en la generación de datos futuros, y ante la falta de datos en el período 2036-2065 fue necesario considerar una tendencia lineal entre los datos observados en la línea base y los generados por el modelo en el período 2071-2100, lo que puede no ocurrir.

Tal vez la metodología seguida en la creación de los modelos no es muy específica, donde por ejemplo en la cuenca Elqui en Algarrobal se utilizaron solo 3 estaciones de precipitación para la creación de polígonos de Thiessen. Luego podría haberse utilizado una metodología similar a la de la cuenca Hurtado en San Agustín, creando un gradiente de precipitación con la altura a partir de la mayor cantidad de estaciones pluviométricas presentes en la región. También el gradiente de precipitación con la altura utilizado en Hurtado en San Agustín podría haber sido complementado con otras estaciones de precipitación que aunque no se encuentren dentro de la cuenca, representan de una mejor manera la precipitación a cierta altura.

Al igual que en la calibración y validación del modelo, en la simulación futura se utilizó el supuesto de que la demanda permanecería constante, por lo que frente a un aumento en la demanda se incrementaría el estrés hídrico en la zonas de estudio. Es importante recalcar que para la modelación de la cuenca Hurtado en San Agustín no se supuso demanda, debido a que los derechos otorgados en la zona no eran significativos.

A pesar de lo alarmante que pueden resultar las conclusiones del estudio, se debe tener en cuenta que sólo se utilizó un modelo hidrológico en la simulación de caudales (WEAP) y el escenario más desfavorable del modelo meteorológico en la generación de los datos de entrada (A2, PRECIS). Luego para obtener resultados de un mayor grado de confiabilidad debería complementarse este estudio con uno que involucre el uso de una mayor cantidad de

modelos hidrológicos, como también de modelos de generación de escenarios futuros y realizar combinaciones entre éstos.

En conclusión, el presente trabajo constituye un aporte en el sentido de una planificación adecuada en la gestión de los recursos hídricos en la IV región.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Agrimed, 1999. Análisis de la Vulnerabilidad y Adaptación en Agricultura, Recursos Hídricos y Silvicultura. Capacitación de Chile para cumplir con sus compromisos con la Convención marco de las naciones Unidas sobre el cambio Climático. CONAMA, PNUD CHI/96/G31. Universidad de Chile.

Baede, A.P.M., Ahlonsou, E., Ding, Y., Schimel D., 2001. The Climate System, An Overview; Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Booji, M.J., 2008. Appropriate Hydrological Modelling of Climate Change Impacts on River Flooding. Water Resources Management Group, Department of Civil Engineering, University of Twente, Enschede, The Netherlands.

Centro del Agua para Zonas Áridas de América Latina y El Caribe – RODHOS (CAZALAC – RODHOS, 2006). Aplicación de Metodologías para determinar la Eficiencia de uso del Agua – Estudio de caso: Región de Coquimbo.

CIREN – CORFO, 1990. Atlas Agroclimático de Chile, regiones IV a IX.

Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA, 2006. Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI. Estudio realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

Comisión Nacional de Riego, 2002. Sistemas de Información Geográfica.

Danner, Constance L., McKinney, Daene C., Teasley, Rebecca L., 2006. Documentation and Testing of the WEAP Model for the Rio Grande/Bravo Basin. Center for research in water resources, Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin.

Ledermann J., 2001. Efecto del cambio Climático Global en el Diseño de un Embalse de Riego. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Ruiz B., Borado M, Gil M.J. y A. Valdeomillos, 1999. Efectos del Cambio Climático en la Región Mediterránea durante los últimos 300 años. Conferencias impartidas en el Curso internacional patrocinado por la Fundación Ramón Areces en Madrid, del 23 al 25 de mayo de 1995. España.

