



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

**ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA ANDINA DEL  
RÍO TENO, USANDO EL MODELO WEAP**

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

**DIEGO IGNACIO MENA PARDO**

PROFESOR GUÍA:

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISION:

JAMES MCPHEE TORRES

JUAN PABLO SCHUSTER VILLARROEL

SANTIAGO DE CHILE

ENERO, 2009

## “ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA ANDINA DEL RÍO TENO, USANDO EL MODELO WEAP”

La cantidad de recursos hídricos disponibles en una región es una variable de importancia que puede limitar el desarrollo de la vida y también incidir en el desarrollo de actividades productivas tales como agricultura, minería e hidroelectricidad. Por ello, resulta fundamental el análisis de cual será la disponibilidad futura de este vital elemento. En este estudio se intentó proveer la información necesaria para comprender los alcances del cambio climático, en términos de vulnerabilidad del sector de los recursos hídricos en la cuenca andina del Río Teno, caracterizada por la estación fluviométrica Río Teno después de Junta con Río Claro, con el fin de contribuir al proceso de toma de decisiones sobre medidas de adaptación frente al Cambio Climático.

Para lograr este objetivo se usó un modelo de simulación hidrológica generado por el Instituto del Medio Ambiente SEI (Stockholm Environment Institute), conocido como Water Evaluation And Planning System o simplemente WEAP. El modelo fue calibrado y validado a partir de datos históricos mensuales representativos de la cuenca disponibles entre Abril de 1975 y Marzo de 2005. Los parámetros calibrados y validados fueron utilizados para simular la disponibilidad futura del recurso a base de escenarios futuros de las variables meteorológicas de entrada (precipitación y Temperatura) necesarias para la operación del modelo, derivados de datos obtenidos en el modelo PRECIS por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para el escenario A2 en los períodos 2036-2065 y 2071-2100.

Los resultados mostraron una baja de los caudales medios mensuales futuros del Río Teno de un 30% y 40% para los periodos 2036-2065 y 2071-2100 respectivamente y un aumento en el número y prolongación de periodos secos en la cuenca, causados principalmente por la disminución de la precipitación anual y del aumento de la temperatura anual. A pesar de los cambios en las magnitudes del caudal, el régimen mixto nivo-pluvial del Río Teno no varió sustancialmente, salvo un desplazamiento del peak de primavera del mes de Diciembre a Noviembre.

“ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA ANDINA DEL RÍO  
TENÓ, USANDO EL MODELO WEAP”

ÍNDICE

---

ÍTEM	MATERIA	PÁGINA
<b>CAPÍTULO 1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
1.1	Generalidades	6
1.2	Objetivos	7
1.2.1	Objetivo General	7
1.2.2	Objetivos específicos	8
1.3	Organización del informe	8
<b>CAPÍTULO 2.</b>	<b>EL MODELO WEAP</b>	<b>9</b>
2.1	Algoritmos del modelo	10
<b>CAPÍTULO 3.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO</b>	<b>15</b>
3.1	Características de la Cuenca	15
3.1.1	Recursos Hídricos	18
3.2	Recopilación y preparación de Datos	20
3.2.1	Series hidrometeorológicas	21
3.2.2	Preparación de datos meteorológicos representativos	24
<b>CAPÍTULO 4.</b>	<b>CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO</b>	<b>34</b>
4.1	Criterios de calibración	34
4.2	Calibración	34
4.2.1	Calibración Río Claro	35
4.2.2	Calibración Río Teno	38
4.3	Validación	40
<b>CAPÍTULO 5.</b>	<b>APLICACIÓN DEL MODELO WEAP A ESCENARIOS FUTUROS</b>	<b>44</b>
5.1	Análisis de la información del modelo meteorológico PRECIS	44
5.2	Resultados futuros	50
5.2.1	Periodo 2036-2065	50
5.2.2	Periodo 2071-2100	54
5.3	Análisis de resultados	58
5.3.1	Estrés hídrico	58
5.3.2	Curva de duración de meses con déficit continuos	62
5.3.3	Análisis de caudales medios mensuales máximos	64
5.3.4	Curvas de variación estacional (CVE)	65
<b>CAPÍTULO 6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y COMENTARIOS</b>	<b>68</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

ÍTEM	MATERIA	PÁGINA
Figura 1-1: representación esquemática de los escenarios SRES		7
Figura 2-1: Esquema Modelo Método Humedad del Suelo.		12
Figura 3-1: Foto ubicación estación Río Teno después de junta con Río Claro		15
Figura 3-2: Mapa político administrativo		16
Figura 3-3: Representación de cuenca en WMS		17
Figura 3-4: Usos de suelo		19
Figura 3-5: Cauces Principales		19
Figura 3-6: Acuíferos en la cuenca		20
Figura 3-7: Estaciones de medición meteorológicas		22
Figura 3-8: Estaciones de medición fluviométricas		23
Figura 3-9: Correlación de Precipitaciones Mensuales mes Septiembre		23
Figura 3-10: Distribución de Subcuencas en WEAP.		25
Figura 3-11: Subcuencas naturales.		26
Figura 3-12: Zonas de igual precipitación		28
Figura 3-13: Franjas de igual temperatura promedio.		30
Figura 3-14: Gradiente de temperatura v/s cota. Mes de Abril		31
Figura 3-15: Información disponible y utilizada de las estaciones de medición		33
Figura 4-1: resultados calibración rio Claro periodo 1985-1992.		36
Figura 4-2: Resultados calibración Río Teno periodo 1975-1995		39
Figura 4-3: Resultados validación 1995-2005		41
Figura 4-4: Resultados serie 1975-2005		41
Figura 5-1: Análisis de Frecuencia Precipitación Mensual. Mes de Abril		45
Figura 5-2: Análisis de Frecuencia Temperatura mensual. Mes Agosto.		46
Figura 5-3: Corrección parámetros simulados en PRECIS.		48
Figura 5-4: Series de tiempo		50
Figura 5-5: Resultados futuros periodo 2035-2065.		51
Figura 5-6: Resultados futuros periodo 2035-2065.		52
Figura 5-7: Resultados futuros periodo 2071-2100.		54
Figura 5-8: Resultados futuros periodo 2071-2100.		55

<i>Figura 5-9: Serie de caudal medio anual</i>	56
<i>Figura 5-10: Estrés hídrico <math>Q_{75\%}</math> actual</i>	59
<i>Figura 5-11: Estrés hídrico <math>Q_{85\%}</math> actual</i>	60
<i>Figura 5-12: Estrés hídrico <math>Q_{95\%}</math> actual</i>	61
<i>Figura 5-13: Variación del porcentaje de déficit hídrico con demanda <math>Q_{75\%}</math>, <math>Q_{85\%}</math> y <math>Q_{95\%}</math> del periodo actual (1975-2005)</i>	62
<i>Figura 5-14: Curva duración de meses con déficit continuos</i>	63
<i>Figura 5-15: Proporción de caudales medios mensuales máximos por mes</i>	65
<i>Figura 5-16: CVE periodos de estudio</i>	66
<i>Figura 5-17: Variación de la CVE</i>	67
<i>Figura 6-1: Variación de Pp, T y Q futuros con respecto a las series observadas</i>	69

## ÍNDICE DE TABLAS

ÍTEM	MATERIA	PÁGINA
<i>Tabla 2-1: Listado de parámetros y variables de entrada del Modelo WEAP</i>		13
<i>Tabla 3-1: Características de la cuenca</i>		17
<i>Tabla 3-2: Factor para obtener Pp representativa de cada punto de entrada</i>		27
<i>Tabla 3-3: Franjas de igual temperatura promedio.</i>		29
<i>Tabla 3-4: Temperatura por franja</i>		29
<i>Tabla 3-5: Ponderadores de temperatura por franja</i>		30
<i>Tabla 3-6: Derechos de Agua</i>		32
<i>Tabla 4-1: Parámetros de ajuste Río Claro</i>		35
<i>Tabla 4-2: Parámetros de ajuste Cuenca Río Teno</i>		38
<i>Tabla 5-1: Tipo de corrección</i>		49
<i>Tabla 5-2: Serie de caudales medios mensuales periodo 2035-2065</i>		53
<i>Tabla 5-3: Serie de caudales mensuales promedio periodo 2071-2100</i>		57
<i>Tabla 5-4: Caudales medios mensuales adoptados para el análisis del estrés hídrico</i>		58

## Capítulo 1. Introducción

---

### 1.1 Generalidades

La variación en las condiciones climáticas a nivel regional constituye una preocupación para el país, principalmente en el ámbito silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos. Por esta razón, la División Recursos Hídricos y Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, en conjunto con el Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED) realizan un estudio para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), con el fin de determinar los posibles efectos que tendría dicho cambio en los diferentes puntos de interés.

Para el entendimiento de cualquier evaluación de cambio climático, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) establecieron en 1988 el Panel Internacional sobre Cambio Climático (IPCC en siglas inglesas) para que proporcionase la información científica, técnica y socio-económica relevante para la comprensión del cambio climático ( Heuminski, 2007)

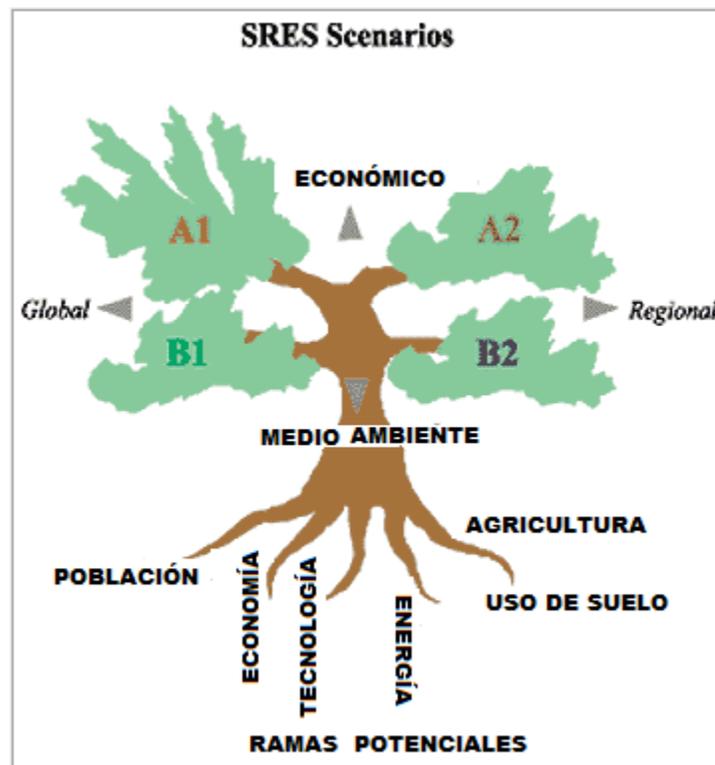
El IPCC determinó 4 familias de escenarios de emisiones (SRES: Special Reports on Emission Scenarios) posibles de ocurrir en el futuro (IPCC Spetial Report of Climate Change, <http://www.grida.no/>): un crecimiento humano con énfasis en la riqueza a nivel global (escenario A1), un crecimiento humano con énfasis en la riqueza a nivel regional (escenario A2), un crecimiento sostenible, en equidad entre la economía y el medio ambiente a nivel global (B1) y un crecimiento sostenible, en equidad entre la economía y el medio ambiente a nivel regional (B2), presentados en la Figura 1-1 y de los cuales existen resultados para Sudamérica para los denominados SRES A2 y B2 (Fuenzalida, 2007), obtenidos a base del modelo regional PRECIS por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para el período 2071-2100.

Estos antecedentes pueden ser usados como información de entrada de modelos hidrológicos que permitan estimar los caudales futuros que se pueden generar en dichos escenarios.

La Modelación Hidrológica es una metodología basada en la simulación de sistemas físicos a través de modelos fundamentados en funciones matemáticas empíricas y conceptuales que permite simular el caudal en base de datos propios de la cuenca. Los modelos que simulan fenómenos relacionados con recursos hídricos se pueden clasificar en

tres grandes categorías: hidráulicos, que corresponden a aquellos que simulan el comportamiento de flujos en los cauces para distintos escenarios; hidrológicos, que simulan la relación entre las características meteorológicas y la escorrentía de una cuenca; y de planificación, que modelan la operación de los sistemas de recursos hídricos de una cuenca.

**Figura 1-1: representación esquemática de los escenarios SRES**



*Fuente: Lenntech Water treatment & air purification Holding B.V. Modificado para esta memoria.*

El modelo WEAP corresponde a un modelo hidrológico que ha sido aplicado en variados proyectos alrededor del mundo para simular el comportamiento del sistema fluvial de una o varias cuencas, con resultados satisfactorios (<http://www.weap21.org/indexesp.asp?doc=05>).

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo General**

Estimar el impacto del cambio climático en la cuenca definida por la estación fluviométrica Río Teno después de Junta con Río Claro, concretamente en la disponibilidad de sus recursos hídricos a base del escenario A2 en los periodos 2036-2065 y 2071-2100.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

- Caracterización del Régimen de escurrimiento actual a través de Curvas de Variación Estacional, CVE.
- Caracterización de Régimen de escurrimiento futuro a través de CVE futuras a partir de resultados entregados por la simulación del nuevo escenario.
- Diagnóstico de estrés hídrico a que está sometido el sistema hídrico en situación actual y futura.
- Comparación de valores actuales y futuros. Identificar cambios y tendencias del sistema.

### **1.3 Organización del informe.**

El presente informe se encuentra organizado de la siguiente forma:

- En el Capítulo 2 se presentan las características principales de los modelos hidrológicos y del modelo WEAP, indicando los algoritmos que utiliza para la simulación hidrológica.
- Las principales características de la cuenca andina del Río Teno y las metodologías usadas en la preparación de los datos meteorológicos que se utilizaron como inputs para la simulación de los caudales medios mensuales del Río Teno, se abordan en el Capítulo 3.
- En el Capítulo 4 se presentan los criterios de calibración, las calibraciones realizadas para el Río Claro (periodo 1985-1992) y Río Teno (periodo 1975-1995) y la validación de la calibración del Río Teno (periodo 1995-2005).
- El Capítulo 5 se explican las metodologías utilizadas para simular las series de caudales futuras para el periodo 2036-2065 y 2071-2100. Además se realiza un análisis de los caudales medios mensuales futuros para determinar variaciones en el régimen del Río Teno y la disponibilidad hídrica futura.
- Finalmente en el Capítulo 6 se incluyen las conclusiones y comentarios de los resultados obtenidos a través del desarrollo del presente trabajo.

## Capítulo 2. El Modelo WEAP

---

Un modelo es una representación esquemática o conceptual de un fenómeno, que representa una teoría o hipótesis de cómo dicho fenómeno funciona. Los modelos normalmente describen, explican y predicen el comportamiento de un fenómeno natural o componentes del mismo.

Los modelos que simulan fenómenos relacionados con recursos hídricos se pueden clasificar en tres grandes categorías: hidráulicos, que corresponden a aquellos que simulan el comportamiento de flujos en los cauces para distintos escenarios; hidrológicos, que simulan la relación entre las características meteorológicas y la escorrentía de una cuenca; y de planificación, que modelan la operación de los sistemas de recursos hídricos de una cuenca.

WEAP (Water Evaluation And Planning System) corresponde a un modelo semi distribuido desarrollado por el Instituto del Medio Ambiente SEI (Stockholm Environment Institute). Este modelo funciona utilizando el principio básico de balance de masas y que combina características de los modelos hidrológicos y de planificación.

Una descripción adecuada del modelo WEAP es la que se encuentra en su página oficial [www.weap21.org](http://www.weap21.org) y que señala que “WEAP es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos cuyo objetivo es asistir más que sustituir al planificador experimentado. Proporciona un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas”. Se distingue por integrar a la simulación componentes naturales (demandas por escorrentía, flujo base) y componentes humanos (demanda humana, embalses).

El modelo WEAP utiliza una interfaz gráfica basada en SIG que permite al usuario generar un diagrama esquemático utilizando el mouse para “arrastrar y soltar” los elementos (líneas y nodos) que se requiera construir, mover o modificar del sistema.

Los nodos representan componentes físicos como plantas de tratamiento, acuíferos o sitios especiales a lo largo del río. Los nodos van unidos por líneas que representan ríos, canales o cualquier otro tipo de conducción de agua.

Entre los nodos se encuentran los “Demand Sites” que simbolizan las demandas determinadas por los derechos de agua (consuntivos y no consuntivos), y los “Catchment” que corresponden

a nodos en donde se ingresan los parámetros meteorológicos y características del suelo de la cuenca.

Los datos meteorológicos y fluviométricos deben ser ingresados al modelo discretizados mensualmente, a diferencia de las características del suelo que generalmente no presentan una variación importante y son ingresados a nivel anual o como una constante para todo el periodo.

## 2.1 Algoritmos del modelo

WEAP posee tres maneras de simular la escorrentía de una cuenca a partir de datos meteorológicos. Estos métodos son:

- Precipitación/Escorrentía.
- Demandas de riego.
- Humedad del Suelo.

El método de la Humedad del Suelo, el cual es el más complejo de los tres, ha sido empleado para simular los caudales de interés de este estudio. Su principal característica es que utiliza dos capas de suelo para representar a la cuenca. Como se muestra en la Figura 2-1, en la capa superior se simula la evapotranspiración considerando los parámetros meteorológicos (precipitación y temperatura) y características del suelo de la cuenca (espesor zona radicular, espesor zona profunda, tasa de conductividad, saturación del suelo), mientras que en la capa inferior se simula el flujo base del río y los cambios en la humedad del suelo.

EL modelo permite dividir la cuenca en N sub-cuencas de acuerdo con el grado de detalle con la que se desea realizar el análisis; el modelo realiza un balance volumétrico para cada una de las sub-cuencas. Las condiciones climáticas se consideran uniformes sobre cada sub-cuenca en donde el balance volumétrico está dado por:

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c_j}(t) \left( \frac{5-2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_1} - (1 - f_j)z_{1,j}^2 - f_j z_{1,j}^2 \quad \text{Ec. 2-1}$$

En el primer término,  $z_{1,j}=[1,0]$  es el almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo de la zona radicular y  $Rd_j$  es la fracción del suelo cubierto j (mm).

El segundo término  $P_e$  (mm) corresponde a la precipitación efectiva, la cual incluye el derretimiento de la nieve desde el manto nival en las subcuencas y está dada por:

$$P_e = P_i m_c + m_r \quad \text{Ec. 2-2}$$

, donde  $m_c$  (porcentaje de derretimiento) se define como:

$$m_c = \begin{cases} 0 & \text{si } T_i < T_s \\ 1 & \text{si } T_i > T_l \\ \frac{T_i - T_s}{T_l - T_s} & \text{si } T_s \leq T_i \leq T_l \end{cases} \quad \text{Ec. 2-3}$$

Donde  $T_i$  es la temperatura mensual observada, y  $T_l$  y  $T_s$  las temperaturas estimadas de derretimiento y congelamiento conocidas también como punto de fusión y congelación.

El porcentaje de derretimiento  $m_r$  (mm) se define como el producto entre la nieve acumulada,  $A_{ci}$ , (mm) y  $m_c$ . La nieve acumulada, está en función de  $m_c$  y de la precipitación mensual observada,  $P_i$  (mm), con la siguiente relación:

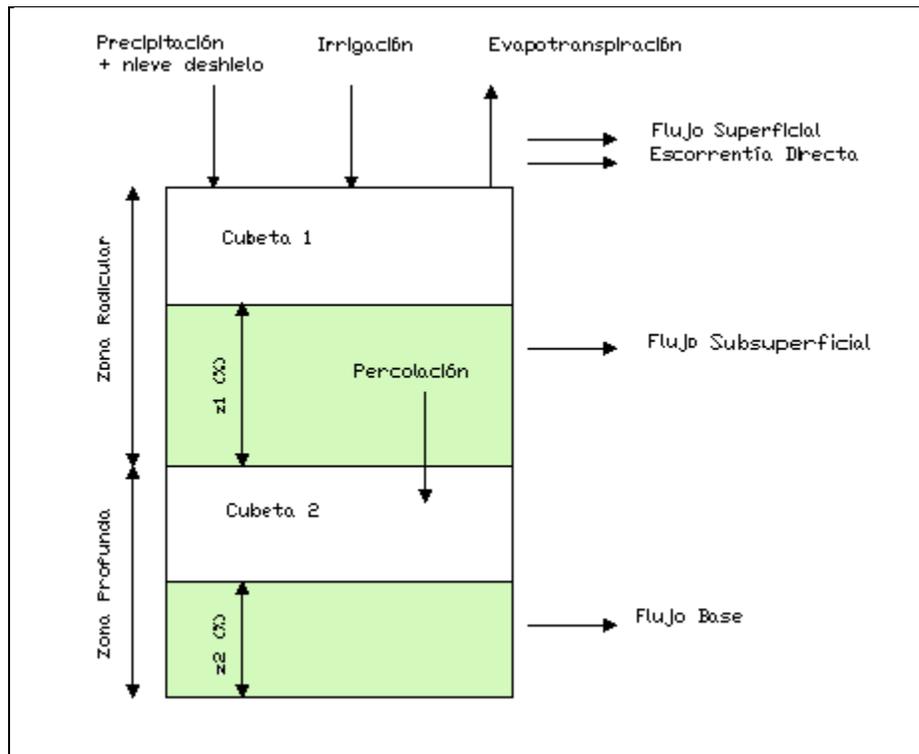
$$A_{c_i} = A_{c_{i-1}} + (1 - m_c)P_i \quad \text{Ec. 2-4}$$

El tercer término PET es la evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia (Penman-Montheit), donde  $k_{cj}$  es el coeficiente de cultivo para cada fracción de cobertura del suelo.

El cuarto término representa la escorrentía superficial,  $RRF_j$  es el índice de resistencia a la escorrentía de la cobertura del suelo. Altos valores para el índice  $RRF_j$ , llevan a una menor superficie de escorrentía. El cuarto y quinto término representan los términos del flujo subsuperficial y la percolación profunda, respectivamente, donde  $k_j$  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.

En la Tabla 2-1 se presenta el listado de parámetros y variables que el modelo WEAP permite ingresar para realizar la calibración y posterior simulación de la o las cuencas que se deseen analizar. Además, se indican cuales fueron los parámetros y variables calibradas.

**Figura 2-1: Esquema Modelo Método Humedad del Suelo.**



*Fuente: Jack Sieber, David Purkey. , 2007. Modificado para esta memoria.*

**Tabla 2-1: Listado de parámetros y variables de entrada del Modelo WEAP**

Variables y parámetros del modelo	unidad	Calibrado	Descripción	
Uso de Agua	Nivel de Actividad Anual	m <sup>3</sup> /s	Si	Demandas solicitadas
	Ritmo de uso del Agua por Año	m <sup>3</sup> /s	No	Índice anual del uso de agua
	Variación Mensual	%	No	Proporción mensual de la demanda anual
	Consumo	%	No	Consumo del agua demandada
Uso de Suelo	Área	Km <sup>2</sup>	Si	Área
	Kc (coeficiente de cosecha)	s.u.	Si	coeficiente de cosecha
	Smax1	mm	Si	capacidad de retención del agua de la capa superior del suelo
	Smax2	mm	Si	Profundidad de la capa inferior del suelo
	Épsilon	s.u.	Si	Contribución al desagüe superficial
	Conductividad zona radicular	mm/mes	Si	Conductividad de la zona radicular
	Alpha	mm/mes	Si	Tasa de conductividad de la capa profunda
	Dirección preferencial del flujo	s.u.	Si	Definición de la dirección preferencial del flujo
	Z1 Inicial	%	No	Valor inicial de Z1 en la simulación
	Z2 Inicial	%	No	Valor inicial de Z2 en la simulación
Clima	Precipitación	mm/mes	Si	Precipitación
	Temperatura	°C	Si	Temperatura
	Humedad	%	Si	Humedad relativa
	Viento	m/s	Si	Viento
	Fracción Nublada	s.u.	No	Fracción de cielo cubierto por nubes
	Latitud	°	Si	Latitud
	Nieve Inicial	mm	No	Nivel de nieve inicial
	Punto de fusión	°C	Si	Umbral de temperatura para derretimiento de nieve en agua
	Punto de Congelación	°C	Si	Umbral de temperatura para congelar agua
Embalse	Máxima profundidad	mm	No	Máxima cota de agua sobre el suelo
	Mínima profundidad	mm	No	Mínima cota de agua sobre el suelo
	Profundidad máxima	mm	No	Cota de fondo
	Descarga requerida	mm	No	descarga de agua liberada para mantener condiciones en el embalse
Pérdida y Reuso	Pérdida	%	No	Pérdida dentro de la zona de demanda, provocando un aumento de ésta
	Ritmo de reuso	%	No	Reuso de agua dentro de zona de demanda
Administración de demanda	Ahorros por DSM	%	No	Porcentaje de reducción total de la demanda mensual (ahorro).
	Costo DSM	\$/m <sup>3</sup>	No	Costos de manejo de la demanda por unidad de agua ahorrada

Variables y parámetros del modelo	unidad	Calibrado	Descripción	
Calidad de Agua	Entrada de DBO	mg/l	No	Máxima DBO permitida
	Entrada de OD	mg/l	No	Máxima OD permitida
	Intensidad de DBO	Kg/km <sup>2</sup>	No	Producción anual de DBO por unidad de actividad
	Intensidad de OD	Kg/km <sup>2</sup>	No	Producción anual de OD por unidad de actividad
	Concentración de OD	mg/l	No	Concentración de OD en la descarga de una zona de demanda
	Concentración de DBO	mg/l	No	Concentración de DBO en la descarga de una zona de demanda
Costo	Costo de capital	\$	No	Costo de Capital Anual
	Costos variables de O y M	\$/m <sup>3</sup>	No	Costos variables de operación y mantenimiento
	Costos fijos de O y M	\$	No	Costos fijos anualizados de operación y mantenimiento
	Ingresos	\$/m <sup>3</sup>	No	Ingresos por metro cubico de agua
	Ingresos anuales	\$	No	Ingresos anuales
Prioridad	Prioridad de oferta	s.u.	No	Prioridad
Avanzado	Método	s.u.	Si	Método de descarga y extracción de líquidos <sup>3</sup>

Para mayor información acerca de los parámetros consultar <http://www.weap21.org>

## Capítulo 3. Caracterización de la zona en estudio

---

### 3.1 Características de la Cuenca

La cuenca andina del Río Teno se encuentra al noreste de la ciudad de Curicó, Séptima Región del Maule, Chile (Figura 3-1). Su punto de salida se ubica en la localidad de Los Queñes, específicamente en la Estación de medición Río Teno después de junta con Río Claro. Las coordenadas del punto de salida de la cuenca son 6125706 N, 333830 E, huso 19 (según Datum psad56).

