



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

**PROYECCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS DIARIAS A LARGO PLAZO EN LA  
CUENCA DEL RÍO TINGUIRIRICA EN BAJO LOS BRIONES, BAJO ESCENARIOS  
A1B Y A2 DE CAMBIO CLIMÁTICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CHRISTIAN ARIEL REYES BENAVIDES

PROFESORA GUÍA:

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RICARDO GONZÁLEZ VALENZUELA  
ERNESTO BROWN FERNÁNDEZ

SANTIAGO DE CHILE  
AGOSTO 2012

## RESUMEN

La caracterización hidrológica de una cuenca está definida principalmente por sus variables hidrometeorológicas, las cuales están siendo afectadas al cambio climático y sus consecuencias. Esto implica limitaciones en uso de los recursos hídricos de una cuenca, lo que hace necesaria la utilización óptima de estos recursos a largo plazo. Este trabajo se centra el análisis en la cuenca definida por la estación fluviométrica "Río Tinguiririca Bajo Los Briones", la cual corresponde a una cuenca cordillerana con régimen nivo-pluvial y con aprovechamientos del recurso hídrico principalmente por centrales hidroeléctricas de pasada, sin embargo, aguas abajo de la cuenca, los usos se diversifican.

Los modelos de circulación general de la atmosfera (GCM's), proporcionan series meteorológicas susceptibles de ocurrir para escenarios futuros de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2007). Sin embargo, la escala espacial de los GCM's es del orden de cientos de kilómetros, por lo que es necesario efectuar un escalamiento a nivel local. Se seleccionan aquellos GCM's con escala temporal diaria y escenarios de cambio climático A1B y A2, los cuales se correlacionan con el reanálisis NCEP/NCAR, que corresponde a un modelo meteorológico del siglo XX en base a observaciones reales, que está en continuo ajuste para simular las condiciones climáticas del planeta. Con los resultados de las correlaciones con el reanálisis, se sugiere el modelo ECHAM5 como el de mejor ajuste a la zona de estudio y con el cual se proyectan las variables meteorológicas futuras bajo los escenarios A1B y A2.

Para determinar la disponibilidad del recurso hídrico en el futuro se utiliza el modelo hidrológico WEAP, el cual sólo es posible calibrar con 2 variables forzantes, precipitaciones y temperaturas. Esto, dado que en la cuenca en estudio, la disponibilidad de registros de otras variables es pobre o inexistente. Para la calibración y validación del modelo WEAP, se utiliza el período 1988- 1992. Con estos registros, se calibra y valida el modelo utilizando 4 indicadores de eficiencia, de los cuales, el *Nash-Sutcliffe* con valores logarítmicos (*LOG NS*) y el *Coefficiente de Determinación* con corrección por pendiente ( $wR^2$ ) resultan ser los más adecuados para la cuenca, obteniéndose resultados de 0,73 para LOG NS tanto en los periodos de calibración como validación y de 0,69 y 0,70 para  $wR^2$  en la calibración y validación respectivamente. Dichos resultados dan cuenta de un buen funcionamiento del modelo hidrológico, con lo que es posible simular los caudales futuros para los escenarios de cambio climático.

Con el modelo WEAP calibrado y validado, se simulan los caudales futuros para los períodos de mediano y largo plazo, comprendidos entre los años 2046-2065 y 2081-2100 respectivamente. Se utilizan las variables forzantes, precipitaciones y temperaturas, provenientes del GCM ECHAM5 anteriormente seleccionado y se obtienen los caudales proyectados para los periodos de mediano y largo plazo junto con las variables meteorológicas obtenidas del GCM ECHAM5.

Los resultados de las proyecciones futuras bajo escenarios de cambio climático, se comparan con el período base modelado 1978-1992, para analizar la evolución de las variables hidrometeorológicas en estudio y determinar el efecto del cambio climático en la cuenca bajo los escenarios A1B y A2. Estos resultados se traducen en disminuciones progresivas de las precipitaciones, llegando a finales del siglo XXI a tener solo un 60% de las precipitaciones de la línea base en ambos escenarios, mientras que el aumento de temperaturas llega a 3°C, lo que tiene como consecuencia una disminución en los caudales en la cuenca, que llega a un 60% de la actual como promedio para el período de largo plazo, lo que implica también, cambios en la distribución mensual de los caudales, presentándose un adelanto del período de deshielo y reducción del mismo.

*Dedicado a la memoria de Amanda Arcos Q.E.P.D.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Con este trabajo se da fin a una etapa muy largo en mi vida, en la cual estuvo involucrada mucha gente, en general para bien y que contribuyeron en mi desarrollo y formación, tanto académica como social.

Muchos episodios han pasado en este largo andar y los protagonistas de esta historia se han mantenido en el tiempo... Los más importantes de todos y a quienes les agradezco todo el esfuerzo y apoyo que me han brindado siempre, mi familia, Mamá, Papá, Tito, hermanos y mis dos abuelas, una desde acá y la otra desde el cielo.

Mis amigos de la U, la mayoría desde el primer año, con quienes he compartido innumerables momentos, carretes y vacaciones, y a pesar del tiempo, los lazos se han mantenido. Imposible no destacar a uno... Grande Max! Por el apoyo en los momentos difíciles y la gran amistad brindada desde acá y el extranjero.

Si de amigos se habla, no pueden quedar afuera los del colegio, Tannia y Romina... Gracias por aguantar mi ingratitud y períodos de autismo sin dejarme en el olvido.

Gracias amigos, de la U y del colegio, por hacer del paso por la Universidad algo más entretenido y aguantable!

Finalmente a la última protagonista en integrarse a esta historia, mi polola Lizbeth, quien se transformo en un pilar fundamental en la última etapa, apoyándome, ayudándome y animándome para terminar este trabajo y cerrar este ciclo.

Una mención especial para mi profesara guía Ximena Vargas, por todo el apoyo entregado en el desarrollo de este trabajo, cuando las cosas parecían no resultar nunca, su experiencia y ayuda permitieron terminar con éxito la memoria. Gracias por ser mi profesora guía, es la mejor!

Gracias a todos por sus aportes, cada uno fue fundamental. En particular mi familia, sin ustedes esto no hubiese sido posible, y por sobre todo, gracias a Dios por darme todo lo que tengo y permitirme ser lo que soy. En particular en esta etapa, por darme la fuerza para seguir adelante cuando me encontré superado e incapaz, y por poner a mi lado a una gran persona.

## INDICE DE CONTENIDO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | INTRODUCCIÓN .....  | 1  |
| 1.1   | Objetivos .....   | 2  |
| 1.2   | Organización del informe .....  | 2  |
| 2.    | REVISION BIBLIOGRÁFICA.....   | 3  |
| 2.1   | Cambio climático y escenarios.....  | 3  |
| 2.2   | Modelos de circulación general de la atmosfera (GCM's).....                           | 5  |
| 2.3   | Reanálisis NCEP/NCAR.....   | 7  |
| 2.4   | Modelo WEAP.....  | 8  |
| 2.4.1 | Generalidades del modelo.....   | 8  |
| 2.4.2 | Enfoques del modelo.....  | 8  |
| 2.4.3 | Métodos de simulación.....  | 9  |
| 2.5   | Criterios de eficiencia para modelos hidrológicos.....                                | 12 |
| 3.    | DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....   | 14 |
| 3.1   | Antecedentes generales cuenca del Río Tinguiririca .....                              | 14 |
| 3.2   | Desarrollo hidroeléctrico.....  | 17 |
| 3.3   | Régimen de la cuenca.....   | 18 |
| 3.4   | Información y registros disponibles en la cuenca.....                                 | 19 |
| 4.    | SELECCIÓN DE UN GCM Y SU ESCALAMIENTO.....  | 22 |
| 4.1   | Selección de estaciones base para escalamiento y selección de GCM's .....             | 22 |
| 4.2   | Escalamiento de precipitaciones para GCM's en estación "La Rufina" .....              | 23 |
| 4.2.1 | Escalamiento Espacial.....  | 23 |
| 4.2.2 | Correlaciones de precipitaciones entre GCM's y reanálisis.....                        | 25 |
| 4.2.3 | Escalamiento temporal .....   | 27 |
| 4.3   | Escalamiento de temperaturas para modelo Echam5 en estación "Rengo" .....             | 29 |
| 5.    | MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON EL MODELO WEAP.....  | 30 |
| 5.1   | Construcción del modelo.....  | 30 |
| 5.1.1 | Configuración de la cuenca .....  | 30 |
| 5.1.2 | Datos de entrada para la modelación.....  | 32 |
| 5.1.3 | Variables meteorológicas en los <i>catchment</i> o <i>elementos</i> de la cuenca..... | 33 |
| 5.1.4 | Uso de Suelo .....  | 34 |
| 5.2   | Calibración, validación y análisis de sensibilidad .....                              | 34 |
| 5.2.1 | Criterios de eficiencia para el modelo WEAP .....                                     | 34 |
| 5.2.2 | Calibración del modelo WEAP.....  | 34 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.2.3 | Validación del modelo.....   | 38 |
| 5.2.4 | Análisis de sensibilidad.....  | 40 |
| 6.    | PROYECCIONES BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO .....                       | 44 |
| 6.1   | Generación de series de datos de entrada al modelo .....                     | 44 |
| 6.2   | Resultados de proyecciones bajo escenario A1B y A2 .....                     | 45 |
| 6.2.1 | Curvas de Duración.....  | 45 |
| 6.2.2 | Curvas de variación estacional.....  | 46 |
| 6.2.3 | Variables hidrometeorológicas anuales .....                                  | 49 |
| 6.2.4 | Días de lluvia .....   | 53 |
| 6.2.5 | Rendimiento de la cuenca .....   | 53 |
| 7.    | CONCLUSIONES .....   | 54 |
| 7.1   | Selección de GCM .....   | 54 |
| 7.2   | Modelo hidrológico .....   | 54 |
| 7.3   | Resultados de proyecciones .....   | 55 |
| 8.    | BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS .....   | 56 |
|       | ANEXOS .....   | 58 |
|       | ANEXO A: Estadística original de estaciones utilizadas a nivel mensual ..... | 58 |
|       | ANEXO B: Escalamiento ECHAM5 en “Central Las Nieves” .....                   | 60 |
|       | ANEXO C: Caudales medios mensuales simulados .....                           | 61 |
|       | ANEXO D: Caudales medios anuales.....  | 64 |

## INDICE DE GRÁFICOS

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gráfico 3-1: | Curva hipsométrica de la cuenca “Río Tinguiririca bajo Los Briones”.....  | 15 |
| Gráfico 3-2: | Curva de variación estacional, Tinguiririca en bajo los Briones. Fuente: DGA (2004) .....                           | 18 |
| Gráfico 4-1: | Correlación diaria entre CGM Echam5 y reanálisis NCEP/NCAR .....  | 26 |
| Gráfico 4-2: | Correlación mensual entre CGM Echam5 y reanálisis NCEP/NCAR .....   | 26 |
| Gráfico 4-3: | Correlación anual entre CGM Echam5 y reanálisis NCEP/NCAR .....   | 26 |
| Gráfico 4-4: | Escalamiento de precipitaciones diarias, modelo Csiro-mk3.5.....  | 28 |
| Gráfico 4-5: | Escalamiento de precipitaciones diarias, modelo Miroc3.2 .....  | 28 |
| Gráfico 4-6: | Escalamiento de temperaturas, modelo Echam5 .....   | 29 |
| Gráfico 5-1: | Variación diaria del parámetro <i>Preferred Flow Direction</i> .....  | 35 |
| Gráfico 5-2: | Calibración - Series de caudales medios diarios observados y simulados, período hidrológico 1988-1992.....          | 36 |
| Gráfico 5-3: | Calibración - Curvas de duración de caudales medios diarios, período hidrológico 1988-1992 .....                    | 36 |
| Gráfico 5-4: | Calibración - Curvas de variación estacional de caudales observados y simulados, período hidrológico 1988-1992..... | 37 |
| Gráfico 5-5: | Calibración - Correlación entre caudales medios diarios observados y simulados, período hidrológico 1988-1992.....  | 37 |

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 5-6: Caudales medios anuales observados y simulados, período hidrológico 1988-1992.....                                 | 37 |
| Gráfico 5-7: Validación - Series de caudales medios diarios observados y simulados, período hidrológico 1978-1987.....          | 38 |
| Gráfico 5-8: Validación - Curvas de duración de caudales medios diarios, período hidrológico 1978-1987.....                     | 39 |
| Gráfico 5-9: Validación - Curvas de variación estacional de caudales observados y simulados, período hidrológico 1978-1987..... | 39 |
| Gráfico 5-10: Validación - Correlación entre caudales medios diarios observados y simulados, período hidrológico 1978-1987..... | 39 |
| Gráfico 5-11: Caudales medios anuales observados y simulados, período hidrológico 1978-1987.....                                | 40 |
| Gráfico 5-12: Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para NS y $R^2$ .....                                       | 41 |
| Gráfico 5-13: Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para LOG NS y $wR^2$ .....                                  | 42 |
| Gráfico 6-1: Curvas de duración para escenarios A1B y A2 en periodo 2046-2065 con línea base modelada en período 1978-1992..... | 46 |
| Gráfico 6-2: Curvas de duración para escenarios A1B y A2 en periodo 2081-2100 con línea base modelada en período 1978-1992..... | 46 |
| Gráfico 6-3: Caudales medios anuales períodos base y futuros.....   | 49 |
| Gráfico 6-4: Temperaturas medias anuales períodos base y futuros. Estación "Rengo".....   | 50 |
| Gráfico 6-5: Precipitaciones anuales en períodos base y futuros. Estación "La Rufina".....                                      | 51 |
| Gráfico 6-6: Precipitaciones anuales en períodos base y futuros. Estación "Central Las Nieves".....                             | 52 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2-1: Parámetros del modelo.....  | 12 |
| Tabla 3-1: Parámetros de la cuenca "Río Tinguiririca bajo Los Briones".....  | 15 |
| Tabla 3-2: Características técnicas de las centrales. Fuente: Elaborado a partir de COREMA (2004).....   | 17 |
| Tabla 3-3: Valores de caudales curva variación estacional, Tinguiririca en bajo los Briones.....   | 19 |
| Tabla 3-4: Estaciones DGA.....   | 19 |
| Tabla 4-1: GCM's con escenarios 20C3M (período 1961-1999), A2 (períodos 2046-2065 y 2081-2100) y A1B (período 2010-2100), a escala diaria..... | 23 |
| Tabla 4-2: Resumen de correlaciones de GCM's con reanálisis en el período 1961-1999.....   | 25 |
| Tabla 5-1: Bandas de elevación para cada sub cuenca definida.....  | 31 |
| Tabla 5-2: Gradientes utilizados en modelación hidrológica.....  | 33 |
| Tabla 5-3: Parámetros del modelo calibrado.....  | 35 |
| Tabla 5-4: Indicadores de eficiencia del modelo calibrado.....   | 36 |
| Tabla 5-5: Indicadores de eficiencia del modelo validado.....  | 38 |
| Tabla 5-6: Comparación de criterios de eficiencia, calibración - validación.....   | 40 |
| Tabla 6-1: Caudales medios mensuales promedio [ $m^3/s$ ], para cada periodo análisis.....   | 47 |
| Tabla 6-2: Rendimiento de la cuenca "Q/Pp" [ $m^3/m^3$ ].....  | 53 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2-1: Representación esquemática de los escenarios SRES. Fuente: Modificado de Grupo III IPCC (2000). .....                                  | 4  |
| Figura 2-2: Ramificaciones de escenarios EI-EE. Fuente: Modificado de Grupo III IPCC (2000).....   | 5  |
| Figura 2-3: Esquema método de humedad del suelo .....  | 10 |
| Figura 3-1: Trazado de la cuenca "Río Tinguiririca bajo Los Briones" .....   | 15 |
| Figura 3-2: Ubicación de la zona de estudio. Cuenca del río Rapel y sub cuenca del río Tinguiririca. Fuente: Modificado de DGA (2000) .....        | 16 |
| Figura 3-3: Esquema captaciones y restituciones de centrales "La Higuera" y "La Confluencia" .....   | 17 |
| Figura 3-4: Mapa con ubicación de estaciones DGA .....   | 20 |
| Figura 3-5: Resumen de registros disponibles para estaciones DGA .....   | 21 |
| Figura 4-1: Ejemplo escalamiento espacial para ECHAM5 en la estación pluviométrica "La Rufina".....  | 24 |
| Figura 4-2: Proceso de escalamiento temporal de precipitaciones diarias, GCM Echam5 .....  | 27 |
| Figura 5-1: Desagregación de la cuenca en sub cuencas.....   | 30 |
| Figura 5-2: Esquema de la cuenca en WEAP .....   | 31 |
| Figura 6-1: Curvas de variación estacional para caudales con Pexc 70%, 80% y 90%, Periodo base modelado y proyecciones de escenarios A1B y A2..... | 48 |
| Figura 6-2: Promedio de días de lluvia al año para estaciones pluviométricas .....   | 53 |

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el mundo está enfrentando una serie de problemas a nivel global y regional, siendo uno de los más importantes para el futuro, el denominado “Cambio Climático”. Este término es utilizado para referirse a los cambios en el medio ambiente producto de la acción humana, los que provocan incrementos en las emisiones de gases de efecto invernadero. Lo anterior tiene como consecuencia una serie de cambios que afectan principalmente las variables meteorológicas como la temperatura, precipitaciones y radiación entre otras, esto a distintas escalas de tiempo dependiendo de la región. El efecto de la variación de precipitaciones tiene diversas respuestas regionales, estimándose que en algunas zonas, habrá aumentos en las lluvias y otras sufrirán por la escasez de ellas. Por último, hay una serie de fenómenos asociados como el retroceso de glaciares, disminución de la extensión de las zonas con nieve permanente y aumento en la frecuencia de eventos extremos (Cifuentes & Meza, 2008).

Los principales efectos relacionados con la disposición de los recursos hídricos de una cuenca bajo el efecto del cambio climático, son los relacionados con la agricultura y generación eléctrica, o en casos más extremos, con la disposición de agua para consumo. Éstos son aspectos de gran relevancia en el desarrollo de algunas ciudades, y es ahí donde radica la importancia de estudiar los posibles efectos que puede tener el cambio climático en las cuencas chilenas en particular.

Para el futuro se han elaborado una serie de escenarios de cambio climático (Grupo III IPCC, 2000) de los cuales en este trabajo se utilizan los escenarios A1B y A2. El escenario más agresivo es el A2, con un uso intensivo de combustibles fósiles que generan un aumento de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, con valores muy superiores a los actuales, que generan un efecto directo en las variables hidrometeorológicas. Por otro lado, el A1B es una ramificación del escenario A1 y es menos agresivo que el escenario A2, ya que enfatiza al uso equilibrado de fuentes de energía y una difusión rápida de nuevas tecnologías.

Tanto para el desarrollo económico como para la asignación óptima de los recursos hídricos en una cuenca, es importante conocer las variaciones futuras en la disponibilidad de agua. Para esto es posible utilizar Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCM's), que incorporan los efectos del incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero para simular escenarios futuros. Éstos son capaces de proyectar las variables meteorológicas en un amplio horizonte temporal y en una escala espacial del orden de cientos de kilómetros. Para una cuenca cualquiera, es posible corregir los valores simulados por los GCM's y así obtener una proyección de variables meteorológicas en la cuenca. Variables que pueden ser utilizadas por modelos hidrológicos, para obtener una proyección de caudales, tanto a nivel diario como mensual, dependiendo del origen del GCM con el cual se simulan las variables meteorológicas.

El modelo hidrológico que se utiliza en este trabajo, corresponde al “*Water Evaluation And Planning*” (WEAP), con el cual se llevará a cabo una modelación hidrológica de la cuenca del río Tinguiririca en Bajo los Briones, utilizando una escala temporal diaria para simular la disponibilidad de hídrica en la cuenca para dos períodos de tiempo en el futuro, de mediano y largo plazo.

## **1.1 Objetivos**

El objetivo general de este trabajo corresponde a la proyección de variables hidrometeorológicas en la cuenca del río Tinguiririca en Bajo los Briones en dos periodos de tiempo, uno de mediano y otro de largo plazo, bajo escenarios A1B y A2 de cambio climático y a escala diaria. Los periodos de proyección están comprendidos entre los años 2046-2065 y 2081-2100.

Los objetivos específicos que derivan de lo anterior son:

- Contar con un GCM capaz de simular las variables meteorológicas a nivel diario para la cuenca en estudio para los periodos 2046-2065 y 2081-2100 con su correspondiente escalamiento espacial.
- Modelar hidrológicamente a escala diaria la cuenca en estudio utilizando el modelo WEAP.
- Simular las variables hidrometeorológicas a escala diaria para el futuro en la cuenca del río Tinguiririca bajo Los Briones, utilizando en conjunto el GCM seleccionado y el modelo WEAP.
- Analizar los resultados de las variables obtenidas de la modelación.

## **1.2 Organización del informe**

Se presenta a continuación la estructura general del trabajo realizado.

En el capítulo 2, se presenta una revisión bibliográfica de los principales tópicos que se utilizan en el desarrollo de este trabajo. Entre éstos, se hace una reseña del cambio climático y los escenarios futuros que son modelados con los GCM's y también se presentan las bases del funcionamiento del modelo WEAP.

En el capítulo 3, se hace una descripción de la zona de estudio y se revisan los antecedentes más relevantes para el desarrollo del trabajo.

El trabajo realizado, se centra principalmente en los capítulos 4, 5 y 6. En el capítulo 4 se selecciona de una lista de 17 GCM's, el que presenta un mejor ajuste con la zona de estudio, al cual se le realiza un escalamiento para las precipitaciones y temperaturas utilizando estaciones base para la cuenca "Río Tinguiririca bajo Los Briones". Por otra parte, en los capítulos 5 y 6 se utiliza el modelo WEAP para realizar la modelación hidrológica de la cuenca antes mencionada, calibrando y validando el modelo para posteriormente simular los caudales para el futuro, considerando los escenarios de cambio climático A1B y A2. Al final del capítulo 6 se hace un análisis de los resultados obtenidos para el futuro con dicha modelación.

Finalmente se presenta el capítulo 7, que corresponde a las conclusiones del trabajo realizado, considerando los objetivos planteados y los resultados obtenidos.

## 2. REVISION BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cambio climático y escenarios

El cambio climático es un proceso continuo que afecta a todo el planeta, pero no de igual forma a nivel regional, ya que los cambios pueden diferir ampliamente entre un lugar y otro. Los efectos están referidos principalmente a cambios sobre las temperaturas, precipitaciones y variaciones del nivel del mar entre otros aspectos. Estas variaciones se expresan como inundaciones, sequías, cambios en los regímenes de los ríos, cambio en la calidad de fuentes de agua, etc.

Según IPCC (2007) se define cambio climático como *“Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra.”* Por otro lado, La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, en su Artículo 1, define el cambio climático como *“cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”*. La CMCC diferencia entonces, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

Para representar el cambio climático, se han propuesto distintos escenarios en los cuales se caracteriza la acción antropogénica sobre la atmósfera, principalmente debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Estos dependen de factores como el crecimiento poblacional a nivel global, las tendencias tecnológicas, el tipo de combustible utilizado, la situación socioeconómica, entre otros (IPCC, 2007).

Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán los distintos factores en las emisiones futuras de GEI, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. (Grupo III IPCC, 2000)

El IPCC determinó 4 familias de escenarios de emisiones, las que se describen según el Grupo III IPCC (2000) y se esquematizan con la Figura 2-1.

- Familia A1: Escenario que describe un mundo con crecimiento económico rápido, la población mundial alcanza su máximo a mediados del siglo XXI y luego disminuye, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. La familia de escenarios A1, describe tres alternativas para el rumbo que tomará el sistema energético: A1F1 describe un uso intensivo de combustibles fósiles, A1T describe un uso de combustibles no fósiles y por último el A1B describe un uso equilibrado entre todas las fuentes de energía, sin dependencia excesiva de ninguna en particular.

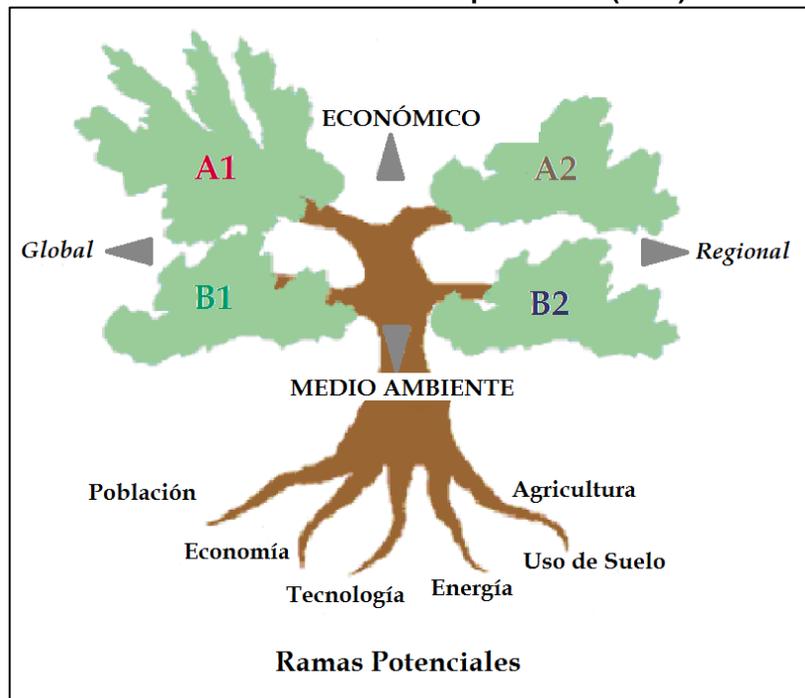
- Familia A2: Escenario que describe un mundo heterogéneo, con un constante aumento de la población mundial. El desarrollo económico se presenta a nivel regional y el cambio tecnológico es más lento y fragmentado que las otras líneas evolutivas.
- Familia B1: Escenario que describe una economía orientada a los servicios e información, con reducción en el uso de materias primas e introducción de tecnologías limpias y eficientes para el uso de los recursos. La población mundial alcanza su máximo a mediados del siglo XXI y luego disminuye. Escenario con un énfasis en la sostenibilidad económica, social y ambiental a nivel global.
- Familia B2: Escenario que al igual que el B1, tiene un énfasis en la sostenibilidad económica, social y ambiental, pero a nivel regional. Aumento en la población mundial de forma sostenida, pero más lento que en el escenario A2. También hay cambio tecnológico, pero menos rápido y más diverso que en los escenarios A1 y B1.

De las familias de escenarios señaladas, se desprenden una serie de escenarios diferentes, todos válidos y probables de ocurrir en el futuro. En la Figura 2-2 se presenta un esquema de las familias de escenarios y sus ramificaciones.

En Chile y Sudamérica se han realizado estudios sobre los impactos del cambio climático, para los cuales se han utilizado principalmente los escenarios A2 y B2 (DGF, 2006; Fuenzalida, 2007; SENAMHI, 2005 entre otros).

Entre los escenarios presentados en la Figura 2-2, se aprecian los dos escenarios que se utilizan en este trabajo, A1B y A2.

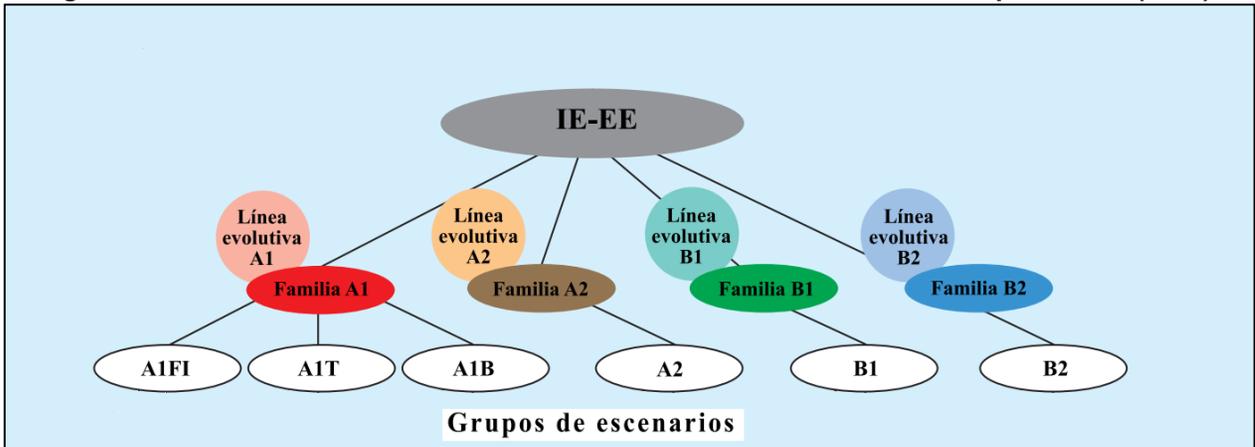
**Figura 2-1: Representación esquemática de los escenarios SRES.  
Fuente: Modificado de Grupo III IPCC (2000).**



Para seleccionar los escenarios de cambio climático que se utilizan en este trabajo, se definieron dos criterios:

- El escenario más agresivo y con peores consecuencias teóricas para el futuro. Resultado: Escenario A2
- Un escenario intermedio entre los más agresivos y menos agresivos, que presente alguna ventaja o utilidad respecto al resto. En este caso queda definida por la una cantidad de trabajos relacionados a los efectos del cambio climático en cuencas chilenas que se están desarrollando actualmente con el escenario A1B. Resultado: A1B

**Figura 2-2: Ramificaciones de escenarios EI-EE. Fuente: Modificado de Grupo III IPCC (2000)**



## 2.2 Modelos de circulación general de la atmósfera (GCM's)

Los escenarios anteriormente descritos son utilizados principalmente en modelos climáticos globales y regionales. En particular para este estudio interesan los modelos globales conocidos como Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCM's), en particular simulados en escenarios A2 y A1B, los que representan los usos de energía y emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera de forma agresiva regional y equilibrada global respectivamente, ambos con énfasis en el crecimiento económico (ver Figura 2-1).

Alrededor de una decena de GCM's han sido desarrollados y aplicados con el propósito de evaluar los cambios climáticos a nivel global y su información ha sido puesta a disposición de la comunidad internacional. Todos ellos están basados en una formulación matemática de las leyes físicas y procesos fundamentales que gobiernan el comportamiento del sistema climático terrestre, la que integrada a partir de un estado inicial y forzada por la radiación solar, dan lugar a variaciones similares a las observadas en el clima.

La mayor desventaja de los modelos globales deriva de una baja resolución espacial (centenas de kilómetros) que al momento de ser utilizados para análisis de impacto resulta ser muy pobre, particularmente en el caso de regiones costeras o con importantes variaciones de relieve. El caso de Chile, donde además de la presencia de las Cordilleras de la Costa y de los Andes se une el escaso desarrollo W-E del territorio

nacional, resulta muy amplia la resolución de los modelos globales para poder utilizarlos directamente (DGF, 2006).

Para mejorar los resultados entregados por los modelos globales GCM, se debe hacer un escalamiento regional o “*Downscaling*”, proceso en el cual se toma la información de los GCM y crea una sub-grilla de éste.

Para llevar a cabo el escalamiento regional, se han creado varias técnicas con diferentes enfoques e incluso *softwares* que realizan el escalamiento de forma prácticamente automática. Según Wilby *et al.* (2002), las técnicas de escalamiento pueden agruparse en 4 categorías:

- **Modelación Climática Dinámica:** Este escalamiento dinámico se basa en anidar un modelo climático regional (RCM, *Regional Climate Model*) de mayor resolución (grilla horizontal de celdas de 20 a 50 km) dentro de un GCM de menor resolución, de manera que la información de los GCM se utiliza para definir condiciones de borde atmosféricas que varían en el tiempo, dentro de un dominio finito en el cual se modela la dinámica física de la atmósfera (Wilby *et al.*, 2002).

La principal limitación de los RCM es que son computacionalmente tan demandantes como los GCM, pero presentan como principal ventaja, que permiten realizar análisis a escalas mucho más acotadas que los GCM.

Un ejemplo de la aplicación de esta técnica, es la utilizada por DGF (2006) para el estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, con el modelo regional denominado PRECIS, donde se usó el GCM “HadCm3” como condición de borde.

- **Generación Climática en Base a Datos Observados:** Esta técnica implica el agrupamiento, a nivel local, de datos meteorológicos, en relación con patrones prevalecientes de circulación atmosférica. Los escenarios de cambio climático son construidos por un re-muestreo de la distribución de datos observados (condicionados por los patrones de circulación generados por un GCM), o mediante la generación de secuencias sintéticas de patrones climáticos, para luego realizar un re-muestreo de los datos observados.

