



Capítulo:  
“ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS  
DE CHILE FRENTE A ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO”

Río Aconcagua en Chacabuquito

Ejecutor: AGRIMED. Universidad de Chile

Diciembre 2008



## Índice

1	Introducción .....	3
1.1	Resumen del estudio .....	3
1.2	Metodología de análisis .....	3
1.2.1	Vulnerabilidad de los recursos hídricos .....	4
1.2.2	Proyecciones de cambio de régimen hidrológico .....	5
1.2.3	Análisis de la posible influencia del cambio climático en las variaciones de eventos de sequías y crecidas .....	5
1.3	Selección de cuencas .....	7
2	Calibración de modelos .....	12
2.1	Software WEAP .....	12
2.1.1	Río Aconcagua en Chacabuquito .....	13
3	Análisis de la información del modelo meteorológico PRECIS .....	14
3.1	Río Aconcagua en Chacabuquito .....	16
4	Resultados futuros .....	19
4.1	Río Aconcagua en Chacabuquito .....	20
4.1.1	Comentarios .....	21
5	Análisis de resultados .....	22
5.1	Río Aconcagua en Chacabuquito .....	22
5.1.1	Estrés hídrico .....	22
5.1.2	Curva de Duración de la duración del déficit .....	25
5.1.3	Análisis de los caudales máximos .....	26
5.1.4	Curva de variación estacional .....	27
5.1.5	Comentarios de los resultados obtenidos .....	27
6	Conclusiones .....	28
6.1	Aspectos generales .....	28
6.2	Situación futura. Período 2035 a 2065. Escenario A2 .....	28
6.3	Recomendaciones de estudios futuros .....	30

## **1 Introducción**

### **1.1 Resumen del estudio**

El clima de una zona o región corresponde al conjunto de condiciones atmosféricas que la caracterizan, es entonces un estado promedio del tiempo atmosférico determinado principalmente por las variables temperatura, precipitación y viento, en un período de tiempo que la Organización Meteorológica Mundial (OMM) define como 30 años. El cambio climático se refiere a la modificación de dichas condiciones promedio o su variabilidad ( $\mu$ ,  $\sigma$ ) por causas atribuibles, 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.

Los cambios de clima previstos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, Intergovernmental Panel of Climate Change) se basan en pautas de comportamiento de la humanidad que generan distintos escenarios climáticos. De estos, el más desfavorable corresponde al escenario denominado A2, el que se caracteriza por la autosuficiencia y conservación de las identidades locales que da origen a que las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. En dicho contexto, el desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones y tanto el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

El estudio “Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático” se ha enfocado a los efectos que sobre estos sectores tiene el escenario A2, adoptando para el análisis el período 2035 a 2065. En particular, en este informe se aborda el impacto sobre los recursos hídricos futuros.

Mediante la calibración de modelos de simulación hidrológica en nueve cuencas chilenas situadas entre la IV y la IX Región, se pretende cuantificar el impacto que tendrá en la escurrentía y disponibilidad del recurso frente a los posibles cambios de temperatura, evaporación y precipitación, correspondientes al escenario A2.

Producto de la heterogeneidad presente, este análisis debe enfocarse por cuencas (nueve cuencas, nueve modelos de simulación). El criterio de selección de estas cuencas corresponde, por una parte, al grado de intervención antrópica que puedan tener, y por otro, a la importancia que tienen en cuanto a la disponibilidad del recurso para la región analizada. Es por esto que se han escogido cuencas principalmente de cabecera cuyos regímenes hidrológicos son tanto pluviales como nivales o nivopluviales y presentan una mínima intervención.

### **1.2 Metodología de análisis**

A continuación se describe la metodología escogida para evaluar la vulnerabilidad de los recursos hídricos y los índices seleccionados para el análisis de las proyecciones de cambios susceptibles de ocurrir en el futuro.

### 1.2.1 Vulnerabilidad de los recursos hídricos

El objetivo de evaluar la vulnerabilidad de los recursos hídricos pasa, en primer lugar, por asociar las unidades básicas de análisis (comunas) con las unidades físicas (cuencas hidrográficas) que traducen los efectos climáticos en variaciones sobre la disponibilidad de recursos de agua. Para tal efecto se seleccionaron de preferencia cuencas en régimen natural, efectuando en éstas un catastro de las fuentes principales de agua, superficiales y subterráneas, de las áreas productivas. Como resultado de dicho análisis fue posible, posteriormente, clasificar las comunas según su fuente o fuentes de suministro, y agrupar de esta manera el análisis de modo de otorgar coherencia física a los resultados.

En el caso de zonas con fuentes superficiales, se caracterizó el régimen de escorrentía de los ríos en términos de sus caudales medios mensuales. Para las cuencas seleccionadas se realizó una completa revisión de los estudios hidrológicos existentes en el país y se actualizaron las estadísticas de caudales medios mensuales disponibles con datos medidos por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (DGA-MOP). Como resultado de este análisis se definieron las curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales, que relacionan el caudal de cada mes con una cierta probabilidad de excedencia. Además de la magnitud de los caudales, interesa evaluar cambios en su distribución temporal, como por ejemplo, la posible evolución en el tiempo que presente el caudal máximo de derretimiento de primavera en aquellas cuencas de régimen nival.

A partir de las series de caudales medios mensuales estimadas se caracterizaron también los períodos críticos de disponibilidad de caudales. Si bien existe más de una definición de sequía, para efectos de este estudio se identificaron las sequías hidrológicas. La definición de sequía hidrológica se refiere a déficit de suministro de aguas para cualquier fin y se puede obtener sobre la base de datos hidrometeorológicos exclusivamente.

La vulnerabilidad de los recursos hídricos no sólo se relaciona con las condiciones hidrometeorológicas que determinan la oferta hídrica de los sistemas, sino también con la capacidad de los usuarios del agua para hacer frente a eventos de escasez. Por consiguiente, el desarrollo del diagnóstico comprendió un catastro de las obras de captación y regulación mayores en aquellas cuencas con información. Este catastro incluyó bocatomas principales y embalses de regulación, y se propusieron indicadores de vulnerabilidad según capacidad, estado de conservación, existencia de asociaciones de usuarios, y otros. En el caso de las obras de regulación, se analizó su capacidad de regulación en comparación con estimaciones de los valores medios afluentes.

La oferta hídrica en régimen natural de los ríos y acuíferos que definen los sistemas seleccionados para el estudio, se comparó con los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas, otorgados y solicitados, en cada una de ellas, por lo cual fue necesario realizar un catastro general acerca de los derechos de agua. Se consultó información recopilada principalmente en la DGA, y se verificó, cuando correspondió, aquellas cuencas que fueron cerradas, así como acuíferos que fueron declarados zonas de protección o conservación. De esta manera se generó un diagnóstico del *stress* hídrico a que están sometidos los sistemas hídricos del país en situación actual, a modo de comparar dicha situación con los escenarios alternativos de Cambio Climático.