Stockholm Environment Institute, 2008. WEAP Water Evaluation And Planning System, Tutorial. <<http://www.weap21.org/>>

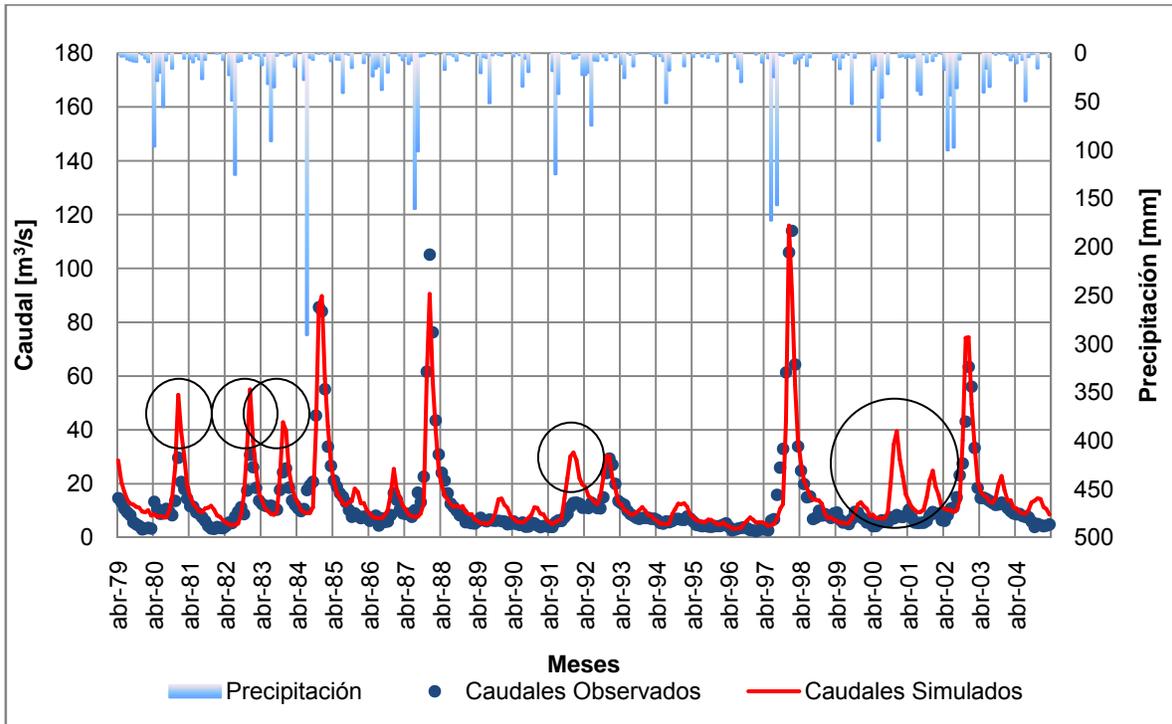
Wilby, R. L. and I. Harris, 2006. A Framework for Assessing Uncertainties in Climate Change Impacts: Low-Flows Scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research* 42, 2419-20428.

Xu, C., E. Widén, and S. Halldin, 2005. Modelling Hydrological Consequences of Climate Change—Progress and Challenges, *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 22, NO. 6, pp. 789–797.

Xu, C., 2002. Textbook of Hydrologic Models. Universidad de Upsala, Departamento de Ciencias de la Tierra, Hidrología. <<http://folk.uio.no/chongyux/textbook1.htm>>