Esta técnica se basa principalmente en la sensible relación entre el clima a grandes escalas y el clima a nivel local.

La principal limitación de esta técnica es que los cambios de precipitación, producidos por cambios en la frecuencia de patrones climáticos, son rara vez consistentes con los cambios producidos por el GCM utilizado (Wilby *et al.*, 2002).

- **Generación Climática Estocástica:** La aproximación de escalamiento estocástico típicamente implica modificar los parámetros de generadores climáticos convencionales como WGEN o LARS-WG (modelos para simular series de tiempo climáticas).

Los escenarios de cambio climático son generados estocásticamente usando parámetros escalados de acuerdo a las salidas del GCM utilizado.

La principal ventaja de esta técnica es que puede reproducir exactamente varias estadísticas meteorológicas observadas, y ha sido utilizada ampliamente, especialmente en la determinación de impactos climáticos en la agricultura. Aún más, los generadores climáticos estocásticos permiten la generación de escenarios para el análisis de riesgos. Las principales desventajas se relacionan con la baja capacidad para reproducir variabilidades climáticas a nivel anual o de décadas, y los efectos que pueden producir los cambios en la precipitación en variables secundarias como la temperatura. Wilks (1999) Utiliza esta técnica en algunas regiones de EE.UU. para validar el enfoque (Wilby *et al.*, 2002).

- **Funciones de Transferencia:** El escalamiento basado en funciones de transferencia, se basa en las relaciones empíricas entre los predictandos (variables a predecir) a nivel local y los predictores (variables utilizadas para predecir) a nivel regional.

La principal virtud del escalamiento basado en funciones de transferencia, es su fácil aplicación. Su principal debilidad es que los modelos usualmente son capaces de reproducir sólo una parte de la variabilidad climática (especialmente en series de precipitación).

Al igual que los generadores climáticos basados en datos observados, en este método también se supone la validez de los parámetros bajo condiciones climáticas futuras, y el escalamiento es altamente sensible a la elección de las variables predictoras (Wilby *et al.*, 2002).

Con los resultados de un correcto escalamiento regional, es posible analizar impactos en variables meteorológicas dentro de una región más reducida que las proporcionadas por los GCM bajo algún escenario de cambio climático.

### 2.3 Reanálisis NCEP/NCAR

El reanálisis NCEP/NCAR es un proyecto desarrollado en conjunto por los centros de investigación *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) y *The National Center for Atmospheric Research* (NCAR). El objetivo del proyecto es reproducir una serie de parámetros atmosféricos en todo el mundo, usando para este fin, diversas fuentes de observaciones históricas, entre las principales se encuentran las estaciones meteorológicas alrededor del mundo y satélites. El proyecto utiliza modelos similares a los de predicción climática. Los resultados del reanálisis corresponden a un punto de referencia para la validez de los modelos meteorológicos globales como los GCM's, por lo tanto son comúnmente usados para analizar estos últimos.

Los resultados del reanálisis NCEP/NCAR, o reanálisis como se denomina en el resto del trabajo, corresponden a la herramienta utilizada para la selección del GCM que mejor caracterice la zona de estudio.

## 2.4 Modelo WEAP

### 2.4.1 Generalidades del modelo

Una vez obtenidos los resultados para las proyecciones de las variables meteorológicas en una región mediante el escalamiento de un GCM o con un modelo de circulación regional (RCM), es posible aplicar un modelo hidrológico para la simulación de los caudales de una cuenca y así caracterizar y simular detalladamente los recursos hídricos dentro de esta región para un período determinado y una escala temporal definida.

WEAP (sistema de “Water Evaluation and Planning”) es una herramienta computacional desarrollada por Stockholm Environment Institute (SEI, 2012), que provee un enfoque integral a la planificación de recursos hídricos.

Este modelo es utilizado para proyectos relacionados con el manejo del agua dulce, la asignación de recursos hídricos limitados, las preocupaciones respecto a la calidad ambiental, la planificación frente a la variabilidad e incertidumbre del clima, y la necesidad de desarrollar e implementar estrategias sostenibles del uso del agua. Todo esto dentro de un marco de cambio climático global y/o regional.

El Modelo WEAP ha sido utilizado ampliamente tanto a nivel mundial como nacional, por lo que se podrían nombrar decenas de trabajos. Sin embargo, dentro de las aplicaciones más usadas del modelo en Chile, se encuentran las relacionadas con el análisis de recursos hídricos producto de cambios climáticos en cuencas chilenas (Cortés, 2010; Mena, 2009; Vicuña *et al.*, 2010; Salgado, 2011). Cabe destacar que la mayoría de los trabajos consultados calibran el modelo WEAP a escala temporal mensual, mientras que este trabajo tiene dentro de los objetivos conseguir una calibración del modelo a escala diaria para así realizar una proyección de las variables hidrológicas a nivel diario.

El Modelo WEAP está diseñado para operar en distintos modos (SEI, 2012):

- Base de datos de balance de agua: proporciona un sistema para mantener información de oferta y demanda de agua.
- Herramienta de generación de escenarios: simula la demanda, oferta, escorrentía, caudal, almacenaje, generación, tratamiento y descarga de contaminantes y calidad del agua en los ríos.
- Herramienta de análisis de políticas: evalúa una completa gama de las opciones de desarrollo y manejo del agua, tomando en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.

### 2.4.2 Enfoques del modelo

WEAP funciona usando el principio básico de balance de masa, pudiendo ser utilizado para sistemas de agua potable rural, agrícolas, a una sola cuenca como también a complejos sistemas de cuencas transfronterizas. Por otra parte, WEAP puede simular una amplia gama de los componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, incluyendo escorrentía por precipitación, flujos base, y recarga de aguas subterráneas por precipitación. Además es posible hacer múltiples análisis de la gestión de recursos hídricos bajo escenarios de diferente índole.

La utilización del modelo incluye generalmente varios pasos:

- Definición del estudio: Se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
- Condición actual de la cuenca: Se desarrolla una caracterización de la demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema. Esto se puede ver como la etapa de calibración en el desarrollo de una aplicación.
- Escenarios: Se pueden estimar y cuantificar los impactos que tendría un sistema bajo diferentes supuestos sobre las políticas futuras, costos y clima, por ejemplo, en la demanda y oferta de agua, hidrología y contaminación.
- Evaluación: Los escenarios se evalúan con respecto a la disponibilidad de agua, los costos y los beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales, y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables forzantes.

### **2.4.3 Métodos de simulación**

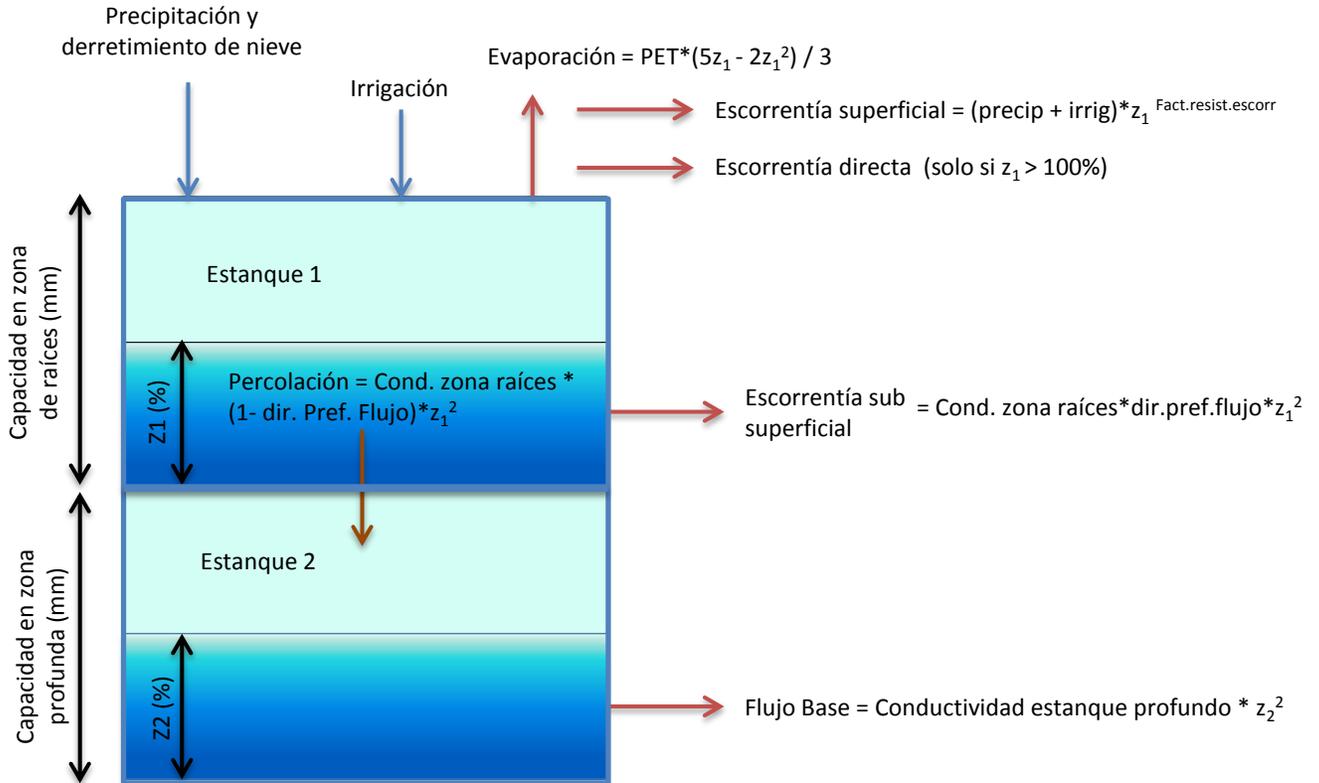
WEAP cuenta con cuatro métodos para simular los procesos internos de una cuenca, los que consideran las demandas evapotranspirativas, la escorrentía superficial, la infiltración y las demandas para riego u otro tipo de demanda que pueda tener la cuenca. Los métodos son los siguientes:

- Demanda de riego: este método se basa en cálculos de las demandas de evapotranspiración de los cultivos para determinar la demanda de riego. No calcula los procesos de escorrentía o infiltración ni realiza un seguimiento de la humedad del suelo.
- Precipitación - Escorrentía: calcula las demandas de evapotranspiración, pero las precipitaciones que no se consumen por los cultivos las modela como escorrentía en un río o las dirige a las aguas subterráneas mediante un enlace directo.
- Humedad del suelo: corresponde al método más complejo de los cuatro y es el utilizado para hacer el modelamiento en la cuenca de estudio, el cual se detalla en el acápite 2.4.3.1.
- MABIA: este método separa las demandas evapotranspirativas de los cultivos y la evaporación directa desde el suelo. Corresponde a una implementación para WEAP del software MABIA desarrollado por el *Institut National Agronomique de Tunisie*.

#### **2.4.3.1 Método de la humedad del suelo**

Este método modela conceptualmente el suelo como dos estanques, que representan la zona de las raíces y la zona profunda del suelo, entre los cuales existe una interacción que simula la percolación desde el estanque de la zona de raíces hacia el estanque profundo. Cada estanque tiene flujos de entrada y salida, los que dependen de las variables forzantes del modelo como también de los parámetros que representan el suelo. En la Figura 2-3 se presenta un esquema del método y los flujos con los cuales se realizan los balances en cada estanque.

**Figura 2-3: Esquema método de humedad del suelo**



Para el modelo WEAP, la unidad básica que representa un área, corresponde a un *catchment* o “*elemento*” como se le llamará en el resto del trabajo. Y es mediante estas unidades como se puede desagregar la superficie de una cuenca, ya sea por subcuencas, bandas de elevación, áreas de cultivo, etc. Cada *catchment* o *elemento*, queda representado por dos estanques como los de la Figura 2-3 y es a estas unidades a las que se les puede asignar valores específicos para las variables forzantes como para los parámetros del modelo. Los *elementos* a su vez, funcionan de forma independiente, es decir, no existe trasvases desde un *elemento* a otro y los balances que rigen el método, se hacen para cada *elemento* por separado. La forma de conectar los resultados de los balances de cada unidad es mediante un cauce que conduce el agua hasta la salida de la cuenca.

Si la superficie total de la cuenca se divide en  $N$  *elementos* o sub-áreas, las ecuaciones que rigen el método que aplican a los estanques de cada *elemento* son:

En el estanque superficial:

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

**EC: 2-1**

Donde:

- $Sw_j$  : Almacenamiento en la zona de raíces del *elemento* j (mm)  
 $Z_{1,j}$  : Almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento en la zona de raíces [0,1]  
 $P_e$  : Precipitación efectiva que incluye el derretimiento de nieve del manto nival de la sub cuenca  
 $PET$  : Evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia (Penman-Montieth)  
 $k_{c,j}$  : Coeficiente de cultivo para el *elemento* j  
 $k_{s,j}$  : Conductividad en la zona de raíces para el *elemento* j  
 $RRF_j$  : Resistencia a la escorrentía en el *elemento* j  
 $f_j$  : Coeficiente de partición relacionado al suelo, tipo de cobertura y topografía. Representa la dirección preferida del flujo que fluctúa entre horizontal y vertical [0,1]

Escorrentía superficial:

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

**EC: 2-2**

Donde:

- $RT$  : Escorrentía superficial total.  
 $Z_{1,j}$  : Almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento en la zona de raíces [0,1].  
 $P_e$  : Precipitación efectiva que incluye el derretimiento de nieve del manto nival de la sub cuenca.  
 $k_{s,j}$  : Conductividad en la zona de raíces para el *elemento* j.  
 $RRF_j$  : Resistencia a la escorrentía en el *elemento* j.  
 $f_j$  : Coeficiente de partición relacionado al suelo, tipo de cobertura y topografía. Representa la dirección preferida del flujo que fluctúa entre horizontal y vertical [0,1]  
 $A_j$  : Área del *elemento* j.

En el estanque profundo:

$$S_{max} \frac{dz_{2,j}}{dt} = \left( \sum_{j=1}^N (1 - f_j) k_{s,j} Z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} Z_{2,j}^2$$

**EC: 2-3**

Donde:

- $S_{max}$  : Percolación profunda desde los estanques 1 de todos los *elemento*.  
 $Z_{1,j}, Z_2$  : Almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento en la zona de raíces y de la zona profunda respectivamente [0,1]  
 $k_{s2}$  : Conductividad en la zona saturada del estanque profundo.  
 $f_j$  : Coeficiente de partición relacionado al suelo, tipo de cobertura y topografía. Representa la dirección preferida del flujo que fluctúa entre horizontal y vertical [0,1]

El modelo cuenta con una gran cantidad de parámetros, sin embargo, para el caso de estudio, la calibración se basa en los parámetros más importantes desde el punto de vista conceptual y de importancia para las ecuaciones que rigen el método utilizado. En la Tabla 2-1 se muestran los parámetros en los que se centra la calibración del modelo.

**Tabla 2-1: Parámetros del modelo**

| <b>Parámetro</b>                | <b>Traducción</b>                      |
|---------------------------------|--|
| Crop coefficient                | coeficiente de cultivo                 |
| Soil water capacity [mm]        | Capacidad estanque superior            |
| Deep water capacity [mm]        | Capacidad estanque profundo            |
| Runoff resistance factor        | Factor de resistencia a la escorrentía |
| Root zone conductivity [mm/día] | Conductividad zona de raíces           |
| Deep conductivity [mm/día]      | Conductividad zona profunda            |
| Melting point [°C]              | Temperatura de derretimiento           |
| Freezing point [°C]             | Temperatura de congelamiento           |

## 2.5 Criterios de eficiencia para modelos hidrológicos

Para evaluar la eficiencia de los modelos que simulan fenómenos naturales, existe una amplia gama de indicadores y criterios que dan cuenta de la similitud de las modelaciones con las observaciones. En particular en los modelos hidrológicos, los criterios se aplican a las series de caudales observados y modelados, con lo cual se obtienen factores que cuantifican la eficiencia del modelo (Krause *et al*, 2005).

A continuación se presentan los criterios seleccionados para calibrar el modelo WEAP:

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

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

**EC: 2-4**

- Nash Sutcliffe con valores logarítmicos (LOG NS): para calcular este criterio, se utiliza la ecuación EC: 2-4 pero con los logaritmos de los caudales. Con este criterio, se consigue disminuir el problema de las cuencas con alto dinamismo de caudales, lo que se traduce en dejar los caudales altos a un nivel comparables con los bajos y así mejora el valor del indicador de eficiencia.
- Coeficiente de determinación ( $R^2$ ): Mide el grado de relación entre dos variables, en este caso las observadas y las modeladas, sin embargo, este coeficiente sólo refleja la dispersión de los valores y no da cuenta de los desajustes sistemáticos

que puedan existir, como sobre estimaciones o sub estimaciones mantenidas en el tiempo.

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

**EC: 2-5**

- Coeficiente de determinación, versión  $wR^2$  ( $wR^2$ ): Considera la pendiente generada por la regresión lineal de los datos ( $b$ ). Al complementar el coeficiente  $R^2$  con la pendiente, se soluciona el problema que posee  $R^2$  de no considerar los desajustes sistemáticos. Para conseguir mejores ajustes con los modelos, se puede tomar en cuenta el intercepto de la regresión, el cual debe ser lo más cercano a cero.

$$wR^2 = \begin{cases} |b| \cdot R^2 & \text{for } b \leq 1 \\ |b|^{-1} \cdot R^2 & \text{for } b > 1 \end{cases}$$

**EC: 2-6**

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1 Antecedentes generales cuenca del Río Tinguiririca

El río Tinguiririca se ubica en la Sexta de Región del Libertador Bernardo O'Higgins, siendo uno de los principales afluentes del río Rapel. Este drena la cuenca sur del río Rapel con una hoya hidrográfica de alrededor de 4.500 km<sup>2</sup>. El río nace en las inmediaciones del Volcán Llamas, al unirse el río Azufre y el río Las Damas a unos 3.000 m.s.n.m. Sus principales afluentes son los ríos Azufre y Clarillo por el norte, y el río Claro y los esteros Chimbarongo y Calleuque por el sur (DGA, 2004).

En la Figura 3-2 se observa un mapa general de la cuenca del río Rapel, donde se señala la ubicación aproximada de la salida de la cuenca de estudio, la cual corresponde a la cuenca superior del río Tinguiririca. Ésta nace en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes y termina antes de la junta con el río Claro, lugar donde es controlada por la estación fluviométrica "Río Tinguiririca bajo los Briones".

La cuenca cuenta con cumbres importantes, sobre los 4.500 m.s.n.m. como el volcán Tinguiririca y altas pendientes en laderas y acantilados. Por el norte limita con dos sub cuencas aportantes al río Cachapoal y por el sur, su divisoria de aguas corresponde al límite geográfico entre la sexta y séptima región.

La cuenca no tiene desarrollo agrícola ni asentamientos humanos importantes, esto por tratarse de una cuenca cordillerana. Sin embargo, la agricultura se desarrolla inmediatamente aguas abajo de la salida de la cuenca donde comienza el valle.

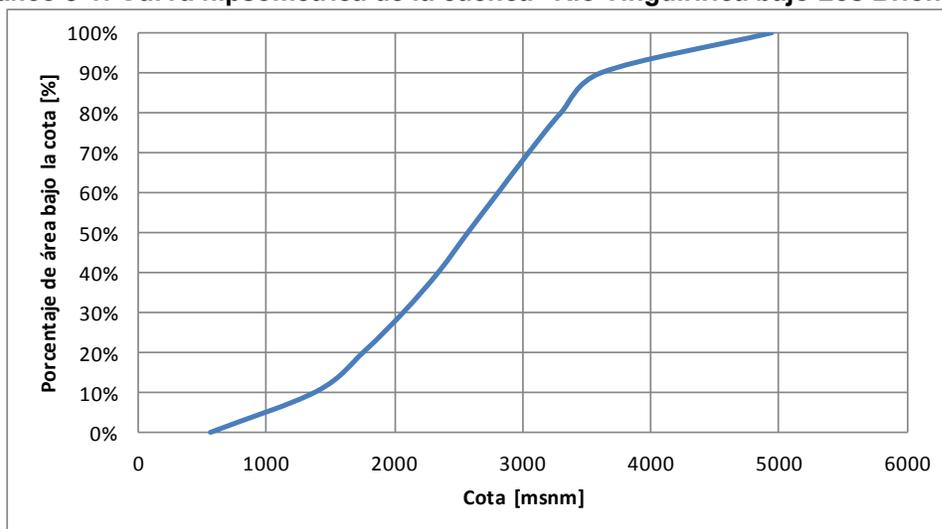
En el área aportante, no existen cuerpos de agua como lagos o lagunas que puedan funcionar como regulador hídrico, sin embargo, se encuentran dentro de la cuenca glaciares importantes como el glaciar Universidad y el Azufre, siendo el primero uno de los más extensos del país, con una longitud de 12 km.

Con WMS (*Watershed Modeling System*), programa computacional utilizado para modelar cuencas hidrológicas, se delimitó la cuenca de estudio, la cual se puede observar en la Figura 3-1. Para ello se utilizó un DEM (*Digital Elevation Model*) tipo ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), el cual tiene una resolución espacial de 30 metros para simular la topografía de la cuenca. Luego, se obtuvieron las principales características la cuenca como el área aportante, la altura media, entre otros parámetros, los que se presentan en la Tabla 3-1. Además se calculó la curva hipsométrica presentada en el Gráfico 3-1, para determinar los porcentajes del área de la cuenca bajo cierta cota.

**Tabla 3-1: Parámetros de la cuenca “Río Tinguiririca bajo Los Briones”**

| Parámetro                        | Valor  |
|----------------------------------|--------|
| Area [km <sup>2</sup> ]          | 1433   |
| Pendiente media [m/m]            | 0.489  |
| Elevación media [msnm]           | 2543.4 |
| Pendiente maxima [m/m]           | 0.033  |
| Longitud de la cuenca [km]       | 54.3   |
| Longitud cauce principal [km]    | 81.5   |
| Elevación punto de salida [msnm] | 560    |

**Gráfico 3-1: Curva hipsométrica de la cuenca “Río Tinguiririca bajo Los Briones”**



**Figura 3-1: Trazado de la cuenca “Río Tinguiririca bajo Los Briones”**

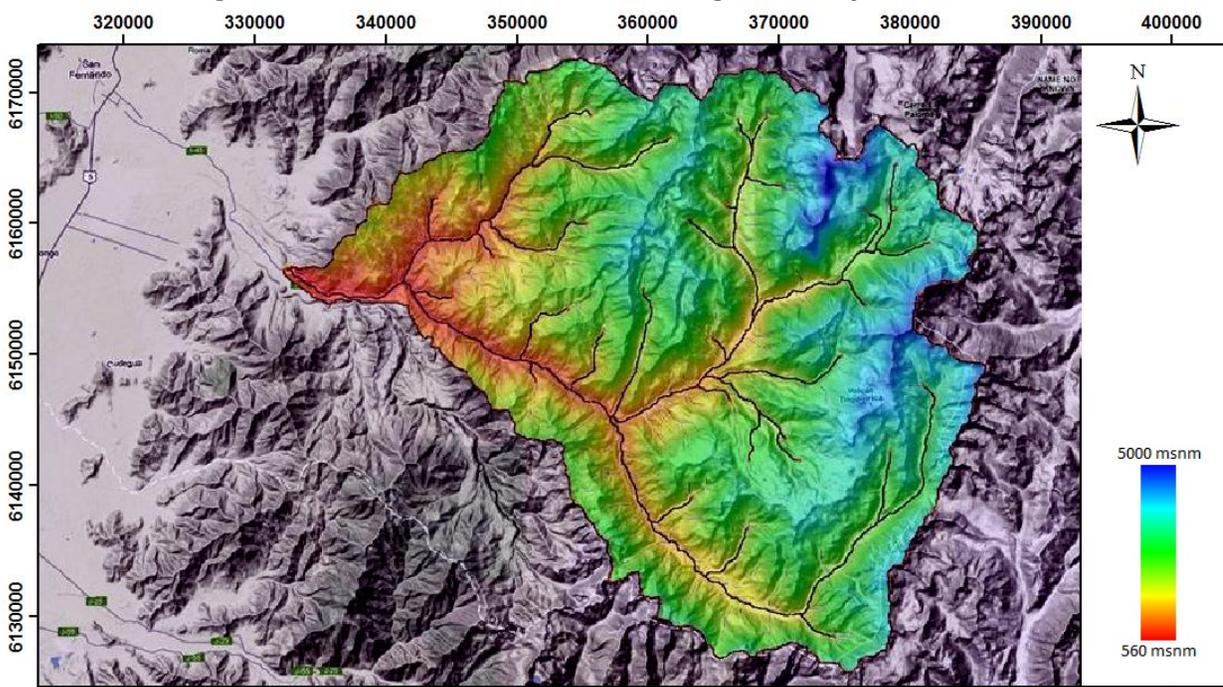
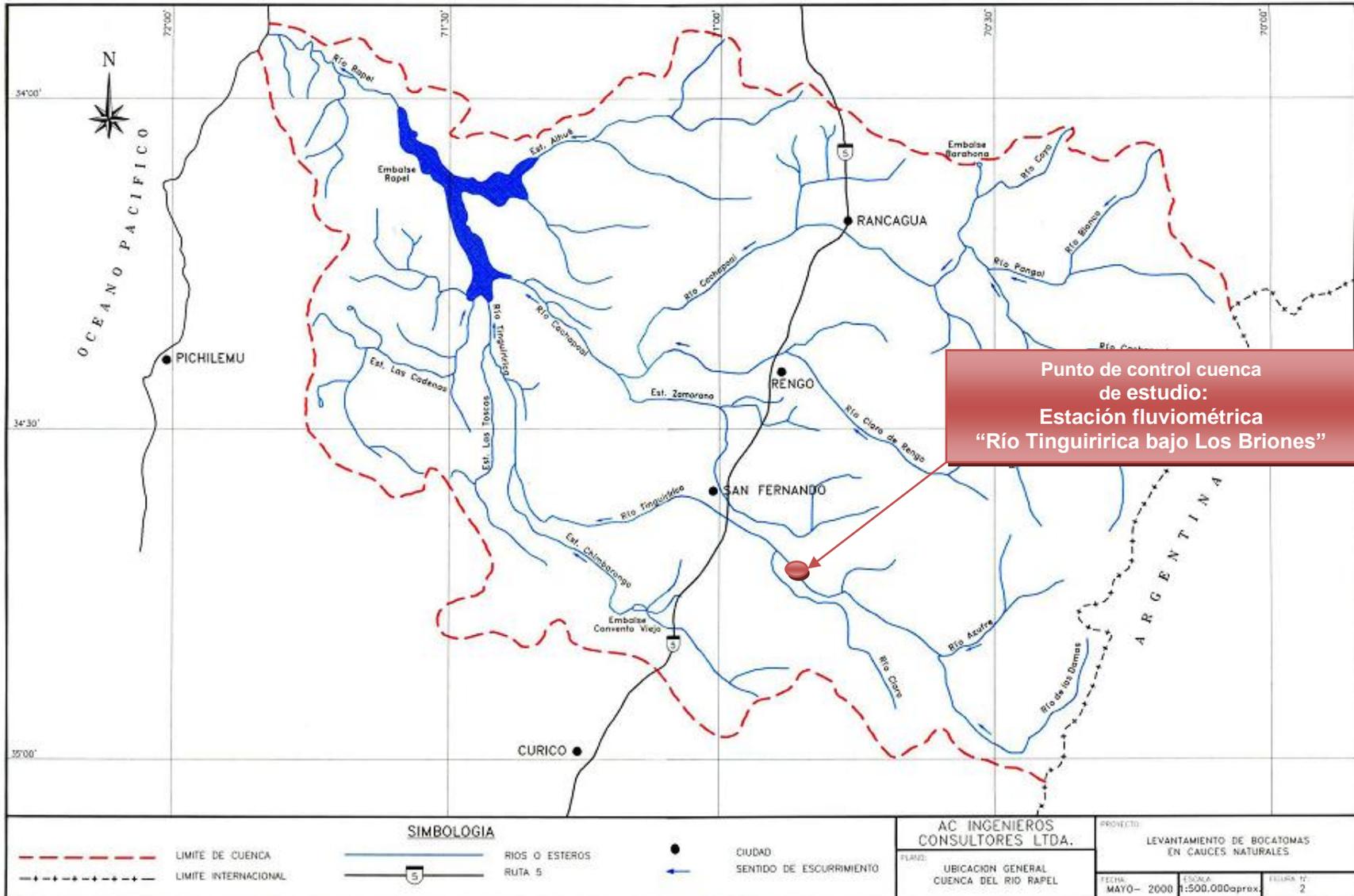


Figura 3-2: Ubicación de la zona de estudio. Cuenca del río Rapel y sub cuenca del río Tinguiririca. Fuente: Modificado de DGA (2000)



### 3.2 Desarrollo hidroeléctrico

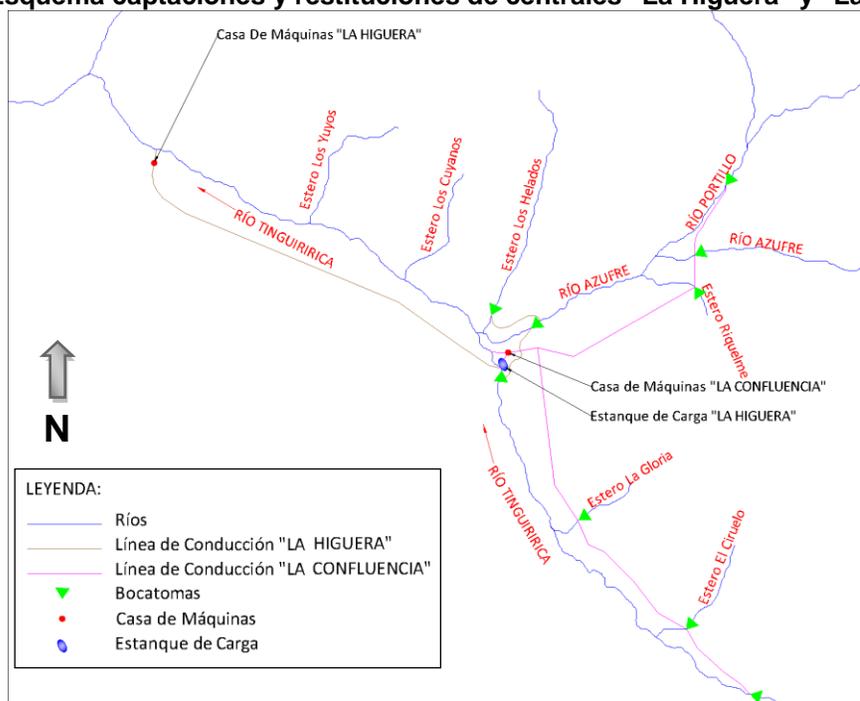
En la actualidad, existen dos centrales hidroeléctricas de pasada que funcionan en la cuenca, "La Confluencia" y "La Higuera", ambas centrales se encuentran en operación desde el segundo semestre del año 2010. La mayor parte del agua captada por estas dos centrales, se junta en un estanque de carga ubicado en el sector sur del río Tinguiririca, aguas arriba de la junta con el río Azufre.

La central "La Higuera" consta de tres captaciones, las que se ubican en el estero "Los Helados" y en los ríos Azufre y Tinguiririca aguas arriba de su confluencia. Las aguas de estas captaciones son conducidas a un estanque de carga y luego llevadas a la casa de máquinas de La Higuera, ubicada 17.5 km aguas abajo del estanque de carga (ver Figura 3-3). Por otra parte, la central "Confluencia" realiza sus captaciones en los esteros "La Gloria", "El Ciruelo" y "Riquelme" y en los ríos Azufre, Portillo y Tinguiririca, luego el agua pasa por la casa de máquinas de La Confluencia y una fracción del agua es restituida al río Tinguiririca y otra fracción se conduce al estanque de carga de la central La Higuera, donde se juntan con el agua proveniente de las captaciones de esta central para volver a ser utilizada para la generación (ver Figura 3-3). En la Tabla 3-2 se muestran las características técnicas de las dos centrales hidroeléctricas (COREMA, 2004).