## 1.2.2 Proyecciones de cambio de régimen hidrológico

A partir de las proyecciones de cambio climático disponibles se generaron series de tiempo de variables hidrológicas de interés para las cuencas del país seleccionadas para el estudio. En algunos casos fue posible establecer modelos estadísticos que relacionaran caudales superficiales y subterráneos con variables hidrometeorológicas, de modo de generar proyecciones de cambio de manera directa. En otros casos, se debieron generar series sintéticas de caudales mediante un modelo de simulación. Se propone principalmente el uso del paquete computacional WEAP (Water Evaluation and Planning System, del Stockholm Environmental Institute), el cual ha sido desarrollado específicamente con el fin de incorporar información climatológica a estudios hidrológicos.

El software WEAP utiliza representaciones conceptuales simplificadas de las interacciones atmósfera-suelo y río-acuífero para generar series de caudales a partir de datos de entrada climatológicos, de uso de suelo y operacionales. WEAP posee una interfaz gráfica que permite integración directa con datos de SIG (Sistemas de Información Geográfica), programación dinámica y diversas funciones incorporadas, así como la flexibilidad de incorporar variables y funciones *ad-hoc* por parte del usuario. Este software ha sido aplicado con éxito en diversas regiones geográficas con el fin de evaluar los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos (Amato *et al.* 2006; Assaf y Saadeh, 2006; Olusheyi, 2006; Sorisi, 2006; Yates *et al.*, 2007). El análisis en este caso se llevará a cabo a nivel medio mensual.

Adicionalmente, se contempla el uso de un modelo especialmente desarrollado para la generación de caudales medios diarios en cuencas pluviales como es el GR4J, ya calibrado en algunas cuencas de Chile (López, 2007).

## 1.2.3 Análisis de la posible influencia del cambio climático en las variaciones de eventos de sequías y crecidas

### 1.2.3.1 Análisis de sequías

Para el análisis de las proyecciones de frecuencia, intensidad y duración de sequías para escenarios de Cambio Climático en los lugares seleccionados para el análisis, se considera la evaluación, tanto en el período actual como en los futuros escenarios de cambio climático, de los siguientes tipos de índices:

#### A. Índices basados en la frecuencia de fallas

Son los de más amplia utilización. Su acepción más general consiste en definir la seguridad como la probabilidad de que el sistema se encuentre en una situación satisfactoria, entendiendo por tal aquella en que el suministro es suficiente para satisfacer la demanda. La probabilidad de las situaciones contrarias representa lo que se denomina riesgo de falla.

Así, la seguridad del sistema se puede describir por medio de la frecuencia o probabilidad y de que el sistema se encuentra en una situación satisfactoria:

$$\gamma = P(X \in S)$$

El riesgo o probabilidad de falla es simplemente la probabilidad complementaria de  $\gamma$ , vale decir,  $1 - \gamma$ .

Para definir la falla se adoptará tanto el año como un período de  $N$  años como intervalo de tiempo, de manera de analizar la probabilidad de que en cualquier año el estado del sistema sea satisfactorio, es decir, que el suministro sea suficiente para atender la totalidad de la demanda o un porcentaje de ésta (Garantía o Seguridad Anual) como también la probabilidad de operación sin fallas durante un período de años consecutivos (Garantía o Seguridad Multianual) de una determinada duración  $N$  (generalmente, la vida útil del sistema que se está analizando).

#### B. Índices basados en la duración de las fallas

Se propone el uso del concepto de resiliencia, que indica la rapidez con que el sistema se recupera una vez que la falla se ha producido. Este concepto es más completo que el de Seguridad Temporal, ya que permite apreciar si las fallas se concentran en un período particular de tiempo.

Formalmente, la resiliencia,  $\rho$ , se define como la inversa del valor esperado de la duración,  $T_f$ , del período de tiempo en el cual el resultado del sistema es insatisfactorio, es decir, como la inversa de la duración media de las secuencias de fallas. Para determinar la duración media de las fallas se requiere saber el número de fallas ocurridas en un intervalo de tiempo. Si  $\delta$  es la probabilidad de pasar del estado satisfactorio al estado de falla, entonces la resiliencia se expresa como:

$$\rho = \frac{\delta}{1 - \gamma}$$

#### C. Índices basados en la severidad de las fallas

La principal finalidad de estos índices es describir el tamaño o magnitud de las fallas. Uno de los más simples es el déficit, entendido como la diferencia entre la demanda y el suministro. Representa la demanda que no ha sido servida, es decir, el volumen adicional que habría sido consumido si el sistema dispusiese de una fiabilidad absoluta. El déficit se puede referir tanto a un año cualquiera como a un determinado período de años, también se puede expresar tanto en valor absoluto como relativo, en función de la demanda solicitada. Para comparar los déficit entre los sistemas se recomienda utilizar el valor relativo o medio, que se define como el cociente entre la suma de los déficit que se producen durante un determinado período de tiempo y el número de déficit ocurridos.

Se propone utilizar el índice de Seguridad Volumétrica ( $S_v$ ) que se determina de acuerdo a la expresión:

$$S_v = 1 - \frac{\int (D - R) dt}{\int_0^t D dt}$$

Donde **D** representa la demanda y **R** el suministro. Si se utiliza un intervalo de tiempo similar a la discretización temporal con la que se aborda el problema, normalmente el mes o lo que dure una estación, se habla de Porcentaje de Demanda Suplida o Satisfecha, PDS. El PDS, sirve para caracterizar una falla particular del sistema por lo que se propone utilizar escenarios preestablecidos de demanda en función de los valores actuales de caudales disponibles en los lugares de interés.

#### *1.2.3.2 Análisis de crecidas*

Teniendo en consideración el nivel temporal de la información disponible, esta evaluación se limita al análisis del mes en que ocurre el caudal medio mensual máximo en el período actual y futuro, comparándose el porcentaje de veces en que dicho valor máximo se produce en un mes determinado.

### **1.3 Selección de cuencas**

En la Tabla 1.1 y en la Figura 1-1 se presentan las cuencas seleccionadas para realizar el análisis. La selección se basó principalmente en la disponibilidad de información en régimen natural así como en los estudios recientes realizados en estas cuencas que permiten tener modelos de simulación hidrológica previamente calibrados en ellas

Se aprecia que las cuencas pertenecen a la zona del país comprendida entre la IV y VIII Región, en que las estaciones fluviométricas que las definen cuentan con, al menos, 40 años de información.

En el Anexo se detallan las características principales del conjunto de cuencas y el procedimiento de calibración utilizado en cada caso.