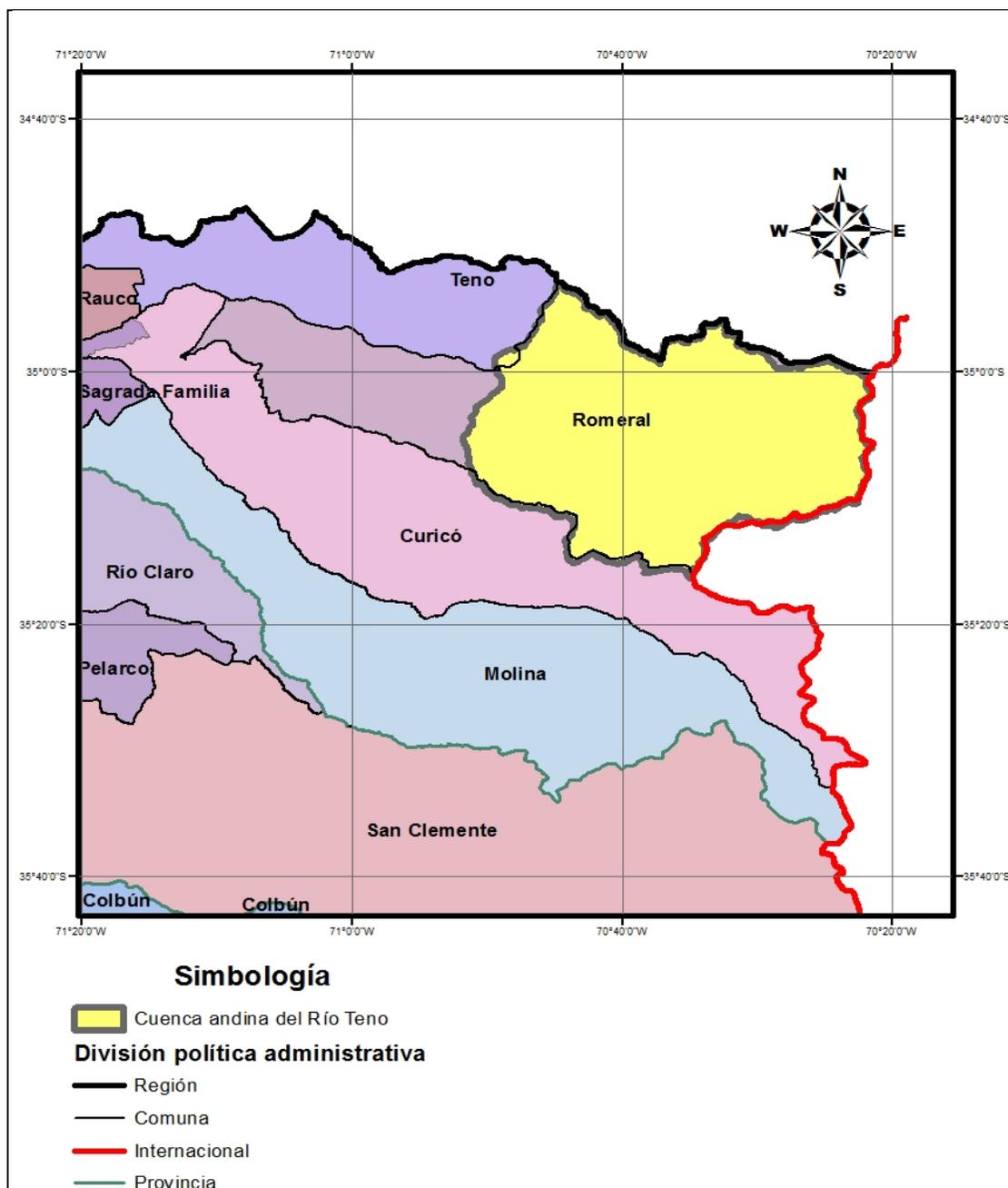
**Figura 3-1: Foto ubicación estación Río Teno después de junta con Río Claro**



*Fuente: Foto satelital Google Earth modificada para esta memoria.*

La cuenca forma parte de la comuna de Romeral tal como se indica en la Figura 3-2.

Figura 3-2: Mapa político administrativo



Fuente: SIG Comisión Nacional de Riego (CNR), modificado para esta memoria.

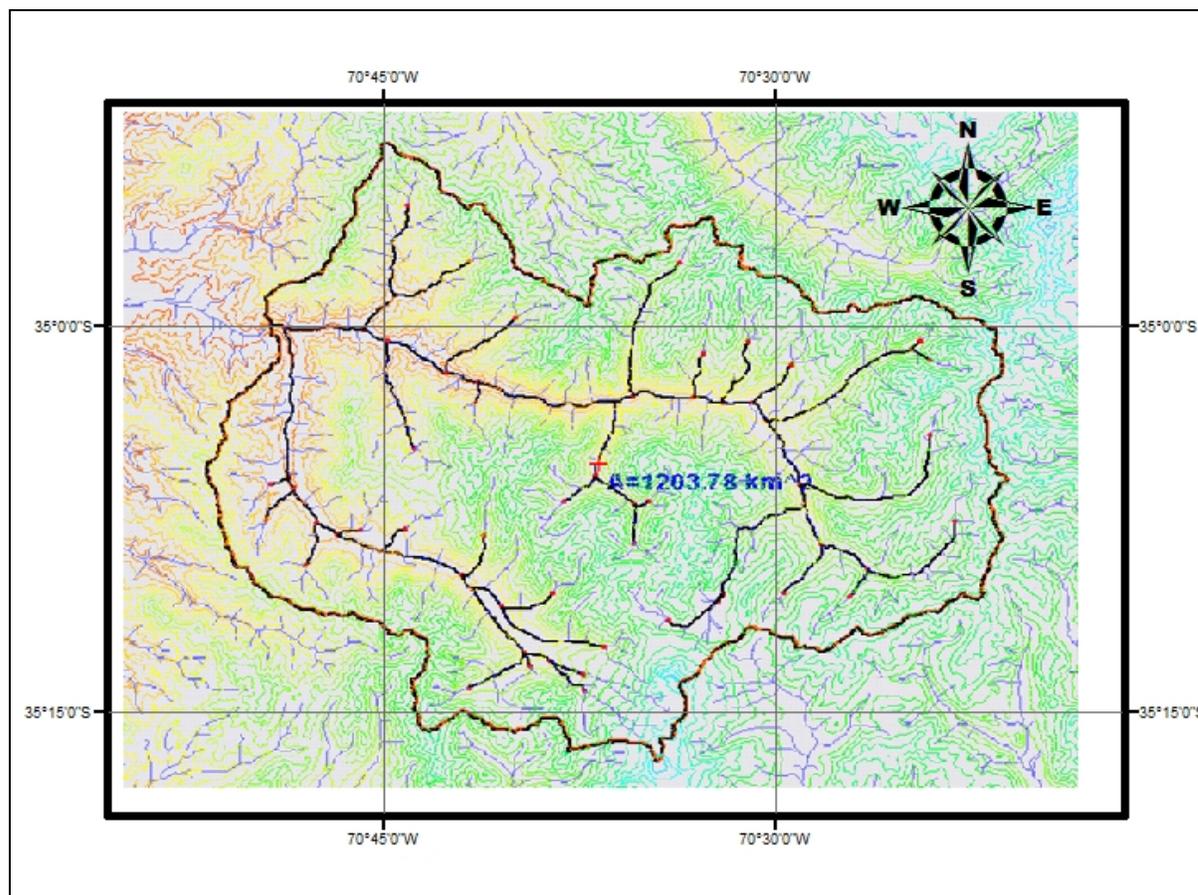
Para determinar la cuenca que forma la Estación Río Teno después de junta con Río Claro se utilizó el programa WMS (Watershed Modeling System). WMS permite trazar los cursos de agua utilizando un archivo DEM que contiene el relieve de la zona estudiada y del cual se

pueden obtener características de la cuenca como las que se muestran en la Tabla 3-1. Los DEM se encuentran en la página de USGS en Internet (US Geological Survey, <http://www.usgs.gov/>).

**Tabla 3-1: Características de la cuenca**

Área (km <sup>2</sup> )	1.203,8
Pendiente de la cuenca	0,47
Cauce más largo (m)	61.092,3
Centro de gravedad	
Coordenada norte	6116650
Coordenada este	352270

**Figura 3-3: Representación de cuenca en WMS**



La característica climática que predomina en la Región del Maule es del tipo mediterráneo. Las precipitaciones son casi exclusivamente de origen frontal y más abundantes en invierno. Los

montos anuales de precipitación, que en la costa superan los 800 mm, disminuyen a 700 mm al lado oriental de la Cordillera de la Costa, para luego aumentar hasta los 1.000 mm al internarse en la depresión intermedia. Finalmente, la precipitación supera los 2.500 mm en la alta cordillera. Las temperaturas medias anuales varían entre unos 13° y 15°C, los valores menores de temperatura media corresponden a la franja costera y cordillera y los valores mayores se presentan en la depresión intermedia, (Dirección Meteorológica de Chile, [http://www.meteochile.cl/climas/climas\\_septima\\_region.html](http://www.meteochile.cl/climas/climas_septima_region.html))

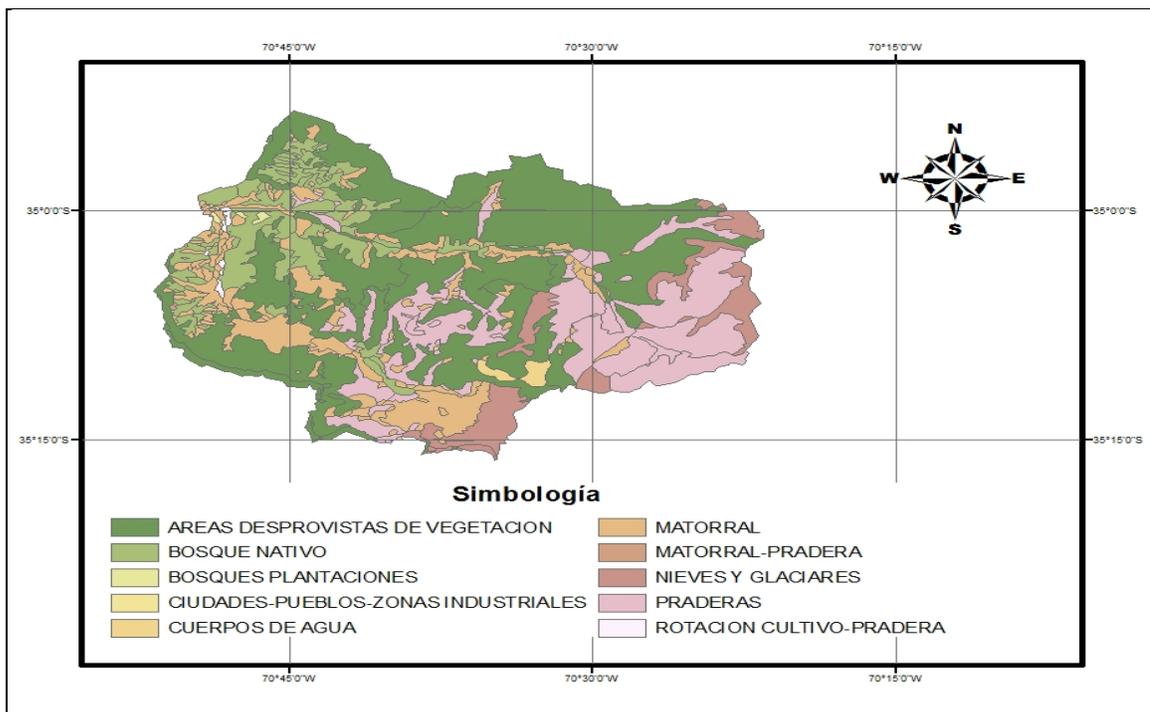
En lo que se refiere a geología y volcanismo, en la cuenca se observa influencia volcánica por parte del Volcán Planchón, el Peteroa y el Azufre. Esto determina que la geología de la cuenca posea diversas formaciones rocosas de origen principalmente volcánico. (Volcanes Activos de Chile. <http://mundo21.tripod.com/600chPETE00.html>)

Los suelos de la cuenca han sido explotados en las laderas del Río Claro por medio de de la rotación cultivo-pradera (datos SIG CNR, <http://esiir.cnr.cl/esiir/>), estas áreas de cultivo son despreciables en términos de las demandas de agua para la modelación del sistema completo. Como se puede apreciar en la Figura 3-4 la mayor parte de la cuenca está formada por zonas desprovistas de vegetación, praderas y glaciares.

### **3.1.1 Recursos Hídricos.**

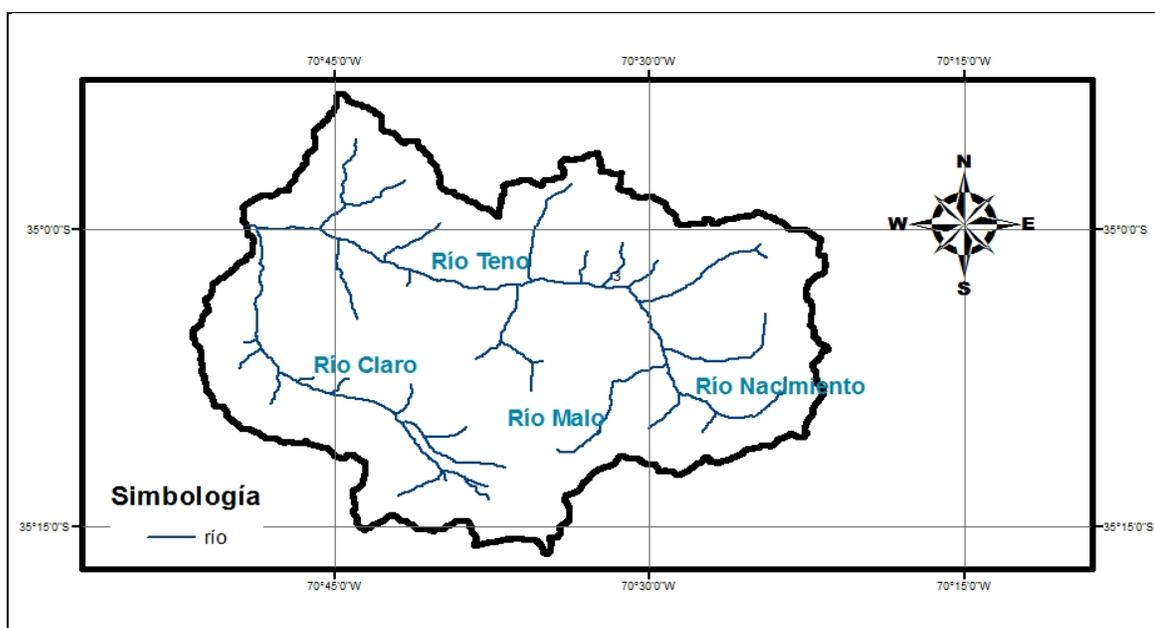
Tal como se aprecia en la Figura 3-5 el río Teno se forma de la confluencia de los ríos Nacimiento y Malo. El río Malo nace de las dos lagunas de Teno, situadas al norte del volcán Planchón mientras que el río Nacimiento se origina cerca de la frontera con Argentina. El más importante tributario por el sur es el Claro, que se le une en la localidad de Los Queñes, a unos 30 km de su formación en el glaciar del volcán Planchón. (CADE-IDEPE, Diciembre 2004). Tal como se aprecia en la Figura 3-6 existe un acuífero que se extiende por debajo del Río Claro. Este acuífero no presenta demandas importantes dentro de la cuenca por lo que el efecto sobre el caudal del Río Claro no será considerado.

**Figura 3-4: Usos de suelo**



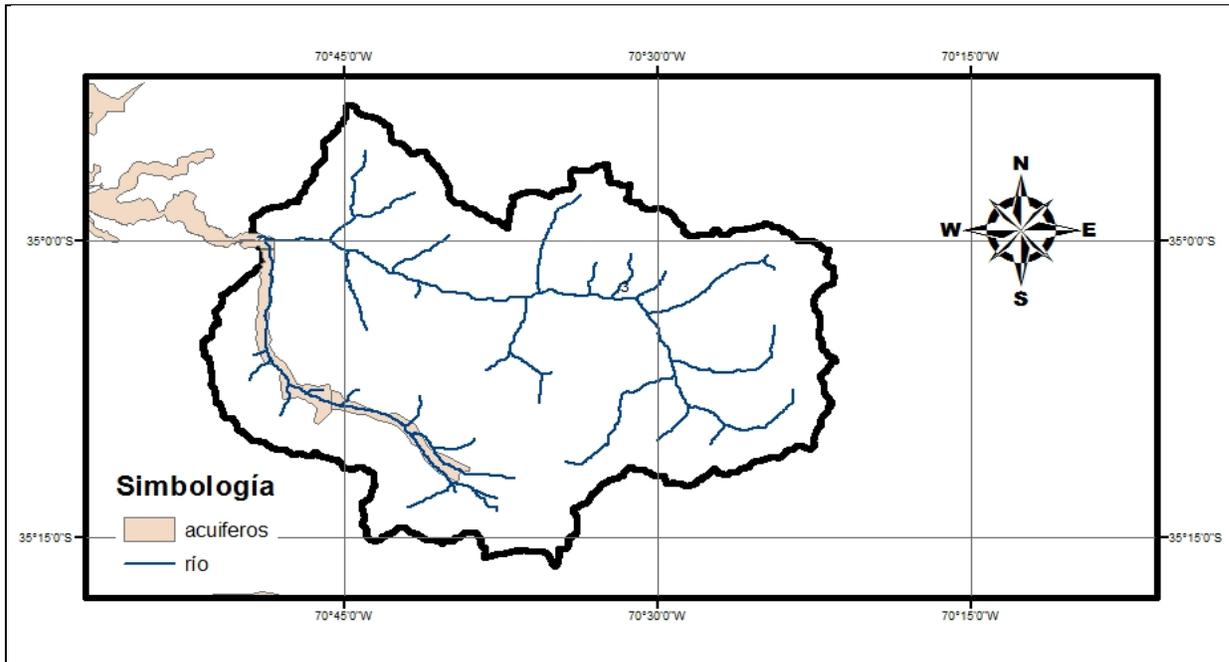
Fuente: SIG Comisión nacional de Riego (CNR), elaboración propia.

**Figura 3-5: Cauces Principales**



Fuente: SIG Comisión nacional de Riego (CNR), elaboración propia.

**Figura 3-6: Acuíferos en la cuenca**



*Fuente: SIG Comisión nacional de Riego (CNR) elaboración propia.*

### **3.2 Recopilación y preparación de Datos.**

Se realizó una recopilación de los antecedentes disponibles en organizaciones gubernamentales y en memorias anteriores. De los datos obtenidos se consideraron relevantes para el estudio las siguientes variables:

- Series de precipitación mensual.
- Series de temperatura media mensual.
- Series de caudal medio mensual.
- Topografía de la cuenca donde se realizó el estudio.
- Derechos de agua presentes en la cuenca estudiada.
- Series de datos futuros generados por el modelo regional PRECIS en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para el período 1960-1990 y 2071-2100.

Los datos meteorológicos y fluviométricos fueron corregidos y rellenados entre abril de 1975 a marzo del 2005 para la utilización de estos en la calibración de los caudales mensuales de la

cuenca. Este periodo corresponde al tiempo en el que se posee mayor información de datos meteorológicos y fluviométricos en la zona de estudio.

Además, se consideró el periodo entre abril de 1960 a marzo del 1990 de las series de precipitación mensual de la estación Los Queñes y el periodo 1971-1990 de las series de temperatura de la estación Convento Viejo, para corregir los valores generados de precipitación mensual y temperatura media mensual por el modelo regional PRECIS, ya que estos sobreestiman sus magnitudes. Los datos y sus correcciones se encuentran resumidos en el Anexo digital.

A continuación se muestra la ubicación de las estaciones de medición utilizadas en el estudio y además se exponen las metodologías utilizadas en la generación de los datos de entrada necesarios para la utilización del modelo WEAP en la cuenca andina del Río Teno.

### **3.2.1 Series hidrometeorológicas**

En la Figura 3-7 y Figura 3-8 se presenta las coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas para el estudio.

#### ***Información disponible en las estaciones***

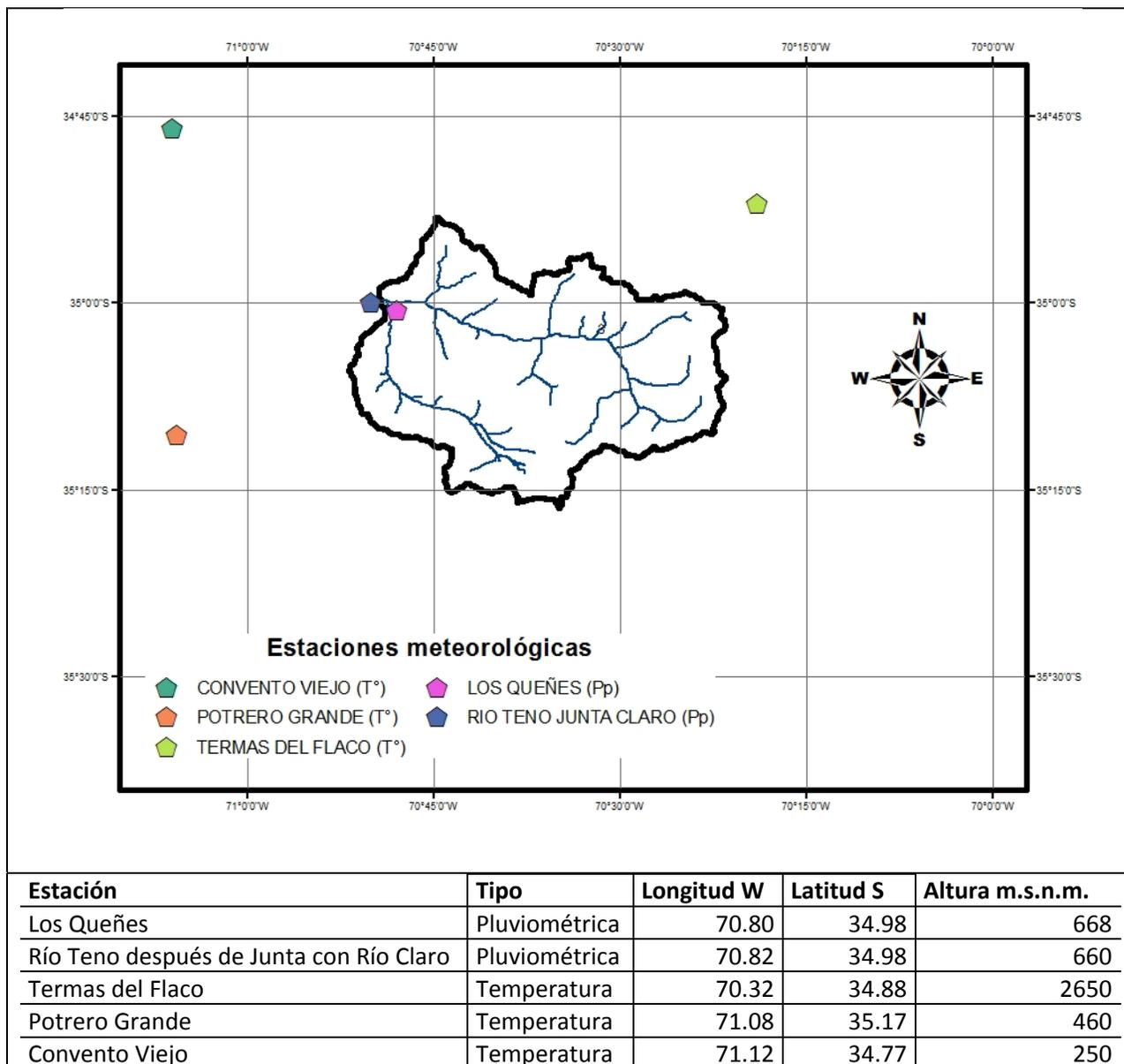
En la Figura 3-15 se presentan los años con información de cada una de las estaciones consideradas en este estudio y además los años utilizados para realizar los cálculos. El detalle de los datos se encuentra en el Anexo digital.

#### ***Series de precipitación mensual.***

Las series de precipitación mensual fueron facilitadas por el Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas. Se usaron correlaciones mensuales entre las dos estaciones con registros pluviométricos indicadas en la Figura 3-8. Los meses rellenados en la estación Río Teno después de Junta con Río Claro se completaron utilizando la estación Los Queñes que presentaba la mayor serie de datos completos (1950-2005). La correlación se realizó para el periodo 1999-2005, en el que ambas estaciones presentaban datos (ver Figura 3-15). Se obtuvieron coeficientes de correlación mayores a  $R^2 = 0.97$  para cada mes. En la Figura 3-9 se presenta la correlación obtenida para el mes de Septiembre. El resto de las correlaciones se adjuntan en el Anexo digital.

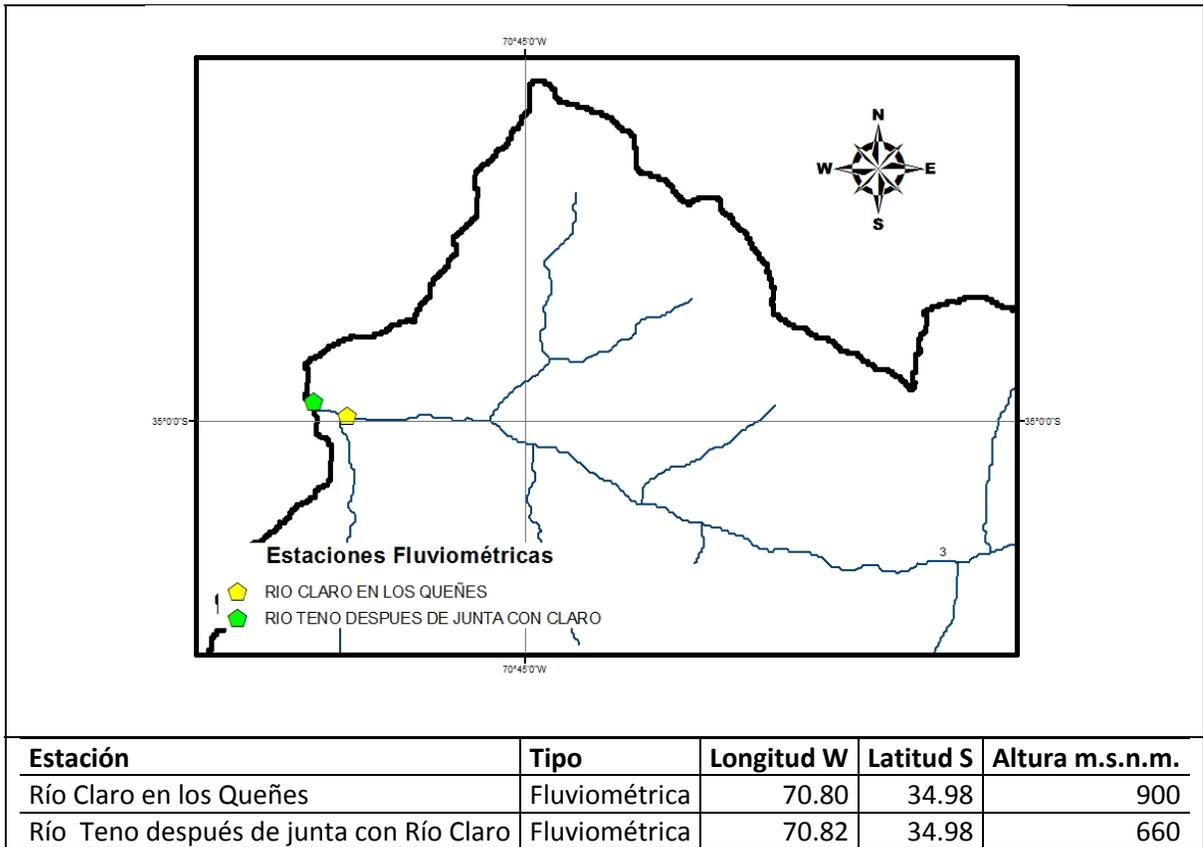
El relleno de datos fue realizado para garantizar el uso de las curvas isoporcentuales en la extrapolación de la precipitación sobre la cuenca.