Tabla 3-2: Características técnicas de las centrales. Fuente: Elaborado a partir de COREMA (2004)

| Característica       | Unidad              | Confluencia La Higuera |     |
|----------------------|---------------------|------------------------|-----|
| Capacidad instalada  | [MW]                | 145                    | 155 |
| Caudal de diseño     | [m <sup>3</sup> /s] | 50                     | 50  |
| Caída bruta          | [m]                 | 344                    | 372 |
| Turbinas             | Francis Vertical    | 2                      | 2   |
| Generadores          | Vertical sincrónico | 2                      | 2   |
| Línea de transmisión | [KV]                | 220                    | 220 |

Figura 3-3: Esquema captaciones y restituciones de centrales "La Higuera" y "La Confluencia"



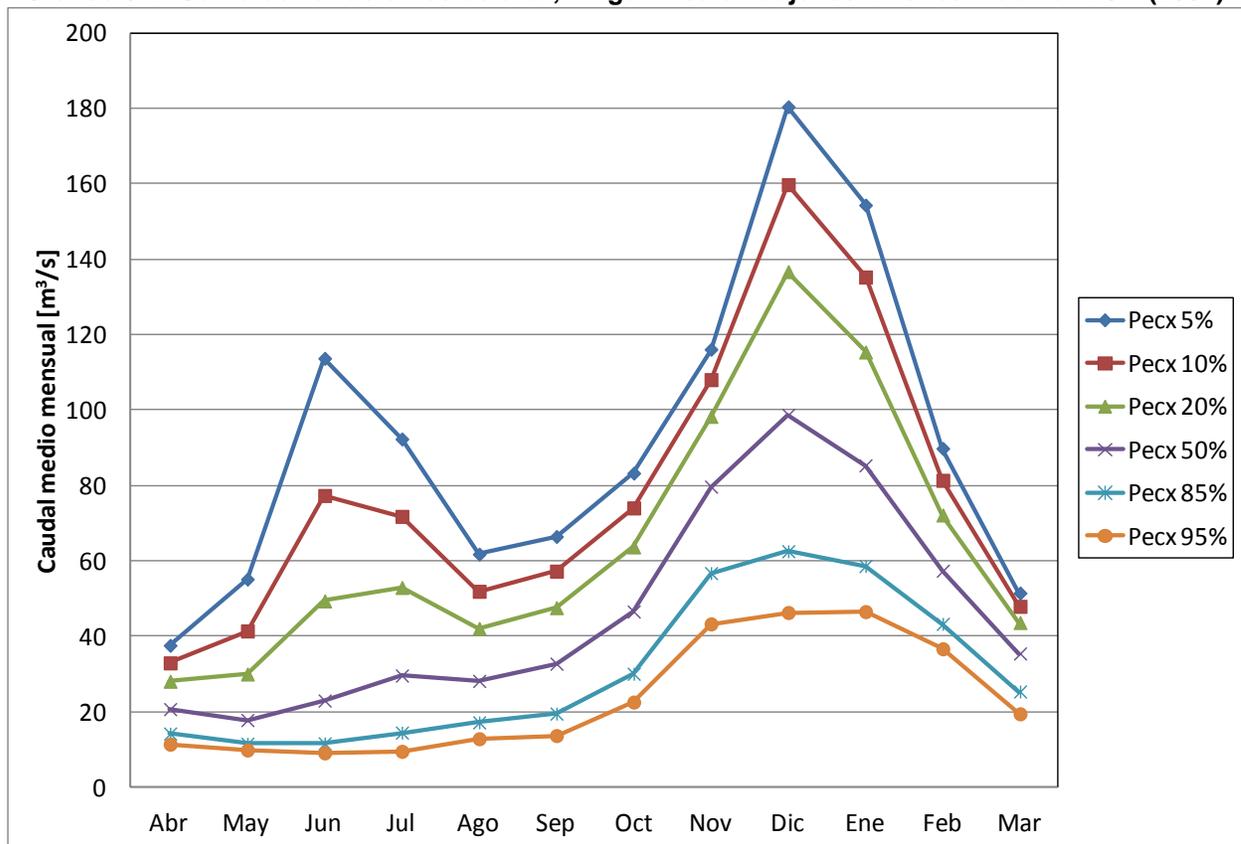
A pesar que las centrales son proyectos recientes y de gran impacto, no representan una alteración en el régimen de la cuenca de estudio, ya que las aguas captadas por las centrales, son restituidas dentro de la misma cuenca, por lo cual no afectan el balance hídrico global de la cuenca en estudio, razón por la cual no serán consideradas en la modelación hidrológica de la cuenca.

### 3.3 Régimen de la cuenca

La cuenca tiene un régimen nivo-pluvial, presentando sus mayores caudales entre los meses de diciembre y enero, los que corresponden a los meses de deshielo intensivo. Sin embargo, como se puede ver en el Gráfico 3-2, en los meses de junio y julio los caudales con probabilidad de excedencia menor o igual a 10%, son importantes y representan un peak pluvial en años húmedos.

En la Tabla 3-3 se muestran los caudales medios mensuales asociados a probabilidades de excedencia entre 5% y 95%.

**Gráfico 3-2: Curva de variación estacional, Tinguiririca en bajo los Briones. Fuente: DGA (2004)**



**Tabla 3-3: Valores de caudales curva variación estacional, Tinguiririca en bajo los Briones.**

**Fuente: Modificado de DGA (2004)**

| P.exc.[%] | Abr  | May  | Jun   | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov   | Dic   | Ene   | Feb  | Mar  |
|-----------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|
| 5         | 37.6 | 55.1 | 113.7 | 92.3 | 61.8 | 66.5 | 83.3 | 116.1 | 180.4 | 154.3 | 89.8 | 51.5 |
| 10        | 32.9 | 41.4 | 77.3  | 71.8 | 51.9 | 57.3 | 74.0 | 108.1 | 159.8 | 135.3 | 81.3 | 47.9 |
| 20        | 28.1 | 30.0 | 49.4  | 52.9 | 42.1 | 47.6 | 63.7 | 98.3  | 136.7 | 115.4 | 72.2 | 43.6 |
| 50        | 20.7 | 17.8 | 23.0  | 29.6 | 28.2 | 32.7 | 46.6 | 79.7  | 98.7  | 85.3  | 57.4 | 35.5 |
| 85        | 14.2 | 11.5 | 11.6  | 14.4 | 17.2 | 19.5 | 30.1 | 56.8  | 62.6  | 58.6  | 43.3 | 25.4 |
| 95        | 11.4 | 9.8  | 9.1   | 9.5  | 12.8 | 13.7 | 22.5 | 43.3  | 46.3  | 46.5  | 36.7 | 19.4 |

### 3.4 Información y registros disponibles en la cuenca

Se solicitó a la Dirección General de Aguas (DGA), la información de una serie de estaciones estacionales pluviométricas y meteorológicas cercanas a la zona de estudio. En la Tabla 3-4 se enumeran las estaciones con sus correspondientes nombres y códigos DGA, la ubicación geográfica y el tipo de estación, mientras que en la

Figura 3-4 se muestra la ubicación de estas estaciones en la zona de estudio.

**Tabla 3-4: Estaciones DGA**

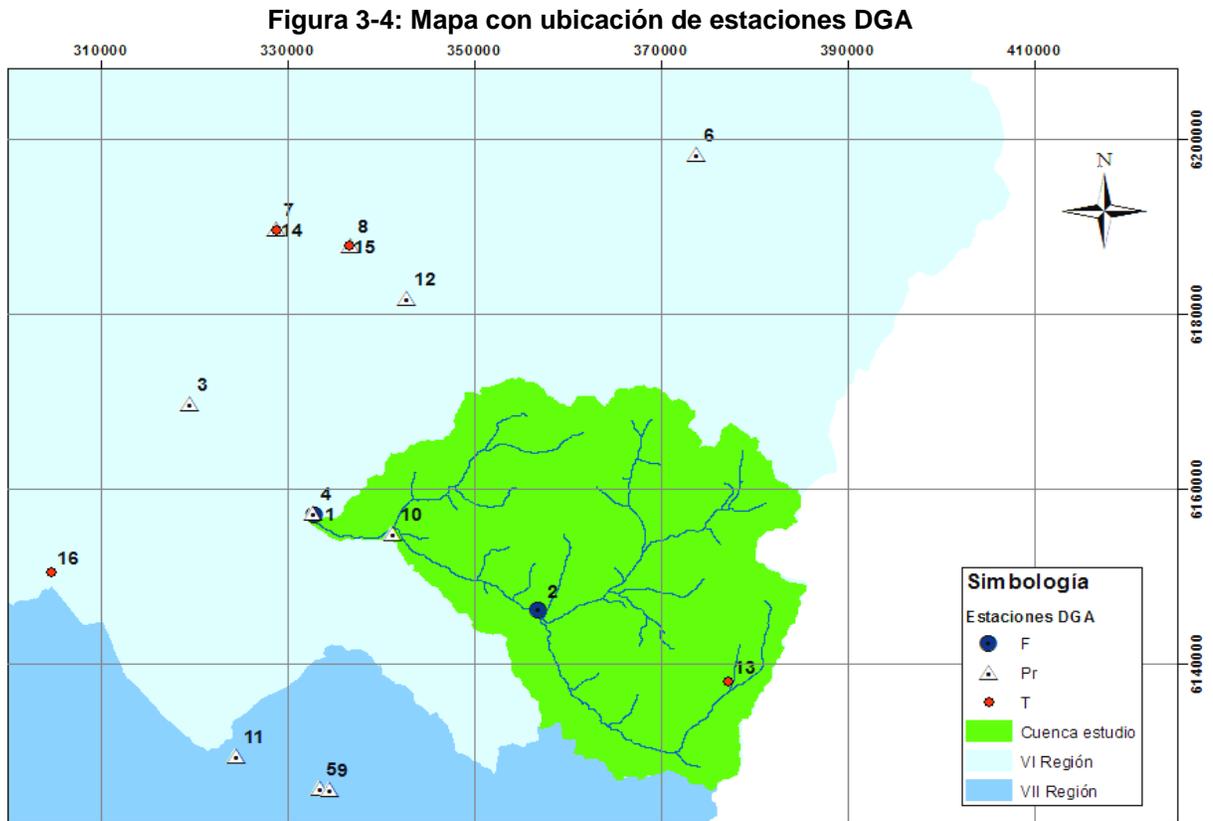
| N° | Código BNA | Tipo          | Nombre de la estación                           | UTM Este | UTM Norte | Elevación [msnm] |
|----|------------|---------------|---|----------|-----------|------------------|
| 1  | 06028001-0 | Fluviométrica | Río Tinguiririca bajo Los Briones               | 332727   | 6156581   | 560              |
| 2  | 06025001-4 | Fluviométrica | Río Tinguiririca aguas abajo junta río Azufre   | 356936   | 6146143   | 1024             |
| 3  | 06016004-K | Pluviométrica | San Fernando                                    | 319466   | 6169677   | 350              |
| 4  | 06028001-0 | Pluviométrica | Río Tinguiririca bajo Los Briones               | 332727   | 6156581   | 560              |
| 5  | 07104002-K | Pluviométrica | Río Teno después de junta con Claro             | 333846   | 6125812   | 647              |
| 6  | 06003001-4 | Pluviométrica | Río Cachapoal 5 km aguas abajo junta Cortaderal | 373401   | 6198518   | 1,127            |
| 7  | 06015003-6 | Pluviométrica | Rengo   | 328455   | 6189449   | 310              |
| 8  | 06013005-1 | Pluviométrica | Popeta  | 336501   | 6187899   | 480              |
| 9  | 07103003-2 | Pluviométrica | Los Queñes                                      | 334641   | 6125303   | 663              |
| 10 | 06027003-1 | Pluviométrica | La Rufina                                       | 339617   | 6154023   | 743              |
| 11 | 07104005-4 | Pluviométrica | El Manzano                                      | 324902   | 6129282   | 574              |
| 12 | 06013006-K | Pluviométrica | Central Las Nieves                              | 343037   | 6181879   | 700              |
| 13 | 06020001-7 | Temperatura   | Termas del Flaco                                | 378490   | 6138164   | 2650             |
| 14 | 06015003-6 | Temperatura   | Rengo   | 328455   | 6189449   | 310              |
| 15 | 06013005-1 | Temperatura   | Popeta  | 336501   | 6187899   | 480              |
| 16 | 06034003-K | Temperatura   | Convento Viejo                                  | 304786   | 6150390   | 239              |

Para definir las estaciones a utilizar, se realizó una inspección de la calidad de los datos, considerando el periodo de los registros y la continuidad de éstos en el tiempo. En la

Figura 3-5 se presenta un resumen de los registros de las estaciones proporcionado por la DGA, donde se indica si los años están completos o si les falta información, cuantificando para los años incompletos, en días o meses faltantes.

Fuera de los registros proporcionados por la DGA, la cuenca no cuenta con estaciones que midan otras variables a las presentadas en la Tabla 3-4. Además, en la Figura 3-5 se observa que la calidad de los registros es pobre para el caso de las temperaturas y caudales, ya que sólo se cuenta con cuatro estaciones de temperatura y dos de caudales, las cuales además poseen varios vacíos de información.

Para definir el periodo base, se deben seleccionar años consecutivos que posean registros completos o posibles de rellenar para cada tipo de estación (fluviométrica, pluviométrica y de temperaturas).





## 4. SELECCIÓN DE UN GCM Y SU ESCALAMIENTO

Existe una gran cantidad de GCM's disponibles, por lo que primero es necesario filtrar los modelos que simulan los escenarios 20C3M, A1B y A2, y que presenten resultados a escala diaria. El escenario 20C3M corresponde a la modelación del siglo XX y es el escenario que se utiliza para correlacionar los GCM's con los datos del reanálisis, mientras que los escenarios A1B y A2 son de cambio climático y corresponden a modelaciones para los periodos futuros que se desea analizar (2046-2065 y 2081-2100), bajo las implicancias que cada escenario presenta (ver capítulo 2).

Una vez revisados los 2 criterios básicos, se obtiene la lista de modelos posibles de utilizar, los que se presentan en la Tabla 4-1.

Los GCM's se encuentran disponibles en internet y son de libre disposición (University of California, 2004), al igual que los ficheros del reanálisis (ESRL PSD, 2005; NOAA, 2005). La información contenida en los modelos y en el reanálisis esta almacenada en archivos con formato "NetCDF", que corresponden a archivos que contienen matrices multidimensionales y poseen gran capacidad de almacenamiento de datos.

Para seleccionar el GCM que se usará para la modelación hidrológica, es necesario comparar los resultados que entrega cada GCM con los del reanálisis para la zona de estudio, sin embargo, no es posible hacer esto directamente, ya que tanto los GCM's como el reanálisis tienen resoluciones espaciales distintas y para representar los resultados de un área menor a dichas resoluciones, se debe tener un modelo regional o hacer directamente un escalamiento de los GCM's y reanálisis para poder compararlos en un punto en particular, que en este caso debe ser un punto representativo de la cuenca para la variable que se desea comparar.

Se realiza primero el escalamiento de las precipitaciones, ya que éstas corresponden a la variable meteorológica de interés que presenta mayores variaciones, a diferencia de las temperaturas que tienen un comportamiento más estable y tienen menor variación entre los diferentes GCM's. Dado esto, la elección del GCM se base en las precipitaciones. Para esto, es necesario definir las estaciones base con las cuales se escalaran los GCM's para su posterior análisis en dichos puntos de interés.

### 4.1 Selección de estaciones base para escalamiento y selección de GCM's

Estación Pluviométrica: Dentro de las estaciones disponibles, la única que se encuentra dentro de la cuenca corresponde a la estación "La Rufina", la que además tiene la mejor calidad de registros, razones por la cual se define como estación base para la selección del GCM. Para completar los registros se utiliza la estación pluviométrica que da mejores correlaciones, correspondiente a la estación "Los Queñes", ubicada en la cuenca del río Teno, 30 km de "La Rufina".

Estación de Temperaturas: Se cuenta con cuatro estaciones, de las cuales sólo dos poseen registros en el mismo periodo que las estaciones pluviométricas y fluviométricas seleccionadas. Se opta por la estación "Rengo", ya que es la que se encuentra más próxima a la cuenca y tiene una elevación mayor, la cual es rellenada con la otra estación correspondiente a "Convento Viejo".

**Tabla 4-1: GCM's con escenarios 20C3M (período 1961-1999), A2 (períodos 2046-2065 y 2081-2100) y A1B (período 2010-2100), a escala diaria**

| Centro, País de origen  | Sigla        | Modelo           | Resolución |          | N° |
|---|--------------|------------------|------------|----------|----|
|   |              |                  | Latitud    | Longitud |    |
| Bjerknes Centre for Climate Research<br><b>Noruega</b>  | BCCR         | BCM2             | 2.8°       | 2.8°     | 1  |
| National Center for Atmospheric Research<br><b>USA</b>  | NCAR         | CCSM3            | 1.40°      | 1.40°    | 2  |
|   |              | PCM1             | 2.8°       | 2.8°     | 3  |
| Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis<br><b>Canada</b>   | CCCma        | CGCM3.1          | 3.75°      | 3.75°    | 4  |
| Centre National de Recherches Meteorologiques<br><b>Francia</b>   | CNRM         | CNRM-CM3         | 2.81°      | 2.81°    | 5  |
| Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization<br><b>Australia</b>  | CSIRO        | Mk3.0            | 1.88°      | 1.88°    | 6  |
|   |              | Mk3.5            | 1.88°      | 1.88°    | 7  |
| Max Planck Institute for Meteorology<br><b>Alemania</b>   | MPI          | ECHAM5           | 1.88°      | 1.88°    | 8  |
| Meteorological Institute of the University of Bonn, <b>Alemania</b><br>Institute of Korea Meteorological Administration, <b>Corea</b> | MIUB<br>IKMA | ECHO-G           | 3.75°      | 3.75°    | 9  |
| Geophysical Fluid Dynamics Laboratory<br><b>USA</b>   | GFDL         | CM2.0            | 2°         | 2.5°     | 10 |
|   |              | CM2.1            | 2°         | 2.5°     | 11 |
| Goddard Institute for Space Studies<br><b>USA</b>   | GISS         | NASA/GISS        | 4°         | 5°       | 12 |
| National Institute of Geophysics and Volcanology<br><b>Italia</b>   | INGV         | ECHAM 4.6        | 1.13°      | 1.13°    | 13 |
| Institute for Numerical Mathematics<br><b>Rusia</b>   | INM          | INM-CM3.0        | 4°         | 5°       | 14 |
| Institut Pierre Simon Laplace<br><b>Francia</b>   | IPSL         | IPSL-CM4         | 2.50°      | 3.75°    | 15 |
| Center for Climate System Research, <b>Japón</b><br>National Institute for Environmental Studies, <b>Japón</b>                        | CCSR<br>NIES | MIROC3.2(medres) | 2.8°       | 2.8°     | 16 |
| Meteorological Research Institute<br><b>Japón</b>   | MRI          | CGCM2.3.2        | 2.8°       | 2.8°     | 17 |

## 4.2 Escalamiento de precipitaciones para GCM's en estación "La Rufina"

Para realizar el escalamiento, primero se extraen las series de precipitaciones que entregan los GCM's para el escenario 20C3M a escala diaria, correspondientes a modelaciones del siglo XX para el periodo comprendido entre los años 1961 y 1999. También se obtiene la serie de precipitaciones para el reanálisis, que representa el estado global de la atmósfera, el cual está en continuo ajuste con incorporación de observaciones y predicciones numéricas.

El escalamiento se realiza en dos etapas, primero un escalamiento espacial y luego uno temporal (Lagos & Vargas, 2012) utilizando la ubicación de una estación meteorológica local, que para el caso de las precipitaciones corresponde a la estación "La Rufina". Con el escalamiento espacial de los modelos GCM's y el reanálisis, se realizan correlaciones entre cada GCM y el reanálisis en dicho punto geográfico, de modo de seleccionar el o los modelos CGM's que presenten mejor ajuste respecto al reanálisis.

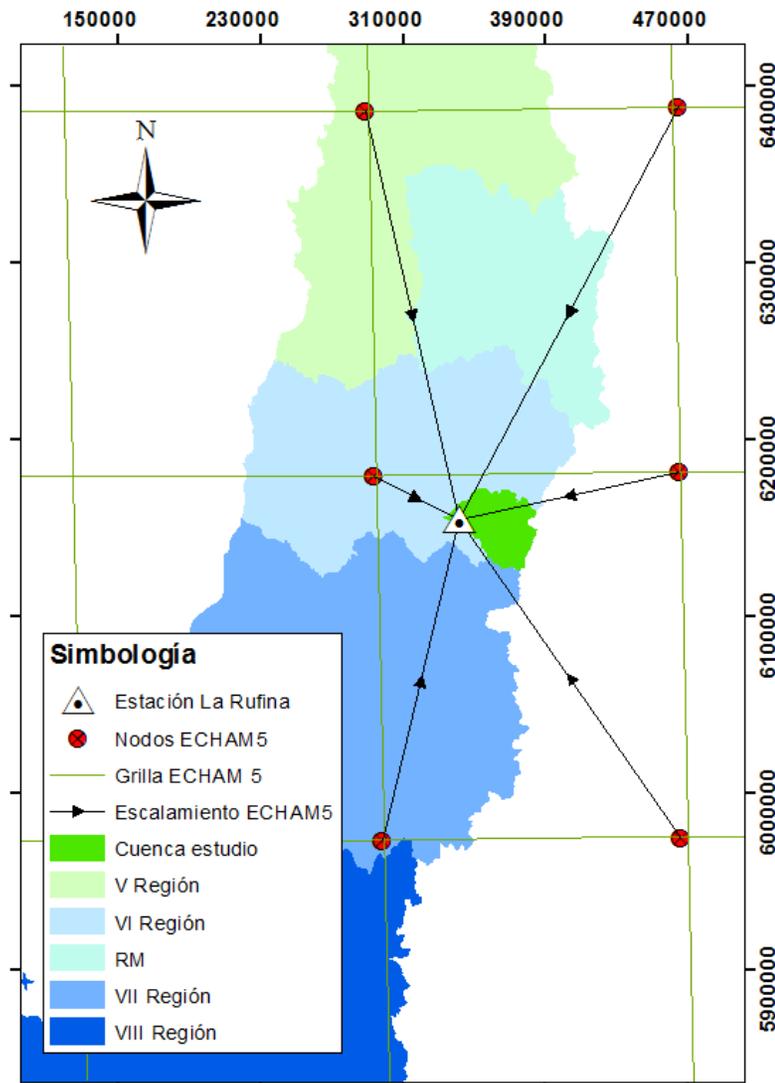
### 4.2.1 Escalamiento Espacial

Para realizar el escalamiento espacial de un GCM, se utiliza el procedimiento descrito por Lagos & Vargas (2012), en el cual, se toman las series de precipitaciones diarias para los nodos de la grilla del modelo que se encuentren más próximos a la zona de estudio. Dado que las grillas de todos los GCM's no son necesariamente iguales entre sí, y son diferentes a la grilla del reanálisis debido a las distintas resoluciones de los

modelos (Ver Tabla 4-1), la cantidad de nodos de la grilla utilizados para realizar el escalamiento espacial puede variar entre 4 y 6 nodos para cada modelo, con el fin de mejorar la representatividad del punto geográfico en el cual se realiza el escalamiento espacial.

El proceso consiste en ponderar las precipitaciones por el inverso de las distancias entre cada nodo y la estación meteorológica (Lagos & Vargas, 2012), con lo que se obtiene una serie única para el punto geográfico, la cual es representativa para la estación que caracteriza la cuenca. En la Figura 4-1 se presenta un ejemplo del este procedimiento para el GCM ECHAM5.

Figura 4-1: Ejemplo escalamiento espacial para ECHAM5 en la estación pluviométrica “La Rufina”



## 4.2.2 Correlaciones de precipitaciones entre GCM's y reanálisis

Como resultado del escalamiento espacial, se tiene:

- Una serie de precipitaciones diarias, única y representativa de la estación para cada GCM (los nodos de cada GCM que rodean la cuenca se sintetizan en un único punto ubicado en las coordenadas de la estación "La Rufina")
- Una serie de precipitaciones única para el reanálisis (igual que con los GCM's).
- Con las series de precipitaciones obtenidas para los GCM's y reanálisis, se hacen comparaciones una a una entre cada GCM con el reanálisis, las cuales corresponden al período comprendido entre 1961 y 1999.

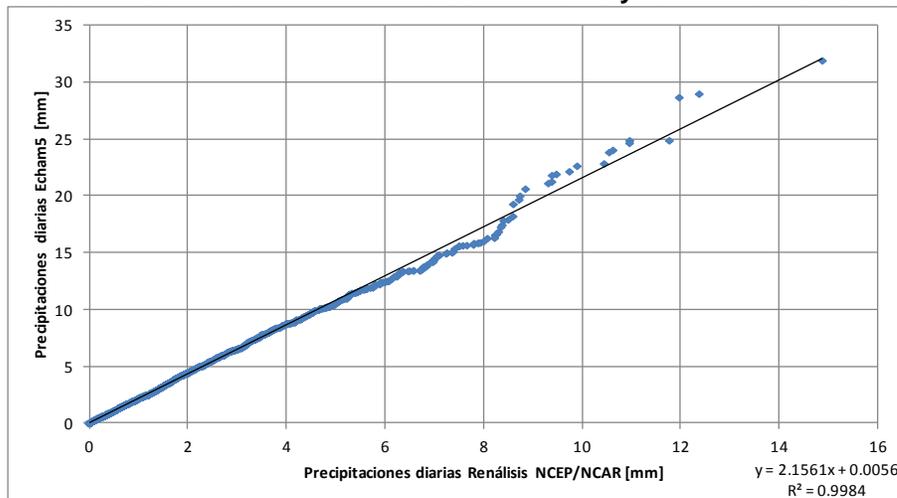
Para realizar las correlaciones entre un GCM y el reanálisis, se toman las series de precipitaciones diarias obtenidas del escalamiento espacial y luego se hacen correlaciones estadísticas entre las precipitaciones diarias del GCM y las del reanálisis, asociadas a igual probabilidad de excedencia (en el periodo 1961-1999). Se realiza este mismo procedimiento con las series de precipitaciones mensuales y anuales para obtener la correlación estadísticas a nivel mensual y anual respectivamente (en el período 1961-1999). En los Gráficos 4-1, 4-2 y 4-3 se presentan como ejemplo las correlaciones estadísticas diarias, mensuales y anuales para el GCM ECHAM5 con el reanálisis.

El procedimiento de escalamiento espacial se repite para cada modelo de la Tabla 4-1 para luego correlacionarlo con el reanálisis. El resultado de las correlaciones de cada GCM con el reanálisis, se presenta en la Tabla 4-2.

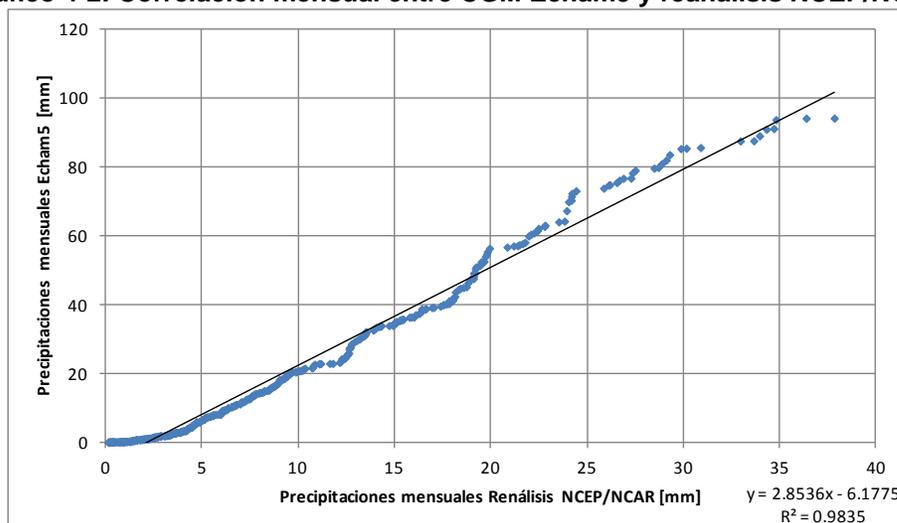
**Tabla 4-2: Resumen de correlaciones de GCM's con reanálisis en el período 1961-1999**

| N° | MODELOS GCM, origen.    | DIARIO         |                  | MENSUAL        |                   | ANUAL          |                    |
|----|-------------------------|----------------|------------------|----------------|-------------------|----------------|--------------------|
|    |                         | R <sup>2</sup> | y= ax + b        | R <sup>2</sup> | y= ax + b         | R <sup>2</sup> | y= ax + b          |
| 1  | BCCR-BCM2.0, Norway     | 0.899          | y = 2.7x + 0.61  | 0.984          | y = 4.17x + 3.76  | 0.971          | y = 3.93x + 74.39  |
| 2  | CCSM3, USA              | 0.990          | y = 2.9x + 0.10  | 0.990          | y = 2.95x + 8.02  | 0.935          | y = 2.82x + 111.87 |
| 3  | PCM1, USA               | 0.903          | y = 1.55x + 0.40 | 0.967          | y = 1.91x + 8.52  | 0.961          | y = 1.20x + 187.06 |
| 4  | CGCM3.1(T47), Canada    | 0.956          | y = 0.34x + 0.04 | 0.990          | y = 0.35x + 0.93  | 0.851          | y = 0.38x + 7.98   |
| 5  | CNRM-CM3, France        | 0.888          | y = 2.82x + 0.81 | 0.982          | y = 4.16x + 11.48 | 0.972          | y = 3.21x + 250.90 |
| 6  | CSIRO-Mk3.0, Australia  | 0.983          | y = 1.14x + 0.15 | 0.978          | y = 1.38x + 2.31  | 0.981          | y = 1.08x + 63.29  |
| 7  | CSIRO-Mk3.5, Australia  | 0.996          | y = 1.12x + 0.01 | 0.984          | y = 1.40x - 2.47  | 0.932          | y = 1.30x - 18.04  |
| 8  | ECHAM5/MPI-OM, Germany  | 0.998          | y = 2.16x + 0.01 | 0.984          | y = 2.85x - 6.18  | 0.959          | y = 2.43x - 31.03  |
| 9  | ECHO-G, Germany/Korea   | 0.911          | y = 0.89x + 0.14 | 0.924          | y = 0.91x + 3.97  | 0.953          | y = 0.87x + 52.88  |
| 10 | GFDL-CM2.0, USA         | 0.956          | y = 1.2x + 0.18  | 0.982          | y = 1.56x + 2.02  | 0.938          | y = 1.51x + 30.39  |
| 11 | GFDL-CM2.1, USA         | 0.997          | y = 1.21x + 0.03 | 0.982          | y = 1.64x - 3.46  | 0.952          | y = 1.47x - 20.94  |
| 12 | GISS-ER, USA (*)        | 0.926          | y = 1.81x + 0.40 | 0.970          | y = 3.14x - 1.18  | 0.761          | y = 5.14x - 252.83 |
| 13 | INGV-SXG, Italy         | 0.971          | y = 3.73x + 0.37 | 0.997          | y = 4.48x + 2.99  | 0.954          | y = 5.35x - 67.33  |
| 14 | INM-CM3.0, Russia       | 0.928          | y = 0.20x + 0.05 | 0.987          | y = 0.23x + 1.25  | 0.9644         | y = 0.29x + 7.96   |
| 15 | IPSL-CM4, France        | 0.961          | y = 0.93x + 0.11 | 0.989          | y = 1.21x + 0.24  | 0.983          | y = 0.85x + 45.46  |
| 16 | MIROC3.2(medres), Japan | 0.993          | y = 1.14x + 0.08 | 0.989          | y = 1.49x - 1.10  | 0.949          | y = 1.32x + 7.48   |
| 17 | MRI-CGCM2.3.2, Japan    | 0.996          | y = 1.48x + 0.06 | 0.972          | y = 1.73x - 0.46  | 0.970          | y = 1.79x - 13.69  |