Tabla 1.3-1: Matriz de cuencas seleccionadas

Cuenca	Estación	Régimen	Inicio - Término Registro	Años De Reg.	Altitud (msnm)	Latitud (°;')	Longitud (°;')	UTM N (m)	UTM E (m)
Elqui	Río Elqui en Algarrobal	Nival	1949/50 - 2004/05	55	760	29 59	70 35	6680630	346946
Limarí	Río Hurtado en San Agustín	Nival	1963/64 - 2004/05	42	2035	30 27	70 32	6628943	352522
Choapa	Río Illapel en Las Burras	Nival	1962/63 - 2004/05	43	1079	31 30	70 48	6512739	327870
Aconcagua	Río Aconcagua en Chacabuquito.	Nival	1937/38 - 2004/05	69	1030	32 50	70 30	6364927	358942
Maipo	Río Maipo en San Alfonso	Nival	1942/43 - 2004/05	63	1108	33 43	70 17	6266811	379639
Mataquito	Río Teno después de Junta Con Claro	Mixto	1959/60 - 2004/05	45	900	34 59	70 49	6126090	333816
Maule	Río Purapel en Nirivilo	Pluvial	1957/58 - 2004/05	48	80	35 33	72 06	6062028	762895
Perquillauquén.	Río Perquillauquén en San Manuel.	Mixto.	1954/55 - 2004/05	50	-	-	-	5971510	264849
Cautín	Río Cautín en Rari-Ruca.	Mixto.	1960/61 - 2004/05	44	-	-	.	5742485	237928



### UBICACIÓN GENERAL DE CUENCAS ANALIZADAS

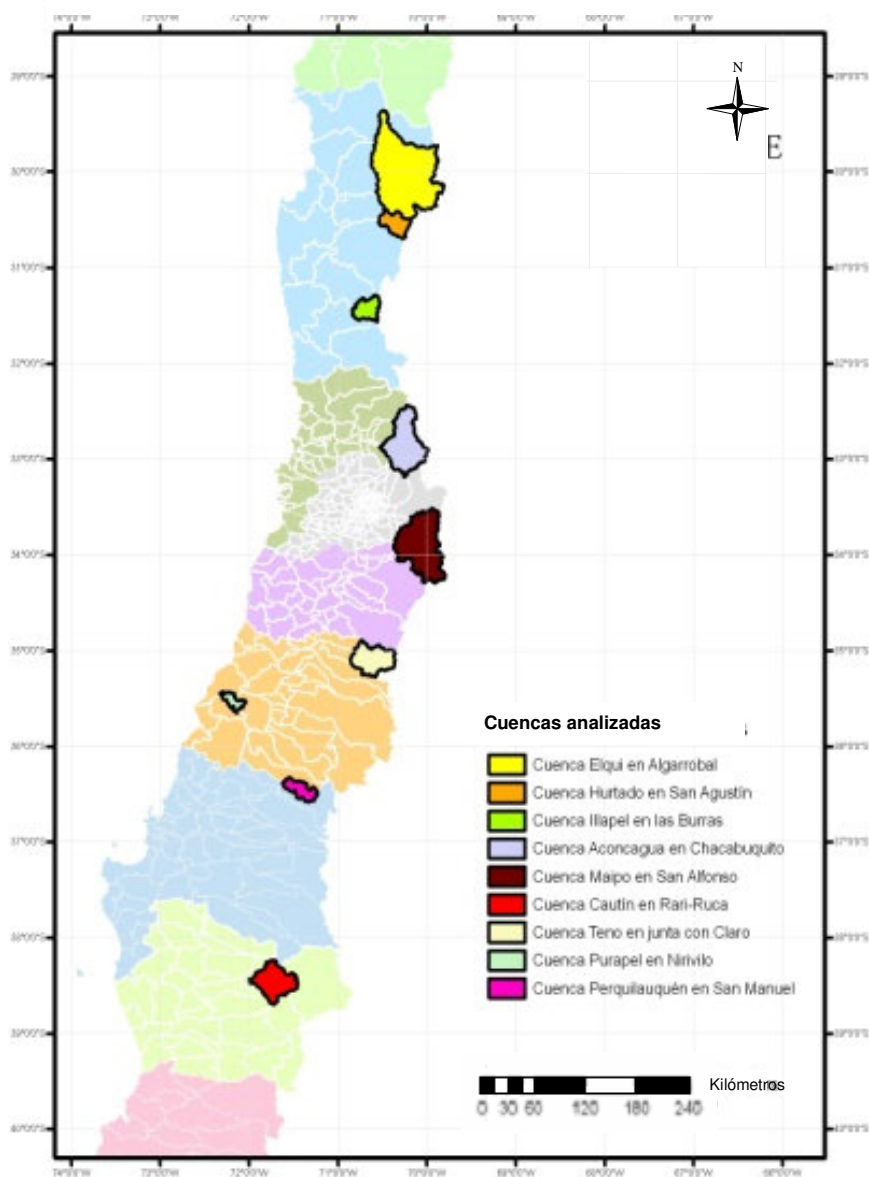


Figura 1.3-1: Ubicación de las cuencas seleccionadas

## 2 Calibración de modelos

### 2.1 Software WEAP

La metodología para la calibración usando el software WEAP obedece una línea general. Se construyeron modelos conceptuales para cada cuenca y se trazaron los principales cursos de ríos. Luego se definieron nodos meteorológicos o “catchments” que son los encargados de agrupar la información referente a precipitación, temperatura y uso del suelo, entre otras. La colocación de estos nodos es estratégica y obedece a representar el régimen hidrológico de cada cuenca.

Para finalizar el modelo conceptual se definieron los nodos de demanda. La información disponible fue obtenida de fuentes oficiales como DGA y la Comisión Nacional de Riego (CNR).

A continuación se presentan, para cada cuenca analizada, los resultados obtenidos en la calibración del modelo hidrológico a nivel promedio mensual y medio anual, además de la curva de duración de los caudales medios mensuales, y los comentarios relativos a este proceso de calibración.

Los resultados a nivel promedio mensual se muestran en un gráfico donde en el eje de las ordenadas se tienen los caudales (*streamflow*) medios mensuales en m<sup>3</sup>/s (metros cúbicos por segundo) y en el eje de las abscisas los meses del año hidrológico. En el gráfico de caudales medios anuales, se tienen los caudales medios anuales en eje de las ordenadas y los años hidrológicos en el eje de las abscisas. Finalmente se presenta la curva duración de la cuenca, donde en eje de las abscisas se tienen las probabilidades de excedencia (en porcentaje) y en el eje de las ordenadas el caudal asociado a cierta probabilidad de excedencia.