**Figura 3-7: Estaciones de medición meteorológicas**



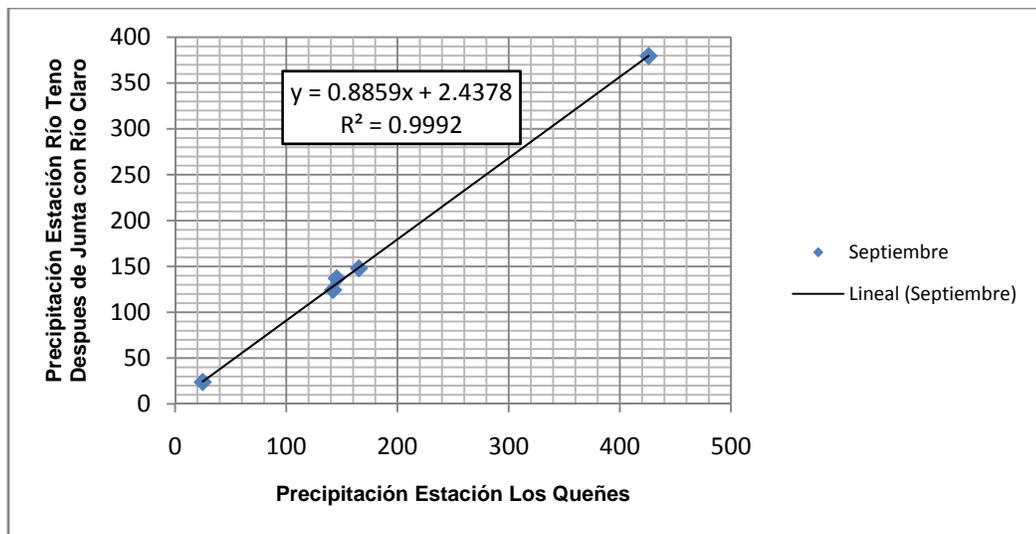
*Nota: Datos facilitados por DGA. Elaboración propia.*

**Figura 3-8: Estaciones de medición fluviométricas**



Nota: Datos facilitados por DGA. Elaboración propia.

**Figura 3-9: Correlación de Precipitaciones Mensuales mes Septiembre**



### ***Series de temperatura media mensual.***

No fue necesario completar ni corregir datos de temperatura. Se utilizaron las series de temperatura media mensual disponibles (Figura 3-15) de las estaciones Potrero Grande, Convento Viejo y Termas del Flaco para generar gradientes de temperatura v/s altura.

### ***Series de caudal medio mensual.***

Se utilizaron las series de caudales de las estaciones de Río Teno después de junta con Río Claro y Río Claro en Los Queñes disponibles entre 1961 y 2006. Con estas se revisaron las magnitudes de los caudales mensuales a través de comparaciones entre las dos estaciones, lo que permitió encontrar mediciones contradictorias que fueron descartadas para la calibración.

### ***3.2.2 Preparación de datos meteorológicos representativos.***

Los datos meteorológicos ingresados como inputs al modelo WEAP a través de las subcuencas (Catchment) deben ser representativos de un área determinada de la cuenca, es decir, si se tienen “n” subcuencas, para cada una de éstas se deben ingresar las series representativas de las variables de interés.

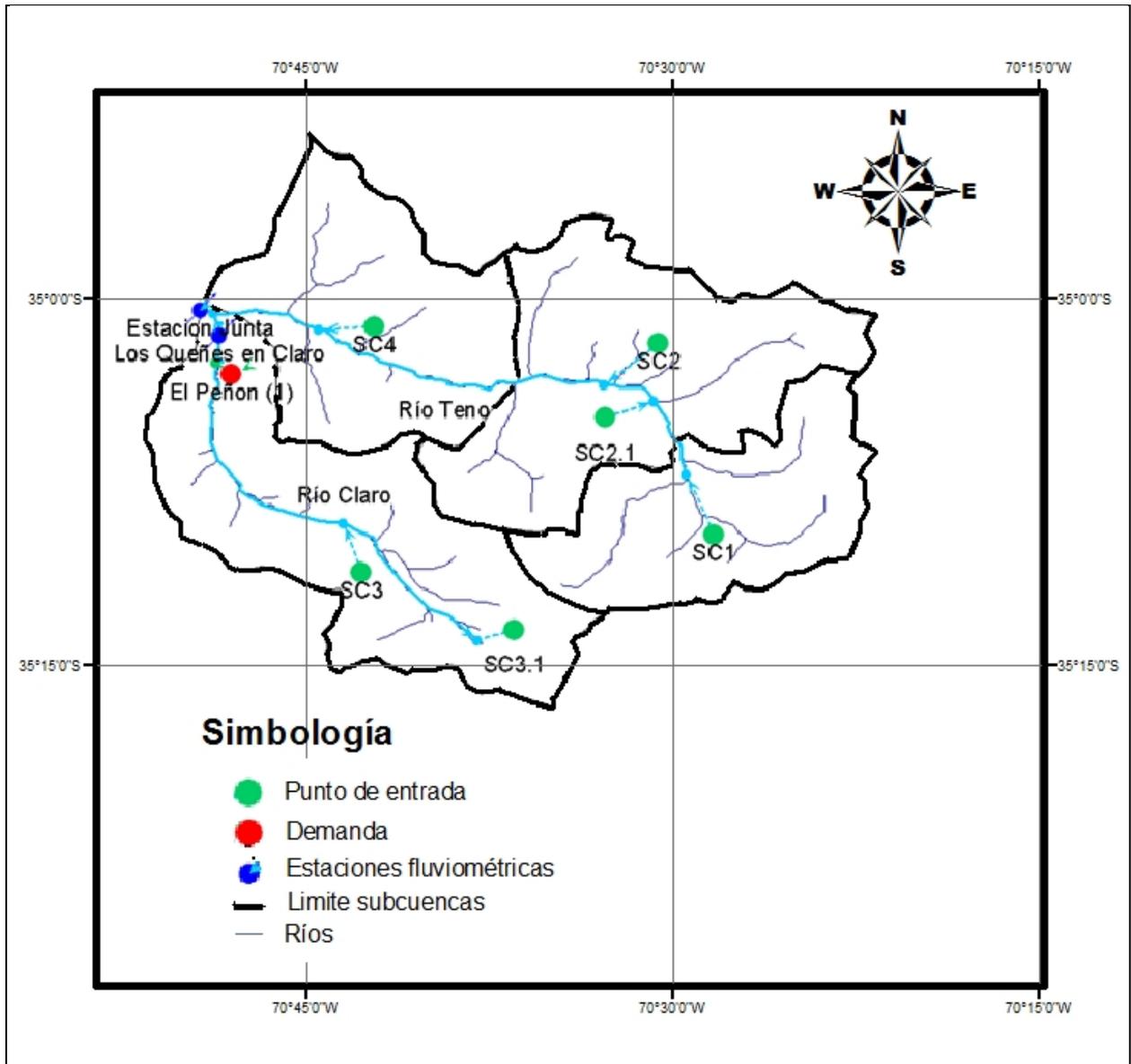
Para la modelación se dispusieron 4 puntos de entrada de datos meteorológicos. Estos fueron distribuidos por cada una de las subcuencas de la cuenca. Luego se subdividieron dos de ellas en una parte alta (cotas > 2000 m.s.n.m.) y una parte baja, sumando 2 puntos de entrada de datos meteorológicos. De estos puntos 4 corresponden al Río Teno (SC1, SC2, SC2.1 y SC4) y 2 al Río Claro (SC3 y SC3.1). Cuya ubicación se aprecia en la Figura 3-10. Las subcuencas de la cuenca están caracterizadas por las zonas altas que separan aguas.

La nomenclatura SCX.Y se explica como:

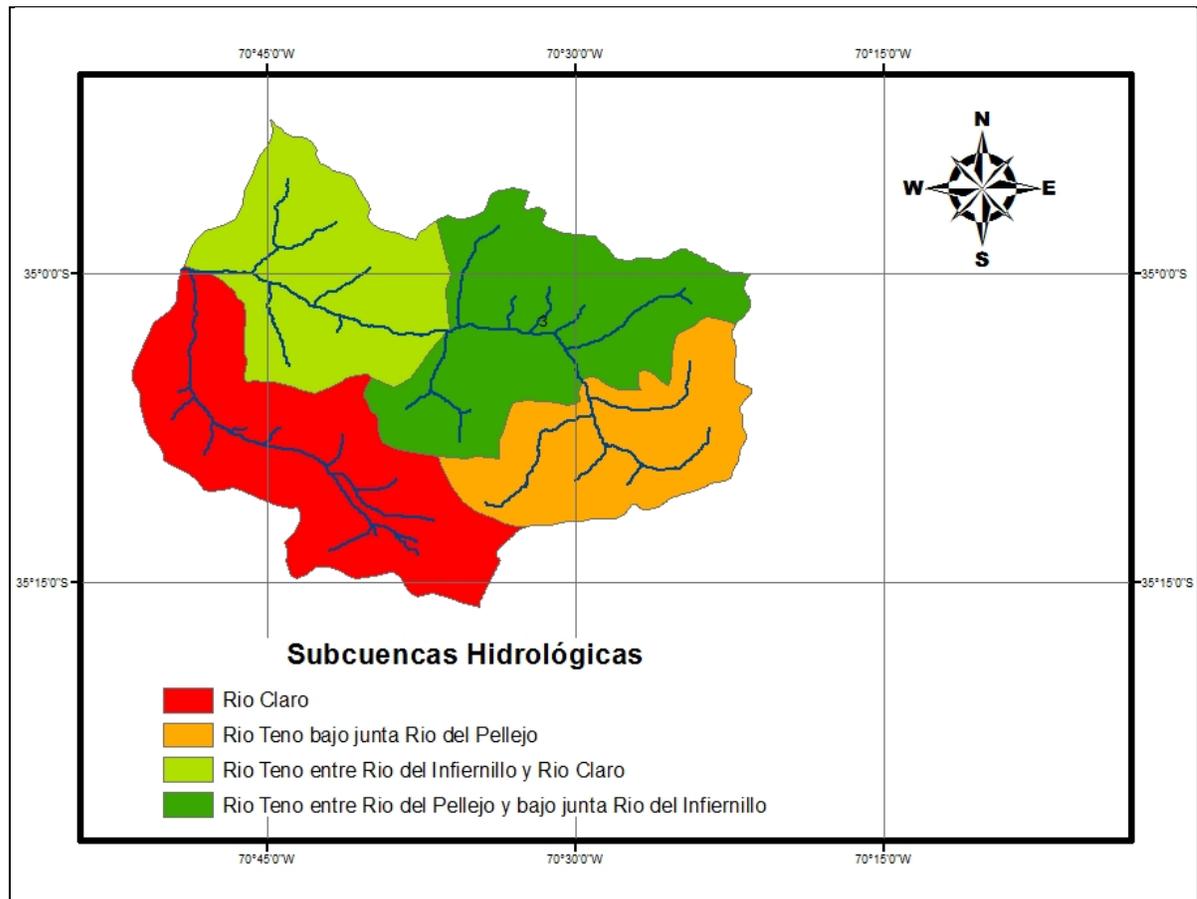
1. SC: corresponde a la sigla de SubCuenca.
2. X corresponde a el número representativo de la subcuenca, donde:
  - 1: corresponde a la subcuenca Río Teno bajo Junta Río del Pellejo
  - 2: corresponde a la subcuenca Río Teno entre Río del Pellejo y bajo Junta del Río del Infiernillo
  - 3: corresponde a la subcuenca Río Claro
  - 4: corresponde a la subcuenca Río Teno entre Río del Infiernillo y Río Claro.

3. Y aparece en el caso de que la subcuenca sea subdividida en una parte alta (cotas >2000 m.s.n.m) y una baja (cotas <2000 m.s.n.m.) en donde  $Y = 1$  corresponde a la parte alta de ésta.

**Figura 3-10: Distribución de Subcuencas en WEAP.**



**Figura 3-11: Subcuencas naturales.**



Las metodologías realizadas para obtener los datos meteorológicos representativos se describen a continuación:

***Precipitación representativa.***

Se utilizaron isoyetas de precipitación anual como curvas isoporcentuales para extrapolar las series de datos de la estación Los Queñes. Estas isoyetas están disponibles en la página de Internet <http://esiir.cnr.cl/> del Ministerio de Agricultura y fueron corroboradas con aquellas informadas por la Dirección General de Aguas (Balance Hídrico, 1987).

Se puede utilizar curvas isoporcentuales si se cumple que en una región el régimen de precipitaciones y su variación espacial está condicionada por efectos topográficos; la variación de la precipitación en el espacio durante una tormenta es generalmente similar a la variabilidad que presenta la precipitación anual normal. En otras palabras, si la lluvia estudiada sigue una configuración espacial similar a la anual normal, al calcular el cociente entre la precipitación

observada en cada estación y la de la precipitación anual normal respectiva, los coeficientes serán prácticamente constantes y, por lo tanto, las isoyetas de la precipitación anual normal serán una versión amplificada de la lluvia en estudio. (Espíldora, Brown, Cabrera e Isensee, 1975)

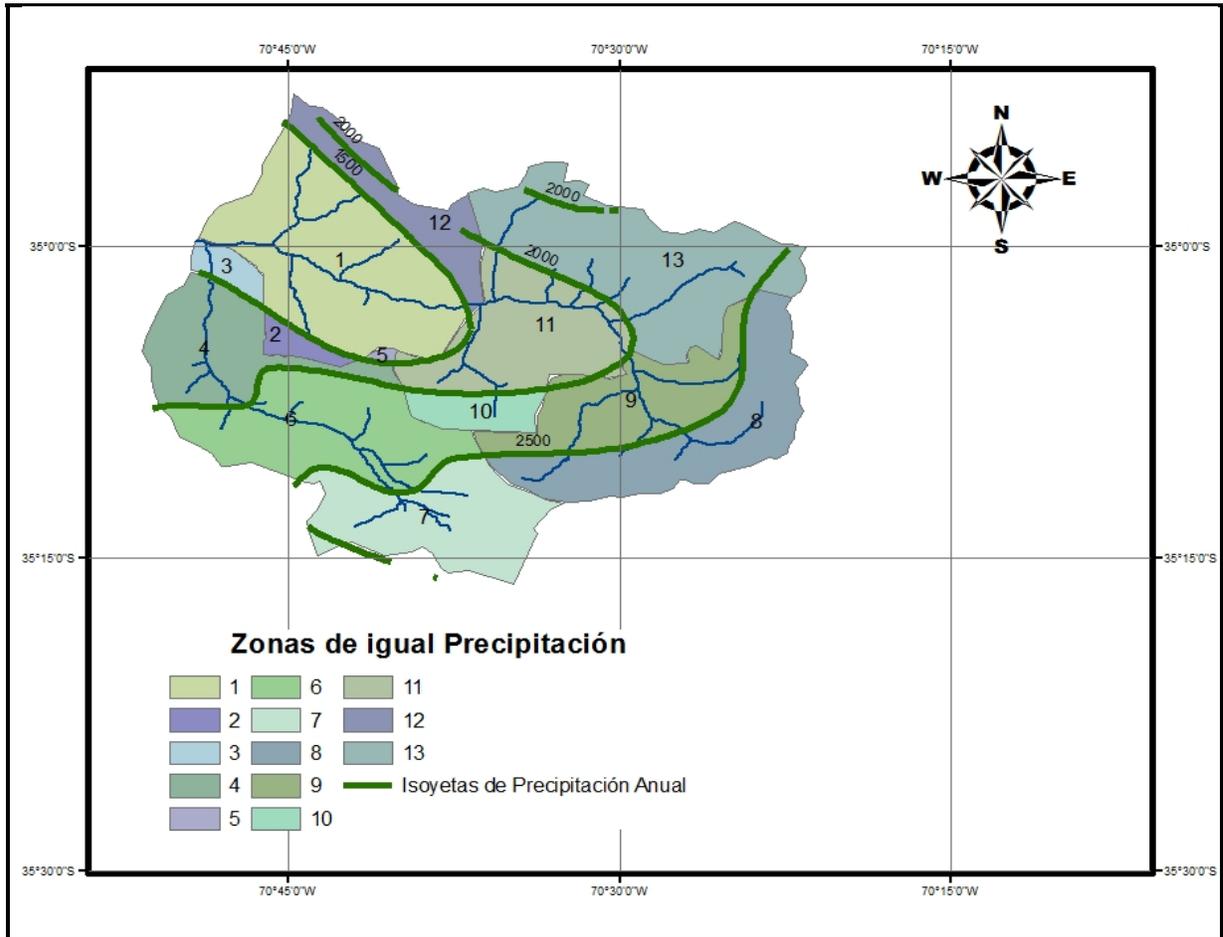
Utilizando las estaciones Los Queñes y Río Teno después de junta con Río Claro se garantizó el uso de las curvas isoporcentuales al obtener valores similares entre los cuocientes de la precipitación de la estación y su correspondiente isoyeta.

Luego, tal como se observa en la Figura 3-12, se dividió el área de las subcuencas de acuerdo a las isoyetas de 1500 mm, 2000 mm y 2500mm, obteniendo 13 zonas a las cuales se les asignó una lluvia característica conforme a la distribución obtenida con las curvas isoporcentuales. Finalmente, se ponderaron las áreas de las 13 zonas con su correspondiente subcuenca para obtener la precipitación representativa. En la Tabla 3-2 se presentan los factores que multiplican a la serie de precipitación de la estación Los Queñes.

**Tabla 3-2: Factor para obtener Pp representativa de cada punto de entrada**

Punto de entrada	Zona	Área por zona (km <sup>2</sup> )	Isoyeta media (mm/añual)	Factor de corrección de Pp por zona	Área Subcuenca (km <sup>2</sup> )	Factor de corrección de Pp por punto de entrada
SC1	8	130.1	2650	1.80	235.7	<b>1.711</b>
	9	105.6	2350	1.60		
SC2	10	30.0	2200	1.50	295.3	<b>1.473</b>
	11	73.4	1800	1.22		
	13	191.9	2300	1.56		
SC2.1	11	29.4	1800	1.22	29.4	<b>1.224</b>
SC3	3	15.4	1450	0.99	177.3	<b>1.325</b>
	4	91.7	1800	1.22		
	6	70.2	2250	1.53		
SC3.1	5	2.3	1470	1.00	189.2	<b>1.713</b>
	6	70.2	2250	1.53		
	7	116.8	2700	1.84		
SC4	1	198.5	1400	0.95	276.1	<b>1.018</b>
	2	13.6	1700	1.16		
	12	64.1	1750	1.19		

**Figura 3-12: Zonas de igual precipitación**



Fuente: Isoyetas de Precipitación anual (Balance Hídrico, 1987).

### **Temperatura representativa.**

Se generaron gradientes de temperatura con respecto a la altura para cada mes del año utilizando los promedios de temperaturas medias mensuales de las series de datos disponibles de las estaciones Potrero Grande, Convento Viejo y Termas del Flaco (Ver Figura 3-15) y se definieron franjas de igual cota promedio utilizando ArcGIS. Los rangos de las franjas y su cota promedio se indican en la Tabla 3-3 y se visualizan en la Figura 3-13. Con los gradientes se calcularon las temperaturas promedio para cada franja, las cuales se muestran en la Tabla 3-4.

**Tabla 3-3: Franjas de igual temperatura promedio.**

Rango (m)	Altura promedio (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje área con respecto al área total (%)
650 – 1000	825	72,3	6,0
1000 - 1500	1250	192,1	16,0
1500 - 1800	1650	197,0	16,4
1800 - 2500	2150	428,7	35,6
2500 - 3000	2750	282,2	23,5
3000 - 3500	3250	30,7	2,6

**Tabla 3-4: Temperatura por franja**

Mes	Temperatura media por franja (T°)						T° promedio Convento Viejo cota 250 m (T°)
	850	1250	1650	2150	2750	3250	
Enero	16.88	15.48	14.47	13.51	12.61	12.01	21.45
Febrero	16.53	15.24	14.31	13.43	12.60	12.05	20.54
Marzo	14.37	13.06	12.12	11.22	10.38	9.82	18.78
Abril	10.55	9.43	8.62	7.85	7.14	6.65	14.34
Mayo	7.23	6.21	5.47	4.77	4.12	3.68	10.54
Junio	4.67	3.24	2.21	1.23	0.32	-0.30	9.09
Julio	4.71	3.62	2.84	2.10	1.40	0.93	8.31
Agosto	6.34	5.11	4.23	3.38	2.60	2.06	10.23
Septiembre	7.47	5.98	4.91	3.89	2.95	2.30	12.15
Octubre	10.45	8.98	7.92	6.91	5.98	5.34	15.16
Noviembre	12.00	10.17	8.86	7.60	6.43	5.64	18.08
Diciembre	14.82	13.20	12.03	10.92	9.88	9.18	20.02

Luego, se ponderaron las temperaturas medias mensuales medidas en la estación Convento Viejo para obtener las temperaturas medias mensuales de cada franja en la cuenca con la siguiente ecuación:

$$T_{Franja}^{Mes-Año} = \frac{\bar{T}_{Franja}^{Mes}}{\bar{T}_{Mes}} \times T_{Convento Viejo}^{Mes-Año} \quad (\text{Ec. 3-1})$$

Donde:  $T_{Franja}^{Mes-Año}$ : Temperatura media de la franja de del mes de un año (T°)

$\bar{T}_{Franja}^{Mes}$ : Temperatura media por franja del mes solicitado (T°)

$T_{Convento Viejo}^{Mes-Año}$ : Temperatura estación Convento Viejo del mes de un año (T°)

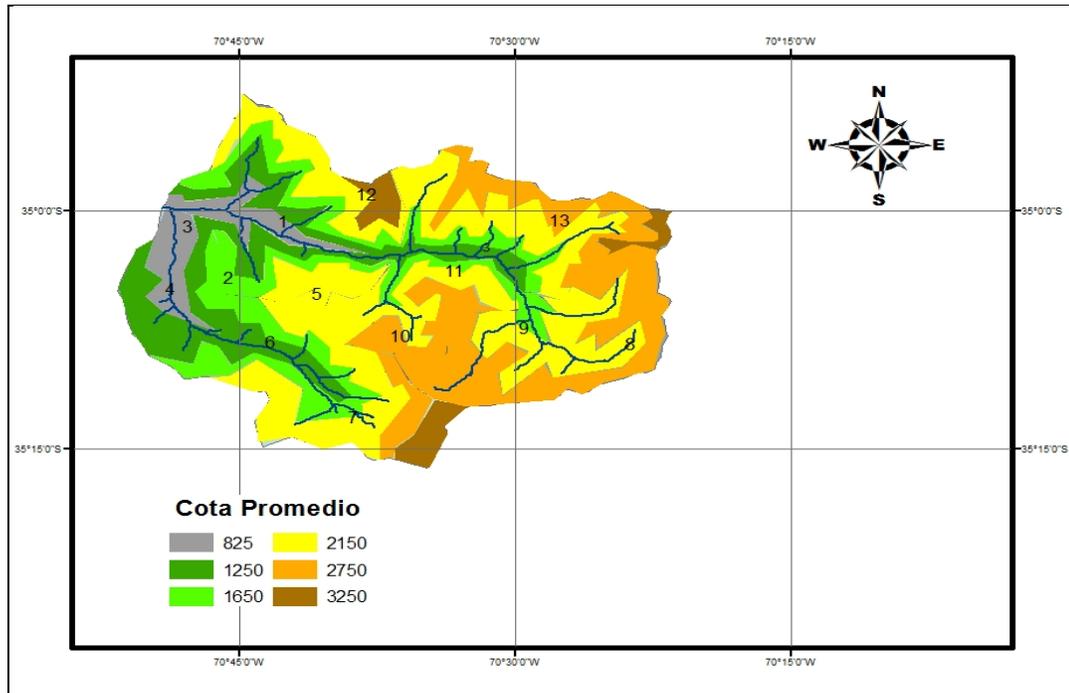
$\bar{T}_{Mes}^{\circ}$ : Temperatura promedio del mes solicitado (T°)

Finalmente, se ponderaron las temperaturas medias mensuales de las franjas según las áreas de las franjas que correspondían al área representativa de la subcuenca. La Figura 3-14 muestra el gradiente obtenido para el mes de Abril. El resto de los gradientes se encuentra resumido en el Anexo digital que adjunta a esta memoria.

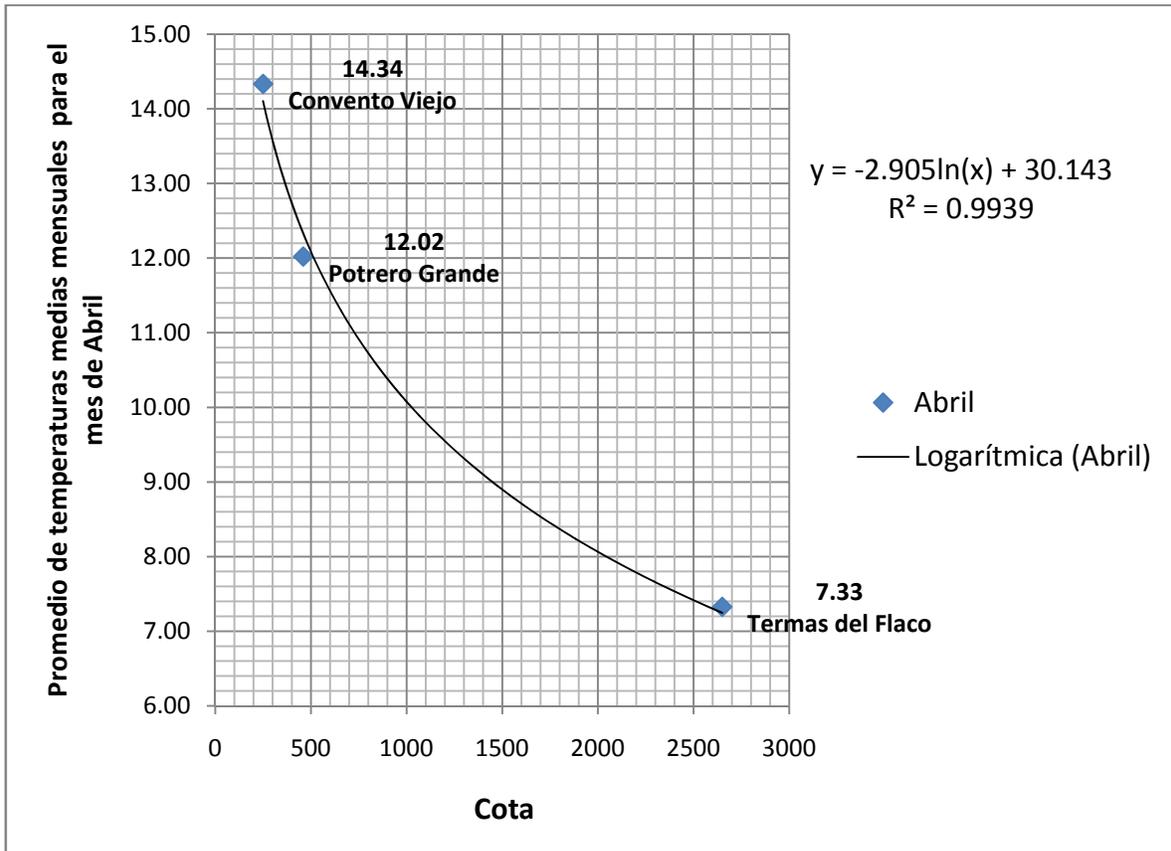
**Tabla 3-5: Ponderadores de temperatura por franja**

Subcuenca	Ponderadores por franja						Total
	825	1250	1650	2150	2750	3250	
SC1	-	0.35	0.65	-	-	-	1.00
SC2	-	-	-	0.55	0.41	0.04	1.00
SC2.1	-	-	-	0.55	0.41	0.04	1.00
SC3	0.18	0.47	0.35	-	-	-	1.00
SC3.1	-	-	-	0.72	0.14	0.14	1.00
SC4	0.13	0.25	0.25	0.31	0.06	-	1.00

**Figura 3-13: Franjas de igual temperatura promedio.**



**Figura 3-14: Gradiente de temperatura v/s cota. Mes de Abril**



### ***Derechos de Agua.***

De acuerdo con los artículos 5 y 6 del Código de Agua, las aguas son bienes nacionales de uso público y se otorga a los particulares el derecho de aprovechamiento de ellas. Este es un derecho real que recae sobre las aguas y es de dominio de su titular, quien podrá usar, gozar y disponer de él en conformidad a la ley.