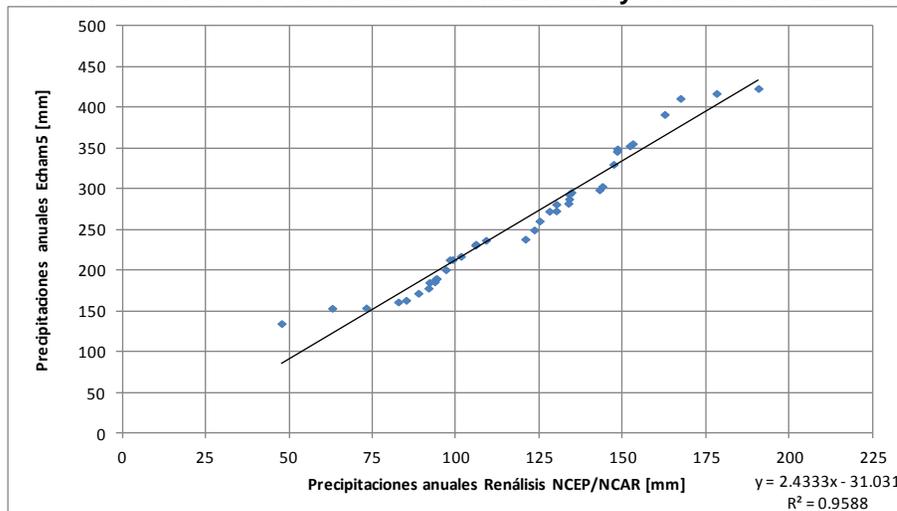
**Gráfico 4-1: Correlación diaria entre CGM Echam5 y reanálisis NCEP/NCAR**



**Gráfico 4-2: Correlación mensual entre CGM Echam5 y reanálisis NCEP/NCAR**



**Gráfico 4-3: Correlación anual entre CGM Echam5 y reanálisis NCEP/NCAR**



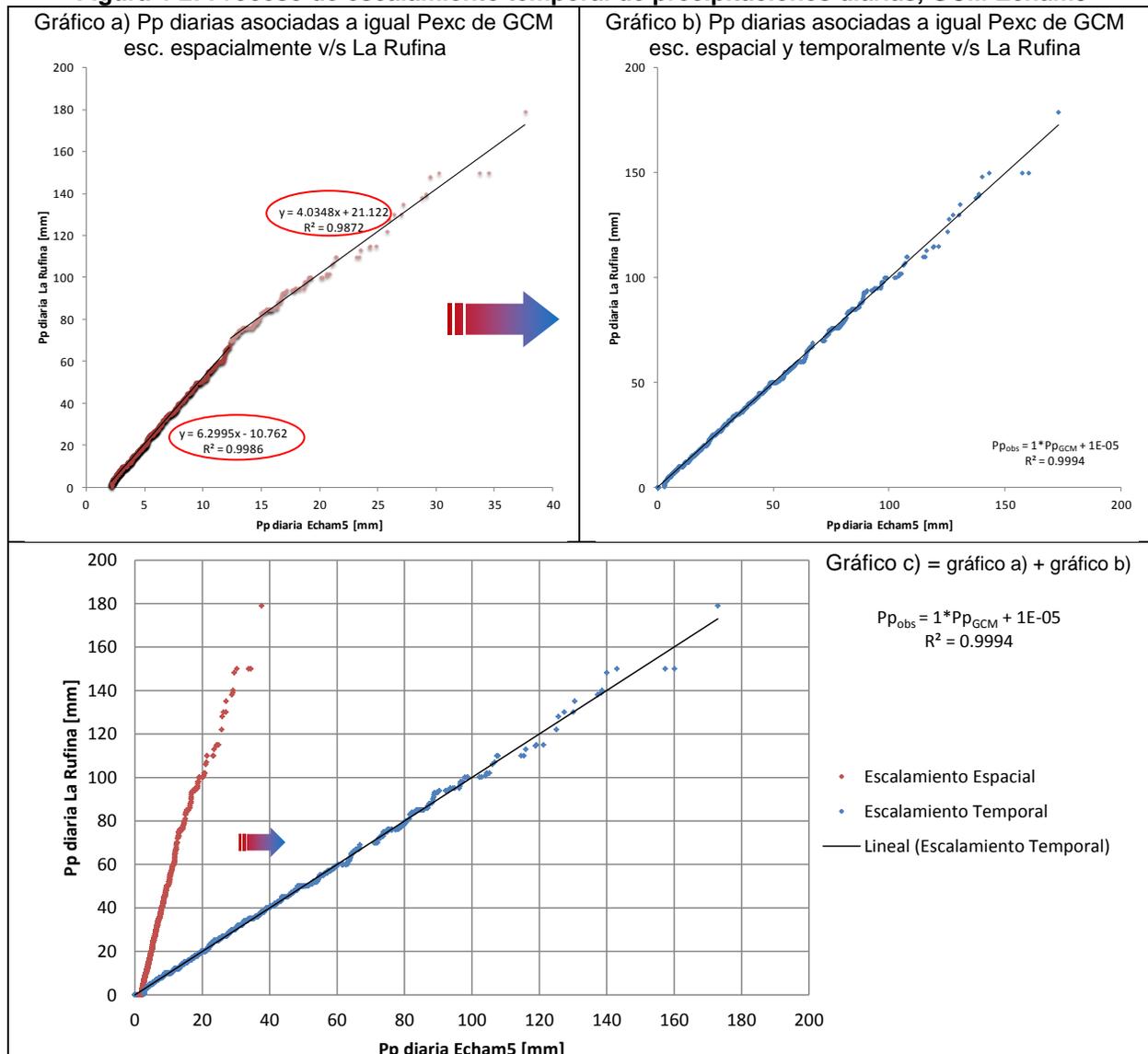
Con los resultados de las correlaciones de los CGM's con el reanálisis mostrados en la Tabla 4-2, se seleccionan los 3 modelos que presentan los mejores ajustes a escala diaria, sin desmedro de las escalas mensual, anual y la forma gráfica de las correlaciones. El resto de los GCM's no seleccionados, se descartan.

Los GCM's que presentan los mejores ajustes son: Csiro-mk3.5, Echam5 y Miroc3.2. Para escoger cuál de estos GCM será el definitivo, se realiza el escalamiento temporal con cada uno de estos para la estación "La Rufina", para así seleccionar el que entregue mejores resultados para la zona de estudio.

### 4.2.3 Escalamiento temporal

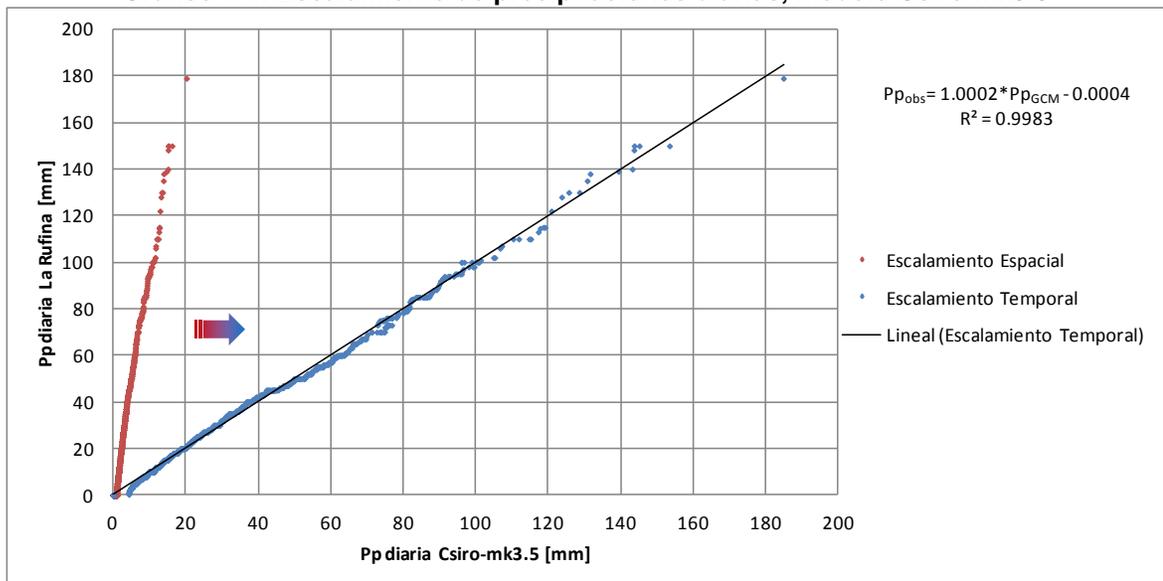
Con las series de precipitaciones diarias de los GCM's seleccionados escaladas espacialmente en la sección anterior, se ajustan estadísticamente con las precipitaciones observadas en la estación "La Rufina", tomando las precipitaciones diarias asociadas a igual probabilidad de excedencia (Lagos & Vargas, 2012). Para este proceso se utiliza el periodo 1961-1999.

**Figura 4-2: Proceso de escalamiento temporal de precipitaciones diarias, GCM Echam5**

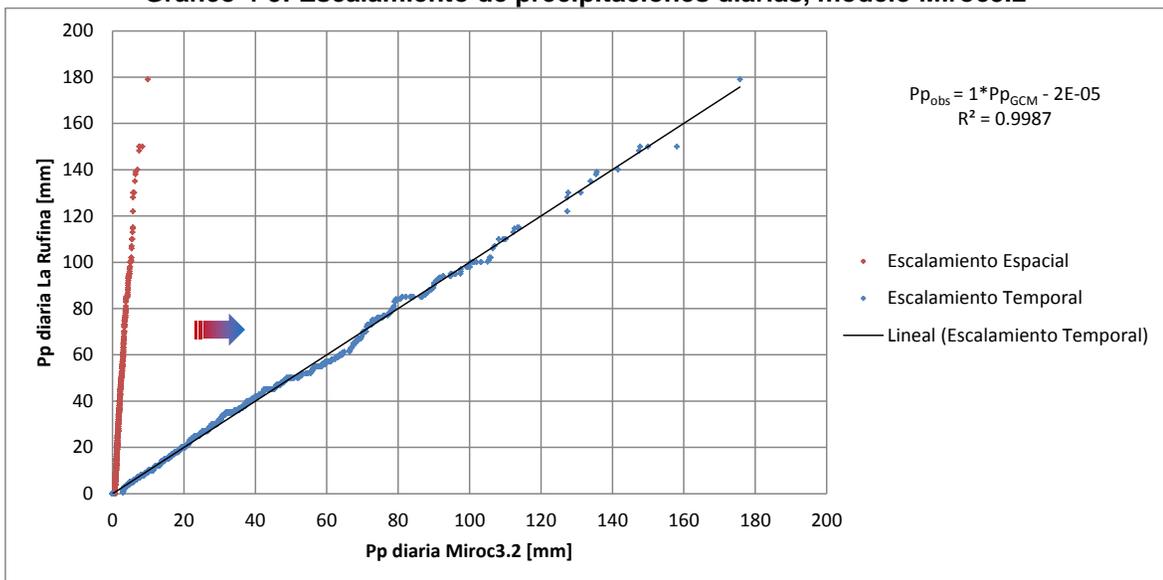


En la Figura 4-2, se presentan tres gráficos, el gráfico a) corresponde a las series de precipitaciones diarias asociadas a igual probabilidad de excedencia, del GCM Echam5 escalado espacialmente (en la ubicación de la estación “La Rufina”) v/s las precipitaciones diarias observadas en la estación “La Rufina”. De este gráfico, se obtienen los ajustes estadísticos necesarios para realizar el escalamiento temporal. Una vez aplicados dichos ajustes, se obtiene la serie de precipitaciones escaladas temporalmente para el GCM en “La Rufina”. En el gráfico b), se muestra las precipitaciones diarias asociadas a igual probabilidad de excedencia, del GCM Echam5 escalado temporalmente (en la ubicación de la estación “La Rufina”) v/s las precipitaciones observadas en dicha estación. Finalmente en el gráfico c) se presentan los resultados de los gráficos a) y b) en conjunto, que por simplicidad corresponde al tipo de gráfico con el cual se presentan los resultados del escalamiento temporal para los otros GCM’s (Csiro-mk3.5 y Miroc3.2). En los Gráficos 4-4 y 4-5 se presentan los escalamientos temporales para los GCM’s Csiro-mk3.5 y Miroc3.2.

**Gráfico 4-4: Escalamiento de precipitaciones diarias, modelo Csiro-mk3.5**



**Gráfico 4-5: Escalamiento de precipitaciones diarias, modelo Miroc3.2**



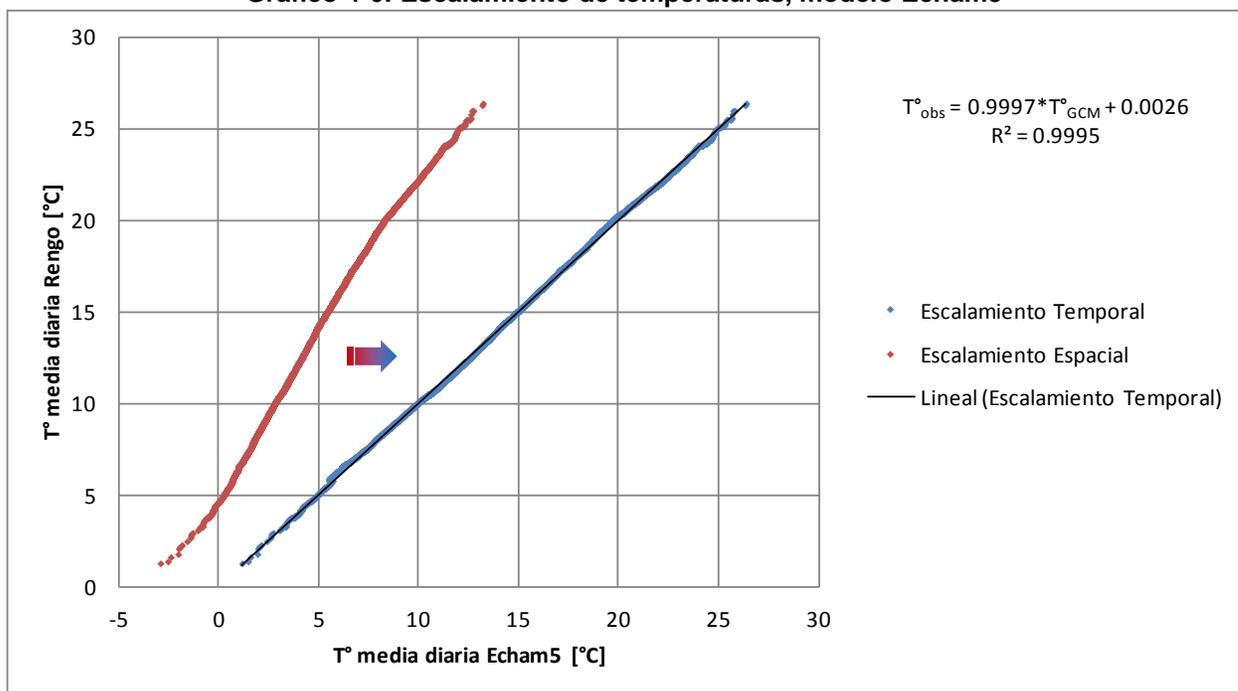
Con los resultados del escalamiento temporal de los GCM's mostrados anteriormente (Gráfico C de Figura 4-2 y Gráficos 4-4 y 4-5), se considera que el GCM que presenta el mejor ajuste corresponde al modelo Echam5, considerado así el más representativo de la zona de estudio. Dado esto, las proyecciones de variables meteorológicas bajo escenario A1B y A2 de cambio climático se realizarán utilizando este GCM. Cabe destacar, que la variación de las precipitaciones que entregan los GCM's son sustancialmente menores que observadas en la estación "La Rufina", sin embargo, con los ajustes estadísticos, estos valores son normalizados.

El modelo de circulación general de la atmosfera ECHAM5 fue desarrollado por el Instituto Max Planck para Meteorología, publicado el año 2003 (Roekner *et al* 2003) y corresponde a la última versión del modelo ECHAM. El grillado espacial de este modelo es de 1.88° y cuenta con simulaciones para varios escenarios y entrega resultados a escala de tiempo diaria y mensual.

### 4.3 Escalamiento de temperaturas para modelo Echam5 en estación "Rengo"

De la misma forma que se llevó a cabo el escalamiento de precipitaciones en la estación "La Rufina", se realiza el escalamiento espacial y temporal para la serie de temperaturas del modelo ECHAM5, pero esta vez utilizando la estación meteorológica "Rengo" y el periodo comprendido entre los años 1970 y 1993. A continuación en el Gráfico 4-6 se muestra el resultado del escalamiento de temperaturas del modelo ECHAM5 en "Rengo".

Gráfico 4-6: Escalamiento de temperaturas, modelo Echam5



Al igual que en el caso de las precipitaciones, las temperaturas que entrega el GCM Echam5, son menores que las observadas en la estación "Rengo", sin embargo, con el ajuste estadístico, dichas temperaturas quedan normalizadas.

## 5. MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON EL MODELO WEAP

Para la modelación se utilizó la última versión oficial del modelo WEAP (versión: 3.22, Octubre 31, 2011) que se encuentra disponible en el sitio web oficial del modelo (SEI, 2012). De las cuatro modalidades que cuenta WEAP para modelar hidrológicamente una cuenca, el método utilizado es el “*Rainfall Runoff*” que corresponde al método de humedad del suelo.

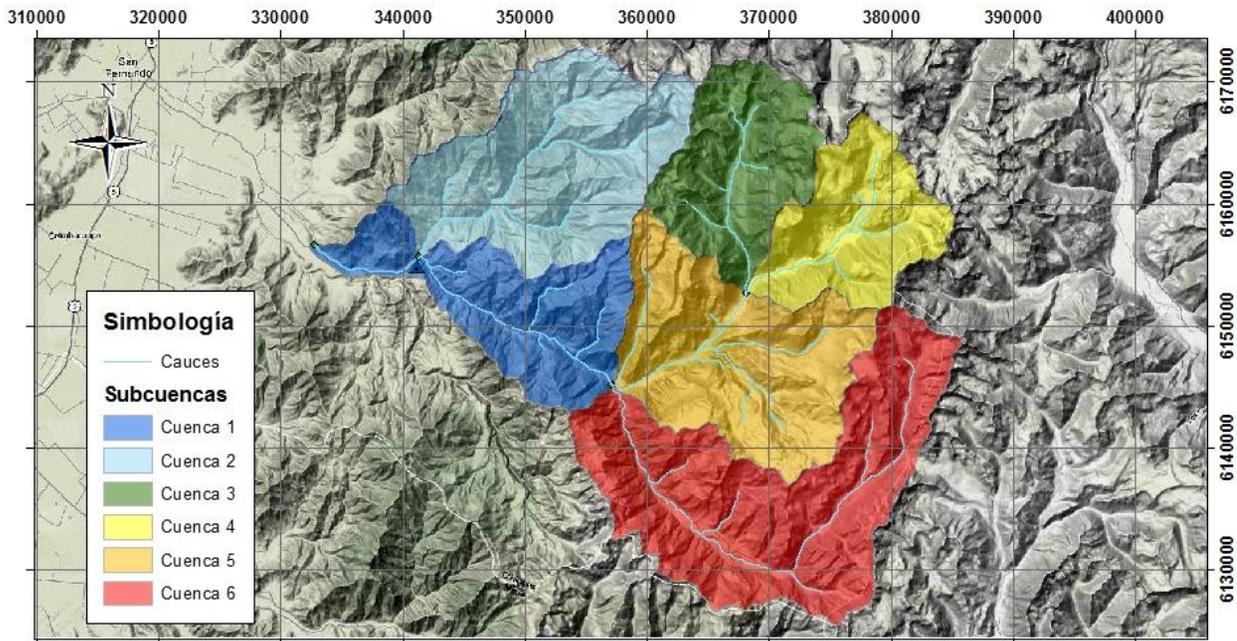
### 5.1 Construcción del modelo

#### 5.1.1 Configuración de la cuenca

Dadas las características de la cuenca (ver capítulo 3) es necesario para el modelo dividirla en sub cuencas y a la vez cada sub cuenca en bandas de elevación. Las sub cuencas son necesarias para representar de forma aislada los procesos que ocurren en las cuencas de los tributarios del cauce principal, y las bandas de elevación son necesarias, ya que las variables forzantes del modelo presentan variaciones importantes en altura, pues que se trata de una cuenca cordillerana y las diferencias de elevación entre la salida de la cuenca y las zonas más altas, son superiores a los 3.000 metros.

Según lo anterior, la desagregación de la cuenca en sub cuencas se muestra en la Figura 5-1 y las bandas de elevación para cada una de las sub cuencas, se indican en la Tabla 5-1.

Figura 5-1: Desagregación de la cuenca en sub cuencas

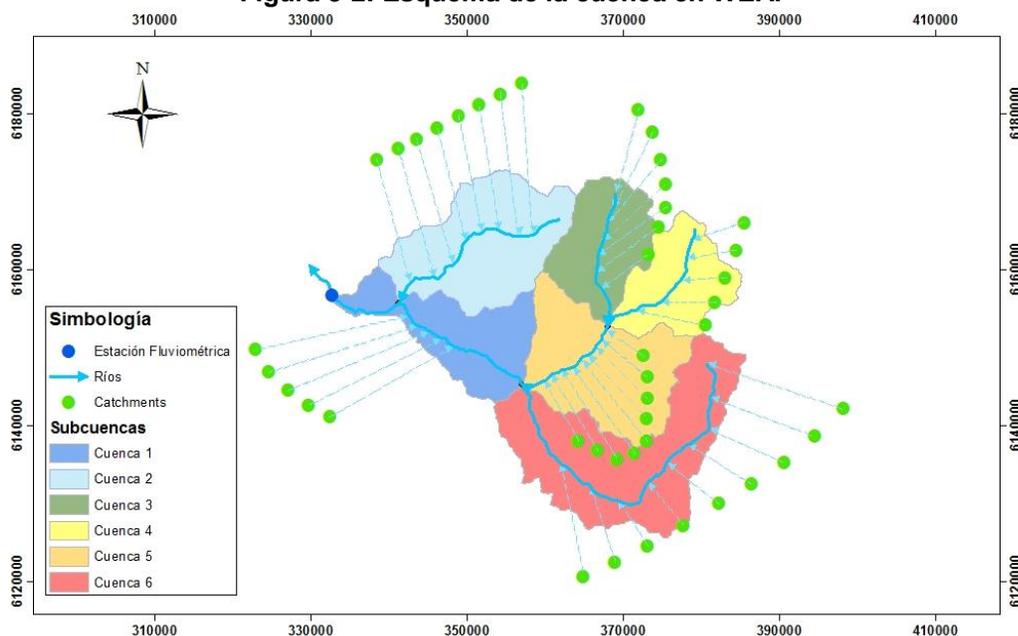


**Tabla 5-1: Bandas de elevación para cada sub cuenca definida**

| Sub cuenca | Id Banda | Elevación media [msnm] | Area banda [km2] | Sub cuenca | Id Banda | Elevación media [msnm] | Area banda [km2] |
|------------|----------|------------------------|------------------|------------|----------|------------------------|------------------|
| 1          | C1_FJ06  | 3027                   | 26.9             | 4          | C4_FJ01  | 4280                   | 54.1             |
|            | C1_FJ07  | 2212                   | 18.4             |            | C4_FJ02  | 3460                   | 35.1             |
|            | C1_FJ08  | 1921                   | 25.6             |            | C4_FJ03  | 3177                   | 19.3             |
|            | C1_FJ09  | 1580                   | 36.1             |            | C4_FJ04  | 2814                   | 24.1             |
|            | C1_FJ10  | 981                    | 83.3             |            | C4_FJ06  | 1572                   | 23.8             |
| 2          | C2_FJ03  | 3446                   | 33.5             |            | 5        | C5_FJ01                | 4130             |
|            | C2_FJ04  | 2932                   | 21.0             | C5_FJ02    |          | 3460                   | 34.6             |
|            | C2_FJ05  | 2696                   | 25.7             | C5_FJ03    |          | 3177                   | 37.4             |
|            | C2_FJ06  | 2462                   | 33.0             | C5_FJ04    |          | 2932                   | 36.4             |
|            | C2_FJ07  | 2211                   | 40.6             | C5_FJ05    |          | 2696                   | 29.6             |
|            | C2_FJ08  | 1920                   | 41.0             | C5_FJ06    |          | 2462                   | 22.4             |
|            | C2_FJ09  | 1580                   | 38.7             | C5_FJ07    |          | 2211                   | 21.1             |
|            | C2_FJ10  | 980                    | 44.2             | C5_FJ08    |          | 1920                   | 23.8             |
| 3          | C3_FJ01  | 4280                   | 22.7             | 6          |          | C5_FJ09                | 1165             |
|            | C3_FJ02  | 3460                   | 20.4             |            | C6_FJ01  | 4135                   | 43.5             |
|            | C3_FJ03  | 3177                   | 25.9             |            | C6_FJ02  | 3460                   | 38.6             |
|            | C3_FJ04  | 2932                   | 22.7             |            | C6_FJ03  | 3177                   | 37.8             |
|            | C3_FJ05  | 2696                   | 21.0             |            | C6_FJ04  | 2932                   | 46.4             |
|            | C3_FJ06  | 2462                   | 20.3             |            | C6_FJ05  | 2696                   | 49.3             |
|            | C3_FJ07  | 1456                   | 32.6             |            | C6_FJ06  | 2462                   | 44.8             |
|            |          |                        | C6_FJ07          |            | 2211     | 37.2                   |                  |
|            |          |                        | C6_FJ08          |            | 1920     | 36.8                   |                  |
|            |          |                        | C6_FJ09          | 1165       | 43.4     |                        |                  |

Con esta distribución de áreas, la cuenca queda dividida en 6 sub cuencas y con una cantidad variable de bandas de elevación por cada una de ellas. Estas discretizaciones quedan finalmente esquematizadas en el modelo WEAP por 43 *catchments* o *elementos*, como se observa en la Figura 5-2.

**Figura 5-2: Esquema de la cuenca en WEAP**



### 5.1.2 Datos de entrada para la modelación

Para cada *elemento* de la cuenca es necesario contar con las variables forzantes que definen la modelación hidrológica. Las variables forzantes que se utilizan son precipitaciones y temperatura, dado que corresponden a las exigencias mínimas para modelar con WEAP. Además, no existe información disponible, en la cuenca y sus alrededores, de otras variables relevantes como viento, humedad, radiación, etc.

Antes de definir las estaciones y periodos con los cuales se calibra el modelo WEAP, es necesario hacer una distinción entre el proceso de selección del GCM que se utilizará para proyectar las variables meteorológicas y el proceso modelación hidrológica. En el primero se utilizó la estación pluviométrica “La Rufina”, por tratarse de la única estación de este tipo que se ubica dentro de los límites de la cuenca en estudio, mientras que la estación de temperaturas “Rengo” es la estación de este tipo más cercana a la cuenca (no hay estaciones de temperatura con una cantidad de datos suficientes para trabajar dentro de los límites de la cuenca). Ambas estaciones se utilizan para caracterizar la zona de estudio y seleccionar adecuadamente el GCM. Por otra parte, las estaciones utilizadas para la modelación hidrológica con WEAP, no deben ser necesariamente las mismas, ya que se busca calibrar el modelo con la mayor cantidad información disponible que mejore los resultados.

En el capítulo 3 se pueden ver las ubicaciones de las estaciones disponibles junto con los periodos en los que existen registros diarios para cada estación (Figuras 3-4 y 3-5). Con estos antecedentes se define el periodo para realizar la calibración y validación del modelo hidrológico, período comprendido entre los años hidrológicos de 1978 y 1992, período en el cual existe simultáneamente información de estaciones de precipitaciones, temperaturas y caudales. A continuación se detallan las estaciones bases utilizadas para el modelo:

- Estación base de temperaturas: Corresponde a la estación “Rengo”, la cual cuenta con registros incompletos para el periodo hidrológico seleccionado (1978-1992), por lo cual se rellena con la estación “Convento Viejo” utilizando correlaciones diarias a nivel mensual.
- Estación base de Precipitaciones: En el caso de las precipitaciones, se seleccionan 2 estaciones base. Para las sub cuencas 2 ,3 ,4 y 5 se utiliza la estación “Central las Nieves” y para las sub cuencas 1 y 6 se utiliza la estación “La Rufina”. Se diferencian de esta forma por la orientación y ubicación que tienen las sub cuencas, de modo que se represente de mejor forma la dirección en la cual se mueven los frentes de precipitaciones en la zona de estudio.
- Estación Fluviométrica de salida: Dado que la cuenca está controlada por la estación “Río Tinguiririca en Bajo los Briones”, ésta se utiliza como estación base para la modelación hidrológica, la cual se puede rellena con la estación “Tinguiririca aguas abajo junta río Azufre”. Sin embargo, los registros de caudales sólo se utilizan para calibrar el modelo hidrológico, comparando los caudales simulados con los observados, para lo cual es recomendable utilizar valores sin rellena, razón por la que se utilizan los registros originales.

Para obtener las precipitaciones y temperaturas en cada *elemento*, es necesario proyectar las series para diferentes cotas, por lo que se necesitan gradientes de precipitaciones y temperaturas en la cuenca los que se detallan a continuación:

- Gradiente de precipitaciones: El gradiente de precipitaciones se obtiene de la relación que existe entre estaciones pluviométricas ubicadas a diferentes cotas que sean representativas de una zona determinada, idealmente con estaciones dentro del rango de cotas que se desea trabajar. Sin embargo, en la cuenca de estudio y en las cuencas vecinas, no existen estaciones pluviométricas sobre los 1.000 m.s.n.m., mientras que la altura media de la cuenca está sobre los 2.000 m.s.n.m. y la altura máxima de la cuenca sobrepasa los 4.000 m.s.n.m., razón por la cual no es posible calcular un gradiente de precipitaciones para la zona de estudio. Dado esto, se utiliza un gradiente de precipitaciones calculado para la cuenca del río Cachapoal al norte de la cuenca de estudio (Figuroa, 2008), ver Tabla 5-2.
- Gradiente de temperaturas: La disponibilidad de estaciones de temperaturas en la zona de estudio y alrededores es aún más escasa que en el caso de las estaciones pluviométricas, por lo que tampoco es posible calcular un gradiente de temperaturas para la zona de estudio por lo que se utiliza el calculado para la cuenca del río Cachapoal (Figuroa, 2008). En la calibración del modelo se ajusta este gradiente de modo de optimizar los resultados del modelo WEAP. Valores de los gradientes en Tabla 5-2.

**Tabla 5-2: Gradientes utilizados en modelación hidrológica**

| Variable meteorológica      | Gradiente                |
|-----------------------------|--------------------------|
| Precipitación               | 0.00067 [mm/m.s.n.m.]    |
| Temperatura (días c/lluvia) | -0.535 [°C/100 m.s.n.m.] |
| Temperatura (días s/lluvia) | -0.700 [°C/100 m.s.n.m.] |

### 5.1.3 Variables meteorológicas en los *catchment* o *elementos* de la cuenca

Precipitaciones: Para dar un valor a las precipitaciones en cada *elemento* del modelo se utiliza el gradiente de precipitaciones que asocia la estación base con el *elemento*. El cálculo de la precipitación de cada *elemento* queda dado por la siguiente expresión:

$$P_i = P_{base} + \Delta ELEV_i \cdot Gradiente \quad \text{EC: 5-1}$$

Donde:

- $P_i$  : Precipitación en el *elemento* i, [mm]  
 $P_{base}$  : Precipitación medida en la estación base, [mm]  
 $\Delta ELEV_i$  : Diferencia de elevación entre el valor medio del *elemento* y la estación, [m.s.n.m.]  
 $Gradiente$  : Gradiente de precipitaciones, [mm/m.s.n.m.]

Temperaturas: El valor de las temperaturas en cada *elemento* queda dado por la estación base de temperaturas junto con el gradiente, para el cual se utilizan 2 valores distintos, uno para los días con lluvia y otro para los días sin lluvia. Esto queda representado con las siguientes expresiones:

Días sin precipitación:  $Ta_i = Ta + \Delta ELEV_i \cdot GTS$  **EC: 5-2**

Días con precipitación:  $Ta_i = Ta + \Delta ELEV_i \cdot GTC$  **EC: 5-3**

Donde:

$Ta_i$  : Temperatura del aire en el *elemento*  $i$ , [°C]  
 $Ta$  : Temperatura del aire en la estación base, [°C]  
 $\Delta ELEV_i$  : Diferencia de elevación entre el valor medio de la banda y la estación, [m.s.n.m.]  
 $GTS, GTC$  : Gradiente de temperatura para días sin y con lluvia respectivamente, [°C/100 m.s.n.m.]

#### 5.1.4 Uso de Suelo

La cuenca en estudio contiene la mayor parte de su área en el sector de la alta cordillera, por lo cual no existen cultivos de ningún tipo y sólo en la parte baja hay una pequeña porción correspondiente a matorrales. El resto del área es suelo descubierto.