## 2.1.1 Río Aconcagua en Chacabucuito

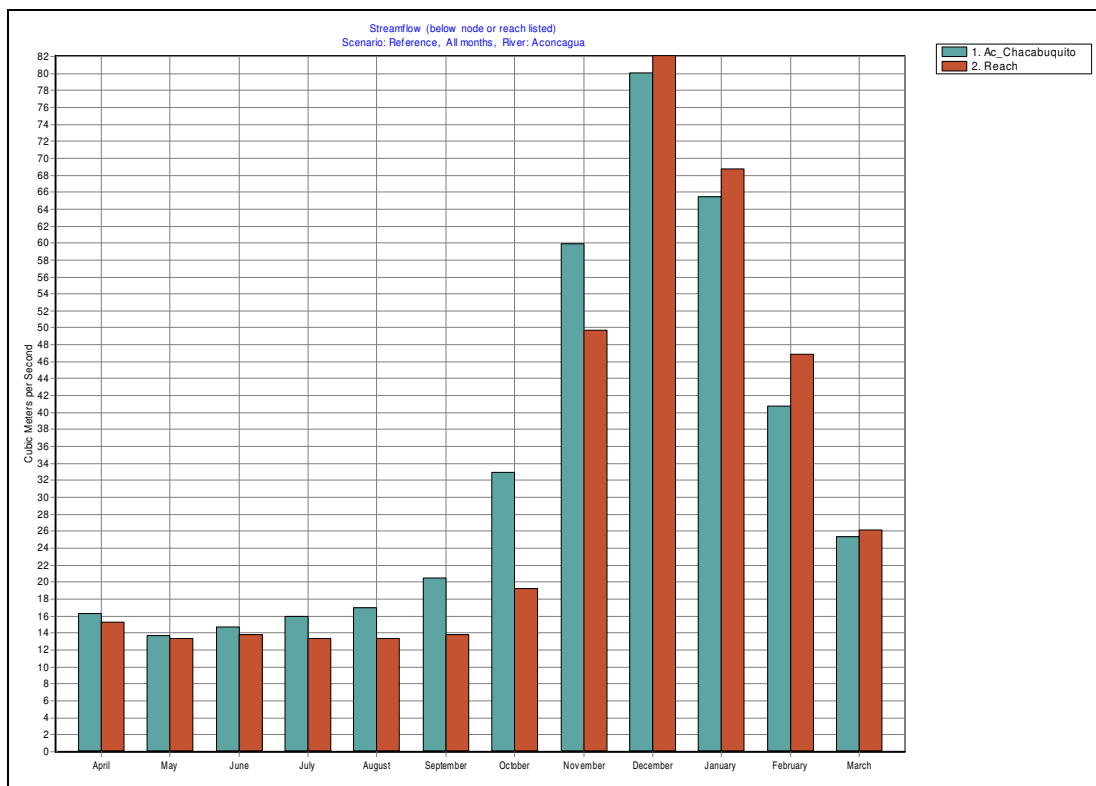


Figura 2.1-1: Calibración promedio mensual cuenca Aconcagua en Chacabucuito

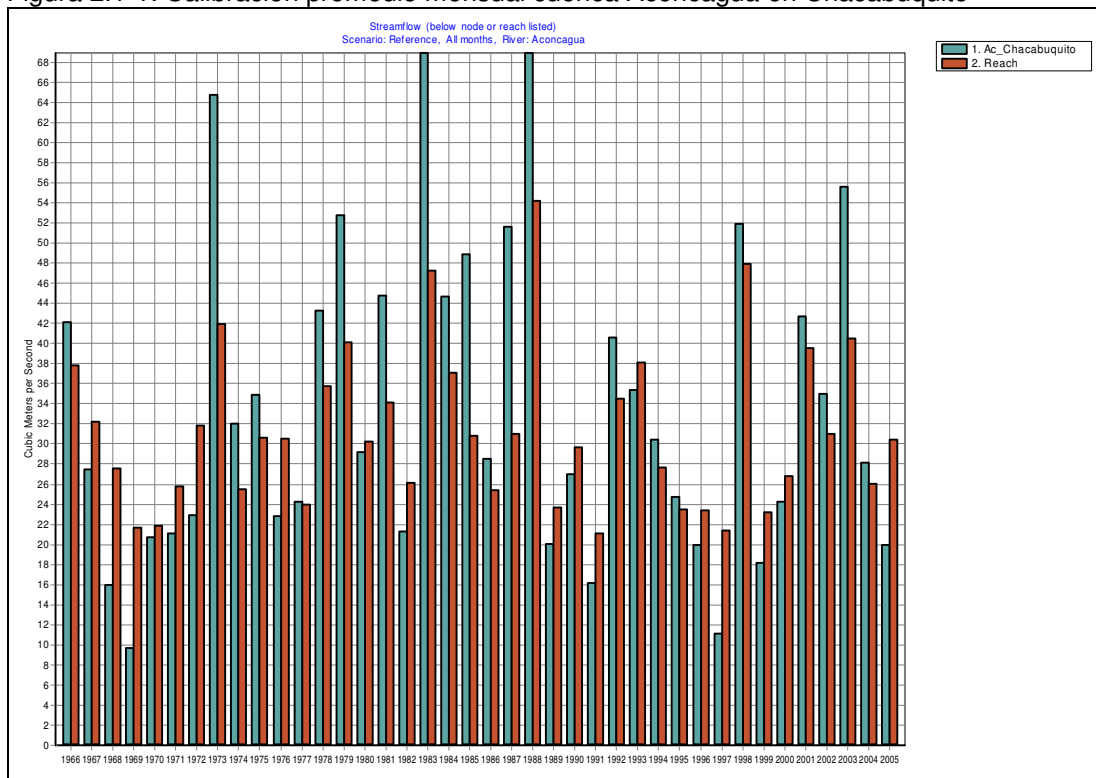


Figura 2.1-2: Calibración total anual cuenca Aconcagua en Chacabucuito

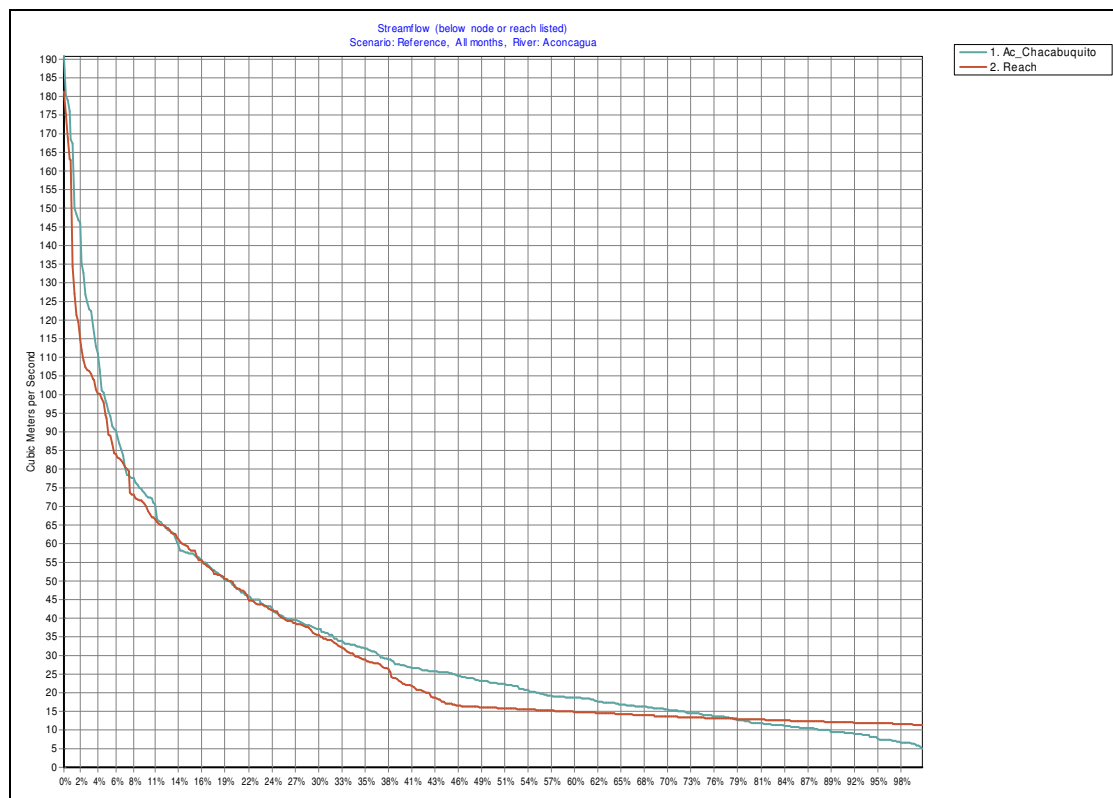


Figura 2.1-3: Curva de duración cuenca Aconcgua en Chacabuquito

### 2.1.1.1 Comentarios calibración

Pese a modificar las temperaturas de derretimiento y congelamiento por temporada, no es posible reflejar los mínimos observados, lo cual señala una limitación del modelo en este sentido. Esto puede ser explicado por el hecho de que WEAP no considera la radiación como variable y por el régimen estrictamente nival de la cuenca, que hace de especial importancia las variables que controlan el comportamiento de la nieve. Esto puede ser corregido en versiones posteriores de WEAP, sin embargo, no existen estaciones que midan la radiación en la zona, lo cual dejaría como alternativa estimarlas con alguna relación teórica de las muchas que existen.

Otra fuente de error corresponde a la variabilidad de los acuíferos ubicados en la cuenca, desde el punto de vista de conductividades, capacidad y extensión, ya que esta información es escasa en la zona estudiada. Esta componente del modelo controlaría el flujo base que define a los caudales de menor magnitud y también influiría en términos de una buena estimación de los máximos.

La bondad de ajuste del modelo fue estimada con el coeficiente de Nash-Sutcliffe, dando como resultado un valor de 0,743, lo cual refleja un buen ajuste en relación a lo observado.

## 3 Análisis de la información del modelo meteorológico PRECIS

Para la evaluación de los impactos del Cambio Climático en el período comprendido entre los años 2035 a 2065 se decidió utilizar los resultados obtenidos por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile en el proyecto Estudio de

Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI, encargado por la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). En dicho proyecto, se realizó una estimación de escenarios climáticos para diferentes regiones de Chile para el período que va desde el año 2071 al 2100, en una grilla con espaciamiento horizontal de 25 km, empleando el modelo PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies), lo que permitió generar series de variables atmosféricas en una ubicación específica del territorio nacional. El software, disponible en Internet, entrega la serie de la variable atmosférica, a nivel diario o mensual, considerando los resultados generados por el modelo PRECIS en el punto de la grilla más cercano, tanto para los escenarios futuros A2 y B2 como en el escenario base correspondiente al período que va desde el año 1960 a 1990.

Las variables de interés para el presente estudio dependen del modelo utilizado para la modelación hidrológica y corresponden a precipitaciones diarias y mensuales, evaporaciones diarias y temperaturas mensuales.