Los derechos de agua vigentes fueron facilitados por el Dirección General de Agua y se presentan en la Tabla 3-6. Las magnitudes de los caudales otorgados, que en total corresponden a menos de 2 m<sup>3</sup>/s, son despreciables comparado con las magnitudes que tienen los caudales en los ríos Claro y Teno por lo que se definió una demanda representativa (Demand sites) de 1,8 m<sup>3</sup>/s a la que se le dio el nombre de El Peñón tal como se observa en la Figura 3-10.

**Tabla 3-6: Derechos de Agua.**

Nombre	Apellido Paterno	Apellido Materno	Comuna	Tipo Derecho	Ejercicio Derecho	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Alicia	Ramírez	Bustamante	Romeral	Consuntivo	Permanente y Continuo	0.04
Félix	Garrido	Larson	Romeral	Consuntivo	Permanente y Continuo	0.03
Nicolás Enrique	Moreno	Urzua	Romeral	Consuntivo	Permanente y Continuo	0.02
Agrícola la Higuera de Romeral Ltda.			Romeral	Consuntivo	Permanente y Continuo	0.03
María Eliana	Pairoa	González	Romeral	Consuntivo	Permanente y Continuo	0.14
María Eliana	Pairoa	González	Romeral	Consuntivo	Permanente y Continuo	0.25
Georgina	Conde	Podest	Romeral	Consuntivo	Permanente y Continuo	0.10
Patricio	Barros	Errázuriz	Romeral	Consuntivo	Permanente y Continuo	0.75
Cecilia	Ojeda	Fuenzalida	Romeral	Consuntivo	Permanente y Continuo	0.05
El Peñón			Romeral	No consuntivo	Permanente y Continuo	0.40
<b>Total</b>						<b>1.80</b>

**Figura 3-15: Información disponible y utilizada de las estaciones de medición**

## Capítulo 4. Calibración y Validación del Modelo

---

### 4.1 Criterios de calibración.

Los criterios considerados en la calibración del modelo WEAP son los siguientes:

- Calibración empleando cerca del 65% de la serie de datos lo que permite utilizar el resto de la serie en la validación del modelo, siempre que se utilicen más de 10 años.
- El porcentaje de veces en la serie calibrada en que la variación porcentual entre los caudales de una misma probabilidad de excedencia sea mayor al 15% no debe ser mayor al 5%.
- El coeficiente de Nash and Sutcliffe (NS) no debe ser menor a 0,7. Este coeficiente se define como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i(Qsim_i - Qobs_i)^2}{\sum_i(Qobs_i - \overline{Qobs})^2} \quad \text{Ec. 4-1}$$

Donde  $Qsim_i$  = Caudal simulado

$Qobs_i$  = Caudal observado

$\overline{Qobs}$  = Promedio de caudales observados en el periodo analizado.

(Nash and Sutcliffe, 1970)

### 4.2 Calibración.

La calibración se realizó en dos etapas:

1. Calibración de subcuenca Río Claro (SC3 y SC3.1), utilizando los datos de la estación Río Claro en Los Queñes. El periodo para la calibración fue entre abril de 1985 y marzo de 1992.
2. Calibración de toda la cuenca, utilizando los datos de la estación Río Teno después de junta con Río Claro. El periodo para la calibración fue entre abril de 1975 y marzo de 1995.

Para ambas etapas se ingresaron los datos meteorológicos en los puntos de entrada del modelo y se calcularon los caudales mensuales utilizando los parámetros que venían por

defecto, luego se procedió a ajustar los caudales mensuales en forma manual cambiando los parámetros iniciales del modelo.

#### 4.2.1 Calibración Río Claro.

Los parámetros de la Tabla 4-1 fueron utilizados para obtener el ajuste de la calibración que se muestra en la Figura 4-1. El NS obtenido es igual a 0.853 a nivel mensual.

**Tabla 4-1: Parámetros de ajuste Río Claro**

Subcuenca			SC3	SC3.1		
1	Características del suelo	1.1	Área (km <sup>2</sup> )	209.1	147.9	
		1.2	kc: Coeficiente de cosecha	0.4	1	
		1.3	Root Zone Conductivity: tasa conductividad capa superior (mm/mes)	100	70	
		1.4	Alpha: tasa de conductividad capa inferior (mm/mes)	50	50	
		1.5	Dirección preferencial del flujo: 1 si 100% horizontal, 0 si 100% vertical	0.15	0.15	
2	Clima	2.1	Precipitación (mm)	P*1.325*1,3	P*1.713*1,1	
		2.2	Temperatura (°C) por franja			
				Altura promedio =825	T°cal*0.1	T°cal*0
				Altura promedio =1250	T°cal*0.28	T°cal*0
				Altura promedio =1650	T°cal*0.21	T°cal*0
				Altura promedio =2150	T°cal*0.3	T°cal*0.72
				Altura promedio =2750	T°cal*0.06	T°cal*0.14
			Altura promedio =3250	T°cal*0.06	T°cal*0.14	
		2.3	Viento (m/s)	3	3	
		2.4	Latitud (°)	-35.187	-35.229	
		2.5	Punto de fusión (°C)	12	20	
2.6	Punto de congelación (°C)	-10	3			
a) Parámetros fijos						
P= precipitación observada estación Los Queñes.						
$T^{\circ}cal = T^{\circ}Mes - A\tilde{n}o$ : Temperatura media de la franja en el mes de un año (T°)						

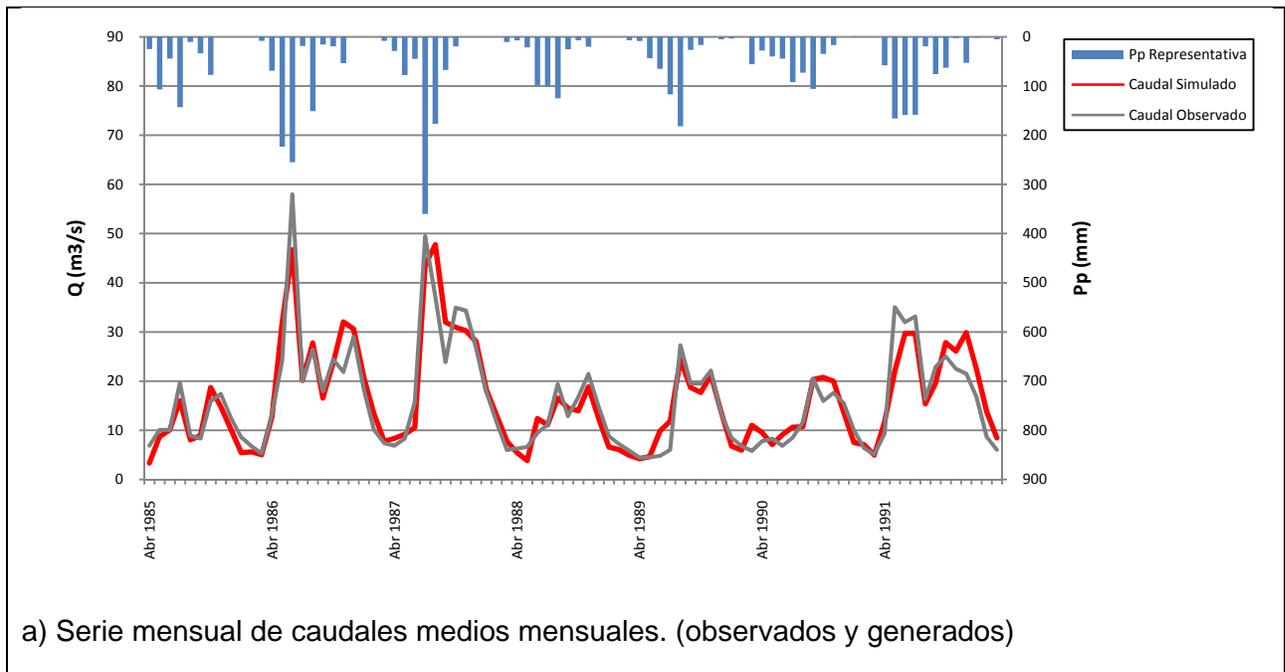
Subcuenca	SC3	SC3.1
abr	0.8	0.8
may	1.3	1.3
jun	0.5	0.5
jul	1.5	1.5
ago	3.5	3.5
sep	3.5	3.5
oct	1.8	1.8
nov	1	1
dic	2.4	2.4
ene	7	7
feb	5.5	5.5
mar	1.5	1.5

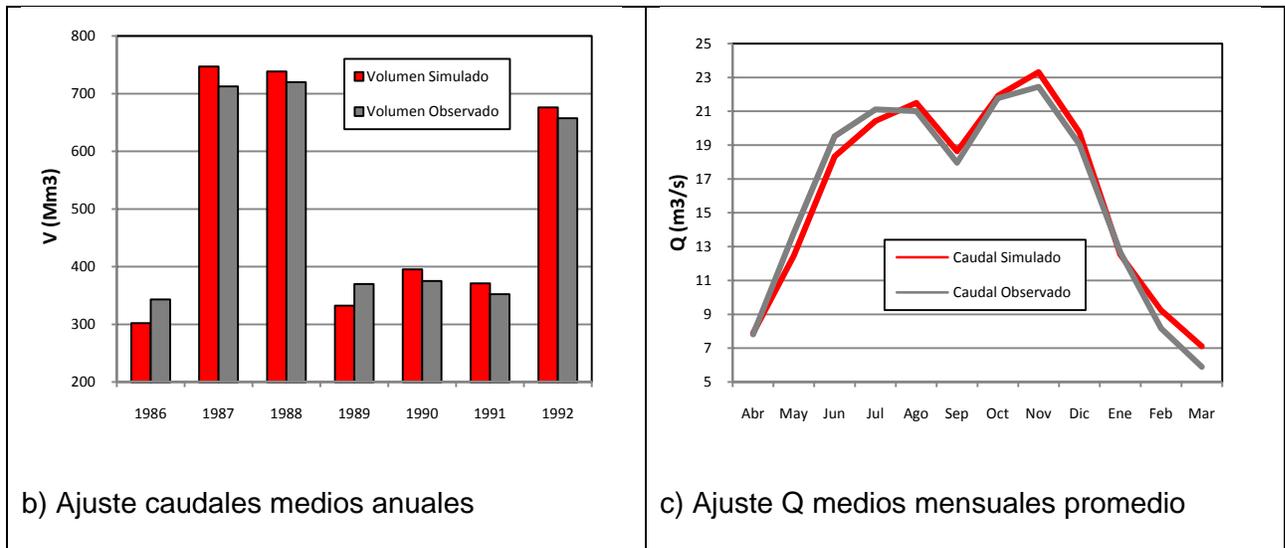
b) Epsilon: Contribución al desagüe superficial. A mayor Epsilon, mayor el desagüe principal. Variabilidad mensual.

Subcuenca	SC3	SC3.1
abr	52.3	52.3
may	55	55
jun	56.7	56.7
jul	57.7	57.7
ago	56.7	56.7
sep	54.3	54.3
oct	51.3	51.3
nov	49	49
dic	47.7	47.7
ene	48	48
feb	45	45
mar	45	45

c).Humedad relativa (%).Variabilidad mensual. Fuente SIG CNR.

Figura 4-1: resultados calibración rio Claro periodo 1985-1992.





En general, como se puede ver en las imágenes a) y b) de los caudales generados en WEAP se ajustan bien a los caudales observados a nivel mensual y anual y se logra simular el régimen mixto de la cuenca que se genera con el promedio de los caudales medios mensuales presentes en la imagen c).

De los parámetros de ajuste utilizados en la calibración resaltan los puntos de fusión y congelación por dos razones:

- La diferencia de sus temperaturas, que está alrededor de los 20 grados, que se explica en base al algoritmo que utiliza el modelo para generar los procesos de derretimiento y congelamiento que están vinculados al porcentaje de derretimiento  $m_c$  expuesto en detalle en el Capítulo 2.
- Sus valores son distintos para cada subcuenca, a causa de la diferenciación que se hizo en la cuenca en subcuencas altas y bajas para poder generar un régimen mixto, de este modo, las subcuencas altas con temperaturas de fusión y congelación más altas tienen mayor capacidad para almacenar nieve en invierno lo que les permite aportar en la generación de los caudales para los meses de verano mientras que las subcuencas bajas que tienen menor capacidad de almacenamiento de nieve simulan los caudales de los meses de invierno.

## 4.2.2 Calibración Río Teno.

La calibración se realizó con la serie de tiempo de abril de 1975 a abril de 1995. El coeficiente de Nash and Sutcliffe obtenido a nivel mensual es igual a 0.748 y a nivel anual es de 0.764.

Los resultados presentados en la Figura 4-2 se obtuvieron a partir de los parámetros de ajuste de la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2: Parámetros de ajuste Cuenca Río Teno**

Subcuenca			SC1	SC2	SC2.1	SC3	SC3.1	SC4	
1	Características del suelo	1.1	Área (km <sup>2</sup> )	231.1	65.1	273.1	209.1	147.9	275.3
		1.2	kc: Coeficiente de cosecha	0.7	0.7	0.7	0.4	1	0.7
		1.3	Root Zone Conductivity: tasa conductividad capa superior (mm/mes)	50	200	50	100	70	200
		1.4	Alpha: tasa de conductividad capa inferior (mm/mes)	50	50	50	50	50	50
		1.5	Dirección preferencial del flujo:	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
2	Clima	2.1	Precipitación (mm)	P*1.71*1.2	P*1.47*1.2	P*1.22*1.1	P*1.33*1.3	P*1.71*1.1	P*1.02*1.1
		2.2	Temperatura (°C)						
			Altura promedio =825	T°cal*0	T°cal*0	T°cal*0	T°cal*0.1	T°cal*0	T°cal*0.13
			Altura promedio =1250	T°cal*0	T°cal*0.35	T°cal*0	T°cal*0.28	T°cal*0	T°cal*0.25
			Altura promedio =1650	T°cal*0.05	T°cal*0.65	T°cal*0	T°cal*0.21	T°cal*0	T°cal*0.25
			Altura promedio =2150	T°cal*0.38	T°cal*0	T°cal*0.55	T°cal*0.3	T°cal*0.72	T°cal*0.31
			Altura promedio =2750	T°cal*0.58	T°cal*0	T°cal*0.41	T°cal*0.06	T°cal*0.14	T°cal*0.06
			Altura promedio =3250	T°cal*0	T°cal*0	T°cal*0.04	T°cal*0.06	T°cal*0.14	T°cal*0
		2.3	Viento (m/s)	3	3	3	3	3	3
		2.4	Latitud	-35.164	-35.028	-35.082	-35.187	-35.229	-35.017
2.5	Punto de fusión (°C)	20	12	20	12	20	12		
2.6	Punto de congelación (°C)	3	-10	3	-10	3	-10		
a) Parámetros fijos									
P= precipitación observada estación Los Queñes.									
T°cal= $T^{\circ}_{Mes-Año}$ : Temperatura media de la franja en el mes de un año (T°).									

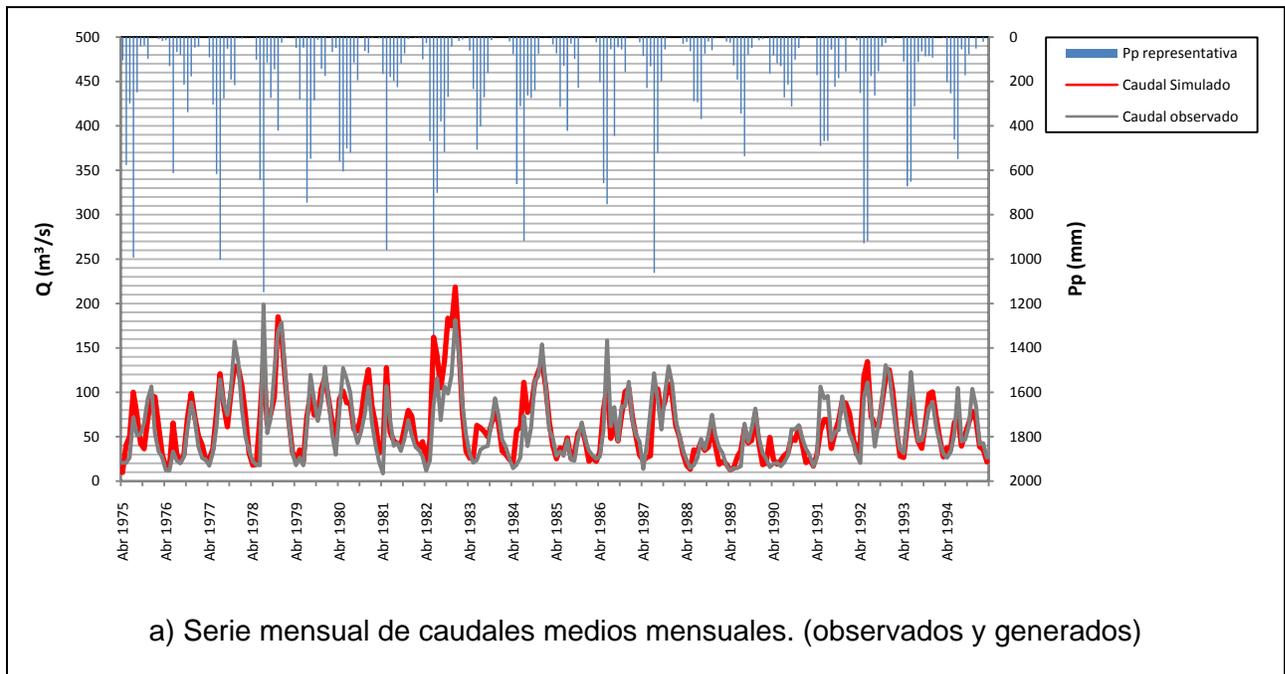
Subcuenca	SC1	SC2	SC2.1	SC3	SC3.1	SC4
abr	1	1	1	0.8	0.8	1
may	0.8	0.8	0.8	1.3	1.3	0.8
jun	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	0.1
jul	0.3	0.3	0.3	1.5	1.5	0.3
ago	0.4	0.4	0.4	3.5	3.5	0.4
sep	0.5	0.5	0.5	3.5	3.5	0.5
oct	1.5	1.5	1.5	1.8	1.8	1.5
nov	0.8	0.8	0.8	1	1	0.8
dic	3	3	3	2.4	2.4	3
ene	10	10	10	7	7	10
feb	4	4	4	5.5	5.5	4
mar	0.1	0.1	0.1	1.5	1.5	0.1

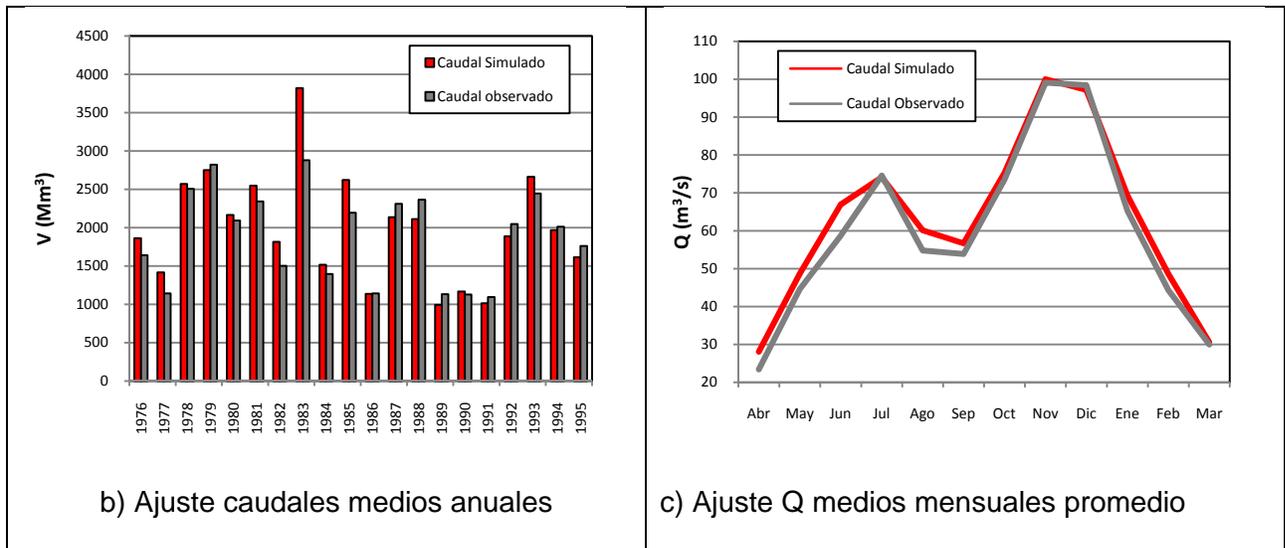
b) Variabilidad mensual. Epsilon

Subcuenca	SC1	SC2	SC2.1	SC3	SC3.1	SC4
abr	46.5	49	49	52.3	52.3	64
may	49	52	52	55	55	67.5
jun	51	54	54	56.7	56.7	70.5
jul	51	55	55	57.7	57.7	71.5
ago	51	53.5	53.5	56.7	56.7	70
sep	48.8	50.5	50.5	54.3	54.3	67
oct	46	47.5	47.5	51.3	51.3	63
nov	43	45.5	45.5	49	49	62.5
dic	42.3	44.5	44.5	47.7	47.7	57
ene	44	45	45	48	48	52
feb	39	40	40	45	45	53
mar	37	39	39	45	45	60

c) Variabilidad mensual. Humedad relativa (%).  
Fuente: SIG CNR.

**Figura 4-2: Resultados calibración Río Teno periodo 1975-1995**



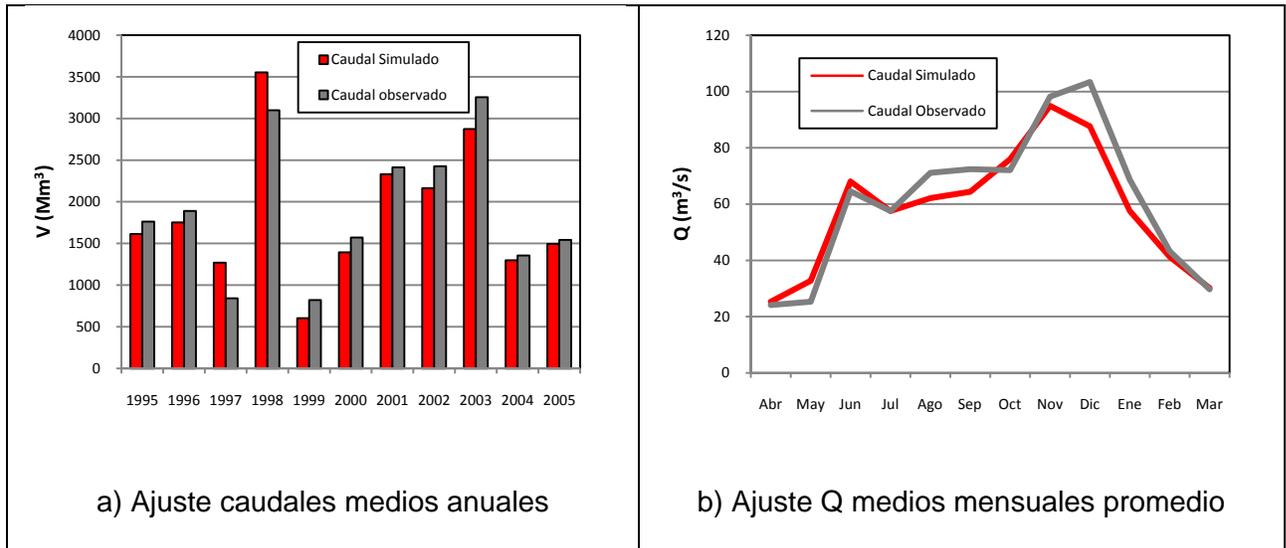


Al igual que en la cuenca del Río Claro en la imagen a) de la Figura 4-2, la curva de la serie de caudales medios mensuales simulados se ajusta a la curva de los caudales observados en gran parte de la serie pero esta vez presenta problemas de ajuste para simular meses en que el caudal mensual es alto. En el caso de la imagen b) los caudales medios anuales generados se ajustan a los observados en el periodo 1975-2005, a excepción del año hidrológico 1982-1983, en donde la simulación sobrepasa alrededor del 20% al caudal medio anual medido en la cuenca. Finalmente la imagen c) de la Figura 4-2 muestra que el ajuste logra generar el régimen de la cuenca andina del Teno.

### 4.3 Validación

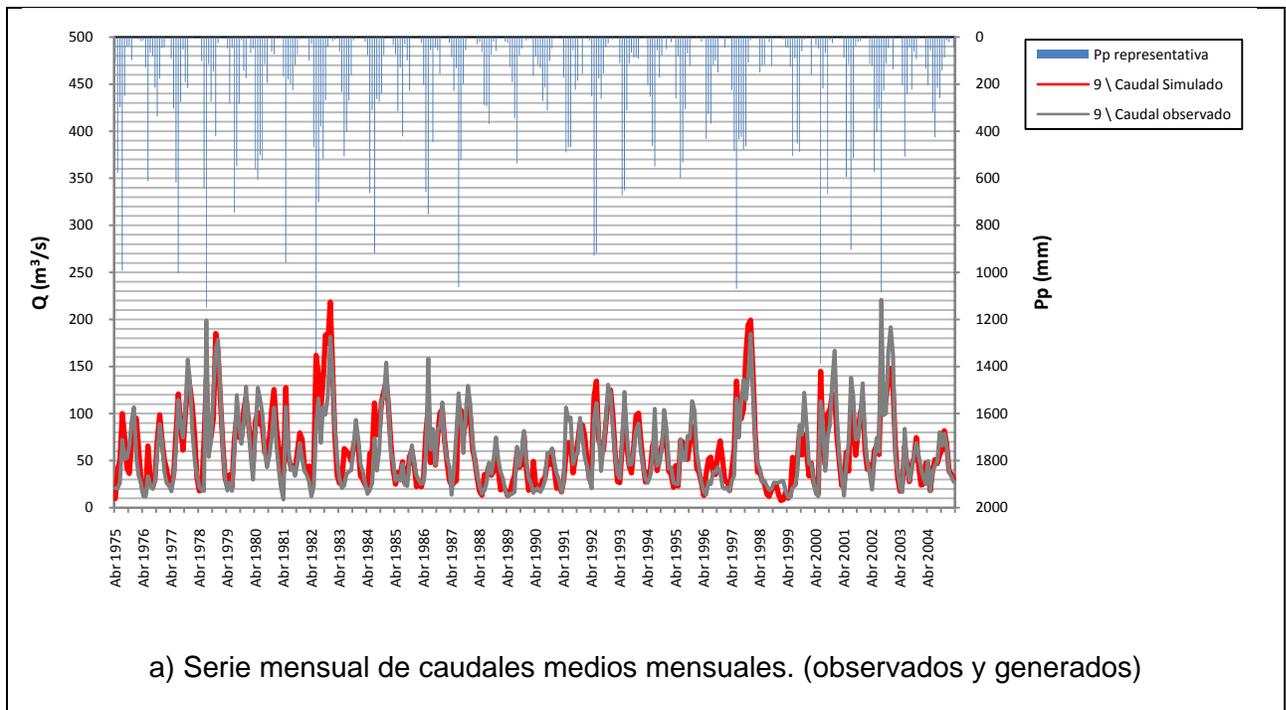
Para la validación se utilizó la serie de caudales mensuales del periodo 1995-2005 de la estación Río Teno después de junta con Río Claro, tal como se ve en la Figura 4-3 los resultados del ajuste de caudales medios anuales de la imagen a) y el ajuste de los caudales medios mensuales promedios de la imagen b) muestran un déficit en las magnitudes de los caudales simulados por WEAP de un 3 % que no afectaría a los futuros. El NS obtenido es igual a 0.796.