### 5.2 Calibración, validación y análisis de sensibilidad

#### 5.2.1 Criterios de eficiencia para el modelo WEAP

Para determinar la eficiencia del modelo y su ajuste a los datos observados, se utilizan los siguientes cuatro indicadores (ver Capítulo 2):

- Nash Sutcliffe (NS)
- LOG Nash-Sutcliffe (LOG NS)
- Coeficiente de determinación ( $R^2$ )
- Coeficiente de determinación, versión  $wR^2$  ( $wR^2$ )

#### 5.2.2 Calibración del modelo WEAP

La calibración del modelo WEAP se desarrolla para la cuenca del río Tinguiririca, específicamente en la estación fluviométrica “Río Tinguiririca bajo los Briones”, considerando una escala de tiempo diaria y utilizando el periodo comprendido entre abril de 1988 y marzo de 1993, considerando años hidrológicos. Se utiliza este periodo, ya que corresponde al periodo con mayor cantidad de datos continuos para la estación fluviométrica, que coinciden con los registros de precipitación y temperatura. Se usa un período de calibración con menor cantidad de años que en el caso de la validación, por la lentitud que presenta el modelo WEAP al procesar una extensa cantidad de datos producto de la escala a nivel diario y de la cantidad de *elementos* con los que fue modelada la cuenca, lentitud que se traduce en dificultades al momento de calibrar, ya que este proceso involucra correr el modelo una gran cantidad de veces hasta llegar a los valores finales de los parámetros del modelo WEAP.

El proceso de calibración se realiza de forma manual y consiste en variar iterativamente los parámetros del modelo hasta alcanzar valores óptimos para los criterios de eficiencia, en los cuales la mejora de uno no empeore significativamente alguno de los otros.

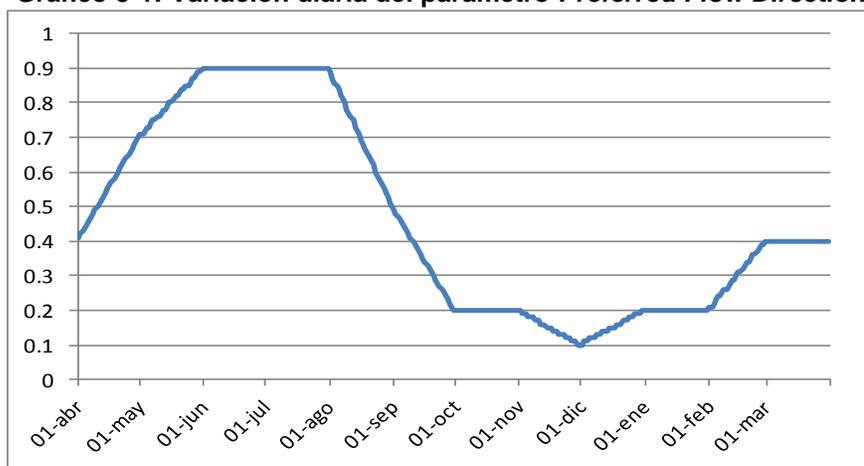
En la Tabla 5-3 se presentan los valores de los parámetros para el modelo calibrado, que corresponde al mejor resultado obtenido para los indicadores de eficiencia del modelo.

**Tabla 5-3: Parámetros del modelo calibrado**

| Parámetros del modelo WEAP      | Valores calibrados                     |
|---------------------------------|--|
| Melting Point [°C]              | 16                                     |
| Freezing Point [°C]             | 2                                      |
| Deep Conductivity [mm/día]      | 500                                    |
| Root Zone Conductivity [mm/día] | 4500                                   |
| Deep Water Capacity [mm]        | 1000-2000-3000                         |
| Soil Water Capacity [mm]        | 1100-2000-5000                         |
| Runoff Resistance Factor        | 0.8                                    |
| Z <sub>1</sub> inicial [%]      | 1                                      |
| Z <sub>2</sub> inicial [%]      | 6                                      |
| Preferred Flow Direction        | Variación diaria con ciclo anual ]0,1[ |

Cabe señalar que los parámetros *Soil Water Capacity* y *Deep Water Capacity* mostrados en la Tabla 5-3, corresponden a los tamaños de los estanques superior e inferior en el modelo, que son la representación conceptual del suelo. Se asignan valores a estos parámetros dependiendo la altura media de cada *elemento*. De esta forma se tienen tres rangos para asignar un valor: para alturas medias menores a 2.000 m.s.n.m. *Soil Water capacity* es 1100 mm y *Deep Water Capacity* es 1000 mm; alturas medias entre 2.000 y 3.000 m.s.n.m. *Soil Water capacity* es 2000 mm y *Deep Water Capacity* es 2000 mm; y para alturas medias sobre 3.000 m.s.n.m. *Soil Water capacity* es 5000 mm y *Deep Water Capacity* es 3000 mm. Por otra parte, en el Gráfico 5-1 se presenta el ciclo anual de la variación diaria asignada a la dirección preferida del flujo (*Preferred Flow Direction*), la cual es 100% horizontal cuando toma valor 1 y 100% vertical con valor 0.

**Gráfico 5-1: Variación diaria del parámetro *Preferred Flow Direction***



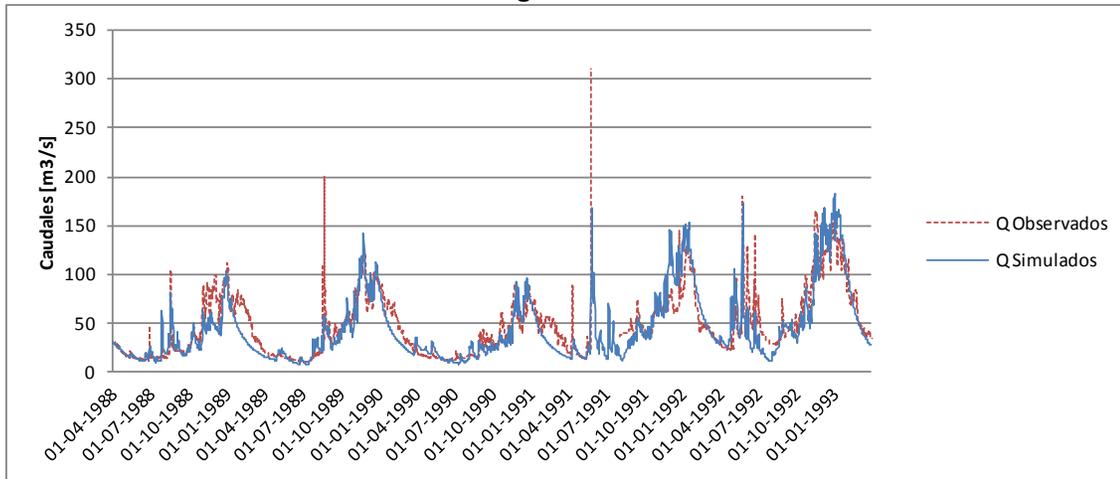
Además de la calibración de los parámetros del modelo, es necesario hacer algunos ajustes a los gradientes de precipitación y temperatura, de modo de mejorar las proyecciones en las zonas más altas de la cuenca, con el fin de representar correctamente el almacenamiento de nieve y su derretimiento en el periodo de deshielo, ya que el régimen de la cuenca es principalmente nival.

Los valores alcanzados para los criterios de eficiencia en la calibración del modelo se muestran en Tabla 5-4, y en los Gráficos 5-2, 5-3, 5-4, 5-5 y 5-6 se muestran los resultados obtenidos.

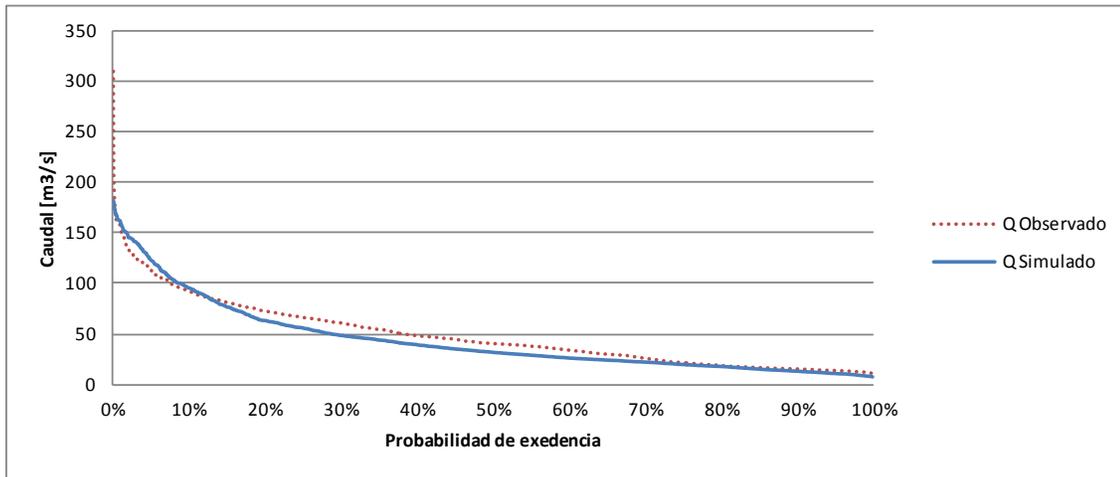
**Tabla 5-4: Indicadores de eficiencia del modelo calibrado**

| Indicadores de eficiencia | Valores obtenidos en calibración |
|---------------------------|----------------------------------|
| NS                        | 0.70                             |
| LOG NS                    | 0.73                             |
| R <sup>2</sup>            | 0.75                             |
| wR <sup>2</sup>           | 0.69                             |

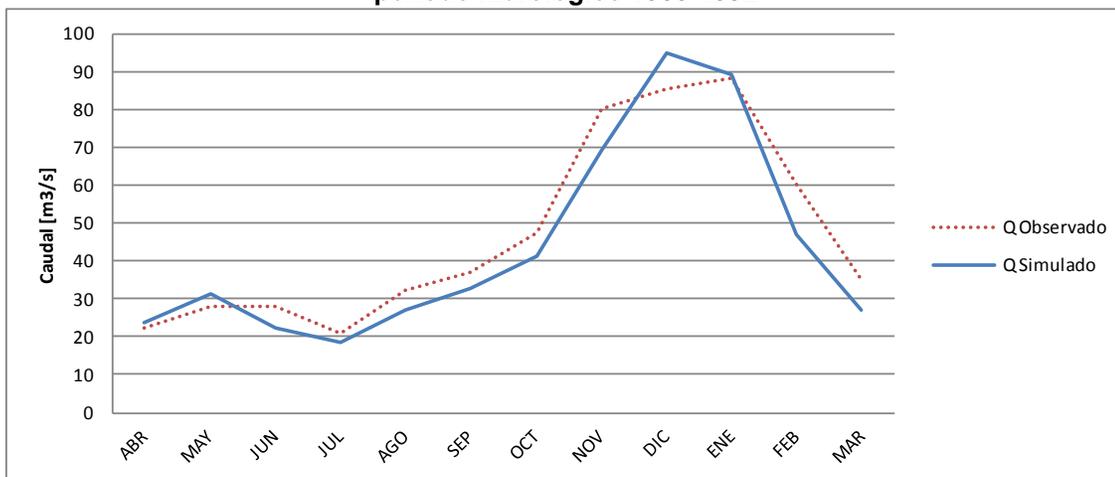
**Gráfico 5-2: Calibración - Series de caudales medios diarios observados y simulados, período hidrológico 1988-1992**



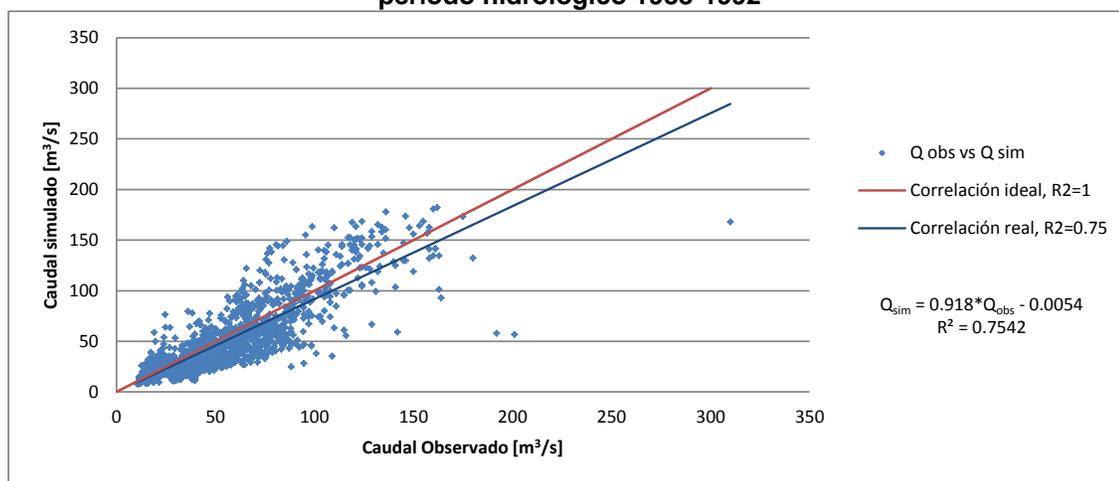
**Gráfico 5-3: Calibración - Curvas de duración de caudales medios diarios, período hidrológico 1988-1992**



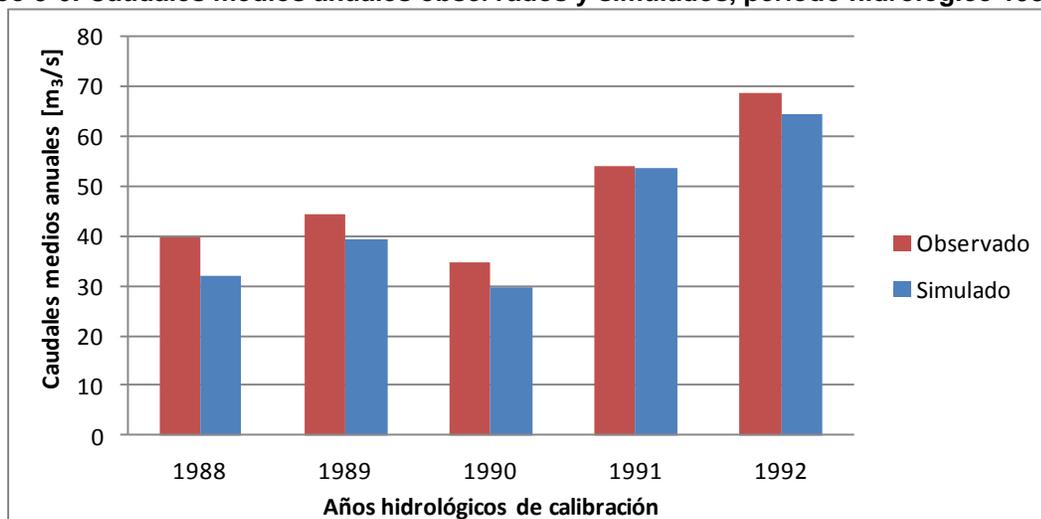
**Gráfico 5-4: Calibración - Curvas de variación estacional de caudales observados y simulados, período hidrológico 1988-1992**



**Gráfico 5-5: Calibración - Correlación entre caudales medios diarios observados y simulados, período hidrológico 1988-1992**



**Gráfico 5-6: Caudales medios anuales observados y simulados, período hidrológico 1988-1992**



De los Gráficos 5-2, 5-3, 5-4, 5-5 y 5-6 se aprecia que existe una sub estimación en los caudales simulados, la cual a nivel anual, en promedio corresponde a un 10%. Por otra parte, existe baja representatividad de los caudales peaks en el periodo pluvial, dado que la simulación entrega caudales menores. Esto se explica por la dificultad que existe en el modelo de representar correctamente los peaks pluviales y de deshielo bajo la misma configuración de los parámetros del modelo WEAP. Sin embargo, dado el régimen de la cuenca, se opta por una mejor representación del periodo de deshielo sin desmedro del flujo base en el resto del año.

Existe una particularidad referida a los caudales máximos diarios durante el año. Estos caudales se presentan generalmente en el periodo pluvial como peaks aislados. Como se mencionó anteriormente, el modelo no representa correctamente los caudales peaks en el periodo pluvial, los cuales son considerablemente mayores que los del periodo de deshielo. Esto se ve reflejado en el Gráfico 5-3 donde los valores máximos en la curva de duración de caudales observados son mayores (casi el doble) que los alcanzados con los caudales modelados en el periodo de calibración.

### 5.2.3 Validación del modelo

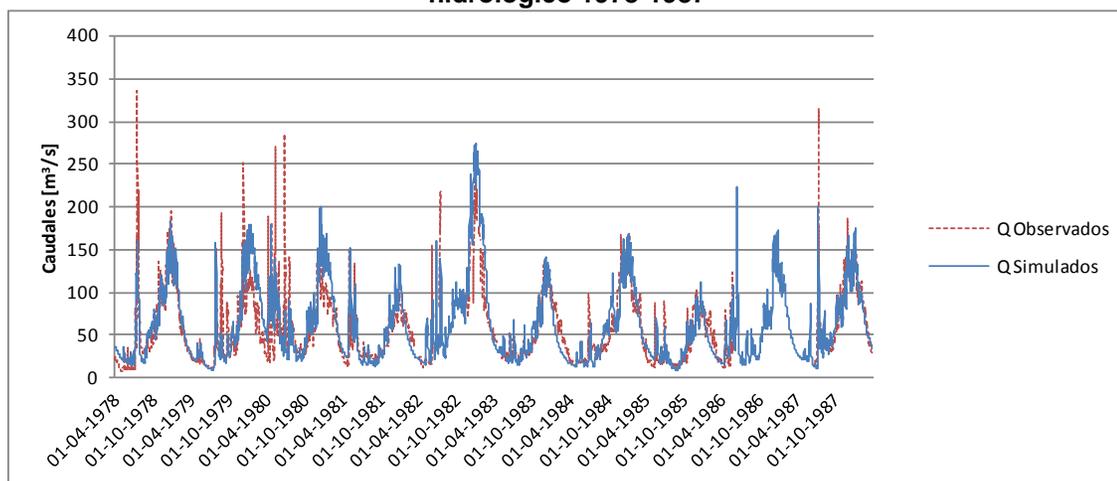
Para validar el modelo, se utilizan los parámetros finales de la calibración sin variar sus valores y una serie distinta de tiempo para las variables de entrada, que en este caso corresponden a las del periodo comprendido entre abril de 1978 y marzo de 1988. Con esto, los criterios de eficiencia resultantes para la validación se ven en la Tabla 5-5.

**Tabla 5-5: Indicadores de eficiencia del modelo validado**

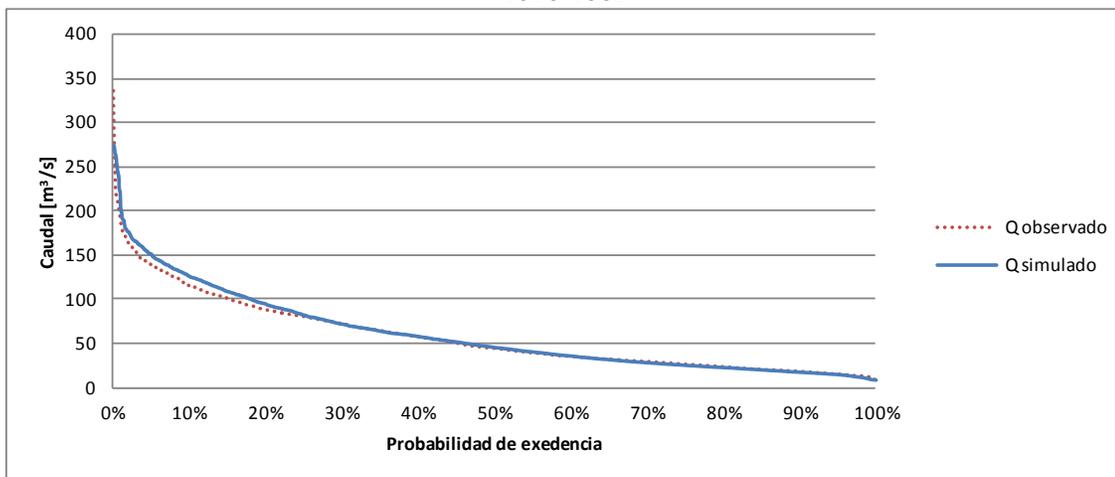
| Indicadores de eficiencia | Valores obtenidos en validación |
|---------------------------|---------------------------------|
| NS                        | 0.60                            |
| LOG NS                    | 0.73                            |
| R <sup>2</sup>            | 0.74                            |
| wR <sup>2</sup>           | 0.70                            |

A continuación se presentan los Gráficos 5-7, 5-8, 5-9, 5-10 y 5-11, que corresponden a los resultados de la validación.

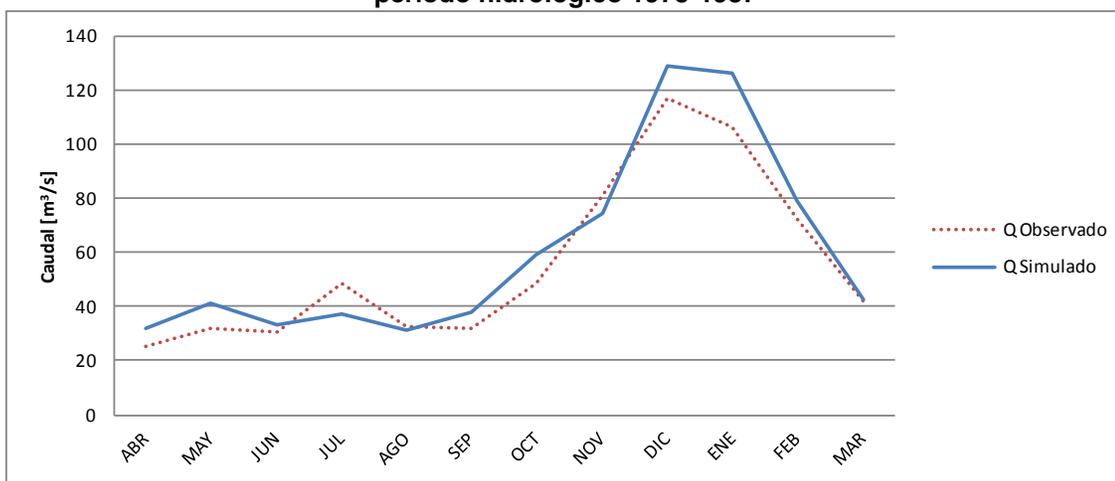
**Gráfico 5-7: Validación - Series de caudales medios diarios observados y simulados, período hidrológico 1978-1987**



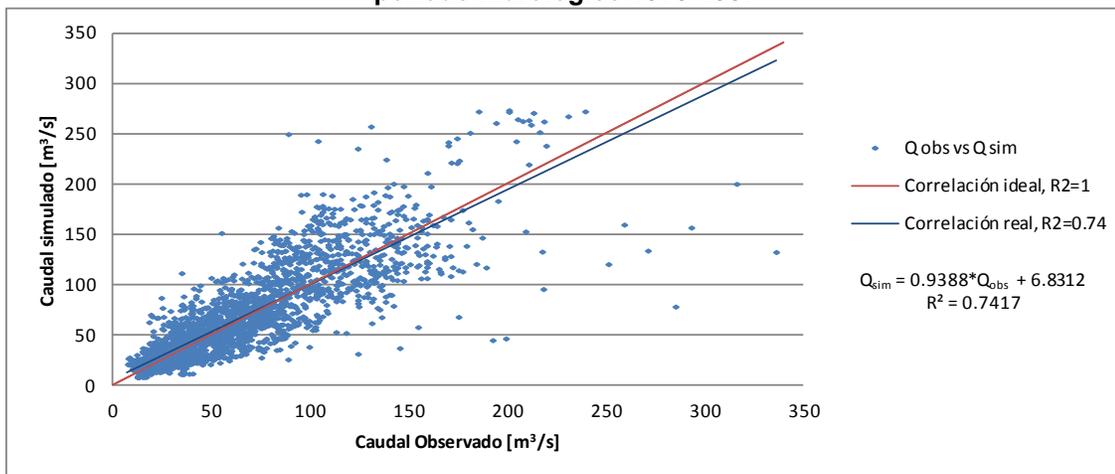
**Gráfico 5-8: Validación - Curvas de duración de caudales medios diarios, período hidrológico 1978-1987**



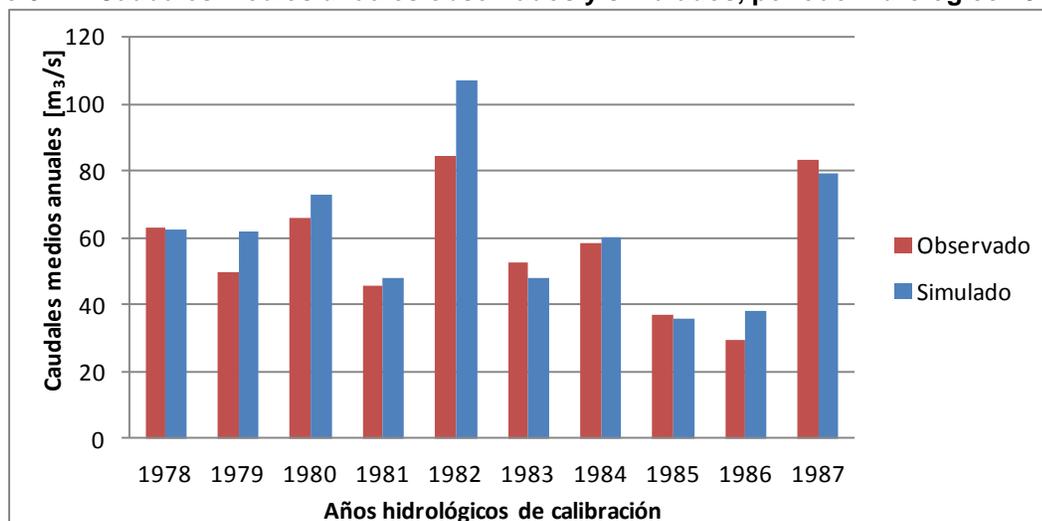
**Gráfico 5-9: Validación - Curvas de variación estacional de caudales observados y simulados, período hidrológico 1978-1987**



**Gráfico 5-10: Validación - Correlación entre caudales medios diarios observados y simulados, período hidrológico 1978-1987**



**Gráfico 5-11: Caudales medios anuales observados y simulados, período hidrológico 1978-1987**



De los resultados de los Gráficos 5-7, 5-8, 5-9, 5-10 y 5-11, se observa que a diferencia de la calibración, en la validación hay en promedio, una sobre estimación de caudales de aproximadamente un 8% anual (considerando que hay períodos sin registros), mientras que en la calibración se obtuvo una sub estimación del 10%. Respecto a la representatividad que consigue el modelo para los peaks en periodo pluvial, el modelo se comporta de la misma forma, es decir, sub estima los peaks pluviales y por consecuencia, la curva de duración de caudales observados llega a máximos superiores a los conseguidos por la simulación (ver Gráfico 5-8).

Considerando los criterios de eficiencia para el modelo, se comparan en la Tabla 5-6 los resultados obtenidos para el periodo de calibración y validación, en la cual se tienen valores similares a excepción de NS, que baja de 0.7 a 0.6. Sin embargo, considerando que el periodo de validación tiene el doble de años que el de calibración (5 años para la calibración y 10 años para la validación), se explica la diferencia de valores, ya que en un periodo más largo hay mayores variaciones en el comportamiento de la cuenca. A pesar que se valida con un periodo más extenso, los otros criterios (LOG NS,  $R^2$  y  $wR^2$ ) presentan valores con diferencias poco significativas, lo que da cuenta de una validación con un correcto funcionamiento del modelo.

**Tabla 5-6: Comparación de criterios de eficiencia, calibración - validación**

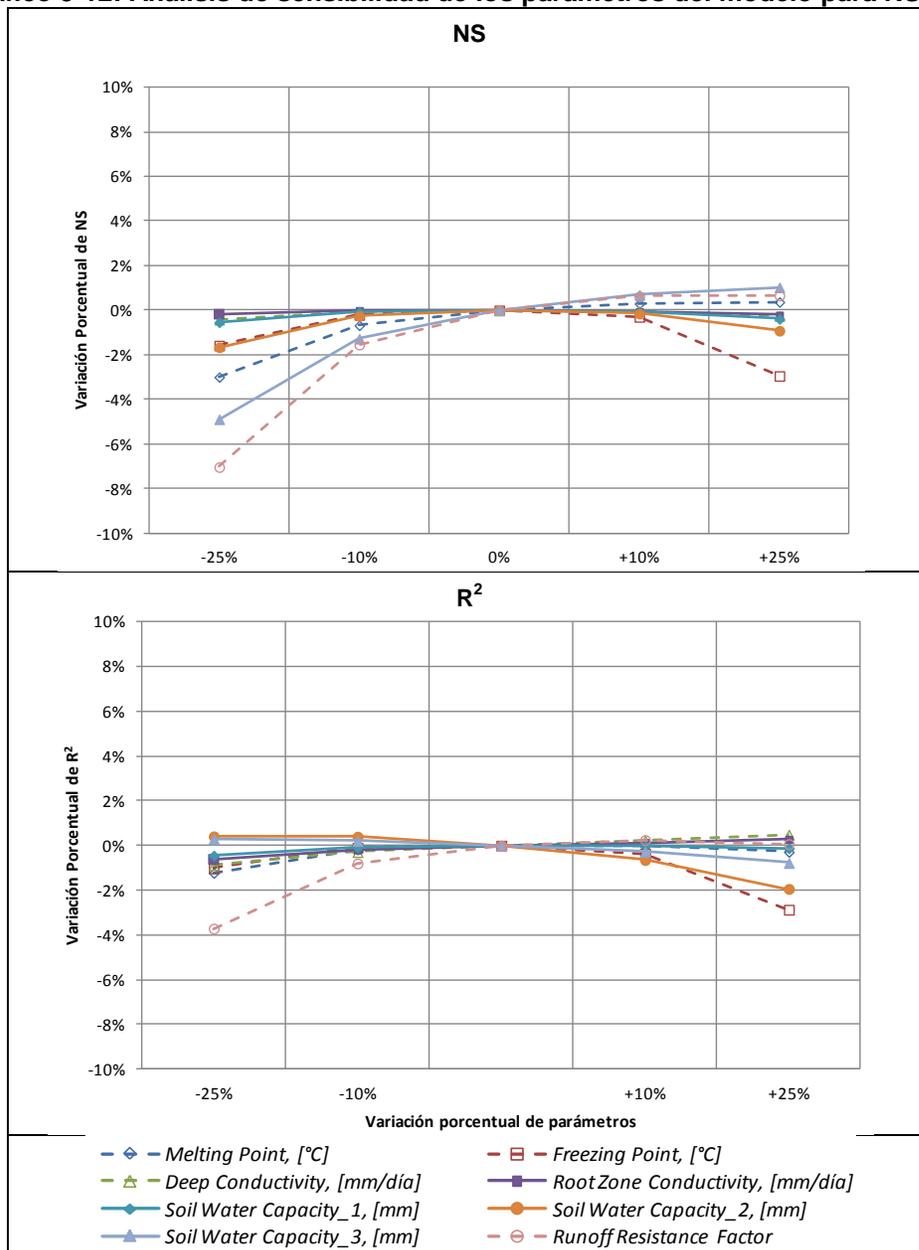
| Criterio | Calibración | Validación |
|----------|-------------|------------|
| NS       | 0.70        | 0.60       |
| LOG NS   | 0.73        | 0.73       |
| $R^2$    | 0.75        | 0.74       |
| $wR^2$   | 0.69        | 0.70       |

#### 5.2.4 Análisis de sensibilidad

Este análisis se realiza para determinar de qué forma se ven afectados los criterios de eficiencia del modelo al aplicar variaciones porcentuales a los parámetros que definen la configuración de éste. Para esto se modifica solo un parámetro a la vez, dejando los demás fijos, para observar si el modelo mejora o empeora en cuanto a los indicadores de eficiencia.