# ANEXO

## Gráfico I Calibración con valores máximos bien representados



## Gráfico A. I Correlación Estaciones de Temperatura

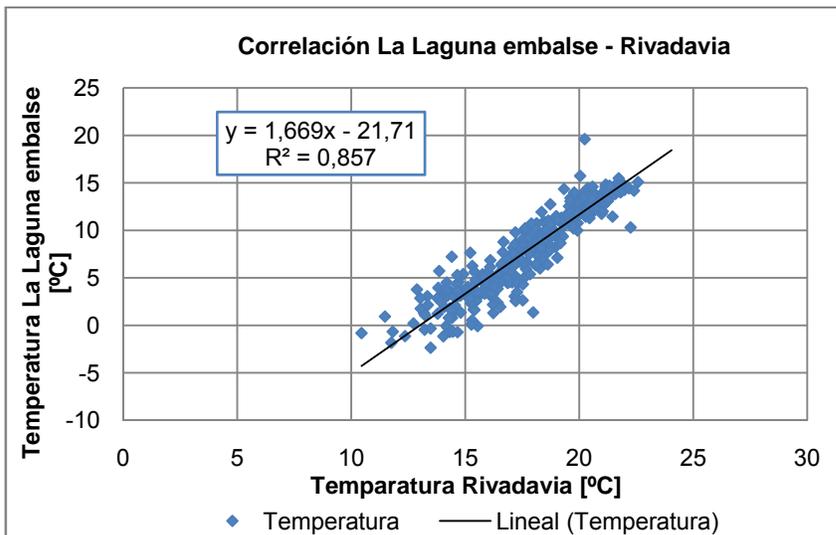


Gráfico A. 1. I