La información de evaporación es la única que no se obtiene directamente del PRECIS, debido a la falta de disponibilidad de una línea base asociada para dicha variable, por lo que se opta por una generación indirecta a partir de la relación de Thornthwaite, basada en una variación empírica de la evaporación con la temperatura (obtenida del PRECIS), utilizando correcciones a partir de las horas de sol recibidas por el espacio geográfico en donde se desea estimar dichas series, las cuales se obtienen de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC).

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

Se extrae la información de la variable simulada con el modelo PRECIS,  $Sp$ , en el período concurrente con información observada en la estación,  $So$ .

Se realiza el análisis de frecuencia a los valores mensuales y anuales de la serie  $Sp$ .

Se realiza el análisis de frecuencia a los valores mensuales y anuales de la serie observada en la estación,  $So$ .

Para valores prefijados de probabilidad de excedencia se extraen los valores asociados de cada muestra y se establece la relación entre ambos valores.

Si el período concurrente es inferior a 15 años no se considera apropiado efectuar el análisis de frecuencia, estableciéndose la relación directa entre las variables observadas y simuladas en el período concurrente.

En algunos casos se considera en forma conjunta la información de meses pertenecientes al mismo período estacional o anual.

La relación establecida se considera válida para cualquier situación futura.

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

Se analizaron las tendencias y los promedios mensuales ( $\mu_i$ ) de cada variable y sus desviaciones ( $\sigma_i$ ) en ambos períodos, lo que permitió también establecer el coeficiente de variación ( $Cv_i = \sigma_i / \mu_i$ ).

Para cada mes se calculó la tendencia en la media y en el coeficiente de variación, lo que permitió establecer los valores ( $\mu_i, \sigma_i$ ) mensuales correspondientes al período de interés (años 2035 a 2065).

Se generó para el período 2071 a 2100 la serie de la variable estandarizada  $(x - \mu_i) / \sigma_i$  utilizando los estadísticos ( $\mu_i, \sigma_i$ ) de dicho período.

Dicha serie fue desestandarizada utilizando los estadísticos del período de interés 2035 a 2065.

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

Para generar los datos diarios necesarios para el modelo GR4J se consideró que la proporción entre el valor diario de la variable y el valor mensual de cada año simulado en el futuro (años 2071 a 2100) se mantenía en el período.

En los anexos, para cada cuenca, se muestran las distintas relaciones establecidas, presentándose a continuación algunos ejemplos de los análisis de frecuencia realizados para cada variable de interés en el período base, generadas tanto con el modelo PRECIS como lo observado en el período concurrente, y la relación establecida para hacer representativa de la estación el resultado del modelo PRECIS. Se incluyen también las tablas de las series a utilizar para la modelación hidrológica futura, en el escenario A2, en el período comprendido entre los años 2035 a 2065 en cada cuenca.