Este proceso se realiza para cada parámetro, aumentando y disminuyendo su valor en un 10 y un 25%. Para visualizar los resultados del análisis de sensibilidad se construyen los Gráficos 5-12 y 5-13 que se presentan a continuación:

**Gráfico 5-12: Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para NS y R<sup>2</sup>**



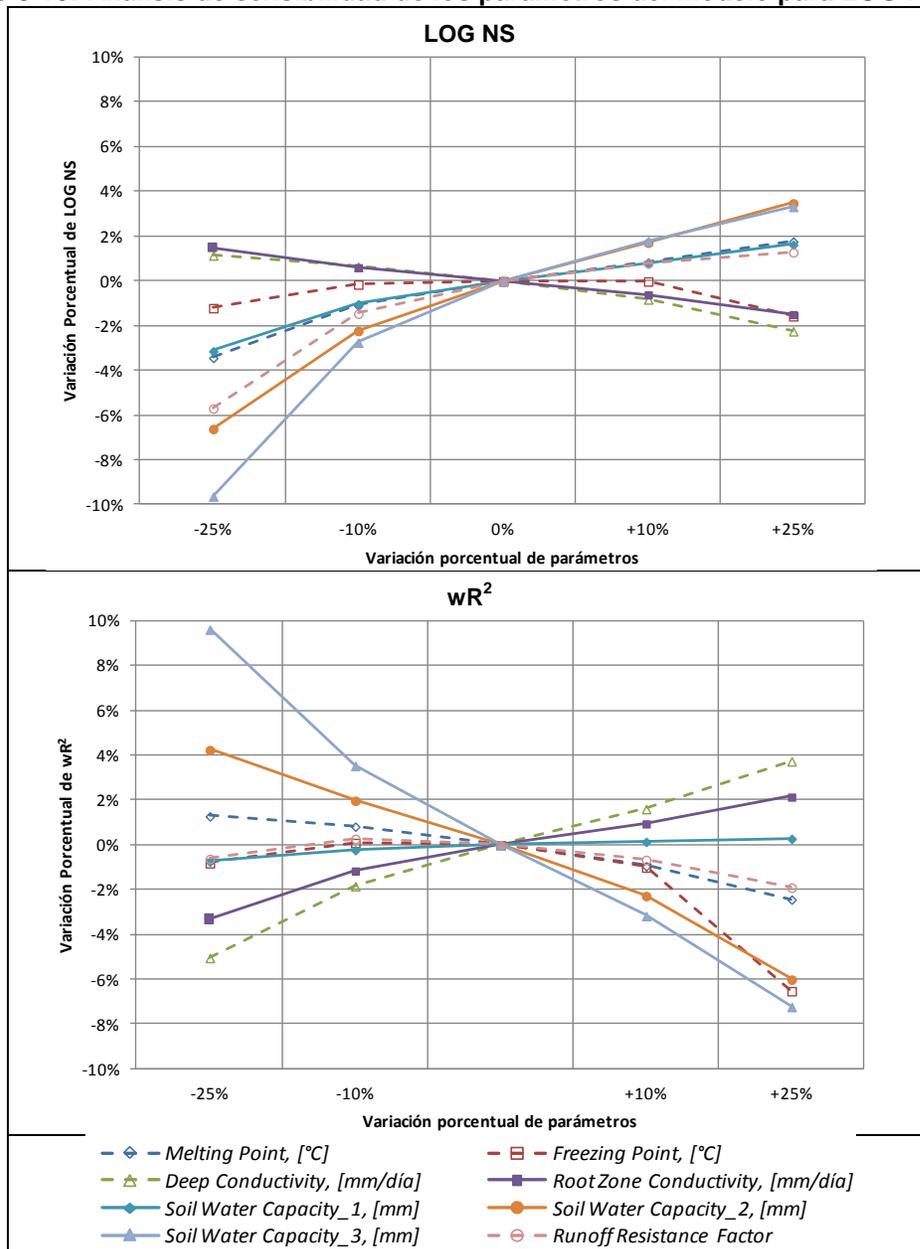
En los Gráficos 5-12 y 5-13, se presentan las variaciones porcentuales de los distintos criterios de eficiencia del modelo, al aumentar y disminuir los parámetros del modelo en un 10% y un 25%. Del Gráfico 5-12 se aprecia que el NS y el R<sup>2</sup> son los criterios que menor sensibilidad presentan a los cambios de los parámetros, obteniendo en general, una mejora en el modelo menor al 1% en ambos casos, y una pérdida de eficiencia de máximo un 7% y un 4% respectivamente.

En el caso del NS (Gráfico 5-12) se ve que al disminuir cualquier parámetro (en un 10% y 25%) siempre el modelo empeora, siendo los parámetros más críticos el "Runoff Resistance Factor" y el "Soil water Capacity\_3", con una disminución de NS de un 7% y

un 5% respectivamente. Al aumentar los parámetros se observa que las máximas mejoras se dan para los mismos parámetros anteriores, pero con un aumento de la eficiencia de aproximadamente un 1% en ambos casos. Esto da cuenta que el indicador NS es poco sensible a la variación de los parámetros del modelo y los que mayor sensibilidad poseen son “*Runoff Resistance Factor*” y el “*Soil water Capacity\_3*”.

Para el  $R^2$  (Gráfico 5-12) se ve que la variación tanto positiva como negativa de los parámetros del modelo, no mejoran significativamente el modelo (menos del 1%). Sin embargo, se observa que al disminuir el “*Runoff Resistance Factor*” la eficiencia baja cerca de un 4%. Por otro lado, se tiene que uno de los parámetros que al aumentarlo empeora más la eficiencia del modelo corresponde al “*Freezing Point*”, que tanto en el NS y el  $R^2$  baja la eficiencia en aproximadamente un 3%.

**Gráfico 5-13: Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo para LOG NS y  $wR^2$**



Por otra parte, se tiene que las variaciones presentadas por LOG NS y  $wR^2$  (Gráfico 5-13) al aumentar o disminuir los parámetros, son mayores que para NS y  $R^2$  (Gráfico 5-12), siendo ambas más sensibles a las modificaciones. En el caso de LOG NS esto se explica porque es un criterio que da mejor cuenta de las variaciones extremas de los caudales, tal como ocurre con la serie de caudales observados que se muestran en los Gráficos 5-2 y 5-7, donde se tiene un flujo base que va desde los 20 m<sup>3</sup>/s hasta crecidas pluviales con caudales sobre los 200 m<sup>3</sup>/s. En el caso de  $wR^2$ , es un indicador que incorpora la pendiente de la regresión de los datos observados y modelados, por cual es un criterio más completo que  $R^2$  lo que se traduce en una mayor sensibilidad a la variación de los parámetros.

Para el caso del comportamiento de LOG NS y  $wR^2$  (Gráfico 5-13), hay 4 parámetros que presentan mayor sensibilidad y que poseen un comportamiento opuesto para ambos indicadores. Al reducir los parámetros “*Deep Conductivity*” y “*Root Zone Conductivity*”, estos mejoran la eficiencia del modelo en aproximadamente un 3% para el LOG NS, mientras que la disminuyen en un 5% para el  $wR^2$ , y al aumentarlos empeoran la eficiencia en un 2,5% para el LOG NS, y la aumentan en un 4% para el  $wR^2$ . Del mismo modo, pero en sentido opuesto, “*Soil Water Capacity\_2*” y “*Soil Water Capacity\_3*”, al disminuir su valor empeoran la eficiencia para LOG NS y la aumentan para  $wR^2$ . La sensibilidad de los criterios de eficiencia para los parámetros mencionados va desde 10% hasta -10% para el más sensible, correspondiente a “*Soil Water Capacity\_3*”.

Dado los distintos indicadores de eficiencia del modelo, para lograr el mejor rendimiento se busca el equilibrio de estos, en especial con respecto al LOG NS y el  $wR^2$ , dado su comportamiento opuesto y por ser los más sensibles a las variaciones de los parámetros.

## 6. PROYECCIONES BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

### 6.1 Generación de series de datos de entrada al modelo

Antes de definir las series de datos necesarias para las proyecciones, es necesario distinguir y diferenciar lo siguiente:

- 1- GCM utilizado para proyectar variables meteorológicas:
  - “Echam5”
- 2- Escenarios de cambio climático utilizados:
  - A1B
  - A2
- 3- Períodos futuros de proyección de variables hidrometeorológicas para cada escenario:
  - 01 de enero de 2046 al 31 de diciembre de 2065 (mediano plazo)
  - 01 de enero de 2081 al 31 de diciembre de 2100 (largo plazo)
- 4- Estaciones base de precipitaciones para modelo WEAP<sup>1</sup>:
  - “La Rufina” “
  - “Central Las Nieves”
- 5- Estación base de temperaturas para modelo WEAP<sup>2</sup>:
  - “Rengo”
- 6- Estación fluviométrica de control de la cuenca:
  - “Río Tinguiririca en Bajo Los Briones”

Antes de correr el modelo para proyectar los caudales futuros, se generan las series de datos de precipitaciones y temperaturas para las estaciones bases que rigen el modelo. Para esto, se toman los resultados de los escalamientos para las estaciones de precipitaciones y temperatura (escalamientos realizados en el Capítulo 4 en el caso de “La Rufina” y Rengo” y en el capítulo 5 en el caso de “Central Las Nieves”), y se aplican los mismos ajustes realizados para dichas estaciones (escalamiento espacial y temporal) para generar las series futuras de los datos de entrada al modelo (escenarios A1B y A2 del GCM ECHAM5 en los dos períodos futuros).

Con las series de precipitaciones y temperaturas correspondientes a los escenarios A1B y A2 del GCM ECHAM5 escaladas en las ubicaciones de las estaciones base que se utilizan en WEAP, es posible generar las series de datos para cada uno de los 43 *elementos* que componen la cuenca, para así poder simular los caudales para los períodos futuros comprendidos entre los años 2046-2065 y 2081-2100. En el anexo digital se presentan las series completas de precipitaciones y temperaturas de la línea base y los escenarios A1B y A2 en los periodos 2046-2065 y 2081-2100, escalados en las ubicaciones correspondientes a “La Rufina” y “Central Las Nieves” para el caso de las precipitaciones, y en “Rengo” para las temperaturas.

---

<sup>1 y 2</sup>: Estaciones definidas en el Capítulo 5, y corresponden a las utilizadas para la modelación hidrológica

## **6.2 Resultados de proyecciones bajo escenario A1B y A2**

Se corre el modelo WEAP para los dos escenarios con sus correspondientes series de tiempo y se obtienen los caudales modelados para el futuro (períodos 2046-2065 y 2081-2100). Los análisis de estos resultados se realizan en base a la línea base modelada, es decir, los resultados del modelo para el periodo 1978-1992 (calibración + validación del modelo WEAP, Capítulo 5). En el anexo digital se encuentran las series completas de caudales modeladas para el periodo base y proyecciones.

### **6.2.1 Curvas de Duración**

Con los resultados obtenidos, se construyen curvas de duración para comparar el efecto del cambio climático en la cuenca y analizar de qué forma se ven afectados los recursos hídricos en la zona.

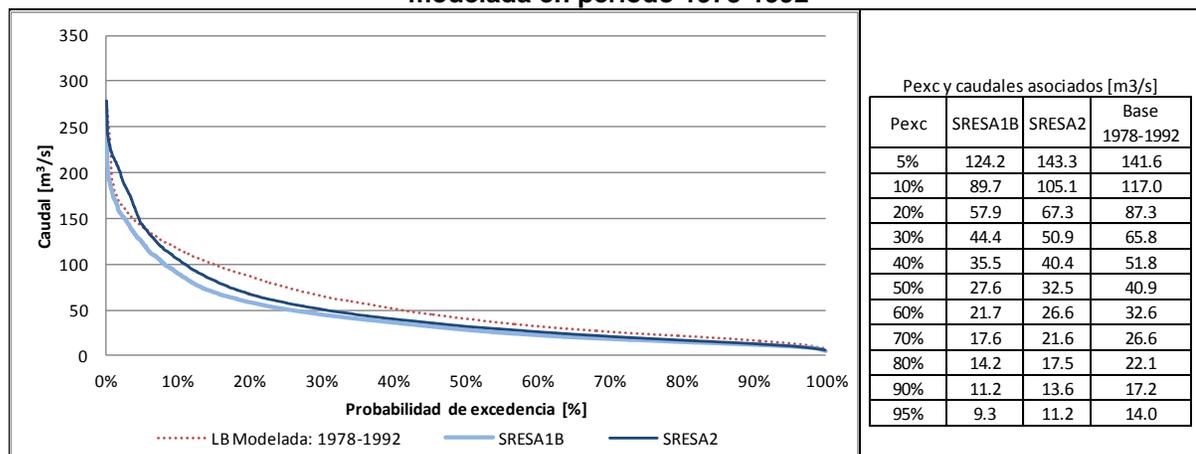
En los Gráficos 6-1 y 6-2 se muestran las curvas de duración para los períodos 2046-2065 y 2081-2100 respectivamente, las que se comparan con la línea base modelada en el periodo 1978-1992. Estas curvas se construyen con las series de caudales diarias obtenidas del modelo y las tablas adjuntas en los Gráficos 6-1 y 6-2 corresponden a los caudales para las probabilidades de excedencia que se señalan.

Se observa para el primer período (Gráfico 6-1), que los caudales con probabilidad de excedencia sobre 10%, presentan una disminución promedio respecto al período base de 33% y 21% para los escenarios A1B y A2 respectivamente, mientras que para caudales mayores, es decir, con probabilidad de excedencia menor a 10% la disminución respecto al período base, es menos significativa, presentando incluso aumentos de caudales para el caso del escenario A2. Esto implica que el primer periodo de análisis (2046-2065) el escenario A1B presenta los resultados más desfavorables para la cuenca.

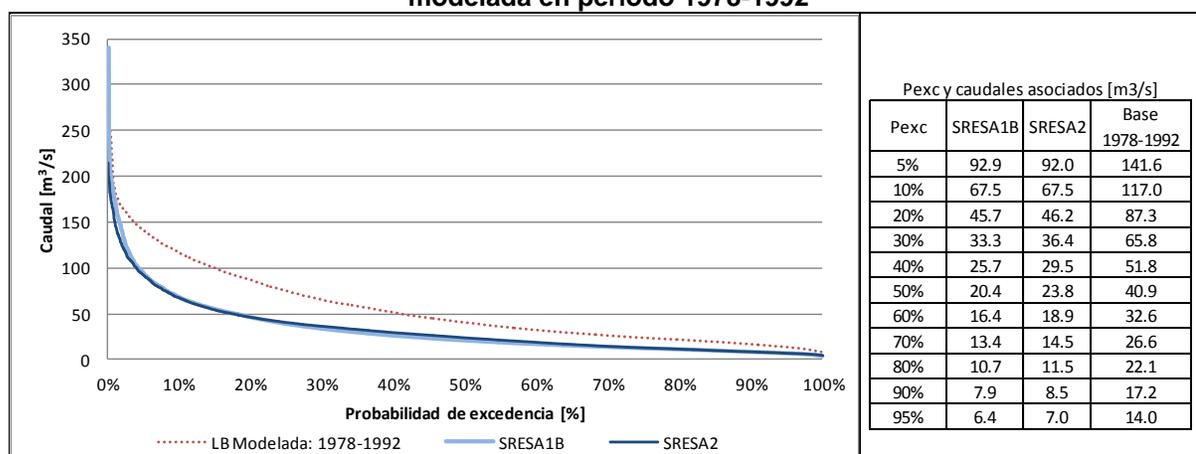
Por otra parte, en el segundo período de análisis (Gráfico 6-2), las diferencias de los escenarios A1B y A2 con el período base (1978-1992) son considerablemente mayores, pero el comportamiento de los dos escenarios de cambio climático entregan resultados similares, presentando diferencias entre ellos menores al 10% respecto a la disminución de los caudales de línea base, esto se refleja en la mayor parte del desarrollo de las curvas de duración, salvo para eventos extremos con probabilidad de excedencia menores a 5%, donde el escenario A1B entrega caudales mayores al A2 e incluso mayores a los del periodo de base para probabilidades de excedencia cercanas a 1%. El comportamiento de los caudales de los escenarios A1B y A2 respecto a los del período base, corresponden aproximadamente a una disminución del 50% en los caudales para la misma probabilidad de excedencia.

Al comparar los dos períodos futuros respecto al período de línea base y las variaciones que muestran las curvas de duración, se tiene que para el mediano plazo (período 2046-2065), los escenarios A1B y A2 presentan una disminución de los caudales con probabilidad de excedencia mayor al 50% de aproximadamente un 34% y un 20% respectivamente. Para el largo plazo (período 2081-2100) la disminución de los caudales con de igual probabilidad de excedencia es de 51% y 46% para los escenarios A1B y A2 respectivamente.

**Gráfico 6-1: Curvas de duración para escenarios A1B y A2 en periodo 2046-2065 con línea base modelada en periodo 1978-1992**



**Gráfico 6-2: Curvas de duración para escenarios A1B y A2 en periodo 2081-2100 con línea base modelada en periodo 1978-1992**



## 6.2.2 Curvas de variación estacional

Las curvas de variación estacional se construyen en base a los caudales medios mensuales y se hace una comparación entre el periodo base y los periodos de mediano y largo plazo que proyectan los escenarios de cambio climático. En la Tabla 6-1 se presentan los caudales medios mensuales promedio para cada período y para los dos escenarios en estudio. En el Anexo C se encuentran los caudales medios mensuales para cada año, con los que se calculan los caudales promedio de la Tabla 6-1 y se construyen las curvas de variación estacional.

Para analizar la curva de variación estacional, se utilizan caudales con probabilidad de excedencia de 70%, 80% y 90% para cada escenario y período en estudio, lo que se presenta en la Figura 6-1, donde se observa que para el mediano plazo (2046-2065) las curvas tienden a mantener la forma para los caudales con probabilidad de excedencia de 70%, presentando además, disminuciones de los caudales en casi todo el año, las que llegan a un descenso de hasta 47% y 46% para mayo y abril respectivamente. Sin

embargo, para los meses de agosto y septiembre no se observan variaciones considerables.

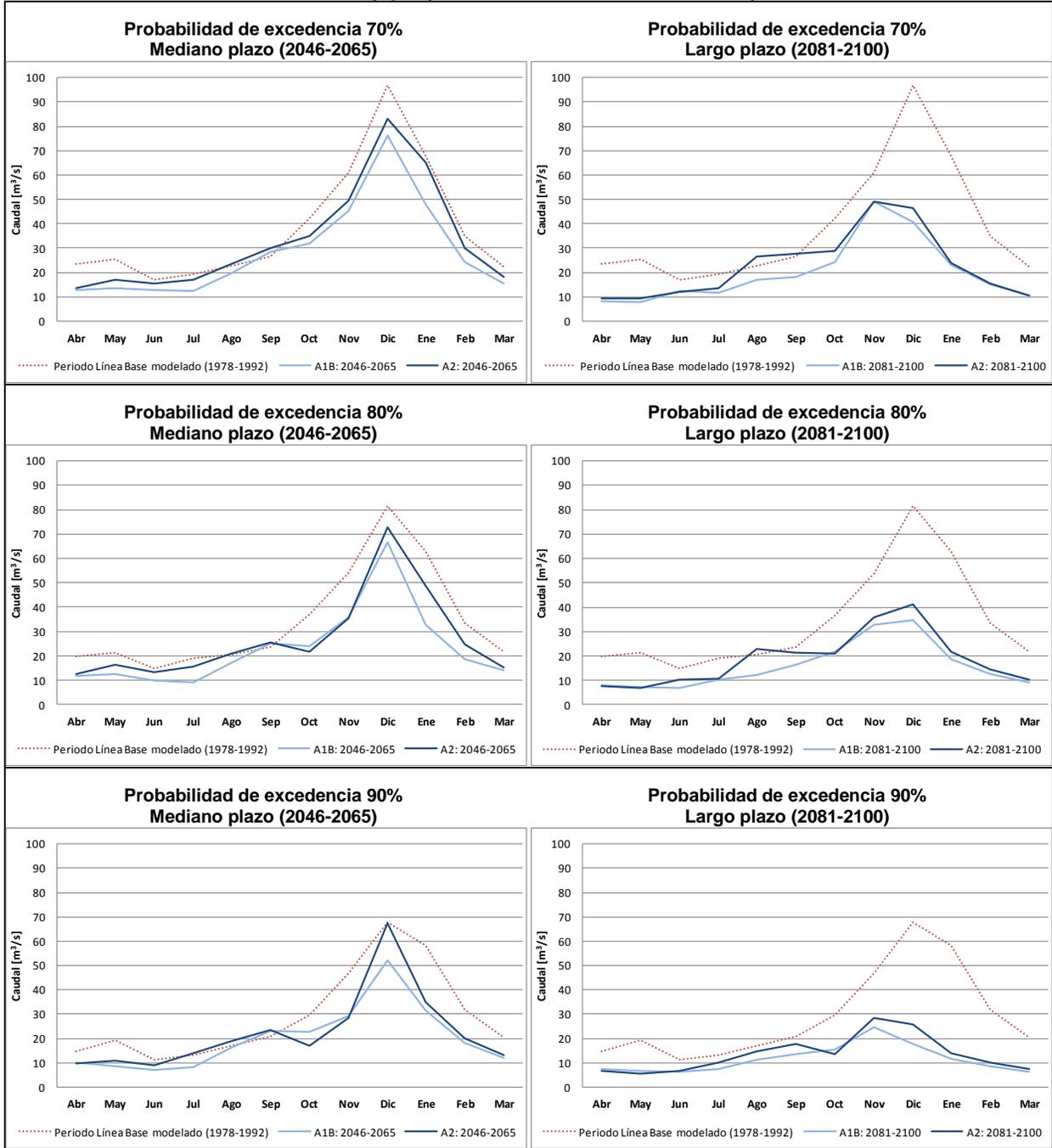
Para el mismo periodo de tiempo con probabilidades de excedencia de 80% y 90%, en los escenarios A1B y A2 comienza a desaparecer el peak pluvial que presenta el periodo base modelado en los meses de abril y mayo. Además se ve una disminución de los caudales para los meses de primavera y verano, que llega hasta un 48% en enero.

En la Figura 6-1 se observa que para el largo plazo (2081-2100) existen disminuciones sobre un 65% para los meses de deshielo. Además, se tiene que la forma de las curvas para las proyecciones de los escenarios A1B y A2, cambian con respecto al período base, desapareciendo por completo el peak de abril-mayo, generándose una conexión entre los caudales de invierno y los de deshielo. En cuanto a las diferencias de las proyecciones entre los dos escenarios de cambio climático, estos siguen tendencias similares pero con una disminución de caudales mayor para el escenario A1B.

**Tabla 6-1: Caudales medios mensuales promedio [ $m^3/s$ ], para cada periodo análisis**

| Periodo   | Escenario  | Abr   | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic   | Ene   | Feb  | Mar  |
|-----------|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 1978-1992 | Línea base | 29.08 | 37.3 | 29.4 | 32.0 | 30.1 | 36.6 | 55.4 | 75.2 | 117.0 | 113.0 | 71.0 | 38.6 |
| 2046-2065 | SRESA1B    | 17.11 | 22.9 | 17.7 | 20.2 | 28.6 | 37.1 | 42.2 | 62.1 | 102.2 | 73.7  | 38.7 | 22.3 |
|           | SRESA2     | 20.55 | 23.3 | 22.8 | 28.9 | 30.1 | 41.5 | 41.6 | 59.8 | 105.1 | 118.7 | 54.6 | 26.0 |
| 2081-2100 | SRESA1B    | 14.92 | 15.6 | 16.1 | 17.0 | 26.6 | 30.2 | 36.4 | 62.0 | 73.9  | 44.4  | 22.3 | 15.5 |
|           | SRESA2     | 13.3  | 14.3 | 19.7 | 23.3 | 31.7 | 36.1 | 36.3 | 58.7 | 73.9  | 44.5  | 22.4 | 14.0 |

**Figura 6-1: Curvas de variación estacional para caudales con Pexc 70%, 80% y 90%, Periodo base modelado y proyecciones de escenarios A1B y A2**



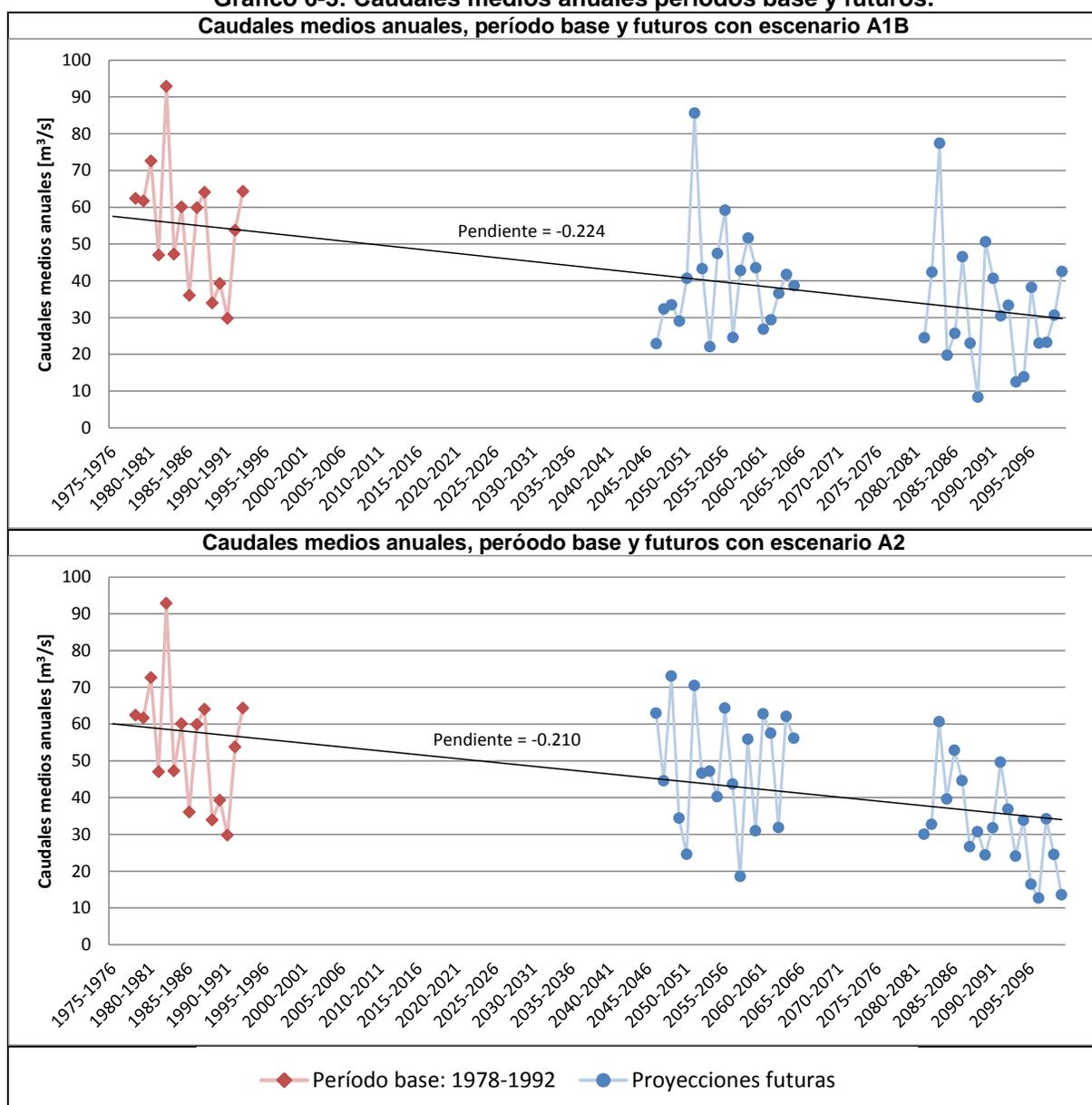
## 6.2.3 Variables hidrometeorológicas anuales

### 6.2.3.1 Caudales medios anuales

Se calculan los caudales medios anuales considerando años hidrológicos para los períodos de línea base y futuros (valores en Anexo D), con los que se construye el Gráfico 6-3 con los escenarios A1B y A2 separados, incluyendo en ambos casos el período de línea base. Se observan las tendencias al descenso en ambos casos.

Para el escenario A1B, la tendencia a la disminución en el mediano plazo resulta más abrupta que en el caso del escenario A2, presentando este último un caudal promedio del período de 9 m<sup>3</sup>/s mayor que el del escenario A1B. Sin embargo, para el largo plazo, los caudales medios del período para ambos escenarios son de aproximadamente 30 m<sup>3</sup>/s, no existiendo diferencias significativas entre los dos escenarios.

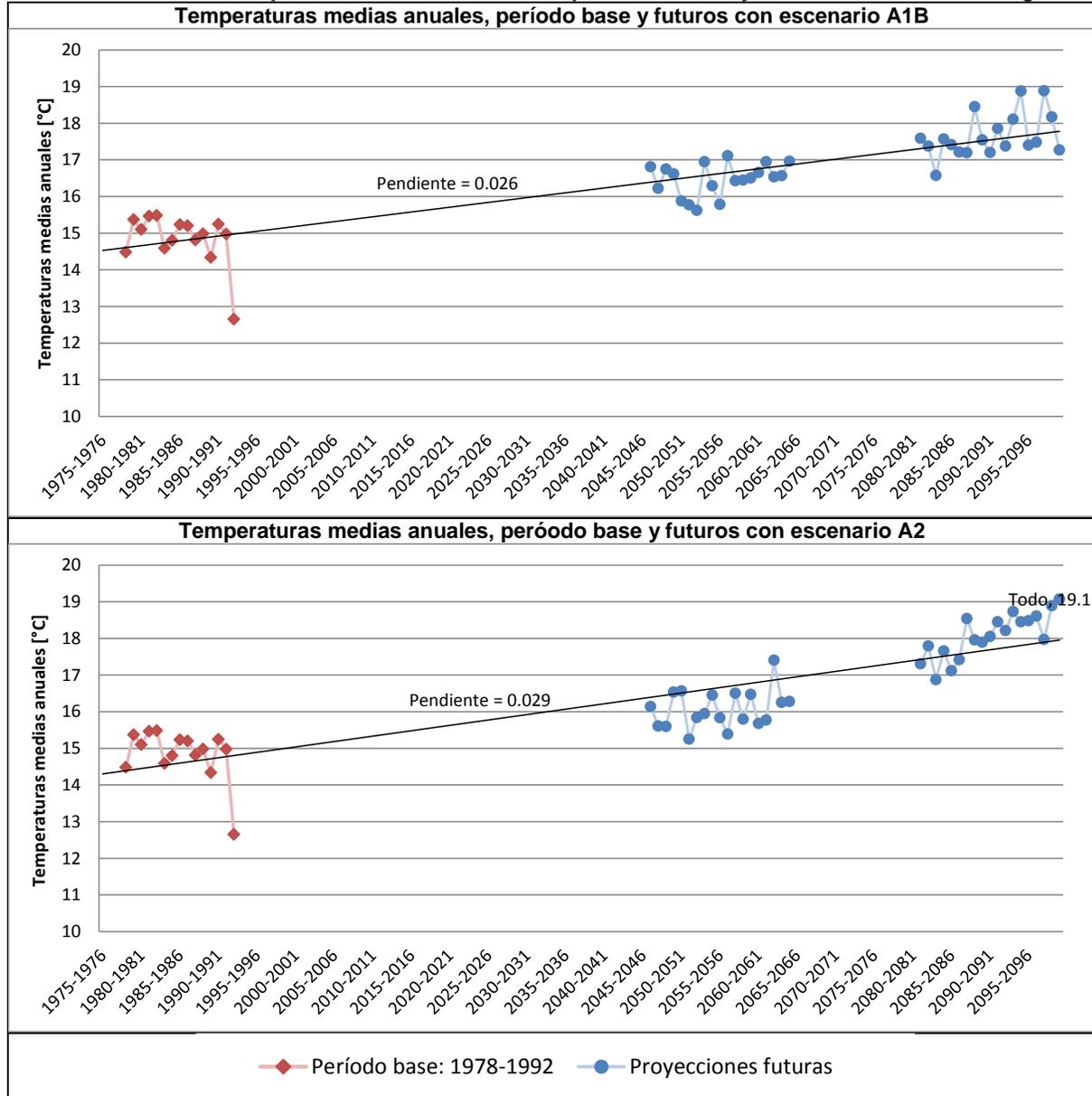
**Gráfico 6-3: Caudales medios anuales períodos base y futuros.**  
**Caudales medios anuales, período base y futuros con escenario A1B**



### 6.2.3.2 Temperaturas medias anuales

En el caso de la temperatura media anual, se analiza el efecto en la estación “Rengo”, que corresponde a la estación base de temperaturas para la modelación con WEAP. En el Gráfico 6-4 se presenta la evolución obtenida del GCM Echam5 respecto a la línea base en dicha estación para los dos escenarios estudiados:

**Gráfico 6-4: Temperaturas medias anuales períodos base y futuros. Estación “Rengo”**

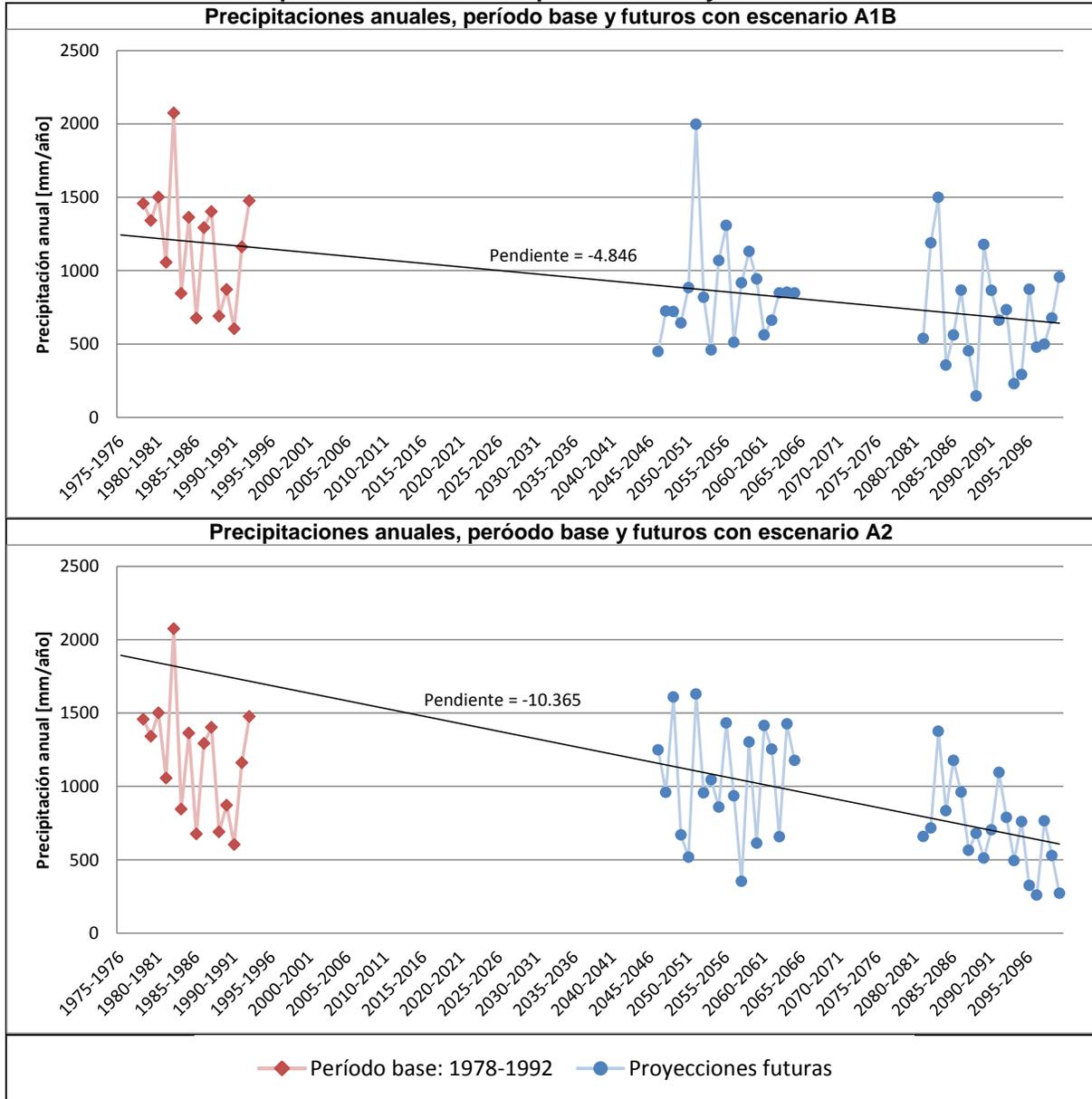


En el Gráfico 6-4 se tiene que para el escenario A1B, las temperaturas aumentan en promedio 1,6°C en el mediano plazo y 2,8°C para el largo plazo respecto a la línea base. Por otra parte, las temperaturas en el escenario A2 aumentan 1,2°C para el mediano plazo y 3,2°C para el largo plazo, lo cual da cuenta de un aumento mayor en este último escenario.