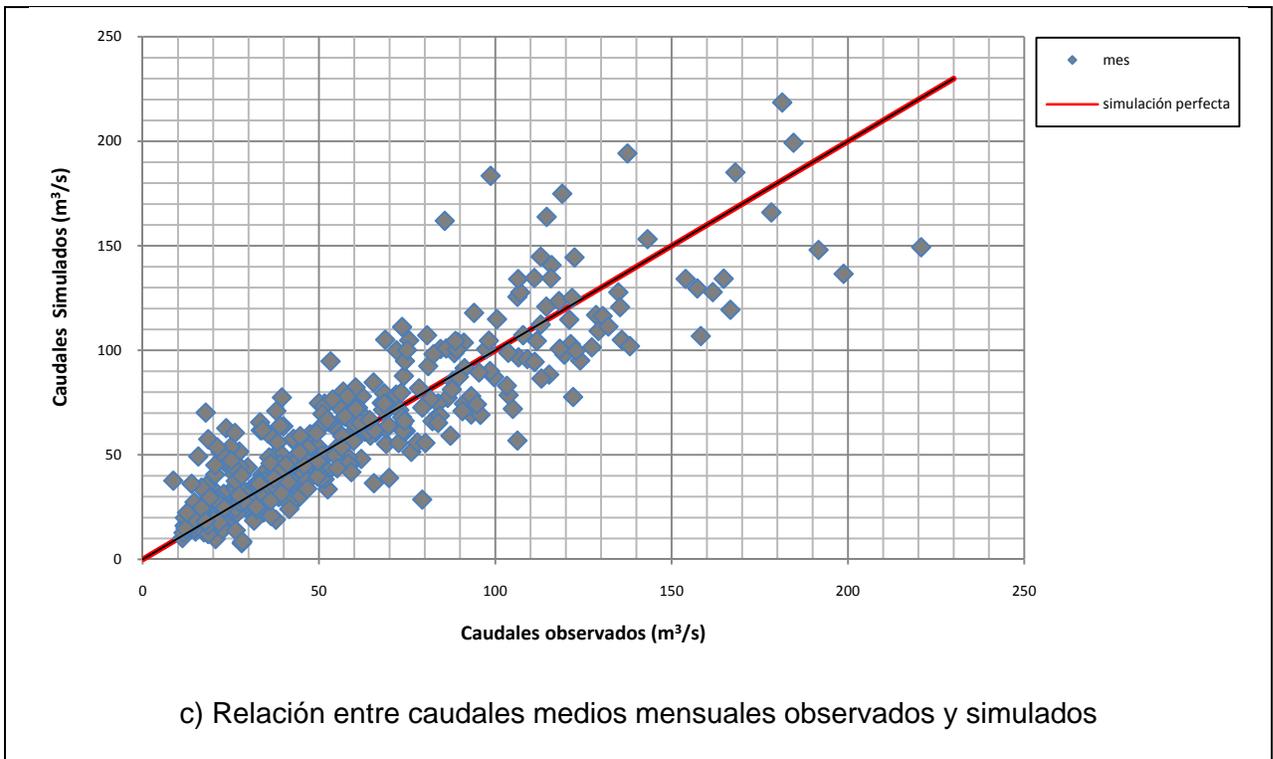
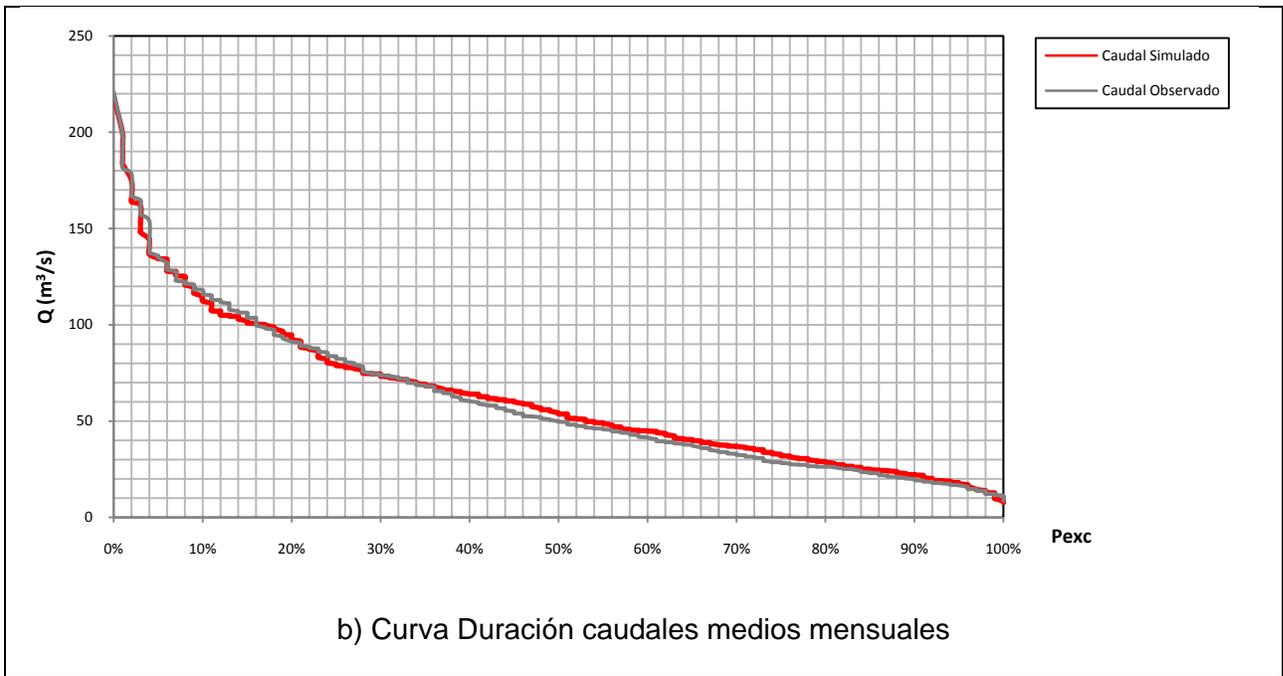
**Figura 4-3: Resultados validación 1995-2005**

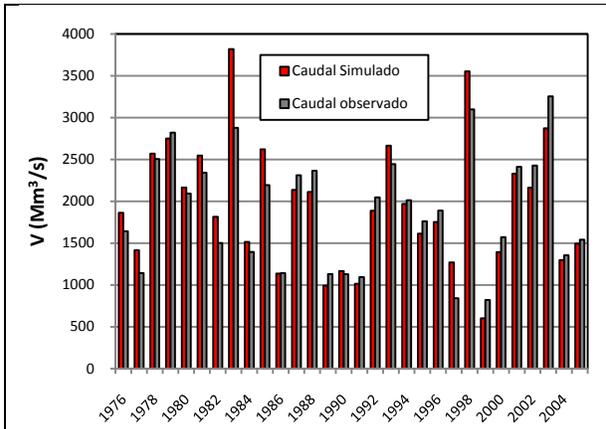


En la Figura 4-4 se puede apreciar el comportamiento del modelo WEAP en el periodo completo, abril 1975 a marzo 2005.

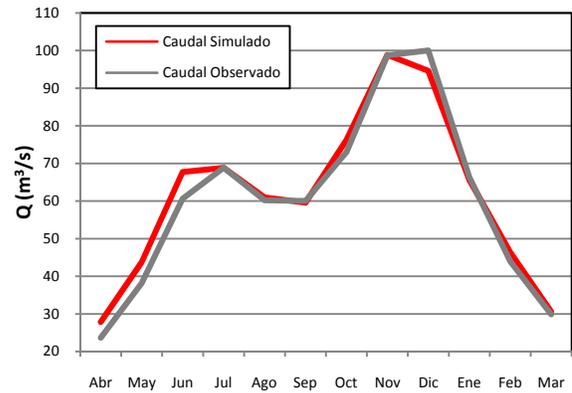
**Figura 4-4: Resultados serie 1975-2005**







d) Ajuste volúmenes anuales



e) Ajuste Q medios mensuales promedio

En la imagen b) de la Figura 4-4 se muestra el ajuste de la curva duración de caudales medios mensuales simulada por WEAP y la curva duración de los caudales medios mensuales de la cuenca obtenida a partir de los datos observados del periodo 1975-2005, los resultados indican que el modelo representa correctamente las probabilidades de excedencia de la serie de caudales estudiada. La imagen c) relaciona los caudales simulados y observados para un mismo mes. La línea de 45° representa una simulación perfecta de la serie de caudales medios mensuales y se espera que la tendencia de los caudales medios mensuales simulados se acerque a ésta. Se puede apreciar que la relación entre caudales sigue la tendencia de la línea de 45°, sin embargo, para caudales medios mensuales mayores a 150 m<sup>3</sup>/s aumenta la desviación estándar de las relaciones entre caudales simulados y observados.

## Capítulo 5. Aplicación del modelo WEAP a escenarios futuros

---

### 5.1 Análisis de la información del modelo meteorológico PRECIS.

Para la evaluación de los impactos del cambio climático en el período 2036 a 2065 y 2071 a 2100 se decidió utilizar 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 periodo 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 (<http://mirasol.dgf.uchile.cl/conama/>) 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, para los escenarios futuros A2 y B2 y el escenario base correspondiente al período 1960-1990.

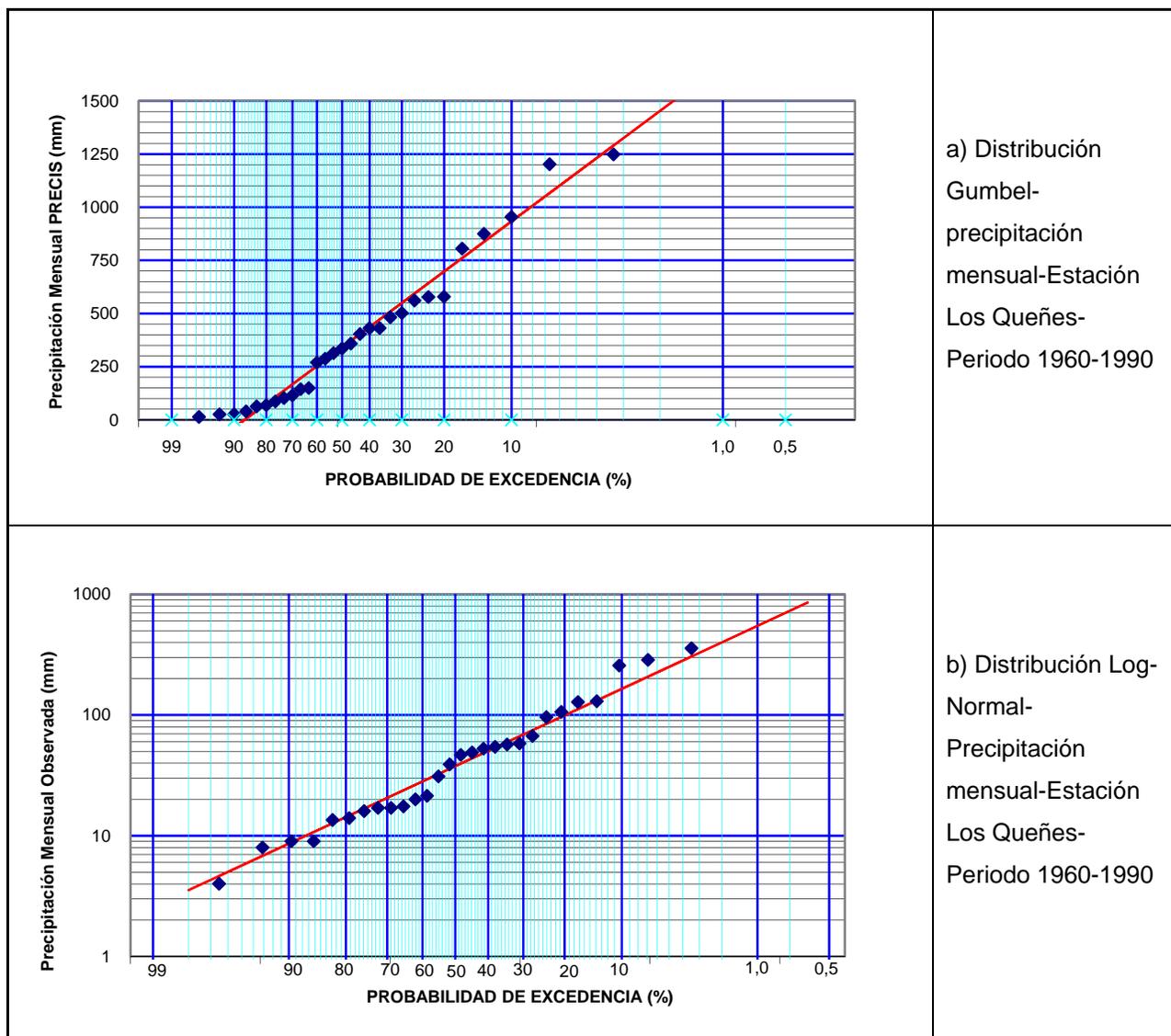
Las variables de interés para el presente estudio corresponden a las precipitaciones mensuales y a las temperaturas mensuales del escenario base y aquellas generadas para el escenario A2, ya que representa el caso más desfavorable.

Antes de utilizar las variables para el escenario futuro estudiado, fue necesario validar la información del modelo PRECIS en el periodo base 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:

1. Se extrae la información de la variable simulada con el modelo PRECIS,  $Sp$ , en el período concurrente con información observada en la estación,  $So$ .
2. Se realiza el análisis de frecuencia a los valores mensuales de la serie  $Sp$ .
3. Se realiza el análisis de frecuencia a los valores mensuales de la serie observada en la estación,  $So$ .
4. Para valores prefijados de probabilidad de excedencia se extraen los valores asociados de cada muestra y se establece la relación entre ambos valores.
5. La relación establecida se considera válida para cualquier situación futura.

En la Figura 5-1 se muestra el paso 2 y 3 correspondientes a los análisis de frecuencia de los valores mensuales de precipitación del periodo concurrente 1960-1990 para el mes de Abril. En general, las distribuciones utilizadas se ajustan a los datos. En la imagen a) se muestran los resultados observados para PRECIS mientras que en la imagen b) se presentan los resultados de los datos observados. El resto de los meses se encuentran disponibles en el Anexo digital.

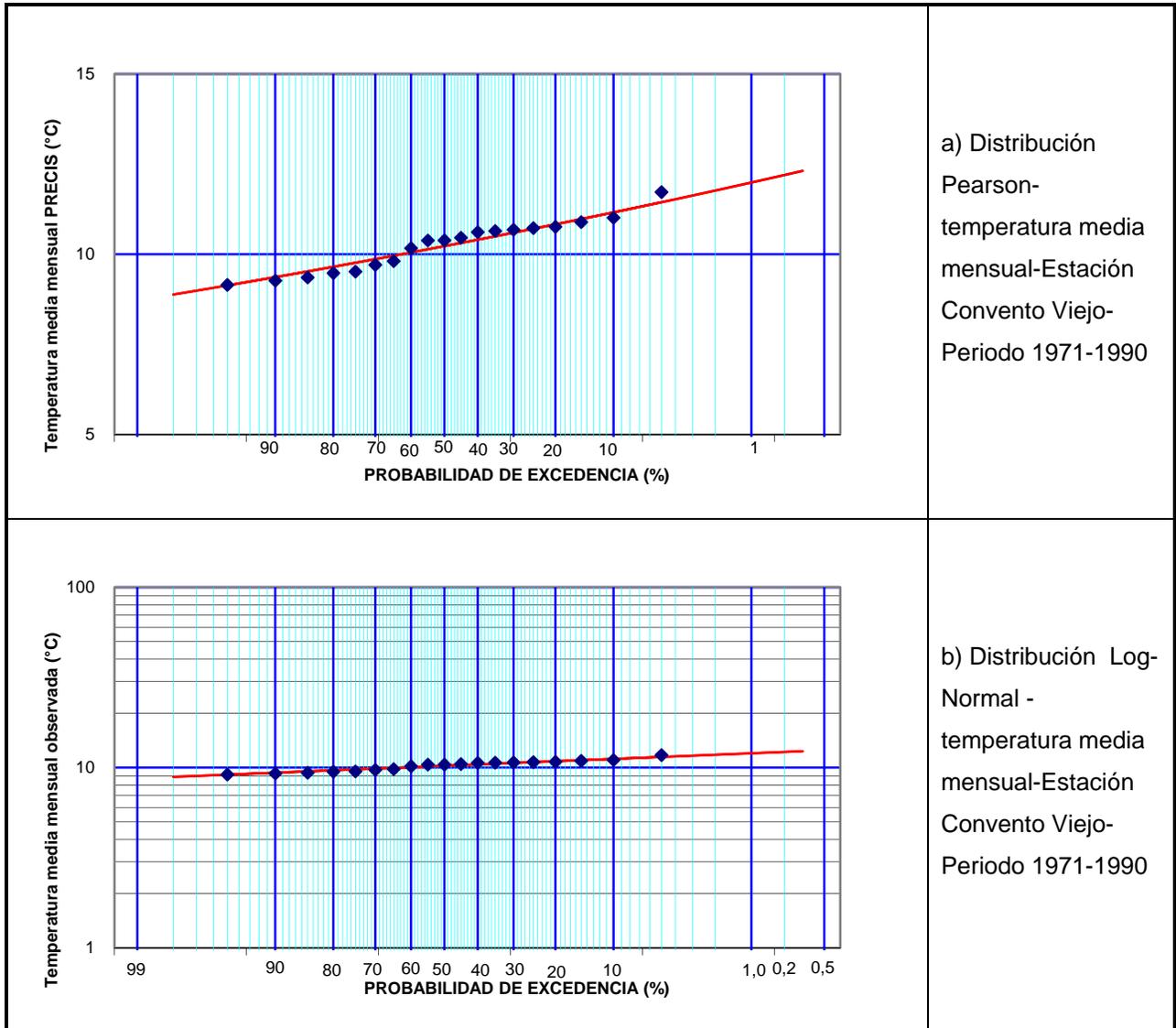
**Figura 5-1: Análisis de Frecuencia Precipitación Mensual. Mes de Abril**



De igual manera, la Figura 5-2 muestra los análisis de frecuencia de los pasos 2 y 3 para los valores mensuales de la temperatura en el mes de Agosto, pero esta vez el periodo

concurrente 1971-1990. En la imagen a) se muestran los resultados observados para PRECIS mientras que en la imagen b) se presentan los resultados de los datos observados. Las distribuciones se ajustan a los datos de temperatura mensual. El resto de los meses se encuentran disponibles en el Anexo.

**Figura 5-2: Análisis de Frecuencia Temperatura mensual. Mes Agosto.**



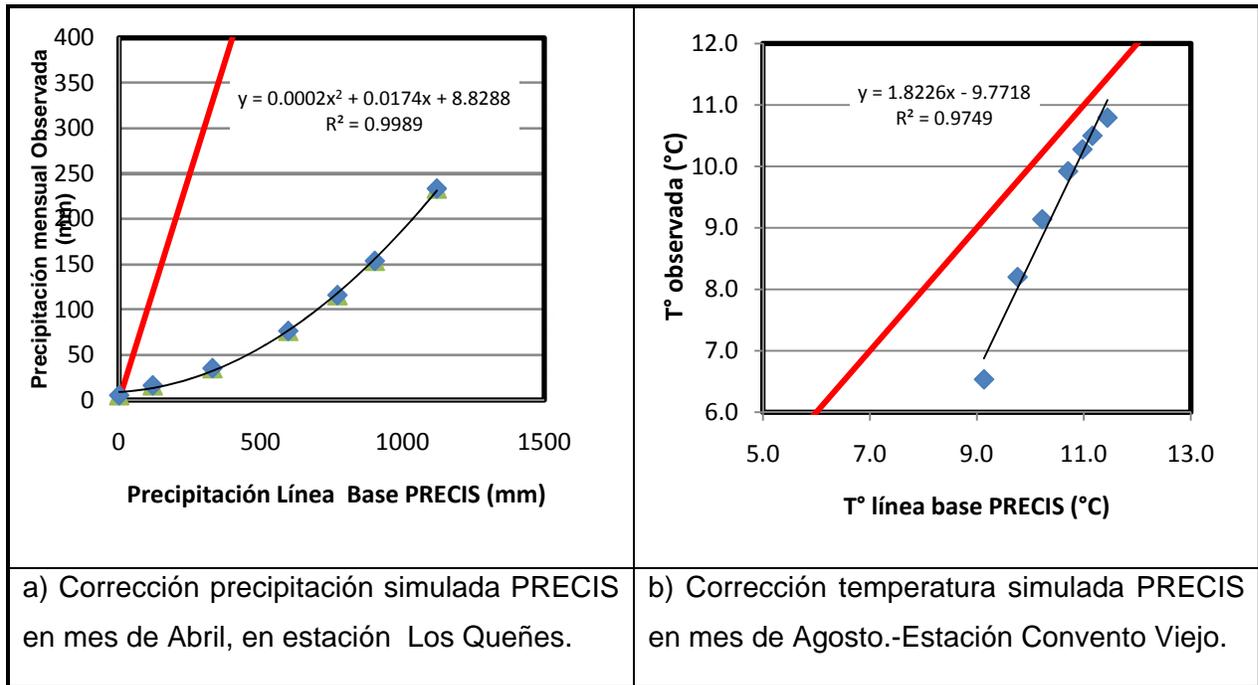
Cabe destacar, que la distribución de ajuste para un mes de los datos PRECIS rara vez sigue la misma distribución de los datos observados en ese mismo mes (Ver Tabla 5-1). Esto indica que el modelo PRECIS se fija en otros parámetros para generar los datos los que no necesariamente respetan la distribución de los datos observados.

**Tabla 5-1: Distribuciones de ajuste**

Mes	Precipitación		Temperatura	
	Obs	PRECIS	Obs	PRECIS
<b>Ene</b>	Pearson	Log-normal	Pearson	Normal
<b>Feb</b>	Log-Pearson	Log-normal	Pearson	Log-normal
<b>Mar</b>	Log-Pearson	Gumbel	Pearson	Pearson
<b>Abr</b>	Log-normal	Gumbel	Pearson	Log-normal
<b>May</b>	Log-normal	Normal	Log-normal	Pearson
<b>Jun</b>	Normal	Gumbel	Pearson	Log-normal
<b>Jul</b>	Gumbel	Log-normal	Normal	Normal
<b>Ago</b>	Gumbel	Gumbel	Pearson	Log-normal
<b>Sep</b>	Log-normal	Gumbel	Log-pearson	Gumbel
<b>Oct</b>	Normal	Gumbel	Pearson	Pearson
<b>Nov</b>	Gumbel	Log-normal	Log-pearson	Log-normal
<b>Dic</b>	Gumbel	Log-normal	Pearson	Normal

La relación de los datos de PRECIS con los datos observados (paso 4) se presenta en la Figura 5-3. Se puede apreciar que las correlaciones son cercanas a 1, luego la transformación de los datos generados PRECIS para utilizarlos como entrada al modelo WEAP es válida. En la imagen a) y b) de la Figura 5-3 la línea de 45° representa la simulación perfecta de las series de precipitación en el periodo concurrente 1960-1990 por parte del modelo PRECIS. La condición real que se aprecia es que el modelo sobrestima las precipitaciones. En el caso de la imagen b) de la Figura 5-3 se puede apreciar que las temperaturas medias también son sobrestimadas por el modelo PRECIS y que para temperaturas más altas la sobreestimación tiende a disminuir.

**Figura 5-3: Corrección parámetros simulados en PRECIS.**



Estas correlaciones permitieron corregir los datos de precipitación mensual y temperatura media mensual de los periodos futuros generados por PRECIS utilizando interpolaciones o extrapolaciones, dependiendo de si los datos futuros estaban o no en el rango de los datos generados por PRECIS para el periodo 1960-1990. En la Tabla 5-2 se señalan cuales datos fueron interpolados y cuales extrapolados.

Para obtener los valores de las variables en el período de 2036 a 2065, se hizo necesario evaluar las tendencias de las series simuladas entre el período base 1960-1990 y el periodo 2071-2100. La metodología establecida para generar las series de las variables atmosféricas en el período de 2036-2065 se resume a continuación:

1. 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 ( $Cv_i = \sigma_i / \mu_i$ ).
2. Para cada mes se calculó la tendencia lineal 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 2036-2065.

3. 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.
4. Dicha serie fue desestandarizada utilizando los estadísticos del período de interés 2036-2065. Las series de precipitación mensual y temperatura media mensual generadas para el periodo 2036-2065 se encuentran en el anexo digital y su tendencia anual se puede visualizar en la Figura 5-4.
5. 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.

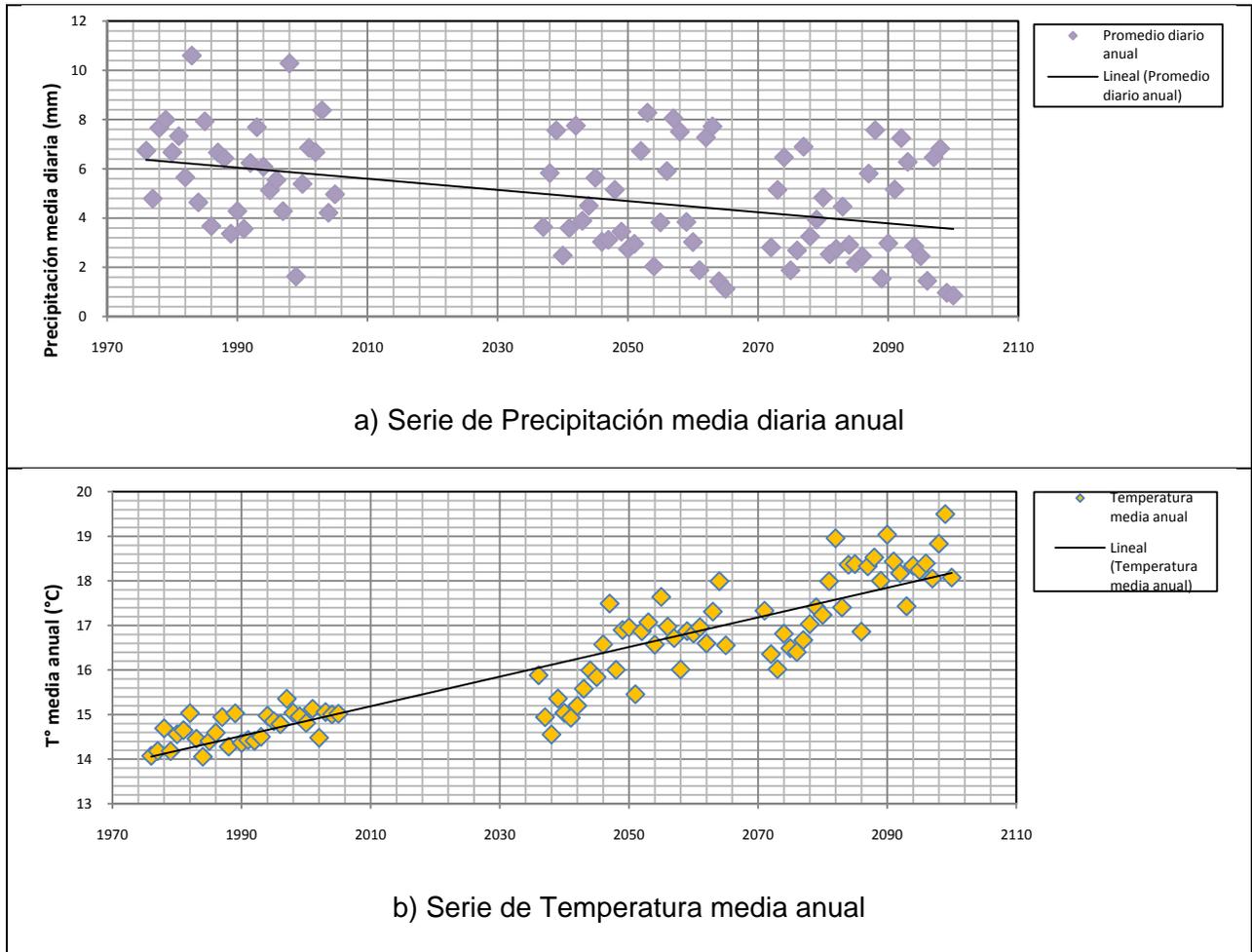
En el anexo digital se presentan las distintas relaciones establecidas para la obtención de las series de precipitación mensual y temperatura media mensual que fueron necesarias para generar las series de caudales con el modelo WEAP.