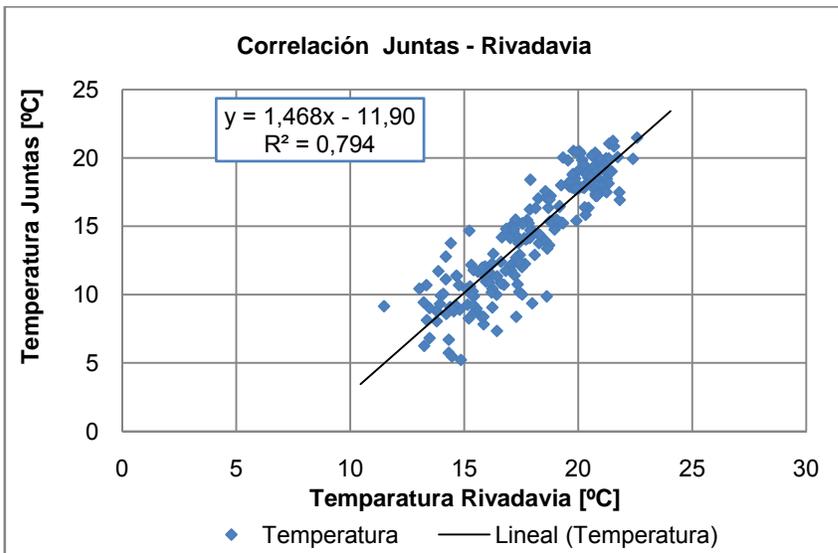


Gráfico A. 2. I

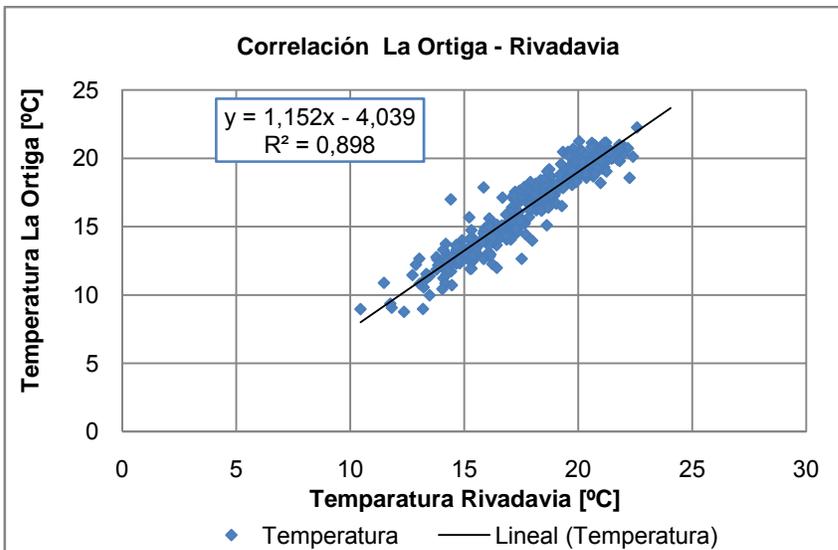


Gráfico A. 3. I

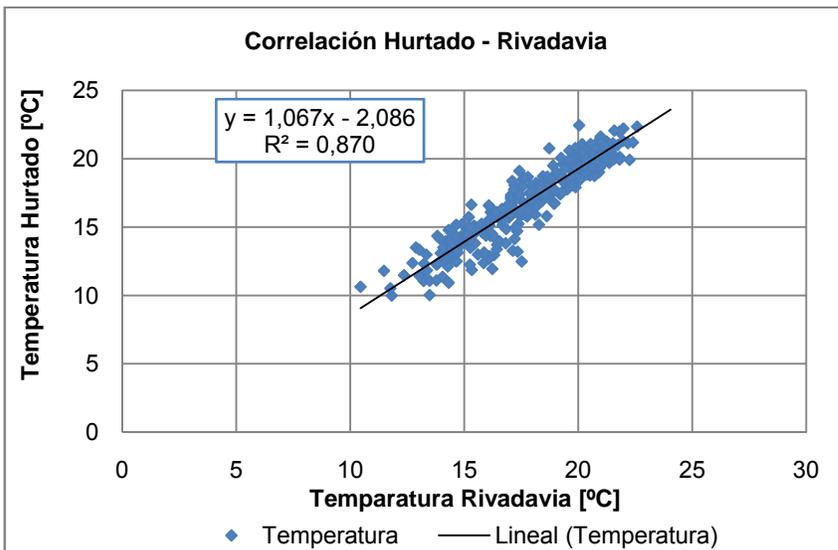


Gráfico A. 4. I