### 3.1 Río Aconcagua en Chacabuquito

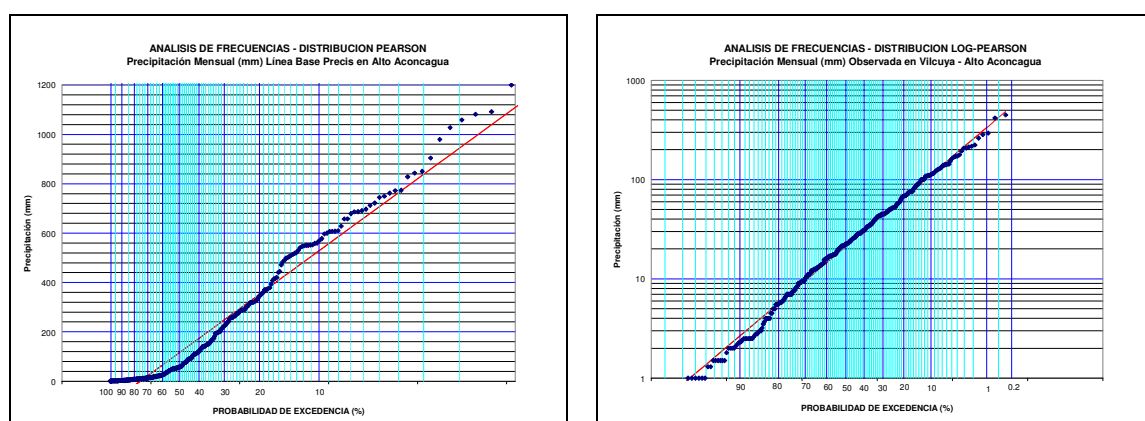


Figura 3.1-1: Análisis de frecuencia de precipitación línea base, modelo PRECIS (izquierda) y precipitación observada (derecha). Cuenca Aconcagua en Chacabuquito



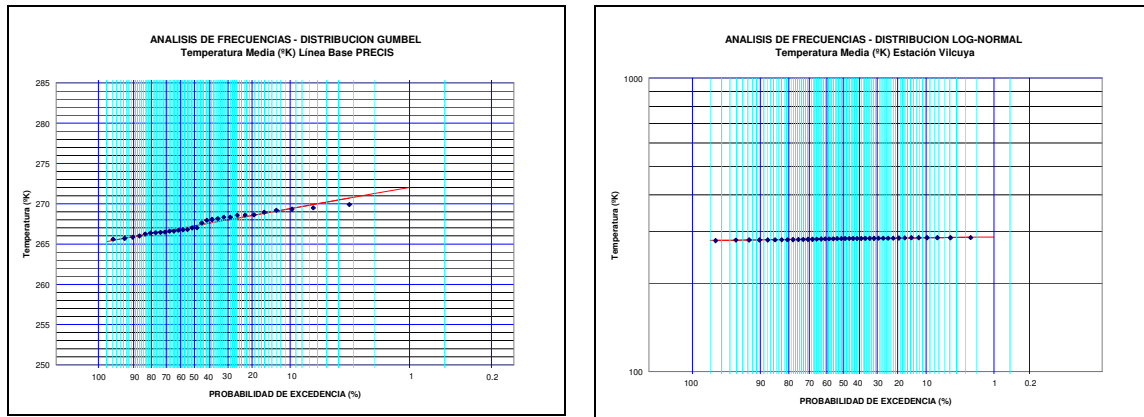


Figura 3.1-2: Análisis de frecuencia de temperatura línea base, modelo PRECIS (izquierda) y temperatura observada (derecha) para junio. Cuenca Aconcagua en Chacabucito

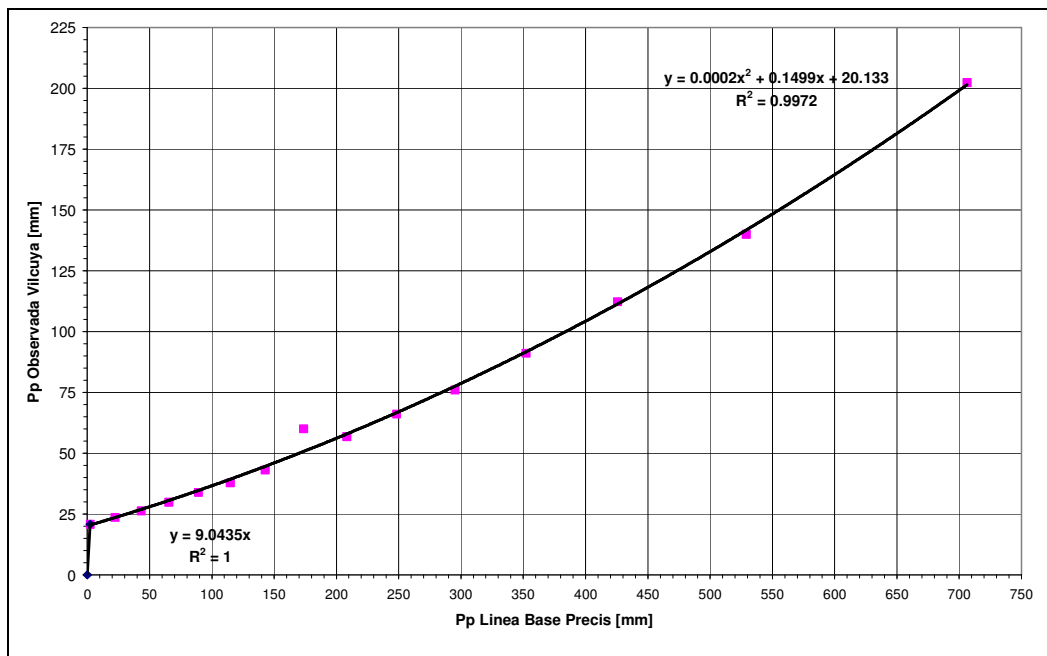


Figura 3.1-3: Corrección de precipitación simulada PRECIS. Cuenca Aconcagua en Chacabucito

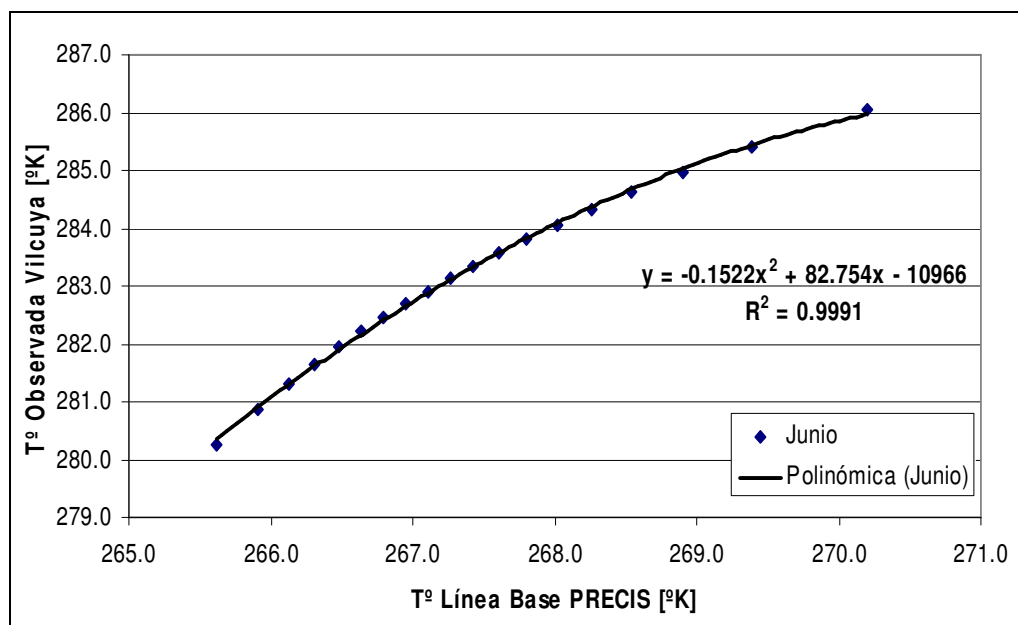


Figura 3.1-4: Corrección de temperatura simulada PRECIS en junio. Cuenca Aconcagua en Chacabuquito