**Tabla 5-2: Tipo de corrección**

Mes	Precipitación		Temperatura	
	periodo 1036-2065	periodo 2071-2100	periodo 1036-2065	periodo 2071-2100
Ene	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Valores extrapolados	Valores extrapolados
Feb	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Valores extrapolados	Valores extrapolados
Mar	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Valores extrapolados	Valores extrapolados
Abr	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Valores extrapolados	Valores extrapolados
May	2 datos menores a 144,5 mm son extrapolados	2 datos menores a 144,5 mm son extrapolados	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado
Jun	2 datos mayores a 1.871,1 mm y 1 dato menor a 329,6 mm son extrapolados	2 datos mayores a 1.871,1 mm y 1 dato menor a 329,6 mm son extrapolados	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado
Jul	1 dato mayor a 1.774 mm y 2 datos menores a 222,6 mm son extrapolados	3 datos menores a 222,6 mm son extrapolados	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado
Ago	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado
Sep	1 datos mayores a 884,4 mm son extrapolados	1 datos mayores a 884,4 mm son extrapolados	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado
Oct	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado
Nov	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Valores extrapolados	Valores extrapolados
Dic	Dentro del rango. Interpolado	Dentro del rango. Interpolado	Valores extrapolados	valores extrapolados

La imagen a) de la Figura 5-4, que representa la precipitación, muestra una clara tendencia hacia la baja, en tanto para la temperatura que se aprecia en la imagen b) se observa el incremento de ésta a medida que pasan los años.

**Figura 5-4: Series de tiempo anuales**



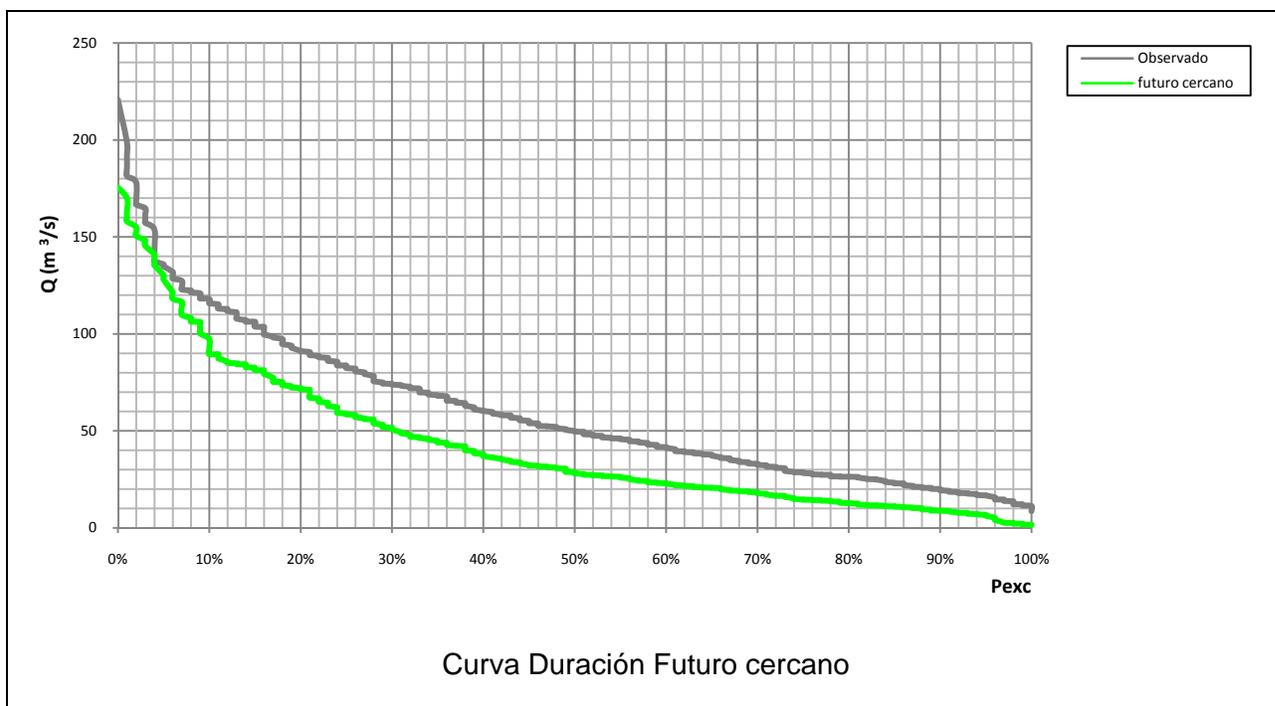
## 5.2 Resultados futuros

### 5.2.1 Periodo 2036-2065

Las series de datos futuros de precipitación y temperatura para el periodo 2036-2065 generados anteriormente fueron introducidos al modelo ya calibrado. Con las serie de caudales medios mensuales futuros simulados con WEAP de la Tabla 5-3 se obtuvo la curva duración, los volúmenes anuales y los caudales medios mensuales promedio del periodo futuro. Además, se puede indicar que mensualmente los caudales sufren una disminución que va desde un 13% en el mes de noviembre, a un 42% en el mes de enero, siendo los más afectados los meses entre enero y mayo, condición dada por el adelantamiento de el proceso de deshielo, causado

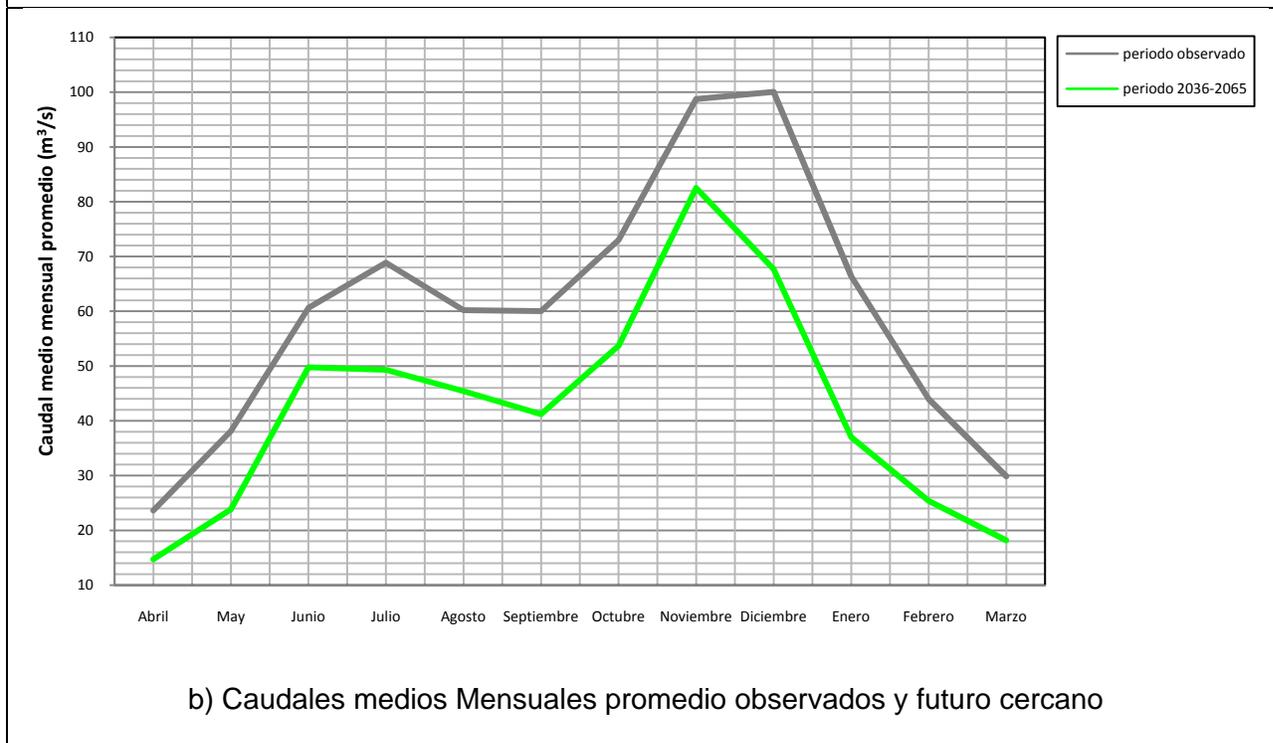
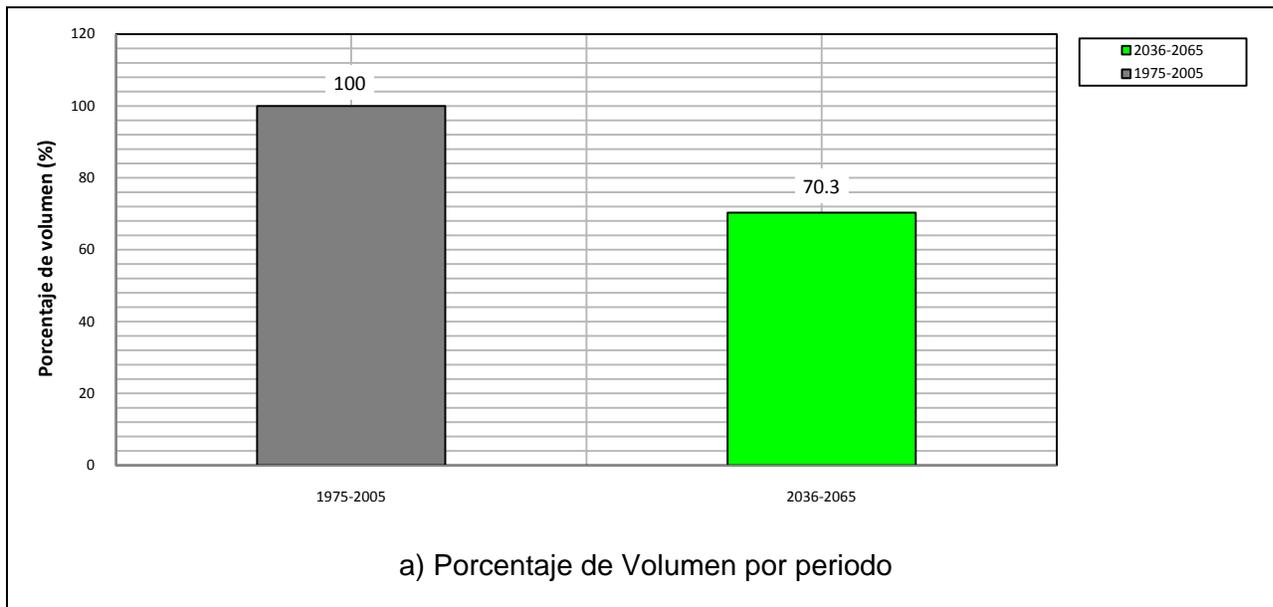
principalmente por el aumento de temperatura mensual de los meses de octubre y noviembre. Los resultados se presentan gráficamente en la Figura 5-5 y la Figura 5-6 acompañados de los valores observados en el periodo de 1975-2005.

**Figura 5-5: Resultados futuros periodo 2035-2065.**



Comparando las curvas de la Figura 5-5, se observa la existencia de un decaimiento de los caudales medios mensuales en el periodo futuro que se reflejaría como una baja en la cantidad de agua. Respecto a los resultados de la Figura 5-6, la imagen a) muestra un disminución en el volumen de agua que sale de la cuenca de alrededor de un 30%. En la imagen b) se observa la baja de los caudales medios mensuales promedios aunque se conserva el régimen nivo-pluvial del Río Teno. Esta baja se atribuiría a la disminución de la precipitación sobre la cuenca y al aumento de la temperatura que generaría una mayor evapotranspiración. Cabe destacar que ambas series tienen un largo de 30 años y el punto de medición es el mismo.

**Figura 5-6: Resultados futuros periodo 2035-2065.**



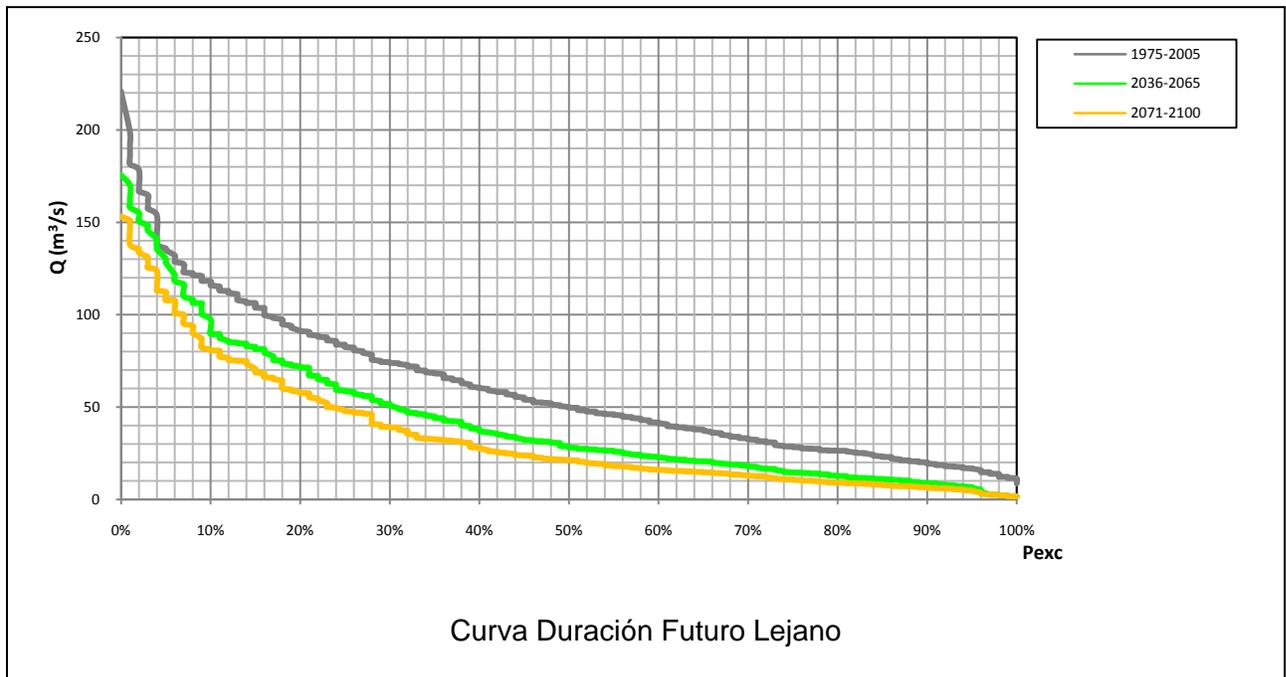
**Tabla 5-3: Serie de caudales medios mensuales periodo 2035-2065**

Año/Mes	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
2035 - 2036	2.7	2.6	2.6	2.4	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.6	1.7	2.7
2036 - 2037	5.1	31.8	28.6	48.9	24.7	21.8	34.4	51.1	31.6	9.1	11.4	13.7
2037 - 2038	7.7	7.7	32.2	89.9	85.3	58.8	62.4	107.3	83.4	52.0	38.6	23.7
2038 - 2039	21.0	28.1	72.6	59.6	92.3	84.8	84.5	136.2	160.4	107.6	71.5	26.7
2039 - 2040	16.7	14.3	39.5	23.6	18.3	26.3	35.3	39.7	24.3	11.0	13.8	14.4
2040 - 2041	16.5	11.6	23.4	31.1	34.6	38.5	44.0	49.4	36.3	18.8	21.6	14.5
2041 - 2042	14.6	14.7	130.3	71.2	47.2	55.7	64.6	139.9	163.0	121.2	66.8	46.9
2042 - 2043	19.4	24.3	48.8	57.1	42.4	30.5	56.1	58.9	57.7	27.1	22.0	20.9
2043 - 2044	12.7	11.4	77.4	41.6	46.4	33.4	52.7	73.6	71.3	27.4	28.8	22.0
2044 - 2045	16.5	12.8	62.8	42.1	88.7	53.2	87.4	105.1	85.1	54.4	31.6	20.6
2045 - 2046	14.2	26.5	21.0	40.0	32.4	31.6	45.0	62.2	32.1	11.5	12.9	10.8
2046 - 2047	8.7	10.2	53.8	21.1	15.2	16.2	23.4	71.4	30.7	11.1	12.6	17.5
2047 - 2048	11.4	13.5	67.1	76.0	58.3	36.9	63.0	89.6	68.6	32.1	25.1	17.2
2048 - 2049	11.8	16.6	64.2	36.2	27.6	25.9	35.6	73.0	42.3	13.6	16.0	11.5
2049 - 2050	9.7	10.7	45.4	24.5	19.0	25.0	33.7	45.9	23.1	9.1	10.7	10.5
2050 - 2051	10.6	21.5	49.1	20.7	21.9	20.5	31.6	53.0	23.8	8.7	10.5	8.9
2051 - 2052	14.0	8.9	56.1	65.9	72.5	81.3	73.1	121.6	129.1	82.5	42.3	19.5
2052 - 2053	35.3	40.3	147.5	121.0	75.0	58.6	106.2	155.2	152.4	116.5	49.1	20.6
2053 - 2054	21.1	27.3	17.5	19.1	21.0	24.2	28.2	33.9	17.9	8.5	9.5	8.4
2054 - 2055	8.8	8.8	29.8	22.8	46.8	36.3	44.5	65.0	42.7	18.5	17.8	12.2
2055 - 2056	11.2	72.1	33.3	84.1	79.4	43.2	84.9	128.2	85.3	32.1	21.8	14.0
2056 - 2057	11.6	108.3	158.0	85.7	81.3	56.5	100.8	150.6	141.2	75.3	37.8	23.2
2057 - 2058	51.7	34.0	26.5	114.1	84.4	75.2	97.4	148.3	135.4	81.3	58.5	26.7
2058 - 2059	20.1	26.6	32.1	30.8	42.7	39.4	51.9	82.6	48.0	18.5	20.2	25.7
2059 - 2060	12.7	27.1	17.6	28.0	31.4	30.8	36.3	45.5	23.6	9.5	11.0	34.6
2060 - 2061	12.0	20.8	14.4	18.7	15.3	19.0	26.4	27.4	12.5	6.4	6.7	11.6
2061 - 2062	11.1	13.8	100.2	46.3	50.8	106.3	109.9	147.6	118.1	55.9	34.4	29.6
2062 - 2063	14.8	59.3	28.9	145.5	87.3	83.0	74.3	170.1	175.5	79.6	46.7	23.0
2063 - 2064	15.1	14.4	10.2	11.7	14.5	16.6	22.3	26.9	13.1	7.5	7.9	7.8
2064 - 2065	7.3	9.1	6.2	5.3	7.0	7.7	7.8	19.8	5.2	4.1	4.2	6.9
<b>Promedio</b>	15.3	25.1	51.5	51.1	47.0	42.7	55.8	85.5	70.1	38.3	26.3	18.8
<b>Desviación Est.</b>	8.9	21.5	38.7	34.5	27.0	24.1	27.5	44.9	52.6	35.8	18.1	8.8
<b>Promedio/Obs</b>	23.6	38.2	60.6	68.9	60.2	60.0	73.0	98.8	100.1	66.4	44.0	29.9
<b>Desviación Est./Obs</b>	14.1	31.6	40.3	42.2	40.9	26.4	23.7	34.5	49.2	35.9	14.8	9.5
<b>Variación prom (%)</b>	35.4	34.3	15.0	25.8	21.9	28.9	23.6	13.5	29.9	42.3	40.3	37.2
<b>Variación Desv. Est. (%)</b>	-36.9	-32.0	-3.9	-18.2	-34.0	-8.7	16.3	29.8	7.0	-0.2	22.9	-6.7

### 5.2.2 Periodo 2071-2100

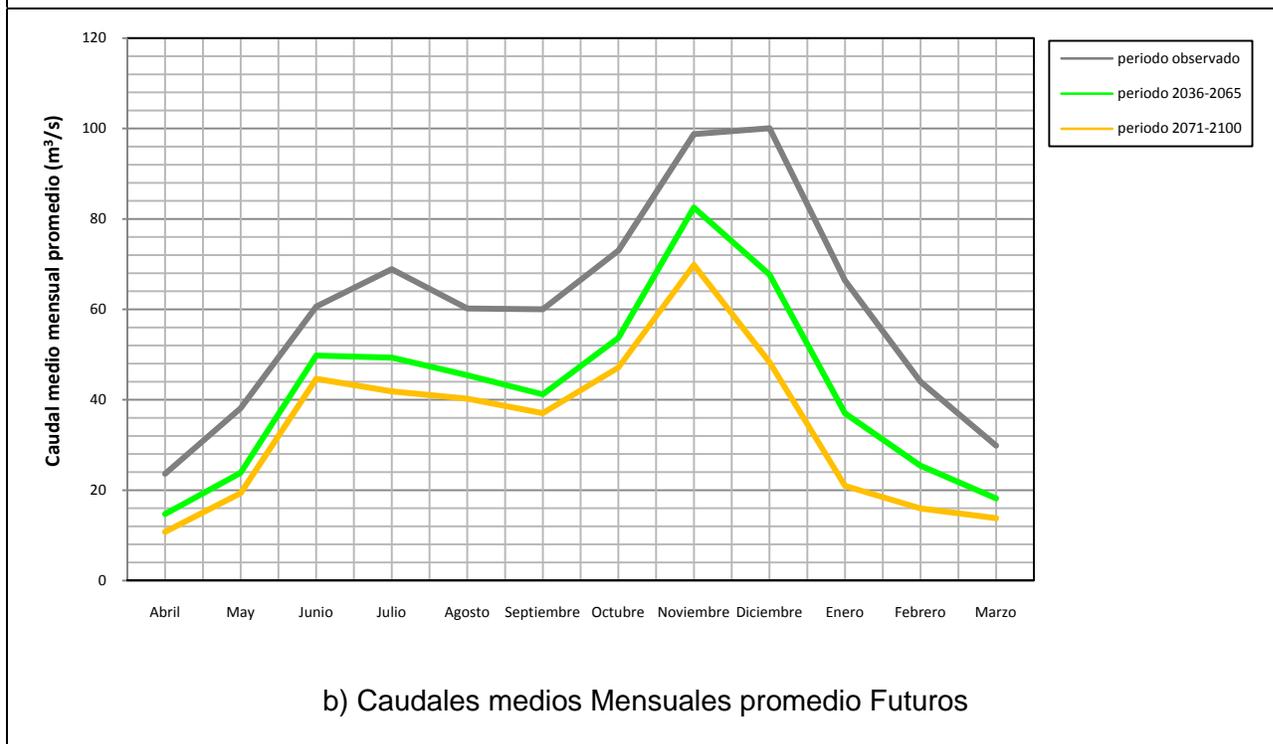
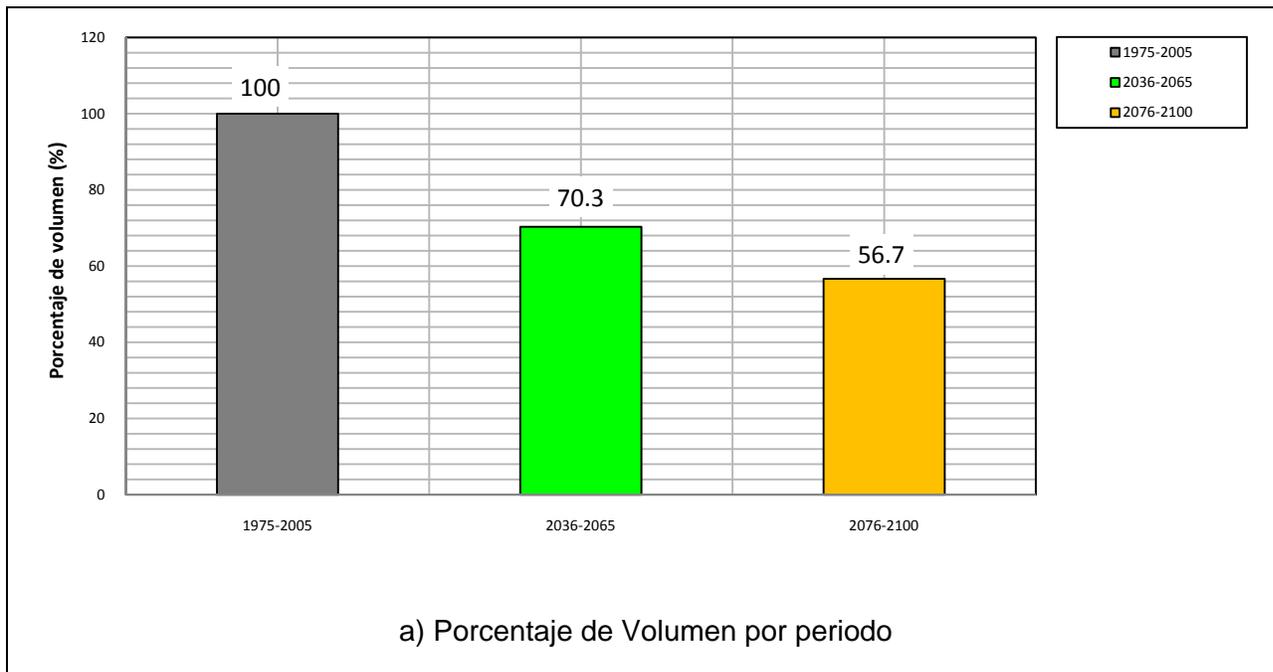
Las series de datos futuros de precipitación y temperatura para el periodo 2071-2100 fueron introducidos al modelo ya calibrado. Con las series de caudales medios futuros simulados con WEAP de la Tabla 5-4 se obtuvo la curva duración, volúmenes anuales de salida y caudales mensuales promedio del periodo futuro. Los resultados se presentan gráficamente en la Figura 5-7 y la Figura 5-8 acompañados de los valores observados en el periodo de 1975-2005 y los generados para el periodo 2036-2065.