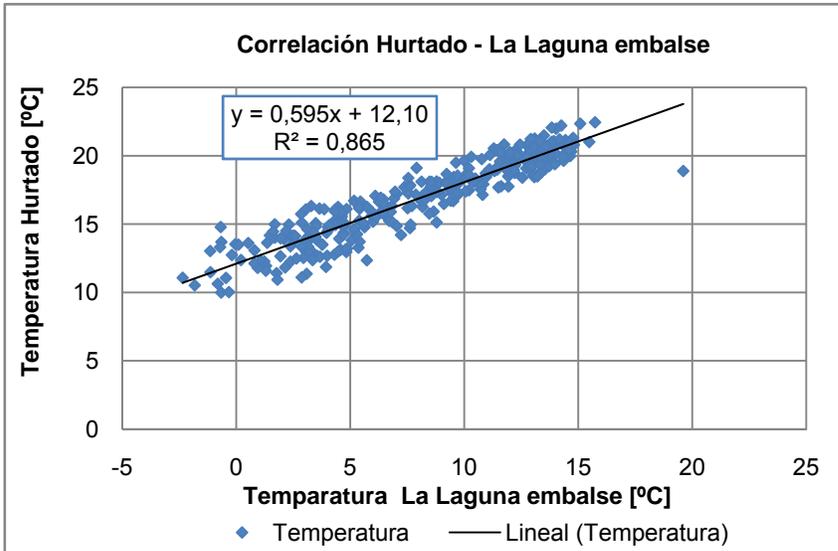


Gráfico A. 5. I

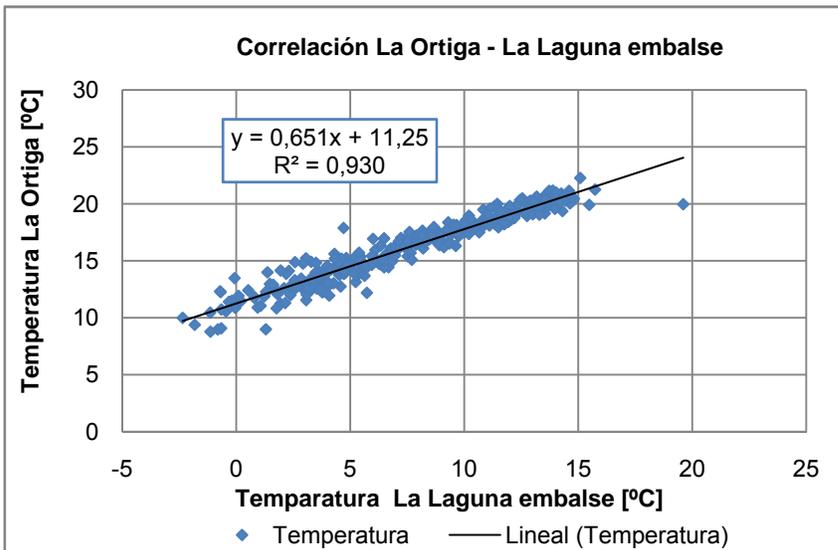


Gráfico A. 6. I

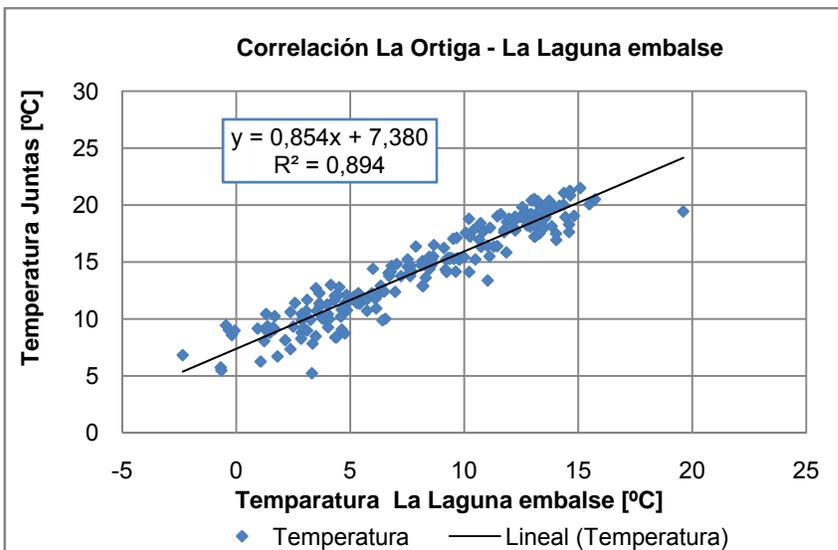


Gráfico A. 7. I