### 6.2.3.3 Precipitaciones anuales

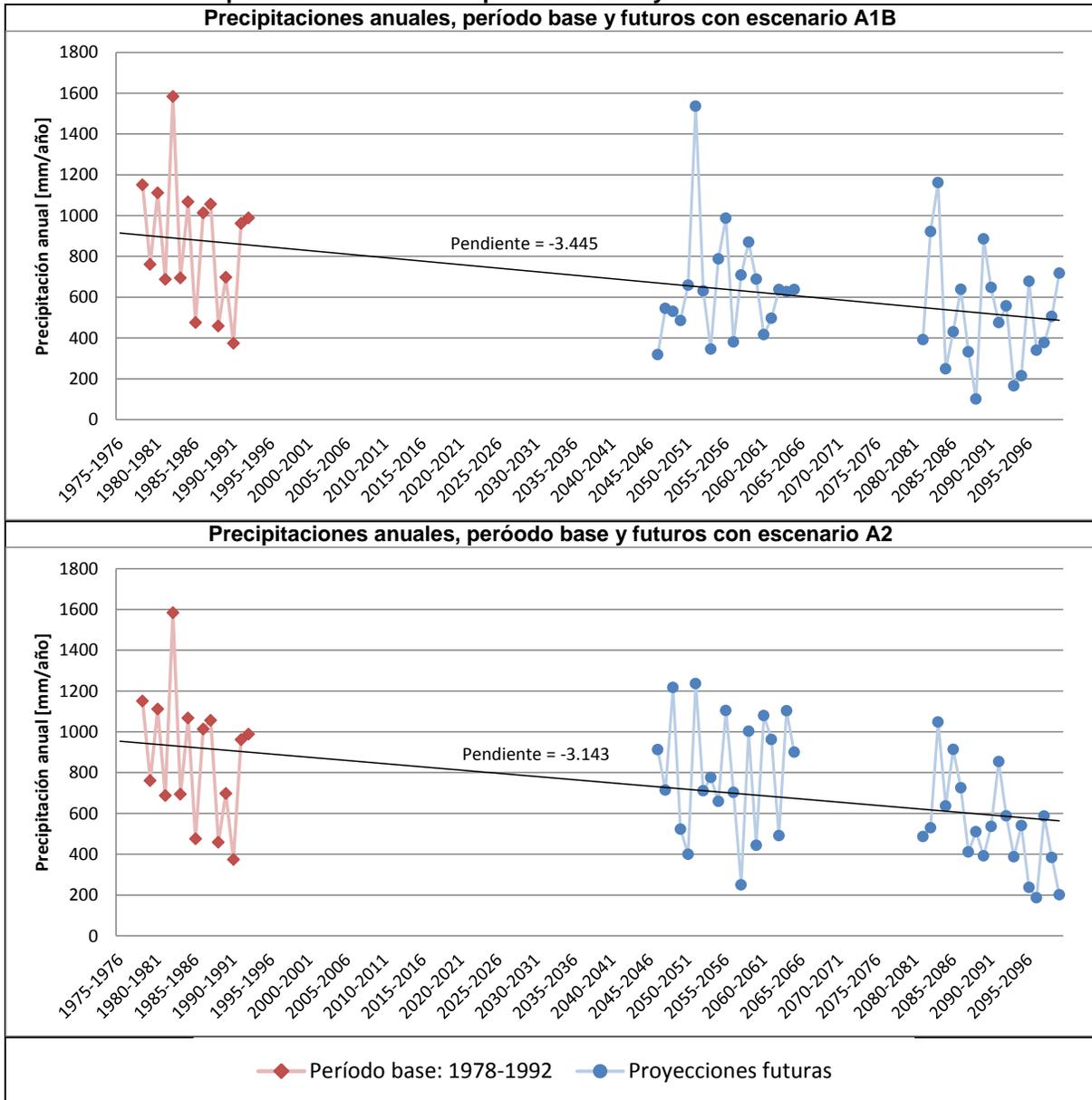
A continuación se presentan los Gráficos 6-5 y 6-6, donde muestra la evolución de las precipitaciones en las dos estaciones base de esta variable utilizadas en el modelo WEAP (“La Rufina” y Central Las Nieves”). Los valores para las proyecciones futuras, provienen del modelo Echam5 en escenarios A1B y A2 con sus correspondientes escalamientos.

**Gráfico 6-5: Precipitaciones anuales en períodos base y futuros. Estación "La Rufina"**



Las disminuciones promedio de precipitaciones en la estación “La Rufina”, corresponden a un 28% y un 42% en el mediano y largo plazo respectivamente, bajo el escenario A1B. Para el escenario A2, las disminuciones son de 11% y 40% para el mediano y largo plazo respectivamente. En ambos escenarios las disminuciones son respecto al período de línea base.

**Gráfico 6-6: Precipitaciones anuales en períodos base y futuros. Estación "Central Las Nieves"**



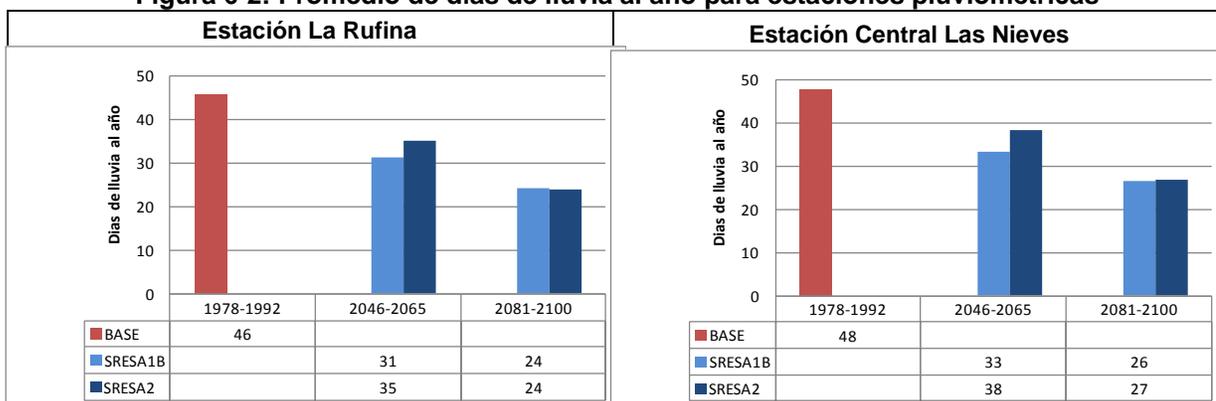
En la estación "Central Las Nieves", las disminuciones en las precipitaciones en promedio son de 26% y 41% para el caso del escenario A1B en el mediano y largo plazo, mientras que en el escenario A2, las disminuciones son menores, con un 8% y un 39% para el mediano y largo plazo. En ambos escenarios, las disminuciones son respecto al período base.

### 6.2.4 Días de lluvia

En la Figura 6-2 se muestran las variaciones de los días de lluvia al año para cada período analizado. Se estudia el promedio para cada período en las estaciones pluviométricas que definen el modelo WEAP (“La Rufina” y “Central Las Nieves”).

Se observan disminuciones en las precipitaciones estimadas en las estaciones “La Rufina” y “Central Las Nieves” para el mediano plazo (2046-2065), que van desde un 20% a un 32% respectivamente, mientras que para el largo plazo la disminución en ambas estaciones son cercanas a un 46%.

**Figura 6-2: Promedio de días de lluvia al año para estaciones pluviométricas**



### 6.2.5 Rendimiento de la cuenca

En la Tabla 6-2 se presentan la evolución de la cuenca en cuanto a su rendimiento, comparando el período de línea base con los períodos futuros con cambio climático. Los resultados muestran una tendencia a bajar el rendimiento de forma sostenida en el tiempo, lo cual es consistente por ejemplo, con la disminución de precipitaciones y el aumento en las temperaturas medias en la cuenca. Los rendimientos promedios para los períodos y escenarios en la Tabla 6-2 están expresados como volumen de caudal anual dividido por el volumen total en agua de precipitación anual [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].

**Tabla 6-2: Rendimiento de la cuenca "Q/Pp" [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]**

| Período   | Escenarios |      |      |
|-----------|------------|------|------|
|           | Línea Base | A1B  | A2   |
| 1978-1992 | 0.89       | -    | -    |
| 2046-2065 | -          | 0.81 | 0.85 |
| 2081-2100 | -          | 0.75 | 0.75 |

## **7. CONCLUSIONES**

### **7.1 Selección de GCM**

En el proceso de selección del GCM se obtuvo, luego del escalamiento espacial, las correlaciones diarias, mensuales y anuales con el reanálisis para los 17 GCM's listados al inicio del proceso. Del total de GCM's, 11 presentaron correlaciones diarias con valor sobre 0,95, todos correlaciones mensuales sobre 0,97 y 8 con correlaciones anuales sobre 0,96. Esto da cuenta de la baja variabilidad de las precipitaciones, asociadas a la misma probabilidad de excedencia, entre los distintos GCM y el reanálisis en la zona de estudio, lo cual genera la necesidad de aplicar otro criterio antes de seleccionar el GCM definitivo.

Luego, en el proceso de escalamiento temporal surgen mayores diferencias, pero éstas no están expresadas de forma concisa en el coeficiente de correlación, ya que los modelos siguen presentando correlaciones casi perfectas, por lo que éstas dejan de ser un buen criterio para seleccionar el modelo más representativo para la zona. Dado lo anterior, se analiza además de los coeficientes de correlación, los ajustes estadísticos realizados para llegar a dichas correlaciones, con lo que es posible seleccionar el GCM que presenta mejores resultados en todas las etapas. Sin embargo, dados los buenos resultados que entregan los GCM's en la zona de estudio respecto al reanálisis, cualquiera de los 3 GCM's con los que se realizó al escalamiento temporal, podría haber sido utilizado para el resto del trabajo, siendo igualmente válido que el utilizado.

Al comparar la Tabla 4-1 con la Tabla 4-2 se puede ver que los modelos que presentan las menores correlaciones a escala diaria, coinciden con aquellos que tienen peor resolución. Lo anterior es un resultado esperable que ha quedado demostrado empíricamente. Con esto, sumado a los buenos resultados que en general entregan los GCM's, se concluye que si se utiliza un GCM con buena resolución espacial (menor a 2°x2°) se consigue un buen ajuste en la zona de estudio.

### **7.2 Modelo hidrológico**

El modelo se calibró a escala diaria, a diferencia de la mayoría de los trabajos citados, que lo realizan a escala mensual. El resultado de la calibración se califica utilizando principalmente dos de los cuatro criterios calculados, LOG NS y  $wR^2$ , los que presentan valores de 0,73 y 0,69 respectivamente. Estos valores, no están cerca al ideal (1), pero dadas las dificultades que se tienen en la cuenca para generar un modelo, es un buen resultado al trabajar en escala diaria. La calibración del modelo resulta compleja dadas las pocas estaciones de monitoreo y la mala calidad de los registros con que se cuenta. Sin embargo, en la validación del modelo, se obtuvieron prácticamente los mismos valores para LOG NS y  $wR^2$ , 0,73 y 0,70 respectivamente, lo que refleja un comportamiento estable del modelo al mantener los parámetros fijos y variar sólo las series de tiempo de las variables forzantes.

Con los resultados de la calibración y validación en conjunto, se tiene entonces un modelo hidrológico que simula adecuadamente el comportamiento de la cuenca, con lo cual es posible hacer las proyecciones utilizando escenarios futuros, que aseguran resultados acordes a las condiciones físicas de la cuenca.

Se concluye además, que si se tuviera una red de estaciones de mejor calidad, en cuanto a la continuidad de los registros, la densidad de estaciones y las variables monitoreadas, se podría conseguir una mejor representación de la cuenca y mejores ajustes entre las observaciones y simulaciones, ya que sólo se pudo tomar como variables forzantes las precipitaciones y temperaturas, y no fue posible calibrar con variables referidas a la cobertura nival o radiación, que son algunas de las opciones con las que cuenta el modelo WEAP para calibrar. Dado lo anterior, en la cuenca no fue posible representar un fenómeno particular para algunas cuencas chilenas, que corresponde a la existencia de glaciares. En la cuenca de estudio se ubica uno de los glaciares más largos del país, el glaciar Universidad, el cual al igual que la mayoría de los glaciares presenta un efecto atribuido al calentamiento global, correspondiente a su derretimiento. La importancia que esto tiene para la modelación, es que su existencia se traduce en aportes de agua a la cuenca que se deberían incrementar producto del cambio climático, esto por el aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones que predicen los escenarios estudiados. Sin embargo, no es posible cuantificar el aporte de agua de origen glaciar al no tener un monitoreo que entregue información de la evolución de este glaciar.

### **7.3 Resultados de proyecciones**

Tomando los resultados de las simulaciones para los períodos futuros en conjunto con la línea base, como se muestra en los análisis de resultados del capítulo 6, en todos los casos hay disminuciones importantes en los caudales del río, lo cual es esperado si las tendencias de las variables forzantes son a la disminución de las precipitaciones y aumento de las temperaturas. El principal hallazgo está en la comparación de los dos escenarios de cambio climático utilizados para las proyecciones, ya que el escenario que según los antecedentes es más agresivo para las condiciones atmosféricas es el A2, pero los resultados obtenidos muestran que el escenario A1B presenta peores consecuencias en el mediano plazo respecto a la línea base en cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca. Sin embargo, en el largo plazo ambos escenarios tienden a equilibrar sus efectos, lo que indica que no existen mayores diferencias a nivel regional para ambos escenarios globales.

Estos resultados reflejan que el cambio climático es un fenómeno a nivel global, y sus efectos pueden diferir considerablemente entre las distintas regiones del planeta. Para este caso, el resultado de tener peores condiciones con el escenario A1B no significa que este escenario sea peor a nivel global, sino más bien que sus efectos son más acentuados en la región, que los del escenario A2 para el mediano plazo.

Considerando el desarrollo hidroeléctrico en la cuenca, los resultados presentados en el capítulo 6 son poco alentadores, ya que las centrales “La Higuera” y “La Confluencia” están diseñadas para caudales de 50 m<sup>3</sup>/s, para trabajar a su máxima capacidad en los meses de deshielo, mientras que los caudales proyectados para el mediano y largo plazo, presentan disminuciones para el período de deshielo que pueden llegar a un 45% en el caso del escenario A1B en el mediano plazo y un 70% para ambos escenarios en el largo plazo (el mes que presenta las mayores disminuciones corresponde a febrero).

## 8. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- Cifuentes, L. A., & Meza, F. J. (2008). *Cambio climático: consecuencias y desafíos para Chile*. Santiago: Centro Interdisciplinario de Cambio Global (CICG-UC).
- COREMA, Comisión Regional del Medio Ambiente del Libertador General Bernardo O'Higgins. (2004). *Resolución que califica favorablemente el estudio de impacto ambiental del proyecto hidroeléctrico La Higuera, río Tinguiririca*. República de Chile.
- Cortés, G. C. (2010). *Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el río Juncal*. Santiago, Chile: Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.
- DGA, Dirección General de Aguas. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Rapel*. Santiago: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.
- DGA, Dirección General de Aguas. (2000). *Levantamiento de bocatomas en cauces naturales. Volumen I, SIT N°64*. Santiago: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.
- DGF, D. d. (2006). *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*. Santiago, Chile.
- Figueroa, R. (2008). *Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca - Implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo*. Santiago: Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico, Universidad de Chile.
- Fuenzalida, H. (2007). *Clima de Chile para fines siglo XXI*. Santiago, Chile: Revista Ambiente y desarrollo 23 (2): 9-14.
- Grupo III IPCC, G. I. (2000). *Escenarios de Emisiones*. Ginebra, Suiza: IPCC.
- IPCC, G. I. (2007). *Cambio Climático, Informe de Síntesis*. Ginebra, Suiza.
- Krause, P., Boyle, D., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5: 89-97.
- Lagos, M., & Vargas, X. (2011). *Variación de eventos extremos de precipitación diaria proyectados a mediados del siglo XXI, resultados en regiones de Coquimbo y Maule*. Santiago: XX Congreso chileno de hidráulica, Sociedad chilena de ingeniería hidráulica.
- Mena, D. I. (2009). *Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando un modelo WEAP*. Santiago, Chile: Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., y otros. (2003). *The atmospheric general circulation model ECHAM5 Report No. 349*. Hamburg: Max Planck Institute for Meteorology.

Salgado, B. A. (2011). *Disponibilidad y demanda futura del recurso hídrico. Análisis del escenario A2 en una cuenca agrícola de la VI Región*. Santiago, Chile: Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.

SEI, Stockholm Environment Institute. (2011). *User Guide WEAP*.

SEI, Stockholm Environment Institute. (2012). *Water Evaluation And Planning*. Recuperado el 27 de Abril de 2012, de WEAP21: <http://www.weap21.org/>

SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2005). *Escenarios Climáticos Futuros y Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Santa*. Lima, Perú.

University of California. (2004). *WCRP CMIP3 multi-model database*. Recuperado el 21 de Junio de 2012, de <https://esg.llnl.gov:8443/index.jsp>

U.S. Department of Commerce, N. O. (2005). *Earth System Research Laboratory | Physical Sciences Division*. Recuperado el 21 de Junio de 2012, de [http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC\\_ReanV2.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC_ReanV2.html)

Vicuña, S., Garreaud, R., & McPhee, J. (2010). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-010-9888-4 , 627-645.

Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17 , 147-159.

Wilks, D. S. (1999). Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator. *Climate Research* 11 , 125-136.

## ANEXOS

### ANEXO A: Estadística original de estaciones utilizadas a nivel mensual

Caudales medios mensuales [m<sup>3</sup>/s], estación Río Tinguiririca en Bajo Los Briones

|      | ENE   | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT  | NOV   | DIC   |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 1978 |       |      |      | 17.0 | 11.2 | 14.0 | 94.5 | 32.9 | 38.8 | 68.5 | 100.1 | 152.4 |
| 1979 | 120.5 | 64.5 | 35.6 | 21.5 | 20.6 | 14.5 | 23.1 | 53.8 | 43.9 | 38.8 | 57.6  | 101.3 |
| 1980 | 108.8 | 72.3 | 40.4 | 53.3 | 75.2 | 71.2 | 63.8 | 43.1 | 31.8 | 41.8 | 67.7  | 122.3 |
| 1981 | 93.0  | 78.0 | 46.1 | 18.8 | 55.6 | 44.0 | 27.3 | 26.3 | 24.5 | 34.9 | 62.7  | 77.9  |
| 1982 | 75.0  | 58.4 | 19.8 | 14.4 | 13.0 | 18.2 | 21.4 |      |      |      | 61.4  | 86.0  |
| 1983 | 141.5 | 96.6 | 59.5 | 22.6 | 17.0 | 28.4 | 30.6 | 28.0 | 28.4 | 45.9 | 89.9  | 113.8 |
| 1984 | 86.3  | 59.0 | 35.1 | 17.4 | 18.4 | 19.7 | 40.5 | 27.5 | 34.2 | 54.1 | 86.7  | 142.7 |
| 1985 | 126.2 | 81.1 | 54.6 | 22.0 | 22.9 | 18.0 | 27.1 | 15.4 | 16.6 | 35.0 | 61.7  | 78.1  |
| 1986 | 67.2  | 54.3 | 26.7 | 21.5 | 36.6 |      |      |      |      |      |       |       |
| 1987 |       |      |      |      |      |      | 48.8 | 12.2 | 35.8 | 70.6 | 119.0 | 134.3 |
| 1988 | 117.5 | 87.7 | 42.4 | 24.7 | 16.2 | 15.1 | 16.0 | 25.1 | 21.6 | 33.8 | 72.9  | 80.4  |
| 1989 | 76.5  | 65.0 | 32.0 | 17.9 | 16.1 | 12.5 | 12.7 | 47.1 | 39.0 | 52.3 | 91.4  | 83.9  |
| 1990 | 75.8  | 53.8 | 29.7 | 18.4 | 15.6 | 13.0 | 14.4 | 17.9 | 32.8 | 38.0 | 56.7  | 62.1  |
| 1991 | 60.5  | 51.8 | 34.7 | 24.9 | 31.3 |      |      | 38.9 | 49.8 | 47.7 | 66.9  | 74.9  |
| 1992 | 106.1 | 53.0 | 38.0 | 25.9 | 59.6 | 71.9 | 40.4 | 32.8 | 42.8 | 67.1 | 114.1 | 127.0 |
| 1993 | 124.4 | 77.5 | 41.5 |      |      |      |      |      |      |      |       |       |

Temperaturas medias mensuales [°C], observadas y rellenadas estación Rengo

|      | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT  | NOV  | DIC  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1978 |      |      |      | 13.5 | 10.2 | 7.6  | 11.0 | 8.4  | 12.6 | 14.5 | 16.8 | 20.1 |
| 1979 | 20.5 | 17.7 | 16.4 | 13.1 | 11.2 | 6.7  | 9.4  | 11.4 | 7.7  | 13.7 | 17.1 | 19.6 |
| 1980 | 22.1 | 21.1 | 20.3 | 14.4 | 12.5 | 10.0 | 8.8  | 10.5 | 12.3 | 15.9 | 17.3 | 20.6 |
| 1981 | 21.6 | 21.7 | 19.3 | 15.8 | 12.8 | 8.4  | 8.5  | 9.5  | 11.7 | 14.3 | 17.9 | 21.2 |
| 1982 | 22.2 | 20.7 | 18.4 | 14.5 | 10.4 | 9.2  | 10.5 | 10.6 | 13.5 | 15.0 | 17.1 | 21.7 |
| 1983 | 22.7 | 21.9 | 18.9 | 15.7 | 10.8 | 7.3  | 8.2  | 9.9  | 11.6 | 16.4 | 19.7 | 22.2 |
| 1984 | 23.5 | 20.9 | 19.2 | 15.7 | 9.9  | 7.4  | 8.4  | 9.2  | 12.7 | 15.5 | 15.9 | 20.0 |
| 1985 | 21.3 | 20.9 | 18.6 | 13.3 | 11.2 | 10.4 | 8.3  | 8.4  | 12.3 | 14.3 | 18.5 | 21.0 |
| 1986 | 21.4 | 20.6 | 18.4 | 14.4 | 12.2 | 9.6  | 8.6  | 10.7 | 12.0 | 16.3 | 16.9 | 21.0 |
| 1987 | 21.2 | 20.8 | 19.2 | 13.8 | 9.6  | 9.3  | 9.6  | 10.1 | 12.2 | 15.8 | 19.0 | 20.6 |
| 1988 | 21.3 | 21.8 | 19.0 | 15.2 | 10.0 | 8.6  | 8.1  | 9.2  | 11.1 | 14.7 | 18.6 | 20.5 |
| 1989 | 22.0 | 21.9 | 18.3 | 14.1 | 10.5 | 9.4  | 8.6  | 9.8  | 11.5 | 15.2 | 19.9 | 21.1 |
| 1990 | 21.9 | 20.2 | 17.8 | 14.5 | 10.3 | 8.3  | 7.7  | 10.8 | 11.9 | 14.2 | 17.7 | 20.5 |
| 1991 | 21.4 | 21.3 | 13.8 | 15.3 | 12.6 | 9.8  | 8.5  | 8.9  | 12.8 | 15.0 | 18.5 | 19.1 |
| 1992 | 22.2 | 20.3 | 19.6 | 14.0 | 11.3 | 7.8  | 6.9  | 10.0 | 12.4 | 15.0 | 18.0 | 20.8 |
| 1993 | 22.4 | 21.6 | 20.2 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

**Precipitaciones mensuales [mm/mes], observadas y rellenadas estación La Rufina**

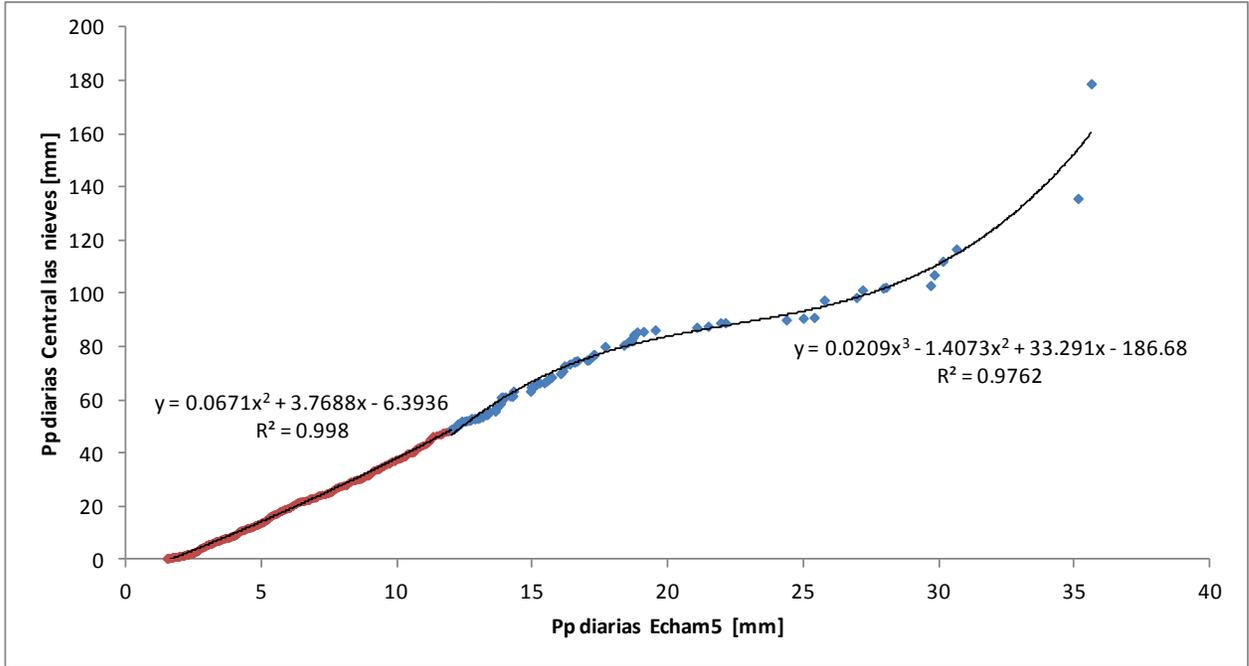
|      | ENE  | FEB  | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1978 |      |      |       | 0.0   | 75.0  | 246.9 | 767.0 | 54.0  | 85.0  | 61.0  | 168.0 | 0.0   |
| 1979 | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 23.0  | 138.0 | 22.0  | 380.0 | 232.0 | 196.0 | 3.0   | 124.0 | 150.0 |
| 1980 | 0.0  | 59.0 | 14.0  | 336.0 | 385.7 | 306.0 | 302.0 | 51.0  | 93.3  | 0.0   | 20.0  | 7.0   |
| 1981 | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 83.0  | 553.0 | 99.6  | 110.0 | 81.0  | 65.0  | 23.7  | 15.0  | 0.0   |
| 1982 | 0.0  | 0.0  | 26.0  | 15.0  | 270.0 | 718.2 | 480.0 | 213.0 | 256.5 | 95.5  | 8.0   | 0.0   |
| 1983 | 15.0 | 3.0  | 0.0   | 36.0  | 128.0 | 227.0 | 218.0 | 143.0 | 81.0  | 8.2   | 0.0   | 0.0   |
| 1984 | 0.0  | 0.0  | 4.3   | 3.8   | 320.7 | 129.5 | 464.1 | 140.5 | 145.0 | 104.3 | 33.4  | 0.0   |
| 1985 | 0.0  | 0.0  | 21.2  | 23.0  | 192.7 | 53.4  | 206.2 | 14.1  | 56.3  | 113.1 | 0.0   | 0.0   |
| 1986 | 0.0  | 0.0  | 17.0  | 113.5 | 385.3 | 414.4 | 35.3  | 220.6 | 12.2  | 36.4  | 70.1  | 0.0   |
| 1987 | 0.0  | 0.0  | 5.2   | 26.3  | 161.7 | 92.4  | 587.2 | 274.6 | 105.7 | 124.4 | 0.0   | 0.0   |
| 1988 | 0.0  | 0.0  | 30.0  | 18.0  | 17.7  | 164.7 | 148.9 | 249.2 | 55.3  | 5.1   | 28.3  | 0.0   |
| 1989 | 0.0  | 0.0  | 2.1   | 20.2  | 74.6  | 63.4  | 175.7 | 367.4 | 32.2  | 20.2  | 4.1   | 13.1  |
| 1990 | 0.0  | 0.0  | 100.3 | 35.3  | 62.1  | 39.2  | 142.2 | 114.2 | 123.7 | 43.1  | 44.1  | 0.0   |
| 1991 | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 62.0  | 218.7 | 279.6 | 273.5 | 33.0  | 125.2 | 50.0  | 3.1   | 103.2 |
| 1992 | 0.0  | 0.0  | 12.1  | 174.5 | 516.7 | 453.7 | 58.2  | 158.1 | 84.1  | 10.1  | 18.1  | 0.0   |
| 1993 | 2.0  | 0.0  | 0.0   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