**Figura 5-7: Resultados futuros periodo 2071-2100.**



Para el periodo 2071-2100 se mantiene la tendencia a la baja de los caudales medios de la cuenca como se visualiza en la Figura 5-7 y la Figura 5-8. La imagen b) de la Figura 5-8 muestra que a pesar de los cambios de las variables meteorológicas el régimen de la cuenca sigue siendo nivo-pluvial.

**Figura 5-8: Resultados futuros periodo 2071-2100.**

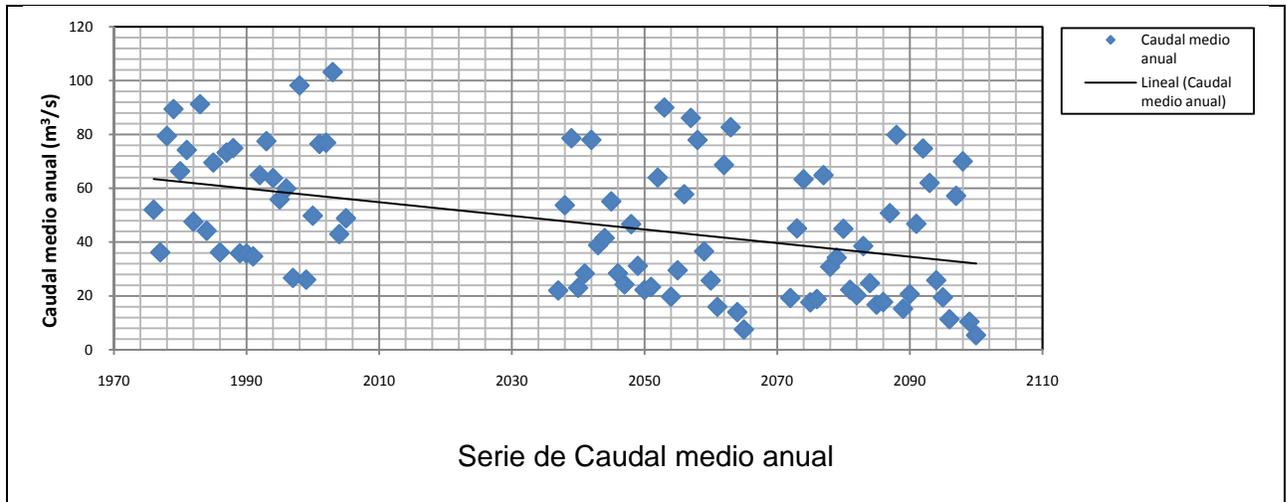


De la Tabla 5-4 se puede indicar que mensualmente los caudales sufren una disminución mayor que para el periodo 2036-2065 lo que confirma la tendencia a la baja de los caudales medios

mensuales en la cuenca. La variación va desde un 24% en el mes de Junio a un 67% en el mes de enero, siendo los más afectados los meses entre enero y mayo, condición dada por el adelantamiento del proceso de deshielo causado principalmente por el aumento de temperatura media mensual de los meses de octubre y noviembre. Los meses menos afectados son Junio y Noviembre que representan los nuevos peaks del régimen nivo-pluvial.

Finalmente, en la Figura 5-9 se presentan las series de caudales medios anuales del periodo analizado. Se aprecia una clara tendencia hacia la baja para los periodos futuros.

**Figura 5-9: Serie de caudal medio anual**



**Tabla 5-4: Serie de caudales mensuales promedio periodo 2071-2100**

Año/Mes	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
2071 - 2072	1.98	15.89	15.40	33.31	15.96	15.57	19.67	33.10	12.40	4.99	5.96	10.14
2072 - 2073	5.23	5.68	25.12	80.50	74.93	54.16	56.75	95.02	78.07	22.55	19.21	14.56
2073 - 2074	14.23	21.59	65.89	50.81	82.27	73.41	78.44	125.38	113.32	64.48	47.49	19.31
2074 - 2075	13.25	12.48	32.72	16.79	13.50	21.51	27.59	30.28	15.84	7.68	8.36	10.91
2075 - 2076	10.88	8.63	13.66	21.37	25.13	30.65	31.43	37.13	19.52	8.33	10.04	9.44
2076 - 2077	9.51	10.52	130.37	64.46	46.14	52.22	59.41	131.16	114.18	76.65	46.88	37.70
2077 - 2078	15.39	20.19	41.33	47.25	38.53	25.97	49.34	51.19	34.66	14.08	14.35	16.76
2078 - 2079	10.13	9.68	74.92	34.77	38.95	31.18	46.71	65.57	46.51	15.73	18.32	18.74
2079 - 2080	12.77	10.63	57.59	35.07	80.47	47.68	77.18	90.02	69.70	23.78	17.96	15.07
2080 - 2081	11.03	21.80	17.25	32.24	26.02	28.26	37.57	48.16	19.42	8.39	9.12	7.97
2081 - 2082	7.03	8.88	49.55	18.43	12.69	15.12	20.05	59.59	21.16	7.66	8.53	14.87
2082 - 2083	8.76	11.02	62.96	67.47	55.22	35.37	54.70	74.98	49.47	15.38	14.59	11.45
2083 - 2084	8.95	13.31	58.86	28.27	21.41	22.94	31.27	59.16	26.07	8.74	10.18	8.15
2084 - 2085	7.48	9.08	39.53	17.67	15.68	20.75	24.47	32.63	14.17	6.18	6.56	7.15
2085 - 2086	7.24	16.31	40.50	16.05	19.48	17.76	24.00	38.92	14.36	5.99	6.53	5.93
2086 - 2087	9.08	6.57	49.93	56.24	66.11	68.26	65.06	107.67	91.63	45.90	27.51	14.40
2087 - 2088	23.82	32.07	146.02	112.94	67.40	60.08	112.33	150.07	135.18	68.73	31.85	15.40
2088 - 2089	16.39	22.70	14.64	13.56	16.94	20.45	21.88	24.82	11.25	6.80	6.99	6.23
2089 - 2090	6.77	7.20	22.26	15.04	36.98	30.02	32.58	47.22	23.75	8.66	9.50	8.28
2090 - 2091	8.05	58.05	26.65	74.14	75.07	40.76	75.11	103.79	53.66	17.96	14.96	10.43
2091 - 2092	9.39	91.30	153.08	75.46	80.84	58.07	101.50	133.66	110.53	39.28	23.58	18.00
2092 - 2093	32.98	25.20	16.15	100.09	74.35	70.65	86.60	137.84	107.74	39.34	32.51	18.47
2093 - 2094	15.40	21.77	21.89	21.24	32.26	32.93	39.25	57.51	24.70	10.26	11.53	20.73
2094 - 2095	9.52	21.36	13.88	21.13	26.04	25.44	25.69	31.86	13.47	6.79	7.08	30.73
2095 - 2096	8.80	16.22	11.31	12.47	10.98	15.12	17.55	18.11	7.32	4.60	4.57	9.12
2096 - 2097	7.19	10.33	97.88	39.42	46.92	94.01	100.62	127.03	84.51	31.51	22.40	24.66
2097 - 2098	11.96	49.78	23.73	135.66	87.16	81.09	75.34	151.13	123.80	48.02	31.95	16.68
2098 - 2099	12.56	12.99	9.01	8.04	12.08	13.50	14.87	17.21	8.25	5.72	5.73	5.51
2099 - 2100	5.45	7.14	4.88	3.60	5.34	6.03	4.91	13.03	3.47	2.91	2.99	5.44
<b>Promedio</b>	11.1	19.9	46.1	43.2	41.5	38.2	48.7	72.2	49.9	21.6	16.5	14.2
<b>Desviación Est.</b>	5.8	18.0	39.8	32.9	26.3	22.7	28.9	43.8	41.7	20.8	11.9	7.5
<b>Promedio/Obs</b>	23.6	38.2	60.6	68.9	60.2	60.0	73.0	98.8	100.1	66.4	44.0	29.9
<b>Desviación Est./Obs</b>	14.1	31.6	40.3	42.2	40.9	26.4	23.7	34.5	49.2	35.9	14.8	9.5
<b>Variación prom (%)</b>	53.2	47.7	24.0	37.2	31.0	36.3	33.3	26.9	50.1	67.4	62.6	52.4
<b>Variación Desv. Est. (%)</b>	-58.6	-43.3	-1.3	-21.9	-35.8	-14.0	22.2	26.7	-15.2	-42.0	-19.3	-21.1

### 5.3 Análisis de resultados

#### 5.3.1 Estrés hídrico

Existe estrés o déficit hídrico cuando el caudal medio mensual de un mes es inferior al asociado a un valor de referencia escogido para el análisis.

En el análisis del stress hídrico se utilizó la curva de duración de la serie de caudales medios mensuales observados del periodo 1975-2005 para determinar el porcentaje de veces en que se presentó el déficit hídrico, utilizando los valores asociados a las probabilidades de excedencia  $P=75\%$ ,  $85\%$  y  $95\%$  como límites del estrés. En la Tabla 5-5 se indican los valores límites obtenidos de la curva de duración para cada probabilidad de excedencia. Posteriormente se les aplicaron estos límites a las nuevas series de caudales generadas por WEAP con el fin de determinar la variación porcentual del estrés hídrico entre los periodos analizados. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5-10, Figura 5-11 y Figura 5-12.

**Tabla 5-5: Caudales medios mensuales adoptados para el análisis del estrés hídrico**

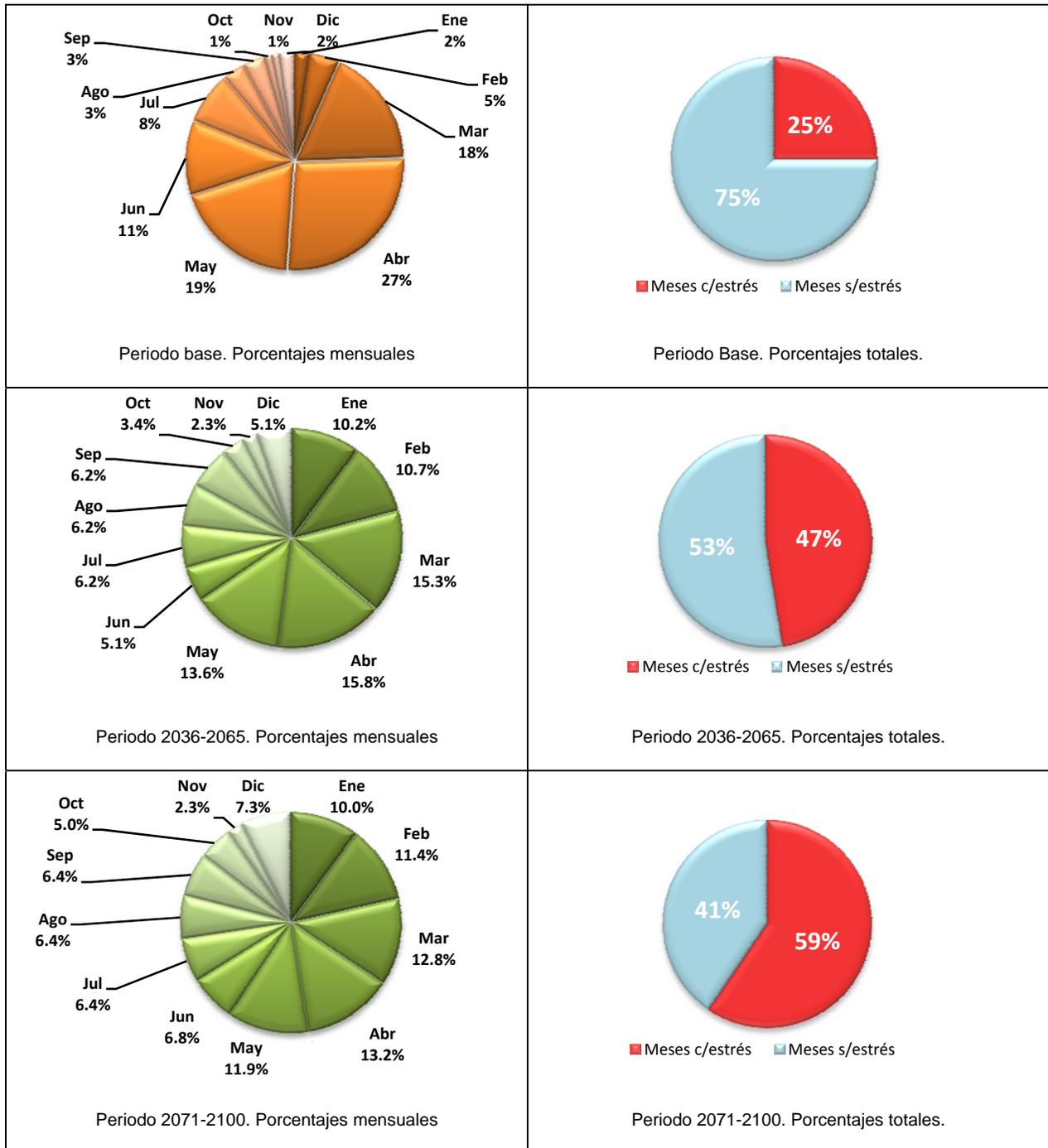
$P_{exc}$	75%	85%	95%
$Q \text{ (m}^3\text{/s)}$	28.53	23.17	16.73

En dichas Figuras se observa un aumento en la cantidad de veces en que se presenta el déficit hídrico en el periodo 2036-2065 con respecto al periodo observado, que se agudiza para el periodo 2071-2100. El incremento más inquietante es para el caudal adoptado  $Q_{95\%}$  actual, en donde el estrés aumenta de un 5% a un 40%, es decir, en el futuro el 40% del tiempo se tiene un caudal medio mensual menor a  $16,73 \text{ m}^3\text{/s}$ .

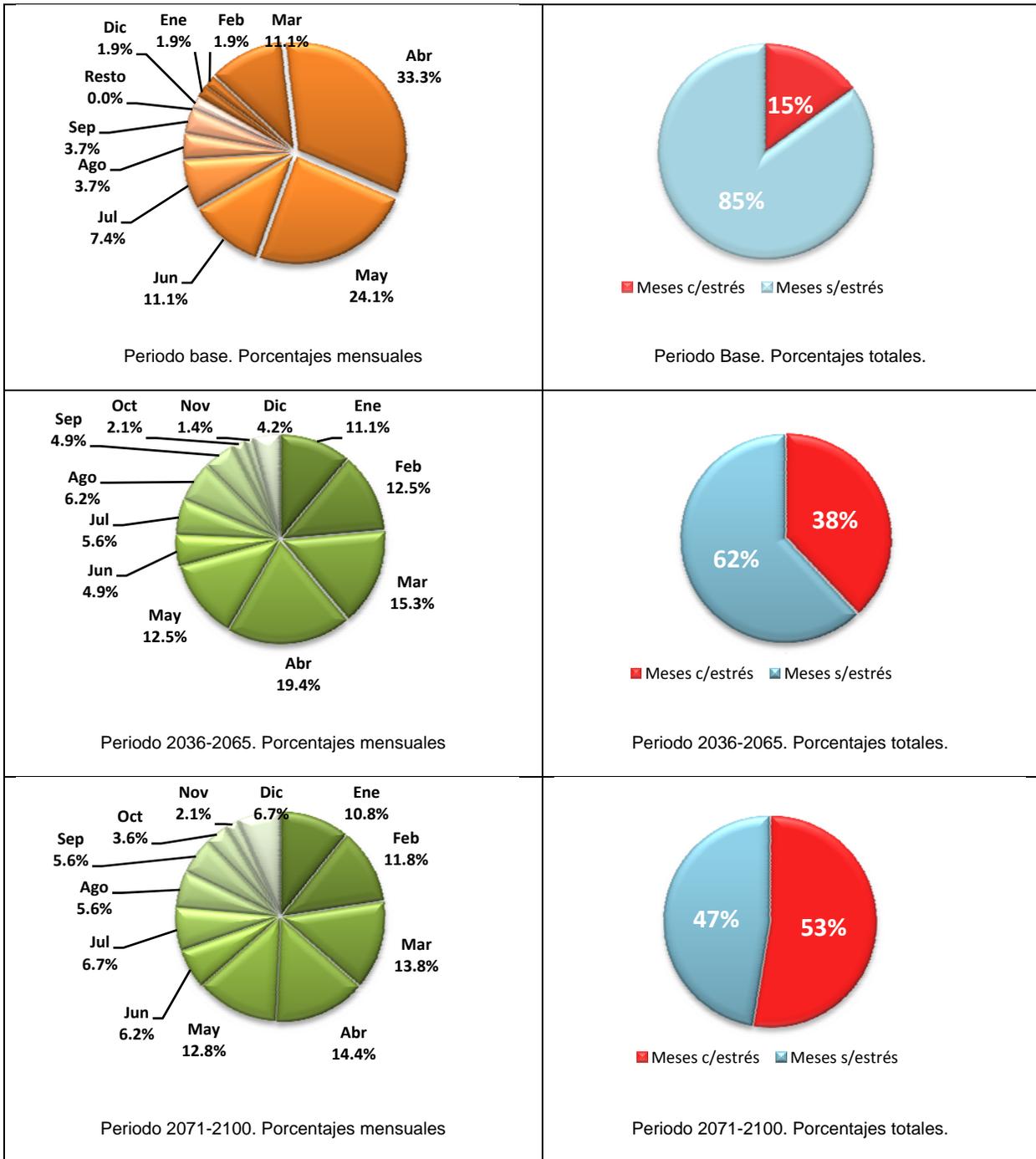
Cuando se adopta el  $Q_{75\%}$  actual igual a  $28,5 \text{ m}^3\text{/s}$  (Figura 5-10) se puede observar que la distribución actual del estrés hídrico a nivel mensual se concentra entre los meses de Marzo y Junio con alrededor del 75% de los casos. Esta distribución evolucionaría a una situación más homogénea en el periodo 2036-2065, en la que la concentración del estrés sería entre los meses de Enero y Mayo, con alrededor del 65,6% en tanto sólo el 49,8%, se centraría entre Marzo y Junio. Ya para el periodo 2071-2100 la concentración entre Enero y Mayo se reduciría a un 59,5% y el estrés entre los meses de Marzo y Junio sería de apenas un 44,7%. Este proceso ocurriría de manera similar para los otros valores de caudal asociados a  $P=85\%$  y  $P=95\%$  en el periodo actual. En estos casos, el estrés hídrico entre los meses de Marzo y Junio variaría, en el primer caso de un 79,6% a un 47,2% y en el segundo de un 94,7% a un 51%, tal como se muestra en la Figura 5-11 y Figura 5-12 respectivamente.

Cabe destacar que Abril es el mes que presenta mayor estrés hídrico independientemente sea el periodo o el límite que se tome para realizar el análisis.

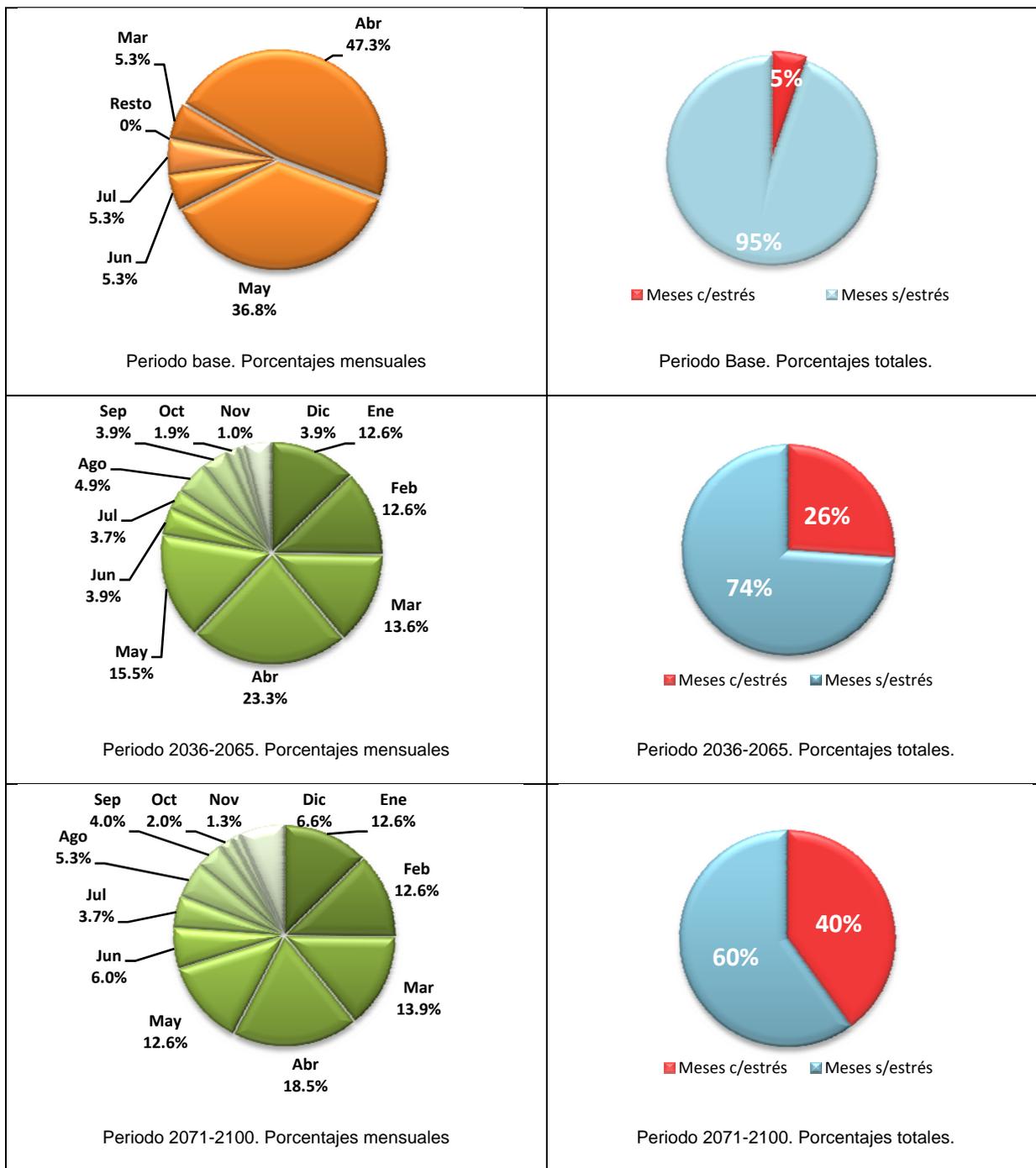
**Figura 5-10: Estrés hídrico Q<sub>75%</sub> actual**



**Figura 5-11: Estrés hídrico Q<sub>85%</sub> actual**

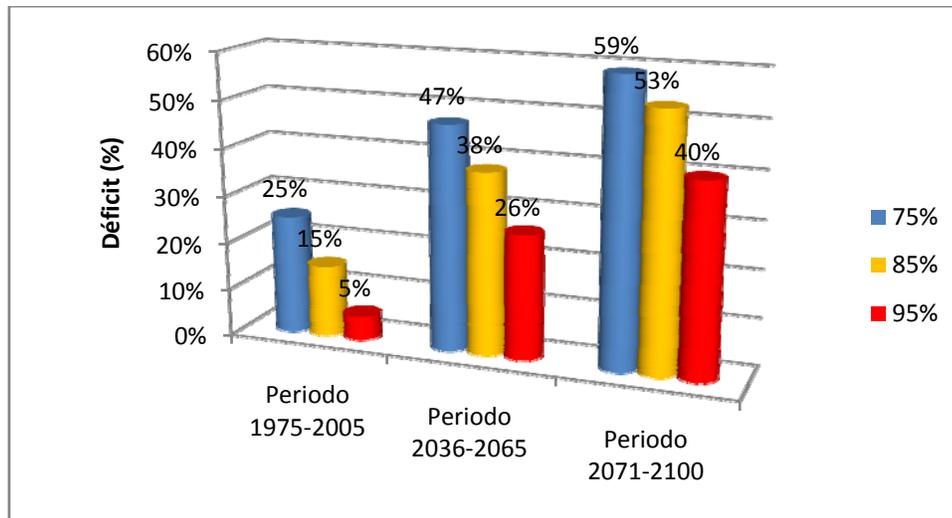


**Figura 5-12: Estrés hídrico Q<sub>95%</sub> actual**



La variación del déficit entre los periodos analizados (observado y futuros) se resume en la Figura 5-13. Es evidente el aumento en la cantidad de meses secos.

**Figura 5-13: Variación del porcentaje de déficit hídrico con demanda  $Q_{75\%}$ ,  $Q_{85\%}$  y  $Q_{95\%}$  del periodo actual (1975-2005)**



### 5.3.2 Curva de duración de meses con déficit continuos.

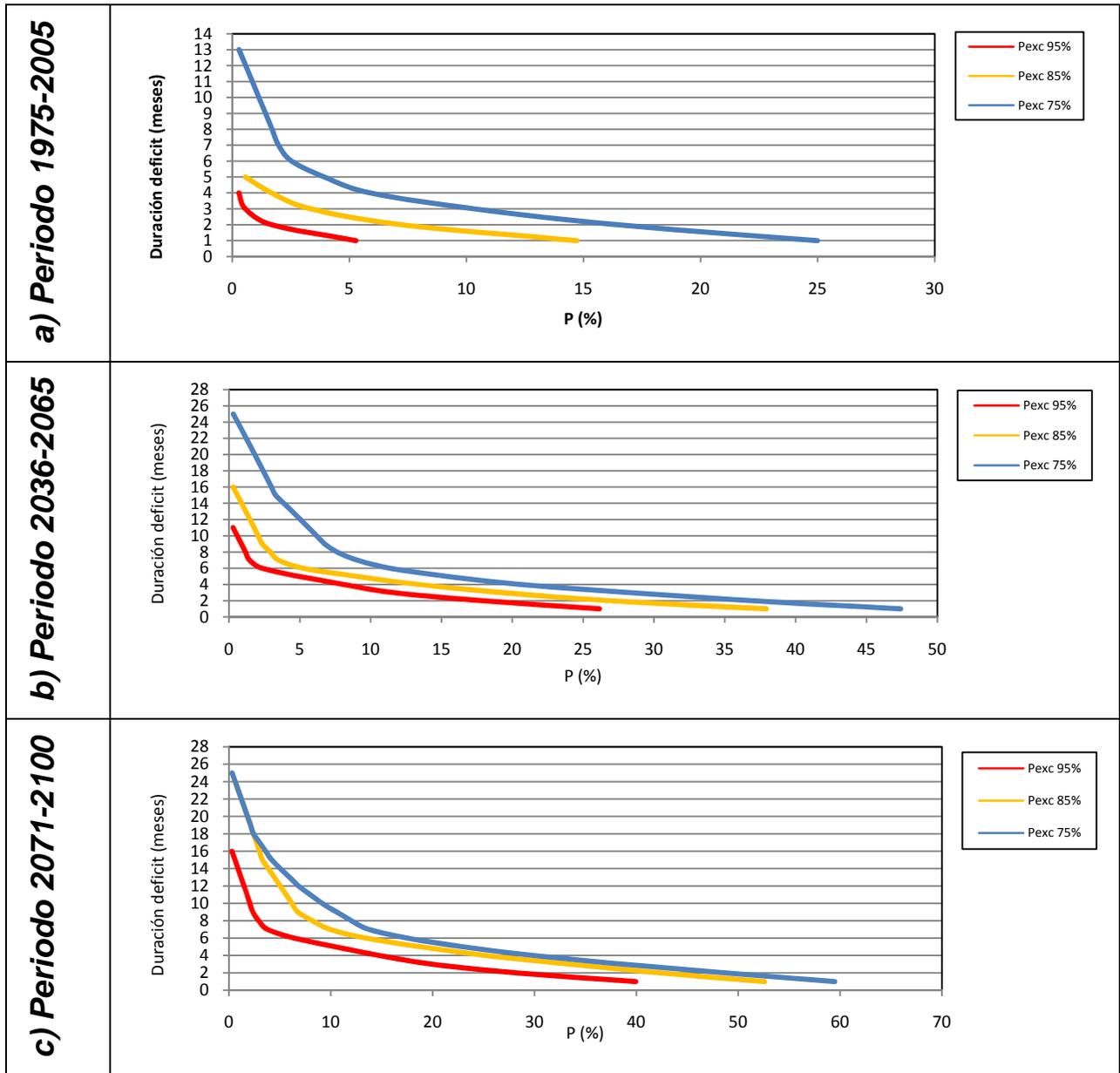
De acuerdo al caudal medio mensual adoptado para  $Q_{95\%}$  actual, se analizó la probabilidad de que meses con déficit ocurrieran de manera continua en los periodos 1975-2005, 2036-2065 y 2071-2100 y se cuantificaron según su duración, por ejemplo, 3 meses de duración. Esto permitió construir las curvas de duración de meses con déficit continuos de dichos periodos.