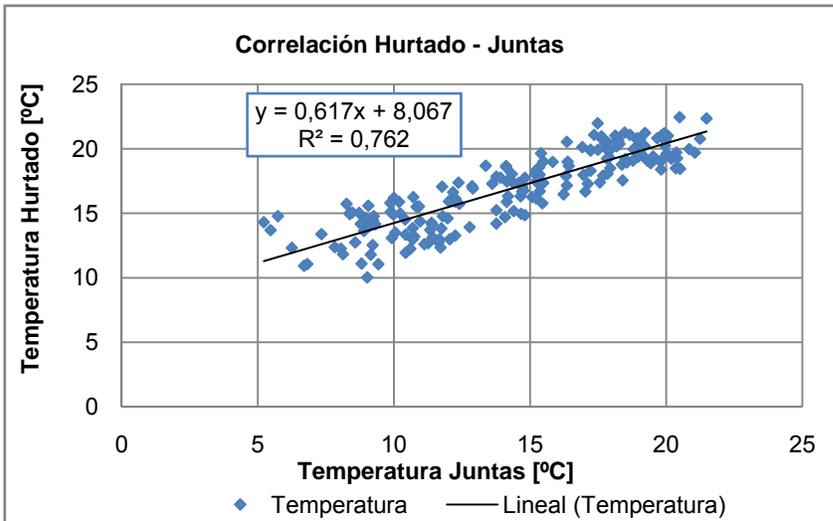


Gráfico A. 8. I

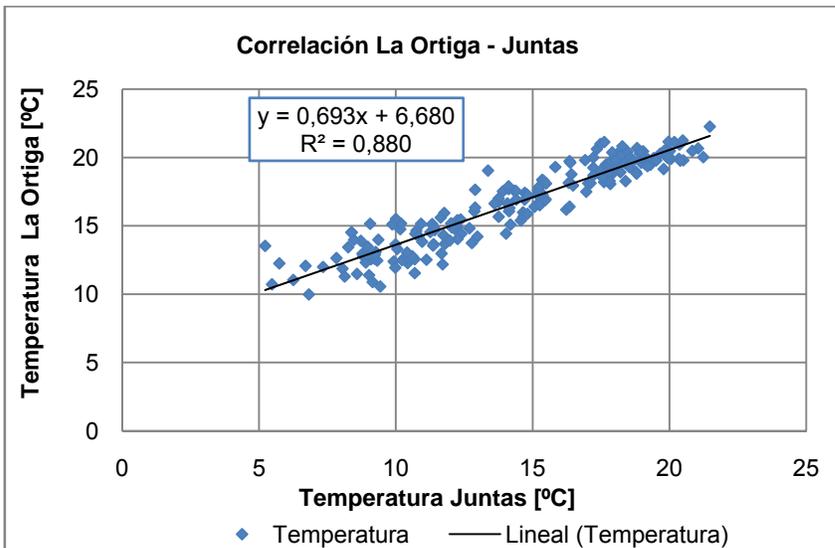


Gráfico A. 9. I

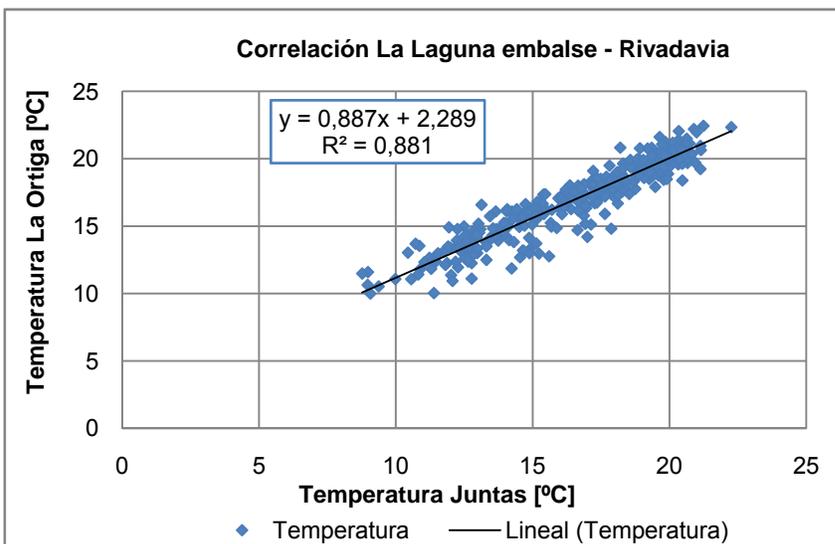
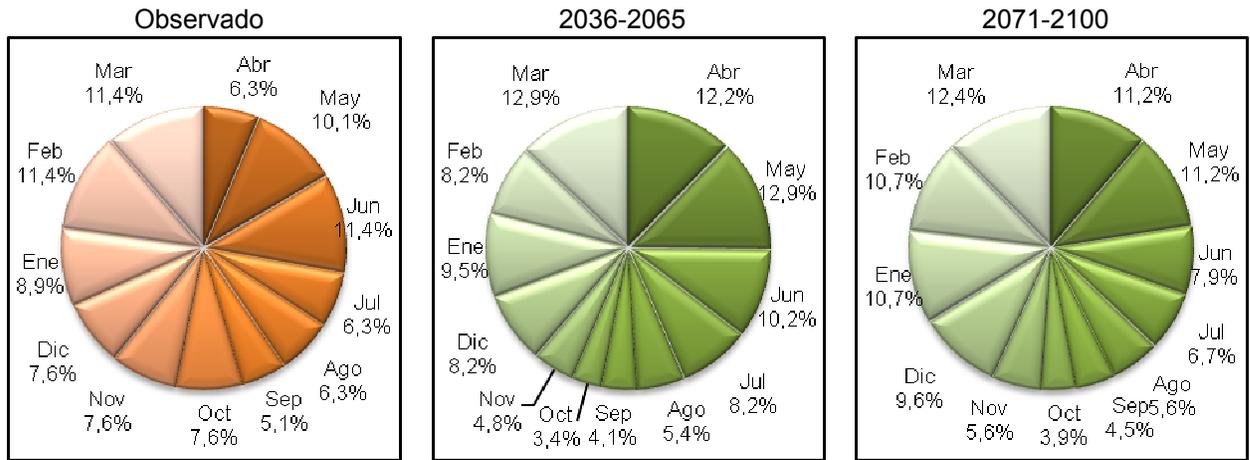