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
2035												21.0
2036	14.8	20.7	14.7	37.4	165.5	88.8	111.6	37.0	24.0	24.0	20.7	12.9
2037	6.2	4.6	21.4	23.6	60.9	80.4	201.0	102.7	23.7	22.0	22.0	30.1
2038	21.3	15.7	27.8	65.2	73.4	312.5	142.0	178.5	91.7	22.0	21.1	10.7
2039	4.9	20.5	22.3	23.5	27.8	119.0	43.5	27.8	53.0	27.9	21.6	21.8
2040	21.1	21.2	21.9	68.9	64.2	153.8	68.1	58.1	75.7	22.0	22.0	14.8
2041	20.8	21.9	22.2	38.7	111.3	594.5	125.8	58.7	109.6	32.3	24.7	23.0
2042	21.2	20.7	25.5	30.2	86.4	95.3	96.3	59.7	64.6	35.3	21.4	20.5
2043	18.7	20.7	21.3	30.6	42.5	390.0	57.3	79.2	22.6	23.6	20.9	21.6
2044	20.6	21.5	21.4	32.1	65.9	341.9	81.6	258.0	29.9	24.3	22.6	20.6
2045	21.3	2.0	21.6	25.5	148.5	44.8	130.0	46.2	25.2	21.4	22.7	17.7
2046	22.3	21.8	22.0	21.0	26.0	269.1	50.7	31.7	28.9	21.5	21.1	20.7
2047	23.1	22.0	21.6	30.1	84.4	259.0	149.8	47.4	32.0	64.5	21.1	21.1
2048	20.6	21.4	20.7	24.5	132.1	427.7	50.8	43.4	33.1	21.2	20.7	21.2
2049	21.3	22.3	21.1	29.3	23.1	198.1	37.3	34.9	31.7	23.0	20.9	20.6
2050	20.7	21.1	11.9	29.0	190.7	212.7	32.5	27.9	31.2	21.8	21.1	15.5
2051	20.5	20.6	20.7	72.8	77.9	307.6	160.7	135.5	179.0	22.3	20.7	9.1
2052	17.9	4.4	22.8	131.4	167.1	455.2	155.1	84.4	42.7	22.2	21.0	14.9
2053	27.9	11.6	13.4	73.9	164.5	103.2	65.9	64.1	28.0	22.4	20.8	18.6
2054	6.0	20.6	20.5	37.6	41.2	114.2	30.0	118.2	25.5	29.0	21.8	20.8
2055	21.1	23.5	22.9	33.8	337.7	52.8	279.3	54.8	26.1	26.1	20.7	20.5
2056	21.9	9.0	22.1	26.8	253.0	313.4	60.5	85.9	25.7	39.5	20.9	20.8
2057	22.8	11.3	21.1	195.2	81.0	118.8	567.1	85.7	54.3	22.4	74.1	21.8
2058	23.5	21.3	28.4	34.5	56.3	148.5	127.8	169.5	36.6	23.3	20.9	20.7
2059	21.8	21.7	38.2	28.8	128.8	54.0	66.1	30.5	25.9	22.8	20.7	20.5
2060	17.8	23.3	16.1	25.2	109.7	35.5	66.1	37.3	27.9	21.3	20.9	20.9
2061	20.9	28.8	20.6	84.7	76.0	853.3	69.6	49.4	203.1	24.8	20.7	11.5
2062	19.4	29.9	29.7	60.7	312.0	73.2	758.7	72.9	103.3	22.5	21.4	20.3
2063	20.8	4.6	8.2	27.6	32.1	54.7	43.0	27.7	25.5	26.0	20.8	20.2
2064	16.3	20.6	22.1	27.0	67.0	42.0	36.0	23.1	24.1	33.3	21.4	9.3
2065	21.0	12.9	21.6	29.0	58.4	62.1	93.9	165.4	28.8	53.7	21.1	

Tabla 3.1-1: Serie mensual de precipitación simulada para el período 2035 a 2065. Estación Vilcuya, en mm

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
2035												18.1
2036	16.3	17.5	19.0	11.1	12.8	7.4	10.5	18.9	21.2	14.8	23.9	18.1
2037	16.3	18.3	18.3	11.7	16.2	7.0	7.2	11.2	14.7	14.8	24.0	18.0
2038	16.2	17.9	20.9	10.7	12.4	7.4	4.8	18.3	14.5	14.8	23.8	17.8
2039	16.1	17.9	19.1	12.8	11.4	6.7	7.0	14.5	20.6	14.7	23.6	18.1
2040	16.2	18.5	18.7	9.7	15.5	7.5	8.5	11.3	18.8	14.7	24.4	18.0
2041	16.1	17.7	18.0	11.7	13.8	7.5	9.5	17.0	19.8	14.8	24.7	17.5
2042	15.6	15.9	19.9	10.9	11.2	7.1	10.5	20.5	19.0	14.8	24.6	18.1
2043	16.1	17.7	20.6	13.7	13.2	7.4	7.5	14.5	12.6	14.8	21.9	18.1
2044	16.1	19.2	22.3	12.9	15.2	7.2	6.2	15.4	18.1	14.8	24.0	18.1
2045	16.2	18.3	20.5	12.8	17.1	5.3	12.9	13.5	31.1	14.7	20.8	17.2
2046	15.7	19.1	22.3	14.8	5.0	7.5	6.2	13.8	12.6	14.8	21.6	17.7
2047	15.1	19.0	21.2	13.3	7.2	7.6	9.9	14.6	23.2	14.8	23.7	18.1
2048	16.2	18.2	21.7	14.0	12.8	7.3	9.5	14.5	19.3	14.8	21.3	18.1
2049	16.3	18.9	20.7	12.8	6.5	7.3	8.8	18.5	24.6	14.7	19.1	17.4
2050	16.1	19.1	22.1	13.0	13.8	7.5	8.9	19.7	20.0	14.8	23.4	17.9
2051	16.0	19.0	21.6	11.9	14.4	7.6	11.4	14.9	19.3	14.8	22.7	18.1
2052	16.3	18.1	21.3	14.2	12.1	6.7	7.6	11.9	24.9	14.8	23.7	18.0
2053	16.3	17.8	20.6	12.1	12.5	7.3	10.1	16.6	24.7	14.7	21.7	18.1
2054	16.2	19.4	23.2	12.3	5.1	6.9	13.7	16.8	25.1	14.8	21.1	17.9
2055	14.8	19.3	20.8	14.1	14.8	7.6	8.6	19.4	22.5	14.8	20.9	15.6
2056	14.6	19.0	22.1	11.7	8.3	7.5	10.9	18.0	28.1	14.7	24.1	18.0
2057	15.9	18.4	23.7	13.3	14.8	7.1	10.6	17.1	24.5	14.8	22.5	18.0
2058	16.2	17.1	18.8	9.9	12.9	7.6	7.4	12.4	24.4	14.8	23.4	18.1
2059	16.3	17.7	21.6	12.3	14.4	7.2	9.2	26.2	38.6	14.7	19.3	17.6
2060	15.3	19.0	22.0	13.9	14.2	7.5	12.6	22.0	41.4	14.7	17.6	17.1
2061	15.8	17.9	20.9	15.8	13.2	6.4	10.5	21.1	19.9	14.7	22.2	18.1
2062	16.2	18.2	20.5	11.7	13.7	7.6	12.5	17.9	33.6	14.8	22.4	18.1
2063	16.3	18.0	20.4	13.5	4.1	7.5	11.4	26.0	45.6	14.7	14.5	16.6
2064	15.6	19.0	20.7	13.3	2.3	5.2	11.7	26.4	35.6	14.7	12.8	15.7
2065	14.9	19.4	21.2	15.3	8.9	7.5	12.6	23.4	41.2	14.8	18.8	