Para la construcción de la curva se calculó la probabilidad de que se presentaran meses con déficit continuos de una misma duración para cada uno de los tres periodos (casos favorables/casos totales). Esto se realizó para todas las duraciones posibles en cada periodo.

Este análisis se repitió para los caudales medios mensuales adoptados para  $Q_{85\%}$  actual y  $Q_{75\%}$  actual.

Una vez realizado los cálculos se procedió a graficar los valores de los tres periodos en la Figura 5-14. Los cálculos se encuentran en el Anexo digital.

Figura 5-14: Curva duración de meses con déficit continuos



De la Figura 5-14, se puede observar dos tendencias:

- Existe un aumento en la probabilidad de que se presenten meses con déficit hídrico, tal como se mostró anteriormente.
- La probabilidad de que se presenten mas periodos continuos de déficit aumentaría. Por ejemplo, de acuerdo al análisis realizado, la probabilidad de que exista un periodo

continuo con 4 meses con déficit para una demanda de  $Q_{85\%}$  actual es de 2%, lo que aumentaría al 12% para el periodo 2036-2065 y para el periodo 2071-2100 llegaría a un 25%.

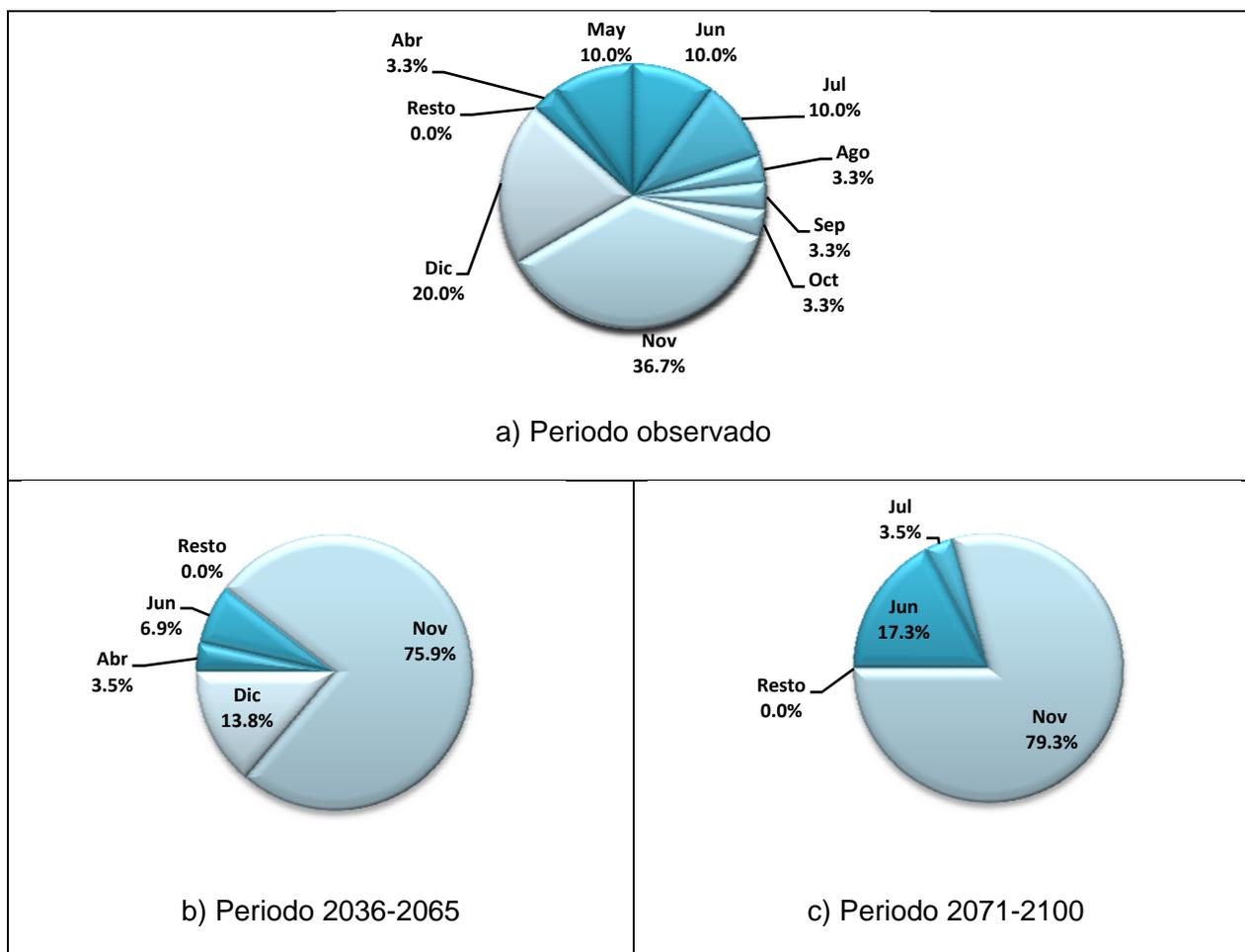
Como se puede observar en la imagen c) de la Figura 5-14, la curva de  $Q_{85\%}$  actual se confunde con la curva de  $Q_{75\%}$  actual, esto se debe a que la probabilidad de que existan duraciones de 26 meses con déficit continuos es muy baja y, por lo tanto, la curva de  $Q_{75\%}$  actual no se desplaza hacia arriba y en general para duraciones mayores a 26 meses no aumentará la probabilidad.

### **5.3.3 Análisis de caudales medios mensuales máximos**

Se realizó el análisis de los caudales medios mensuales con el fin de determinar los meses en que presentan las mayores magnitudes. Los porcentajes indicados en la Figura 5-15 corresponden a la proporción de veces en que el caudal medio mensual máximo de un año perteneció a un mes durante los periodos analizados.

En el periodo de deshielo se observa una variación en la distribución de los caudales medios mensuales máximos, que inicialmente parte con un 56,7% de los casos totales repartidos equitativamente entre Noviembre y Diciembre, tal como se ve en la imagen a) de la Figura 5-15. Esta situación cambia para el periodo 2036-2065 (ver imagen b de la Figura 5-15), en donde la concentración de los máximos aumenta a un 89,7% de los casos totales, sin embargo, la 75,9% de estos se presentan en el mes de Noviembre. Posteriormente, para el periodo 2071-2100, presentada en la imagen c) de la Figura 5-15, se muestra una disminución de la concentración de los máximos respecto al periodo 2036-2075 a un 79,3% de los casos totales, pero todos los máximos se generan en el mes de Noviembre. Por otra parte, en el periodo lluvioso se observa una evolución similar a la que se da en el periodo de deshielo. Los caudales medios mensuales máximos en el periodo 1975-2005, de la imagen a), que representan el 30% de los casos totales, se reparten entre el mes de Mayo y Julio; estos disminuyen a un 6,9% de los casos totales, que están concentrados en el mes de Junio (ver imagen b). Finalmente, en el periodo 2071-2100, mostrado en la imagen c), existe un aumento de los casos totales a un 17,3% los que se concentran nuevamente en Junio.

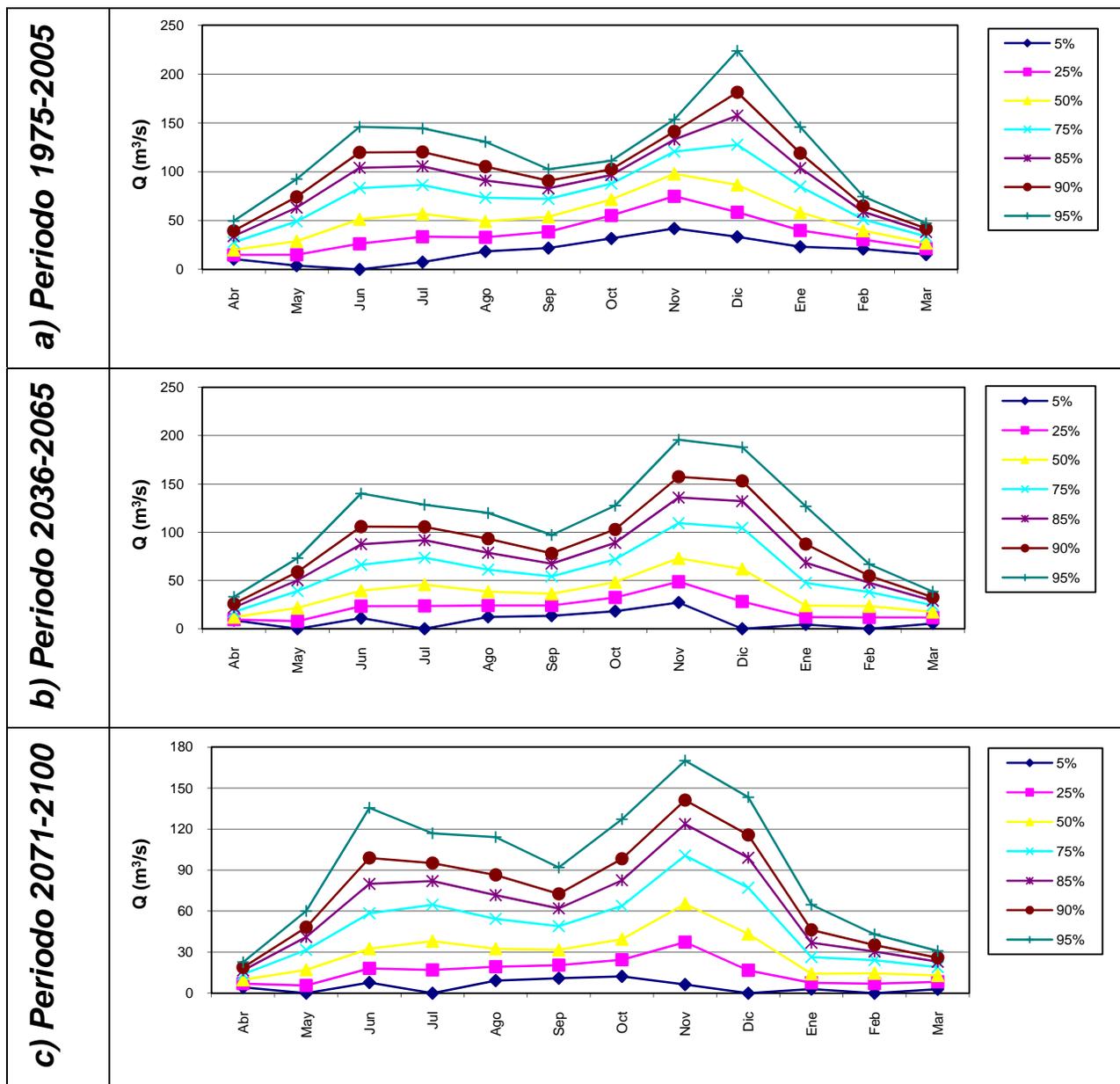
**Figura 5-15: Proporción de caudales medios mensuales máximos por mes**



### 5.3.4 Curvas de variación estacional (CVE)

La CVE permite caracterizar el tipo de régimen de una cuenca. Para analizar los posibles cambios en el régimen de la cuenca andina del Teno se construyeron las CVE para los periodos analizados a partir de las series de caudales medios mensuales simulados por WEAP, estas curvas se presentan a continuación en la Figura 5-16. Con el fin de facilitar la visualización de las variaciones que se han generado en el régimen de la cuenca se ha construido la Figura 5-17 que presenta CVE para el 95%, 75% y 50% de probabilidad de no excedencia. De la Figura 5-16 se concluye que el régimen de la cuenca en el periodo 1975-2005 es nivo-pluvial y que esta característica prevalece para el futuro, aunque las magnitudes de los caudales decaen.

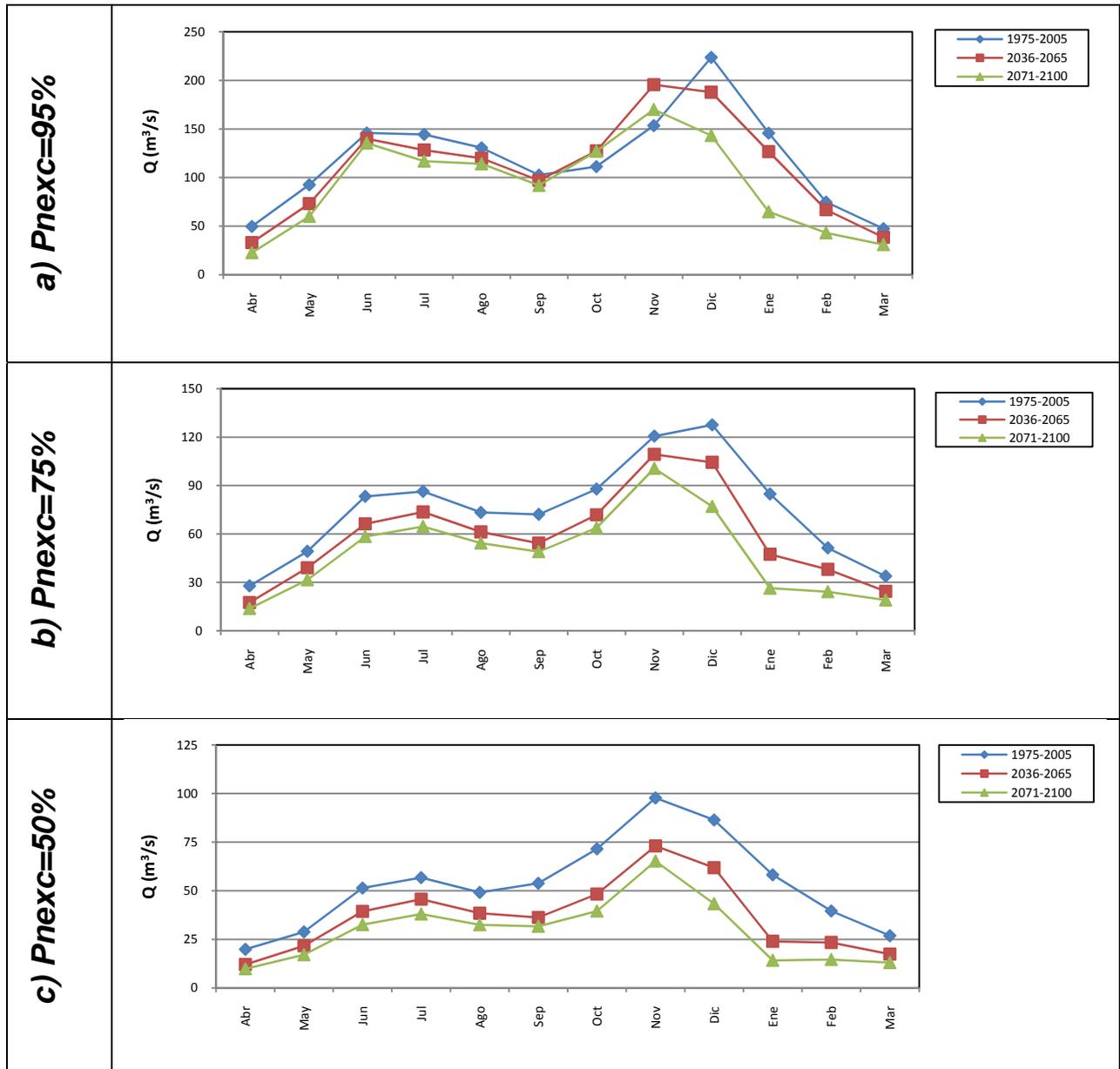
Figura 5-16: CVE periodos de estudio



En la imagen a) de la Figura 5-17 se observa el desplazamiento de la curva de  $P=95\%$  de probabilidad de no excedencia reemplazando el peak de Diciembre por Noviembre, sin embargo, este cambio no afecta el régimen mixto de la cuenca. Por otro lado, en las imágenes b) y c) de la Figura 5-17 se observa una baja de los caudales para el mes de Enero, lo que

indica una aceleración en el derretimiento de las reservas nivales en la cuenca. La variación del periodo lluvioso es considerablemente menor que la que presenta el periodo de deshielo.

**Figura 5-17: Variación de la CVE**



## Capítulo 6. Conclusiones y Comentarios

---

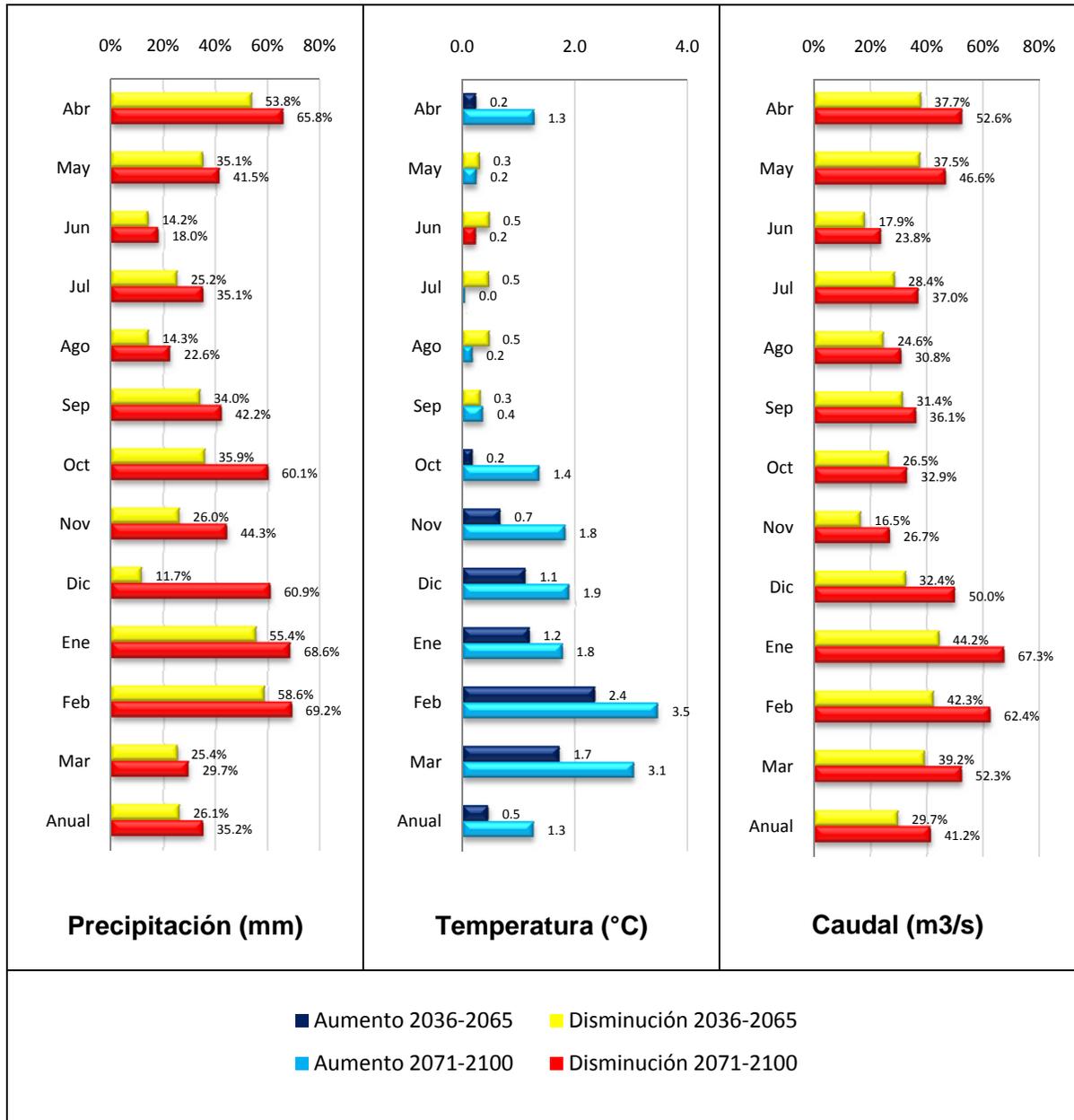
De lo presentado en los capítulos anteriores, se puede concluir que:

1. Tal como lo ha pronosticado el IPCC con los escenarios de emisiones SRES y, en este caso particular con el escenario A2, los resultados obtenidos apuntan a una baja de los recursos hídricos en la cuenca. Esta baja sería cercana al 30% para el periodo 2036-2065 y de un 40% para el periodo 2071-2100 y sería originada principalmente por una disminución de la precipitación en un 26% y 35% y a un aumento en las temperaturas medias anuales cercana a los 0,5°C y 1,3°C para cada periodo respectivamente. Esta tendencia se observa también a nivel mensual, salvo en el caso de la temperatura que presenta valores levemente más fríos en invierno. (Ver Figura 6-1). A su vez, existe un aumento en la probabilidad de que se presenten periodos secos que podrían provocar el desabastecimiento de agua en la cuenca y aguas abajo de ésta, en donde se utiliza el recurso con fines agrícolas o como fuente de sistemas de agua potable.
2. El comportamiento de los caudales en el Río Teno seguirá caracterizado por un régimen nivo-pluvial, con un ligero desplazamiento del peak de primavera, desde el mes de Diciembre al de Noviembre, generado principalmente por el adelantamiento de los deshielos en la parte alta de la cuenca. Además, se muestra una disminución en la diferencia entre las magnitudes de los peaks de invierno y primavera y un aumento de veranos con meses secos, atribuidos a la disminución de las precipitaciones anuales y a un aumento en las temperaturas medias anuales.
3. En la calibración propiamente tal del modelo WEAP, los métodos utilizados en la preparación de los datos meteorológicos representativos resultaron ser eficaces, lo que facilitó su implementación.

Estos métodos fueron principalmente:

- Ponderación de la precipitación de la estación Los Queñes con isoyetas de precipitación anual (curvas isoporcentuales)
- Gradiente de temperatura v/s altura a partir de las mediciones en las estaciones Potrero Grande, Convento Viejo y Termas del Flaco.

**Figura 6-1: Variación de Pp, T y Q futuros con respecto a las series observadas**



4. El modelo PRECIS sobrestima los valores de las variables meteorológicas de temperatura y precipitación, por lo que se debió realizar un trabajo previo para poder correlacionar los datos sobrestimados con los observados, lo que permitió utilizar las series generadas. Además, se realizó una interpolación de los datos de temperatura y

precipitación para el análisis del periodo 2036-2065 considerando la tendencia observada entre las series generadas por el modelo PRECIS en el periodo base 1960-1990 y el periodo 2071-2100, utilizando el supuesto de linealidad.

5. El modelo WEAP simuló apropiadamente las series de caudales medios observados en la cuenca andina del Teno obteniendo un coeficiente Nash and Sutcliffe a nivel mensual igual a 0.748. Sin embargo, es importante recalcar que el modelo no se ajustó a la curva en los meses en que el caudal medio era elevado respecto al resto de la serie. De todas maneras, para los efectos del estudio que considera un análisis probabilístico de los caudales, los resultados fueron satisfactorios.

Cabe destacar que los resultados obtenidos en este estudio son a base de los datos generados solo para el escenario de emisiones A2 por el modelo PRECIS, los que posteriormente se utilizaron para simular las series de caudales con el modelo WEAP, por lo que se recomienda utilizar otros programas de modelación, tanto para generar datos meteorológicos, como para simular los caudales futuros que complementen los resultados de este estudio. Además, en el estudio se impuso que los usos de agua en la cuenca no presentaban cambios y que su influencia en el sistema era despreciable. Esta situación puede presentar cambios causados por ejemplo por un aumento demográfico originado por nuevas oportunidades de trabajo, lo que empeoraría la condición de los periodos analizados. También se debe tener presente que las series de datos obtenidos para el análisis del periodo 2036-2065 en el Capítulo 5 podrían seguir una tendencia distinta a la que se utilizó en el estudio lo que incidiría en los resultados.

En conclusión, el cambio climático afectará la disponibilidad de agua en la cuenca andina del Río Teno por lo que se deberán acoger medidas de adaptación para minimizar los efectos sobre los consumidores y, en especial, aquellos sectores que dependen de este vital recurso para subsistir.

## Bibliografía

- AC Ingenieros Consultores Ltda. (2000). *Levantamiento de bocatomas en cauces naturales, Volumen 1*. Dirección General de Aguas. Santiago, Chile.
- Alley, R. et al. (2007). Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima: Sumário para os Formuladores de Políticas. [http://www.cptec.inpe.br/mudancas\\_climaticas/](http://www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas/).
- 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.
- CADE-IDEPE Ingenieros Consultores. (2004). *Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Río Mataquito*. Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Comisión Nacional de Riego. (n.d.). Sistema de Información Integral de Riego. Consultada Abril-Junio, 2008. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. <http://esiir.cnr.cl/esiir/>.
- Dirección General de Aguas. (1987). *Balance Hídrico*. Ministerio de Obras Públicas. Chile.
- Dirección Meteorológica de Chile. (n.d.). Climas de Chile, región del Maule. Consultada 10 de Abril, 2008. Dirección General de Aeronáutica de Civil. [http://www.meteochile.cl/climas/climas\\_septima\\_region.html](http://www.meteochile.cl/climas/climas_septima_region.html).
- Espíldora B., Brown E., Cabrera G. Y P. Isensee. (1975) *Elementos de Hidrología*. Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Fuenzalida H. (2007). Simulaciones con modelo PRECIS bajo escenarios A2 y B2 del IPCC. *Revista Ambiente y Desarrollo* 23 (2): 9-14. Santiago, Chile.
- Heuminski, A. M. (2007). Uma Síntese do Quarto Relatório do IPCC. *Revista interdisciplinar dos Centros e Núcles da Unicamp*. <http://www.multiciencia.unicamp.br/>

- Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC, (2000), *Informe especial del IPCC Escenarios de Emisiones*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Jack Sieber, David Purkey. (2007). *User Guide, for WEAP21*. Stockholm Environment Institute. Estocolmo, Suecia.
- Lenntech. (n.d.). Explicación de los escenarios de IPCC SRES. Lenntech Water treatment & air purification Holding B.V. <http://www.lenntech.com/espanol/Efecto-invernadero/Escenarios-IPCC.htm>
- Nash, J.E., and J.V. Sutcliffe, (1970), *River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles*, Journal of Hydrology, 10, 282-290.
- Página oficial: Water Evaluation And Planing System WEAP (n.d.) Consultada Abril-Agosto 2008. <http://www.weap21.org/>.
- U.S. Geological Survey. (n.d.). The National Map Seamless Server. Consultada 15 de Mayo 2008. <http://seamless.usgs.gov/>.
- Volcanes Activos de Chile. (n.d.). *Historia / Erupciones Informadas*. El correo de Chile <http://mundo21.tripod.com/600chPETE00.html>

**Figura 3-15: Información disponible y utilizada de las estaciones de medición**