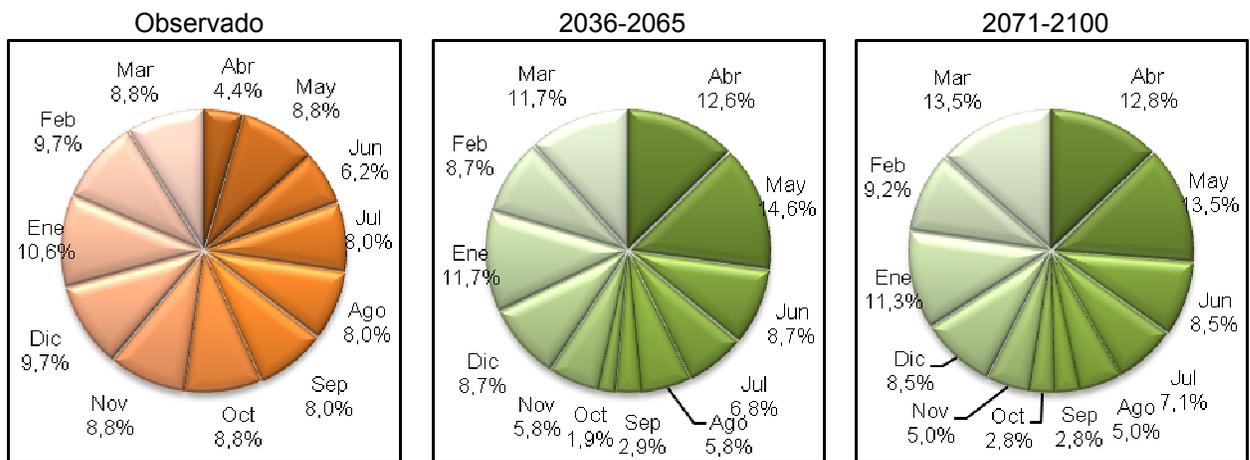
Gráfico A. 10. X

## Gráfico A. II Meses con estrés Hídrico Cuenca Elqui en Algarrobal

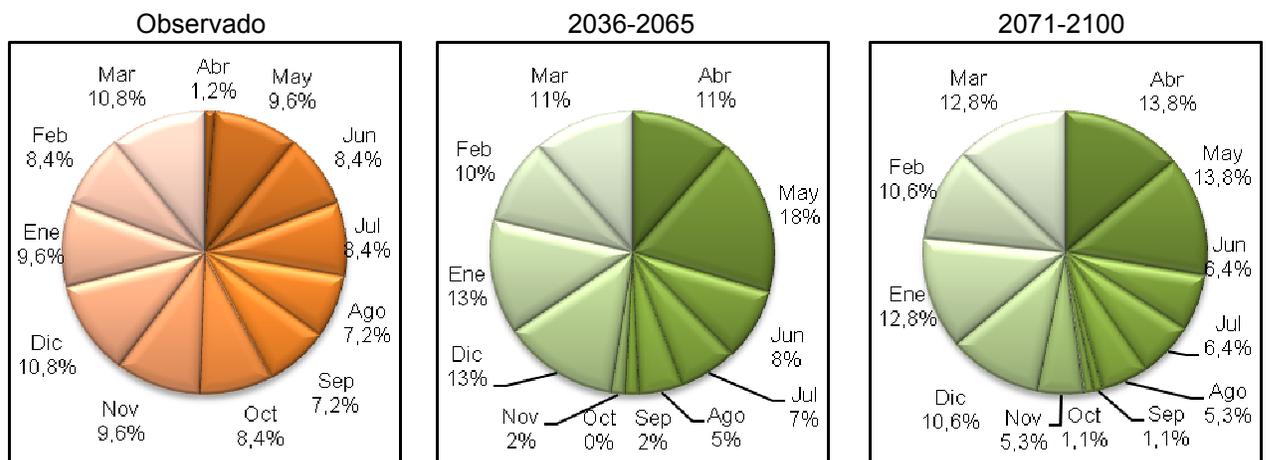
### Caudal de Probabilidad de excedencia 75%