**Precipitaciones mensuales [mm/mes], observadas y rellenadas estación Central Las Nieves**

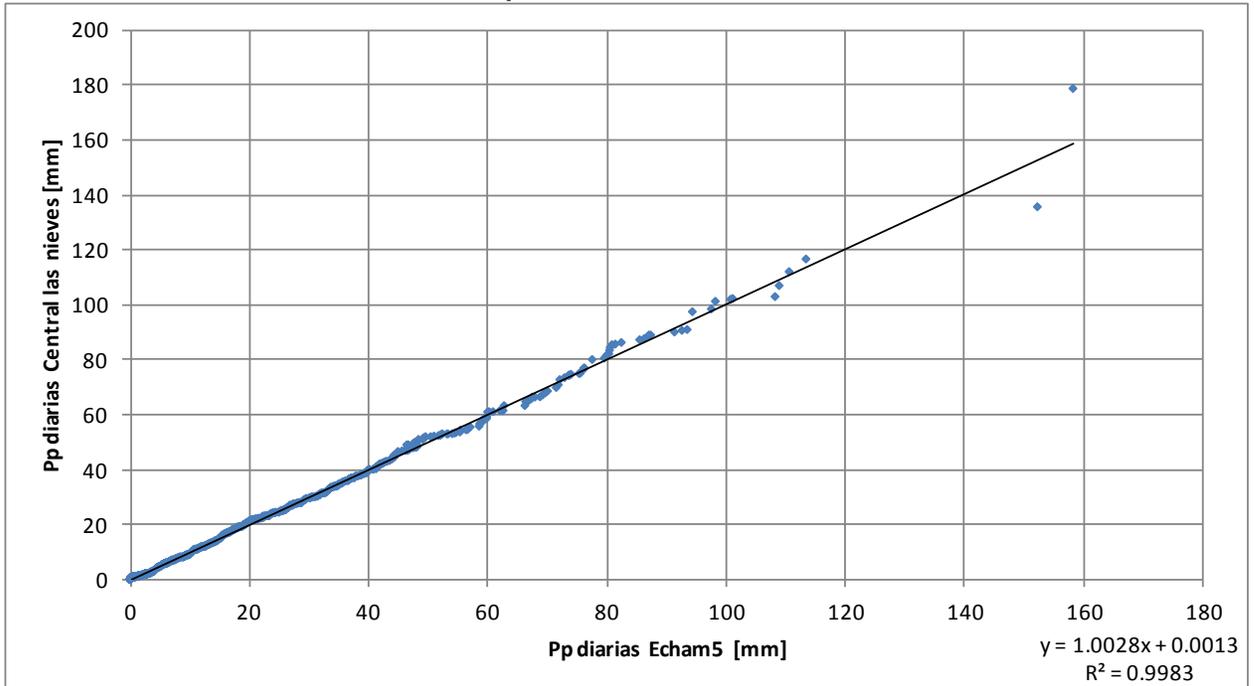
|      | ENE | FEB  | MAR  | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT  | NOV  | DIC  |
|------|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1978 |     |      |      | 0.0   | 59.1  | 194.2 | 642.7 | 51.9  | 70.9  | 38.8 | 86.1 | 5.8  |
| 1979 | 0.0 | 0.3  | 0.5  | 21.9  | 100.4 | 12.2  | 188.0 | 139.3 | 140.6 | 7.8  | 66.6 | 68.2 |
| 1980 | 0.0 | 13.5 | 1.5  | 252.3 | 299.8 | 176.8 | 210.3 | 46.3  | 88.8  | 0.3  | 27.9 | 1.9  |
| 1981 | 1.4 | 1.1  | 3.8  | 42.3  | 381.7 | 55.1  | 60.1  | 48.4  | 48.6  | 24.0 | 4.9  | 0.0  |
| 1982 | 0.0 | 0.0  | 22.3 | 9.1   | 216.5 | 675.0 | 295.6 | 131.0 | 162.8 | 75.7 | 7.8  | 1.6  |
| 1983 | 6.6 | 1.2  | 0.1  | 26.5  | 90.4  | 223.6 | 174.9 | 86.0  | 83.5  | 5.8  | 1.8  | 1.0  |
| 1984 | 0.0 | 0.0  | 0.3  | 11.0  | 196.0 | 102.6 | 376.6 | 122.9 | 117.6 | 78.4 | 27.9 | 0.0  |
| 1985 | 3.2 | 0.0  | 30.9 | 5.1   | 146.9 | 24.0  | 149.5 | 4.3   | 41.2  | 85.6 | 0.3  | 0.0  |
| 1986 | 0.0 | 0.0  | 18.6 | 97.5  | 295.4 | 327.0 | 10.4  | 184.4 | 8.1   | 24.1 | 63.8 | 0.0  |
| 1987 | 0.0 | 0.1  | 2.8  | 24.6  | 101.0 | 77.0  | 467.3 | 215.4 | 75.3  | 71.7 | 0.7  | 0.2  |
| 1988 | 0.0 | 0.0  | 22.4 | 9.0   | 10.0  | 133.2 | 92.0  | 145.3 | 40.3  | 1.4  | 24.4 | 3.2  |
| 1989 | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 26.6  | 66.1  | 50.3  | 150.7 | 319.0 | 28.5  | 13.2 | 3.6  | 3.9  |
| 1990 | 0.0 | 0.0  | 35.8 | 13.9  | 45.1  | 11.0  | 106.2 | 74.7  | 71.5  | 23.2 | 25.1 | 2.8  |
| 1991 | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 55.8  | 183.6 | 231.7 | 253.0 | 29.0  | 77.7  | 31.4 | 0.2  | 87.2 |
| 1992 | 0.0 | 3.4  | 8.1  | 101.7 | 341.0 | 326.0 | 38.9  | 115.0 | 43.6  | 2.1  | 19.8 | 0.0  |
| 1993 | 0.2 | 0.0  | 0.0  |       |       |       |       |       |       |      |      |      |

## ANEXO B: Escalamiento ECHAM5 en “Central Las Nieves”

### Escalamiento espacial ECHAM5 en Central Las Nieves



### Escalamiento Temporal ECHAM5 en Central Las Nieves



## ANEXO C: Caudales medios mensuales simulados

| Año         | Periodo Línea Base modelado                   |             |             |             |             | 1978-1992   |             |             |              |              |             |             |
|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|             | Caudales medios mensuales [m <sup>3</sup> /s] |             |             |             |             |             |             |             |              |              |             |             |
|             | Abr   | May         | Jun         | Jul         | Ago         | Sep         | Oct         | Nov         | Dic          | Ene          | Feb         | Mar         |
| 1977        | 24.9  | 25.9        | 20.9        | 43.5        | 30.7        | 44.4        | 85.9        | 110.9       | 104.2        |              |             |             |
| 1978        | 29.3  | 23.5        | 20.5        | 69.1        | 22.8        | 52.1        | 65.2        | 95.2        | 132.1        | 90.9         | 102.6       | 57.8        |
| 1979        | 23.4  | 29.9        | 14.5        | 27.3        | 47.3        | 26.8        | 42.3        | 59.4        | 126.0        | 129.1        | 71.1        | 38.0        |
| 1980        | 82.8  | 85.2        | 44.3        | 43.9        | 33.1        | 26.7        | 56.9        | 68.1        | 145.9        | 162.0        | 113.0       | 69.4        |
| 1981        | 29.1  | 77.9        | 38.1        | 19.0        | 20.8        | 22.0        | 36.6        | 60.9        | 96.7         | 139.8        | 96.4        | 48.2        |
| 1982        | 19.9  | 31.9        | 57.0        | 58.9        | 41.7        | 73.1        | 90.3        | 93.5        | 202.6        | 90.4         | 44.3        | 26.5        |
| 1983        | 34.4  | 32.3        | 24.7        | 29.5        | 30.3        | 33.4        | 56.0        | 82.2        | 119.2        | 233.5        | 150.2       | 63.0        |
| 1984        | 15.0  | 25.4        | 16.9        | 26.6        | 27.9        | 53.8        | 79.7        | 67.8        | 123.2        | 67.7         | 34.2        | 21.3        |
| 1985        | 32.6  | 30.3        | 25.6        | 26.5        | 12.4        | 18.5        | 37.2        | 52.2        | 78.6         | 139.9        | 95.0        | 50.5        |
| 1986        | 27.6  | 48.0        | 67.5        | 19.4        | 35.3        | 27.4        | 53.1        | 71.2        | 137.6        | 61.6         | 33.5        | 22.5        |
| 1987        | 24.7  | 25.5        | 27.1        | 55.2        | 43.0        | 43.7        | 75.2        | 94.4        | 128.1        | 114.1        | 77.4        | 40.1        |
| 1988        | 27.9  | 19.7        | 16.3        | 21.1        | 35.3        | 23.5        | 30.2        | 48.2        | 61.5         | 126.8        | 80.0        | 44.5        |
| 1989        | 14.6  | 18.6        | 10.8        | 14.7        | 33.1        | 32.4        | 47.8        | 90.4        | 90.3         | 66.5         | 35.0        | 21.5        |
| 1990        | 24.7  | 20.6        | 11.8        | 10.8        | 19.8        | 23.7        | 28.9        | 44.0        | 71.4         | 61.9         | 33.4        | 22.5        |
| 1991        | 19.7  | 34.6        | 38.1        | 27.7        | 20.6        | 40.5        | 48.8        | 72.3        | 110.1        | 52.9         | 29.3        | 18.8        |
| 1992        | 34.6  | 66.8        | 36.9        | 19.4        | 27.6        | 44.3        | 52.5        | 93.0        | 144.6        | 128.5        | 67.3        | 36.6        |
| 1993        |   |             |             |             |             |             |             |             |              | 142.2        | 72.7        | 36.6        |
| <b>Prom</b> | <b>29.1</b>                                   | <b>37.3</b> | <b>29.4</b> | <b>32.0</b> | <b>30.1</b> | <b>36.6</b> | <b>55.4</b> | <b>75.2</b> | <b>117.0</b> | <b>113.0</b> | <b>71.0</b> | <b>38.6</b> |

| Año         | Primer Periodo de proyecciones                    |             |             |             |             | A1B: 2046-2065 |             |             |              |             |             |             |
|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|             | Caudales medios mensuales A1B [m <sup>3</sup> /s] |             |             |             |             |                |             |             |              |             |             |             |
|             | Abr   | May         | Jun         | Jul         | Ago         | Sep            | Oct         | Nov         | Dic          | Ene         | Feb         | Mar         |
| 2046        | 17.3  | 13.5        | 17.7        | 12.2        | 19.0        | 24.2           | 23.8        | 31.4        | 52.1         | 129.9       | 54.7        | 25.9        |
| 2047        | 17.4  | 9.1         | 7.1         | 8.2         | 16.1        | 20.8           | 63.0        | 43.8        | 87.9         | 32.7        | 18.1        | 11.7        |
| 2048        | 12.7  | 8.7         | 9.6         | 13.5        | 32.5        | 45.1           | 50.7        | 58.0        | 82.3         | 63.5        | 30.9        | 18.7        |
| 2049        | 10.1  | 7.1         | 5.2         | 8.4         | 22.3        | 40.4           | 40.9        | 60.7        | 62.0         | 48.0        | 24.4        | 15.1        |
| 2050        | 13.3  | 12.5        | 12.8        | 11.7        | 31.1        | 35.6           | 46.3        | 74.4        | 131.5        | 50.8        | 24.3        | 15.7        |
| 2051        | 11.8  | 63.2        | 24.7        | 44.1        | 64.0        | 77.0           | 48.7        | 121.7       | 182.1        | 68.4        | 30.5        | 18.1        |
| 2052        | 62.4  | 70.2        | 25.1        | 16.5        | 16.6        | 26.9           | 24.4        | 27.1        | 92.5         | 146.1       | 156.8       | 90.9        |
| 2053        | 12.9  | 16.1        | 12.7        | 8.1         | 17.1        | 23.0           | 21.7        | 44.9        | 45.4         | 95.9        | 40.2        | 20.5        |
| 2054        | 11.9  | 19.4        | 23.1        | 18.5        | 19.5        | 36.2           | 51.9        | 77.7        | 168.2        | 32.6        | 18.2        | 12.1        |
| 2055        | 15.1  | 51.9        | 20.6        | 38.7        | 39.3        | 45.7           | 48.3        | 47.6        | 126.2        | 83.9        | 35.3        | 20.8        |
| 2056        | 17.8  | 13.9        | 14.7        | 17.2        | 19.6        | 27.8           | 22.8        | 29.2        | 66.6         | 163.4       | 79.9        | 32.4        |
| 2057        | 16.6  | 12.4        | 9.8         | 21.5        | 45.0        | 31.4           | 50.5        | 79.5        | 98.0         | 31.7        | 18.8        | 14.1        |
| 2058        | 17.8  | 16.0        | 14.9        | 41.0        | 27.6        | 54.9           | 54.4        | 77.7        | 140.3        | 89.3        | 37.2        | 20.8        |
| 2059        | 14.6  | 28.7        | 14.8        | 35.4        | 29.7        | 34.0           | 65.0        | 62.1        | 90.1         | 109.3       | 40.6        | 22.2        |
| 2060        | 12.6  | 16.0        | 11.5        | 8.9         | 30.3        | 30.6           | 23.2        | 35.7        | 74.7         | 90.0        | 36.0        | 19.8        |
| 2061        | 9.7   | 14.1        | 19.2        | 16.0        | 22.7        | 24.9           | 30.5        | 80.6        | 71.7         | 42.1        | 21.7        | 13.6        |
| 2062        | 13.1  | 29.4        | 21.9        | 15.5        | 15.3        | 31.9           | 40.2        | 63.9        | 103.5        | 29.1        | 18.0        | 15.3        |
| 2063        | 30.1  | 15.1        | 13.7        | 14.3        | 25.2        | 44.4           | 50.7        | 75.0        | 124.1        | 47.8        | 31.0        | 24.1        |
| 2064        | 11.8  | 18.4        | 19.5        | 27.5        | 35.2        | 38.6           | 38.0        | 67.8        | 103.3        | 61.0        | 28.7        | 17.4        |
| 2065        | 13.0  | 23.3        | 55.4        | 26.7        | 44.2        | 48.9           | 49.3        | 83.1        | 140.5        | 57.7        | 27.7        | 16.7        |
| <b>Prom</b> | <b>17.1</b>                                       | <b>22.9</b> | <b>17.7</b> | <b>20.2</b> | <b>28.6</b> | <b>37.1</b>    | <b>42.2</b> | <b>62.1</b> | <b>102.2</b> | <b>73.7</b> | <b>38.7</b> | <b>22.3</b> |

|             | Primer Periodo de proyecciones                   |             |             |             |             |             | A2: 2046-2065 |             |              |              |             |             |
|-------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|             | Caudales medios mensuales A2 [m <sup>3</sup> /s] |             |             |             |             |             |               |             |              |              |             |             |
| Año         | Abr  | May         | Jun         | Jul         | Ago         | Sep         | Oct           | Nov         | Dic          | Ene          | Feb         | Mar         |
| 2046        | 16.1   | 23.6        | 13.1        | 52.2        | 31.6        | 66.0        | 54.2          | 70.0        | 141.8        | 61.7         | 29.4        | 17.7        |
| 2047        | 20.7   | 23.0        | 24.7        | 19.8        | 21.5        | 24.4        | 38.3          | 91.2        | 83.6         | 173.8        | 79.5        | 32.6        |
| 2048        | 23.0   | 14.0        | 35.2        | 66.6        | 40.5        | 45.0        | 53.1          | 108.4       | 153.8        | 107.0        | 48.1        | 32.2        |
| 2049        | 24.4   | 17.8        | 20.1        | 18.9        | 25.2        | 29.5        | 38.4          | 57.3        | 91.4         | 193.0        | 97.2        | 46.6        |
| 2050        | 12.3   | 9.3         | 8.6         | 15.6        | 23.4        | 28.8        | 16.8          | 29.2        | 70.4         | 48.7         | 24.7        | 15.3        |
| 2051        | 9.1  | 18.4        | 31.3        | 38.7        | 46.0        | 51.3        | 51.1          | 63.2        | 146.2        | 43.9         | 22.1        | 13.6        |
| 2052        | 37.3   | 44.6        | 29.7        | 28.7        | 36.6        | 33.4        | 32.4          | 57.8        | 83.1         | 223.9        | 119.0       | 48.7        |
| 2053        | 13.4   | 16.7        | 15.0        | 15.5        | 27.9        | 50.6        | 49.8          | 61.5        | 115.6        | 108.7        | 44.2        | 21.7        |
| 2054        | 14.2   | 30.1        | 19.2        | 18.5        | 21.0        | 31.5        | 44.7          | 74.5        | 94.8         | 130.2        | 45.3        | 23.1        |
| 2055        | 12.4   | 16.4        | 21.5        | 74.0        | 35.4        | 51.1        | 46.6          | 55.9        | 144.6        | 82.0         | 32.3        | 18.6        |
| 2056        | 26.4   | 22.9        | 17.1        | 23.7        | 34.4        | 35.3        | 52.9          | 64.0        | 72.8         | 196.0        | 84.9        | 32.1        |
| 2057        | 15.9   | 10.9        | 13.2        | 14.1        | 17.3        | 21.2        | 17.0          | 18.5        | 37.1         | 89.4         | 57.8        | 27.9        |
| 2058        | 12.5   | 35.5        | 31.4        | 18.0        | 24.9        | 71.3        | 58.2          | 67.5        | 120.5        | 29.4         | 16.9        | 10.7        |
| 2059        | 20.4   | 18.2        | 21.1        | 16.6        | 18.7        | 23.7        | 34.0          | 35.4        | 82.4         | 145.1        | 56.3        | 28.1        |
| 2060        | 33.5   | 18.4        | 10.9        | 14.5        | 41.1        | 82.0        | 64.4          | 75.6        | 118.7        | 56.3         | 25.8        | 18.1        |
| 2061        | 33.0   | 28.5        | 37.5        | 18.4        | 33.6        | 44.7        | 44.4          | 50.3        | 114.6        | 184.0        | 80.1        | 30.4        |
| 2062        | 18.9   | 21.7        | 23.0        | 23.2        | 30.3        | 36.1        | 21.7          | 49.3        | 88.6         | 178.4        | 76.8        | 30.1        |
| 2063        | 9.6  | 31.4        | 34.3        | 55.7        | 35.0        | 41.8        | 46.1          | 40.1        | 174.7        | 34.8         | 20.2        | 13.2        |
| 2064        | 23.4   | 48.9        | 41.0        | 32.5        | 37.8        | 37.7        | 48.7          | 98.7        | 100.4        | 162.6        | 80.1        | 32.0        |
| 2065        | 34.8   | 16.5        | 9.0         | 11.8        | 19.1        | 25.3        | 20.3          | 28.4        | 67.5         | 124.9        | 52.3        | 26.5        |
| <b>Prom</b> | <b>20.6</b>                                      | <b>23.3</b> | <b>22.8</b> | <b>28.9</b> | <b>30.1</b> | <b>41.5</b> | <b>41.6</b>   | <b>59.8</b> | <b>105.1</b> | <b>118.7</b> | <b>54.6</b> | <b>26.0</b> |

|             | Segundo Periodo de proyecciones                   |             |             |             |             |             | A1B: 2081-2100 |             |             |             |             |             |
|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|             | Caudales medios mensuales A1B [m <sup>3</sup> /s] |             |             |             |             |             |                |             |             |             |             |             |
| Año         | Abr   | May         | Jun         | Jul         | Ago         | Sep         | Oct            | Nov         | Dic         | Ene         | Feb         | Mar         |
| 2081        | 8.4   | 7.5         | 16.0        | 11.2        | 17.8        | 16.4        | 46.9           | 61.1        | 49.9        | 29.0        | 17.8        | 11.9        |
| 2082        | 8.1   | 37.6        | 39.3        | 16.2        | 24.9        | 43.9        | 31.1           | 73.5        | 97.0        | 29.2        | 17.5        | 11.6        |
| 2083        | 72.1  | 22.7        | 31.9        | 32.9        | 72.4        | 46.1        | 68.9           | 169.7       | 146.2       | 58.3        | 27.4        | 49.4        |
| 2084        | 18.6  | 16.2        | 13.1        | 11.0        | 12.2        | 18.2        | 23.9           | 48.5        | 34.9        | 168.2       | 66.6        | 30.1        |
| 2085        | 7.5   | 6.9         | 6.8         | 7.9         | 17.2        | 30.3        | 29.8           | 62.5        | 75.4        | 18.7        | 12.7        | 9.0         |
| 2086        | 20.9  | 11.3        | 13.3        | 12.5        | 55.1        | 55.8        | 36.3           | 90.0        | 140.4       | 32.3        | 19.1        | 12.5        |
| 2087        | 17.4  | 16.5        | 12.4        | 17.5        | 16.8        | 17.9        | 22.1           | 32.6        | 61.0        | 65.9        | 31.6        | 23.9        |
| 2088        | 8.1   | 5.9         | 4.8         | 5.3         | 8.4         | 10.7        | 13.4           | 14.3        | 10.6        | 31.2        | 17.9        | 11.7        |
| 2089        | 3.8   | 8.9         | 16.7        | 35.5        | 47.2        | 53.8        | 53.8           | 82.7        | 165.9       | 7.7         | 6.3         | 4.9         |
| 2090        | 13.0  | 52.9        | 32.2        | 20.8        | 30.3        | 28.4        | 49.4           | 75.6        | 95.1        | 81.3        | 34.3        | 20.1        |
| 2091        | 10.7  | 23.1        | 17.9        | 19.3        | 29.0        | 33.2        | 29.6           | 54.9        | 80.3        | 47.1        | 25.1        | 15.8        |
| 2092        | 10.0  | 7.0         | 11.4        | 15.2        | 26.3        | 39.8        | 56.8           | 50.8        | 72.7        | 33.3        | 19.6        | 12.9        |
| 2093        | 10.7  | 7.5         | 6.2         | 7.3         | 11.2        | 18.2        | 20.0           | 24.6        | 17.7        | 64.5        | 27.7        | 16.3        |
| 2094        | 8.1   | 6.9         | 6.6         | 10.3        | 11.8        | 13.6        | 29.5           | 29.4        | 20.8        | 11.6        | 8.6         | 6.5         |
| 2095        | 19.7  | 18.4        | 14.7        | 21.3        | 29.1        | 37.0        | 52.9           | 54.1        | 107.0       | 12.8        | 9.3         | 6.9         |
| 2096        | 16.6  | 14.3        | 18.2        | 17.6        | 18.0        | 15.9        | 21.9           | 67.2        | 39.6        | 59.4        | 27.0        | 16.4        |
| 2097        | 7.3   | 15.1        | 13.6        | 19.1        | 23.7        | 22.7        | 25.3           | 59.0        | 46.6        | 22.0        | 14.5        | 10.1        |
| 2098        | 16.9  | 13.1        | 14.9        | 24.3        | 27.4        | 28.5        | 45.0           | 62.6        | 68.9        | 21.8        | 14.5        | 10.1        |
| 2099        | 8.9   | 10.8        | 16.3        | 21.0        | 40.0        | 50.8        | 56.8           | 84.5        | 112.7       | 33.0        | 19.4        | 12.8        |
| 2100        | 11.5  | 8.5         | 15.0        | 13.8        | 13.6        | 22.9        | 15.6           | 42.6        | 34.8        | 61.2        | 28.7        | 17.3        |
| <b>Prom</b> | <b>14.9</b>                                       | <b>15.6</b> | <b>16.1</b> | <b>17.0</b> | <b>26.6</b> | <b>30.2</b> | <b>36.4</b>    | <b>62.0</b> | <b>73.9</b> | <b>44.4</b> | <b>22.3</b> | <b>15.5</b> |

| Año         | Segundo Periodo de proyecciones     |             |             |             |             |             | A2: 2081-2100 |             |             |             |             |             |
|-------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|             | Caudales medios mensuales A2 [m3/s] |             |             |             |             |             |               |             |             |             |             |             |
|             | Abr                                 | May         | Jun         | Jul         | Ago         | Sep         | Oct           | Nov         | Dic         | Ene         | Feb         | Mar         |
| <b>2081</b> | 10.4                                | 10.0        | 6.5         | 22.6        | 39.8        | 36.2        | 30.2          | 58.0        | 62.6        | 47.5        | 24.1        | 15.0        |
| <b>2082</b> | 9.6                                 | 6.9         | 16.9        | 18.2        | 57.3        | 37.8        | 29.5          | 51.4        | 90.7        | 46.3        | 22.9        | 14.2        |
| <b>2083</b> | 9.7                                 | 13.9        | 50.6        | 62.7        | 45.7        | 40.1        | 43.3          | 71.1        | 121.1       | 37.4        | 21.3        | 13.8        |
| <b>2084</b> | 16.6                                | 40.9        | 25.7        | 18.6        | 33.7        | 35.9        | 43.5          | 48.7        | 89.9        | 176.6       | 63.1        | 28.2        |
| <b>2085</b> | 12.1                                | 10.0        | 35.6        | 31.7        | 43.2        | 60.4        | 63.5          | 99.6        | 135.9       | 72.9        | 29.6        | 17.5        |
| <b>2086</b> | 19.5                                | 15.4        | 35.0        | 39.3        | 32.0        | 42.8        | 53.0          | 43.7        | 133.8       | 81.2        | 35.4        | 24.2        |
| <b>2087</b> | 12.5                                | 12.6        | 22.0        | 20.6        | 31.2        | 39.0        | 28.7          | 57.3        | 44.1        | 69.2        | 31.0        | 18.4        |
| <b>2088</b> | 14.3                                | 13.2        | 10.1        | 11.8        | 26.7        | 52.5        | 40.9          | 36.0        | 94.0        | 24.6        | 16.0        | 11.0        |
| <b>2089</b> | 20.0                                | 26.5        | 17.8        | 13.9        | 17.4        | 21.3        | 20.5          | 60.4        | 45.1        | 34.6        | 20.0        | 13.3        |
| <b>2090</b> | 33.0                                | 9.6         | 7.2         | 9.9         | 30.6        | 46.2        | 53.9          | 63.4        | 63.2        | 23.5        | 15.3        | 10.5        |
| <b>2091</b> | 8.9                                 | 8.6         | 23.2        | 35.4        | 52.4        | 72.4        | 56.3          | 111.0       | 129.2       | 31.5        | 19.4        | 12.8        |
| <b>2092</b> | 15.9                                | 28.1        | 29.7        | 25.8        | 34.2        | 29.7        | 36.6          | 87.9        | 85.1        | 51.9        | 27.7        | 17.2        |
| <b>2093</b> | 9.5                                 | 9.2         | 11.9        | 10.0        | 26.4        | 36.4        | 35.5          | 63.0        | 41.3        | 34.3        | 20.7        | 13.7        |
| <b>2094</b> | 7.3                                 | 5.5         | 22.2        | 43.8        | 34.9        | 27.4        | 32.2          | 77.9        | 84.6        | 21.5        | 14.4        | 10.1        |
| <b>2095</b> | 9.4                                 | 12.7        | 10.1        | 10.8        | 22.8        | 21.3        | 13.7          | 28.4        | 29.6        | 34.9        | 20.6        | 13.6        |
| <b>2096</b> | 6.6                                 | 5.3         | 13.6        | 9.6         | 9.4         | 9.8         | 22.8          | 29.3        | 18.2        | 17.7        | 11.9        | 8.4         |
| <b>2097</b> | 28.3                                | 22.1        | 19.0        | 21.7        | 28.7        | 35.2        | 50.4          | 56.3        | 77.4        | 11.8        | 8.8         | 6.6         |
| <b>2098</b> | 9.4                                 | 16.1        | 17.0        | 29.7        | 23.5        | 21.0        | 21.0          | 54.9        | 51.8        | 35.9        | 20.8        | 13.6        |
| <b>2099</b> | 7.6                                 | 6.8         | 6.7         | 13.6        | 14.6        | 17.8        | 13.7          | 24.2        | 26.0        | 23.6        | 15.2        | 10.5        |
| <b>2100</b> | 5.5                                 | 12.6        | 13.9        | 16.0        | 29.7        | 38.7        | 36.1          | 52.5        | 55.0        | 14.1        | 10.0        | 7.3         |
| <b>Prom</b> | <b>13.3</b>                         | <b>14.3</b> | <b>19.7</b> | <b>23.3</b> | <b>31.7</b> | <b>36.1</b> | <b>36.3</b>   | <b>58.7</b> | <b>73.9</b> | <b>44.5</b> | <b>22.4</b> | <b>14.0</b> |

## ANEXO D: Caudales medios anuales

| <b>BASE Modelada</b>   |             |
|------------------------|-------------|
| LB Modelada: 1978-1992 |             |
| Fecha                  | Caudal m3/s |
| 1977-1978              | 61.7        |
| 1978-1979              | 62.4        |
| 1979-1980              | 61.7        |
| 1980-1981              | 72.6        |
| 1981-1982              | 47.0        |
| 1982-1983              | 92.9        |
| 1983-1984              | 47.2        |
| 1984-1985              | 60.1        |
| 1985-1986              | 36.0        |
| 1986-1987              | 59.9        |
| 1987-1988              | 64.1        |
| 1988-1989              | 33.9        |
| 1989-1990              | 39.3        |
| 1990-1991              | 29.8        |
| 1991-1992              | 53.7        |
| 1992-1993              | 64.3        |
| <b>Promedio</b>        | <b>55.4</b> |

| <b>2046-2065</b> |             |             | <b>2081-2100</b> |             |             |
|------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|
|                  | SRESA1B     | SRESA2      |                  | SRESA1B     | SRESA2      |
| Fecha            | Caudal m3/s | Caudal m3/s | Fecha            | Caudal m3/s | Caudal m3/s |
| 2046-2047        | 22.9        | 63.0        | 2081-2082        | 24.5        | 30.1        |
| 2047-2048        | 32.3        | 44.6        | 2082-2083        | 42.4        | 32.7        |
| 2048-2049        | 33.5        | 73.1        | 2083-2084        | 77.4        | 60.7        |
| 2049-2050        | 29.0        | 34.4        | 2084-2085        | 19.7        | 39.6        |
| 2050-2051        | 40.7        | 24.6        | 2085-2086        | 25.7        | 52.9        |
| 2051-2052        | 85.6        | 70.5        | 2086-2087        | 46.6        | 44.6        |
| 2052-2053        | 43.3        | 46.6        | 2087-2088        | 23.0        | 26.7        |
| 2053-2054        | 22.1        | 47.2        | 2088-2089        | 8.4         | 30.7        |
| 2054-2055        | 47.4        | 40.2        | 2089-2090        | 50.6        | 24.4        |
| 2055-2056        | 59.2        | 64.4        | 2090-2091        | 40.6        | 31.8        |
| 2056-2057        | 24.6        | 43.7        | 2091-2092        | 30.4        | 49.6        |
| 2057-2058        | 42.8        | 18.6        | 2092-2093        | 33.3        | 36.9        |
| 2058-2059        | 51.6        | 55.9        | 2093-2094        | 12.5        | 24.1        |
| 2059-2060        | 43.5        | 31.0        | 2094-2095        | 13.9        | 33.9        |
| 2060-2061        | 26.8        | 62.8        | 2095-2096        | 38.2        | 16.4        |
| 2061-2062        | 29.4        | 57.5        | 2096-2097        | 23.0        | 12.7        |
| 2062-2063        | 36.6        | 31.8        | 2097-2098        | 23.3        | 34.2        |
| 2063-2064        | 41.8        | 62.1        | 2098-2099        | 30.7        | 24.5        |
| 2064-2065        | 38.6        | 56.2        | 2099-2100        | 42.6        | 13.5        |
| <b>Promedio</b>  | <b>39.6</b> | <b>48.8</b> | <b>Promedio</b>  | <b>31.9</b> | <b>32.6</b> |