### Caudal de Probabilidad de excedencia 85%

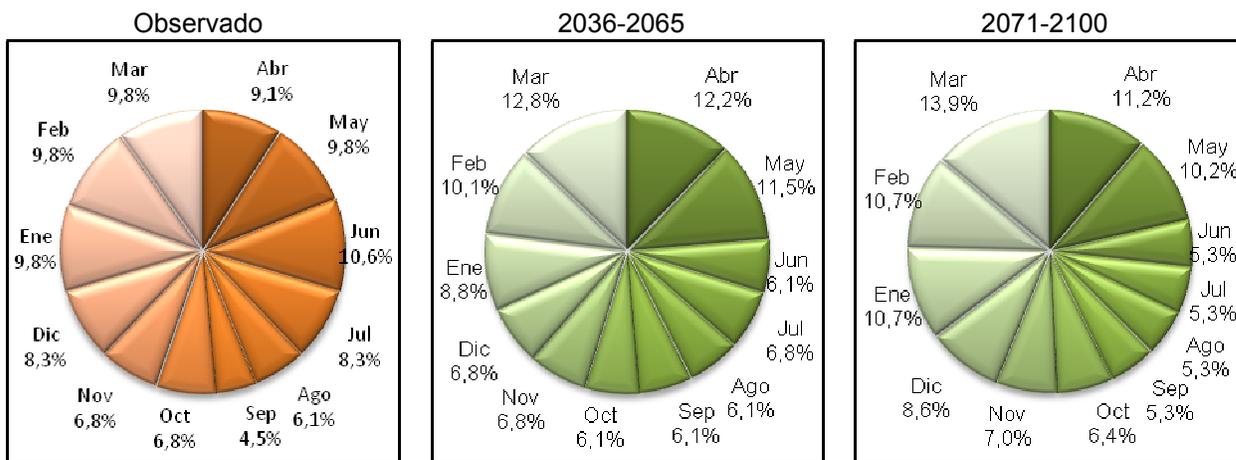


### Caudal de Probabilidad de excedencia 95%

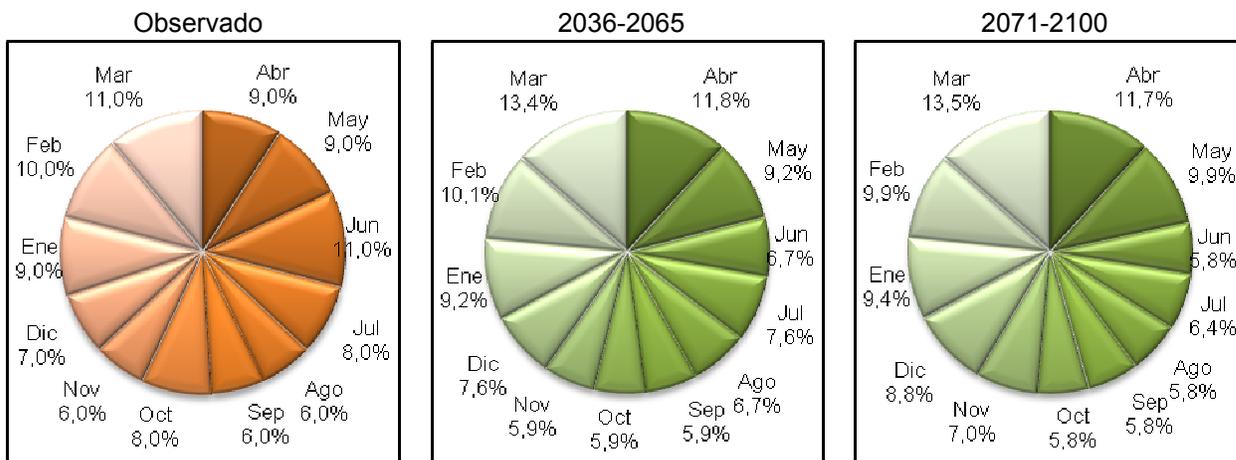


### Gráfico A. III Meses con estrés Hídrico Cuenca Hurtado San Agustín

#### Caudal de Probabilidad de excedencia 75%



#### Caudal de Probabilidad de excedencia 85%



#### Caudal de Probabilidad de excedencia 95%