Tabla 3.1-2: Serie mensual de temperatura simulada para el período 2035 a 2065. Estación Vilcuya, en °C

## 4 Resultados futuros

Las series de variables atmosféricas generadas para el escenario A2, presentadas en el capítulo 2, se utilizaron para simular los caudales en el período que va desde el año 2035 al 2065 en las cuencas de interés, utilizando los modelos hidrológicos WEAP y GR4J, ya calibrados a base de la información observada.

En este capítulo se presentan gráficamente, por cuenca, y de norte a sur, los estadísticos mensuales y anuales similares a los que se presentaron en el capítulo 1 para la calibración. Se incluyen también los comentarios relativos a estos estadísticos.

## 4.1 Río Aconcagua en Chacabuquito

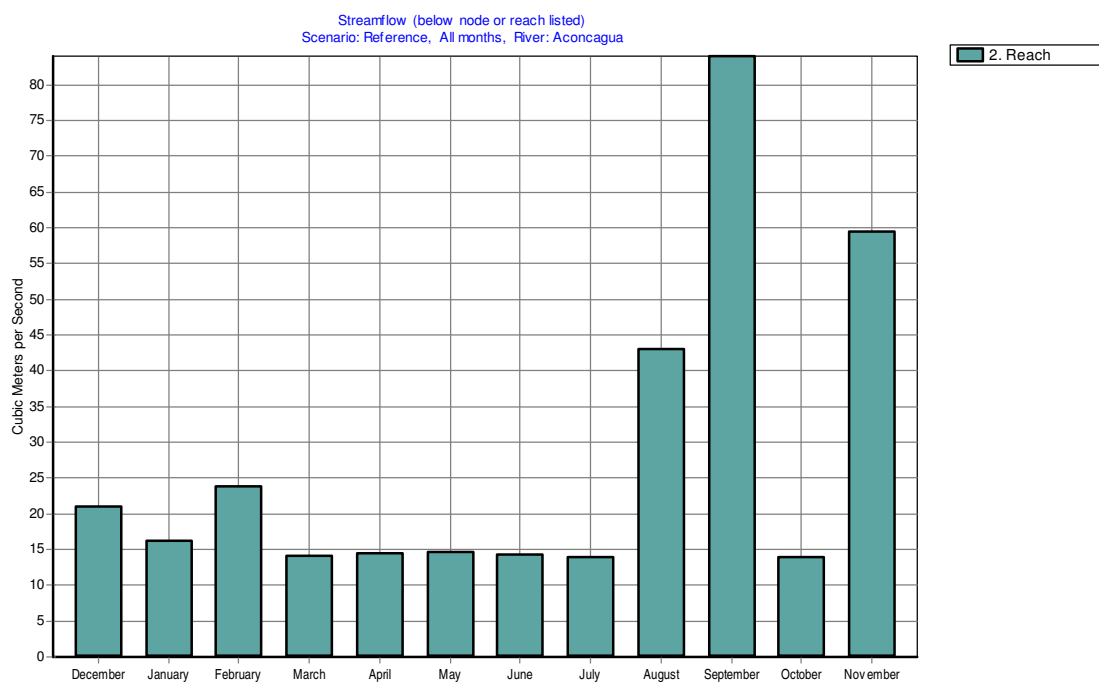


Figura 4.1-1: Promedio mensual para la cuenca Aconcagua en Chacabuquito (datos futuros)

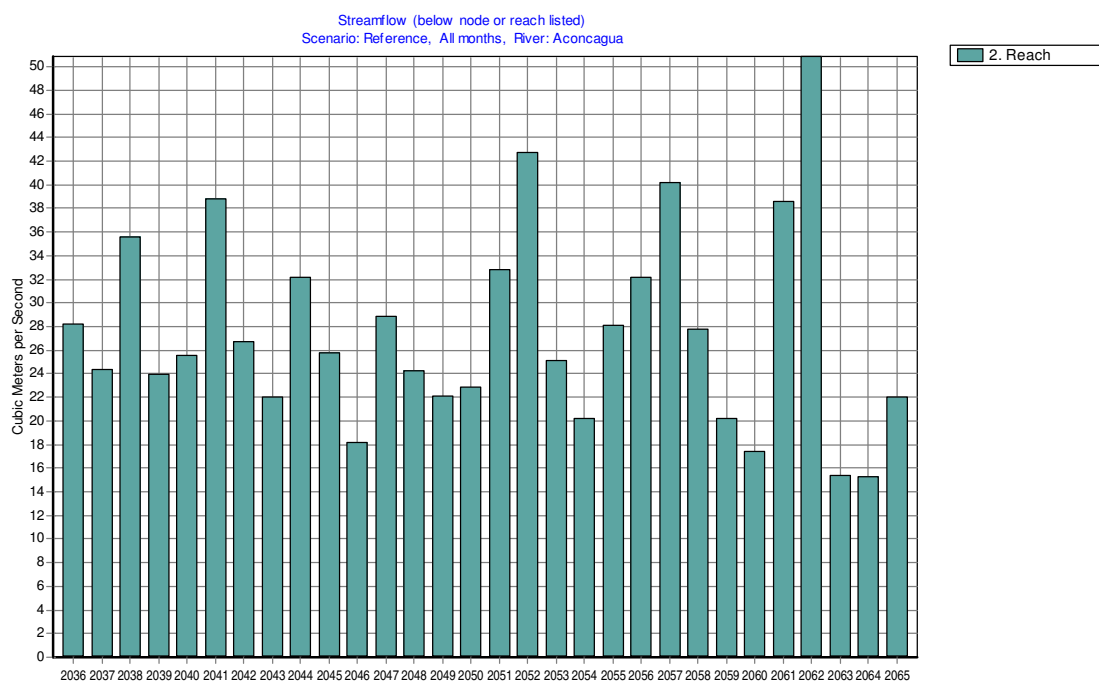


Figura 4.1-2: Total anual para la cuenca Aconcagua en Chacabuquito (datos futuros)

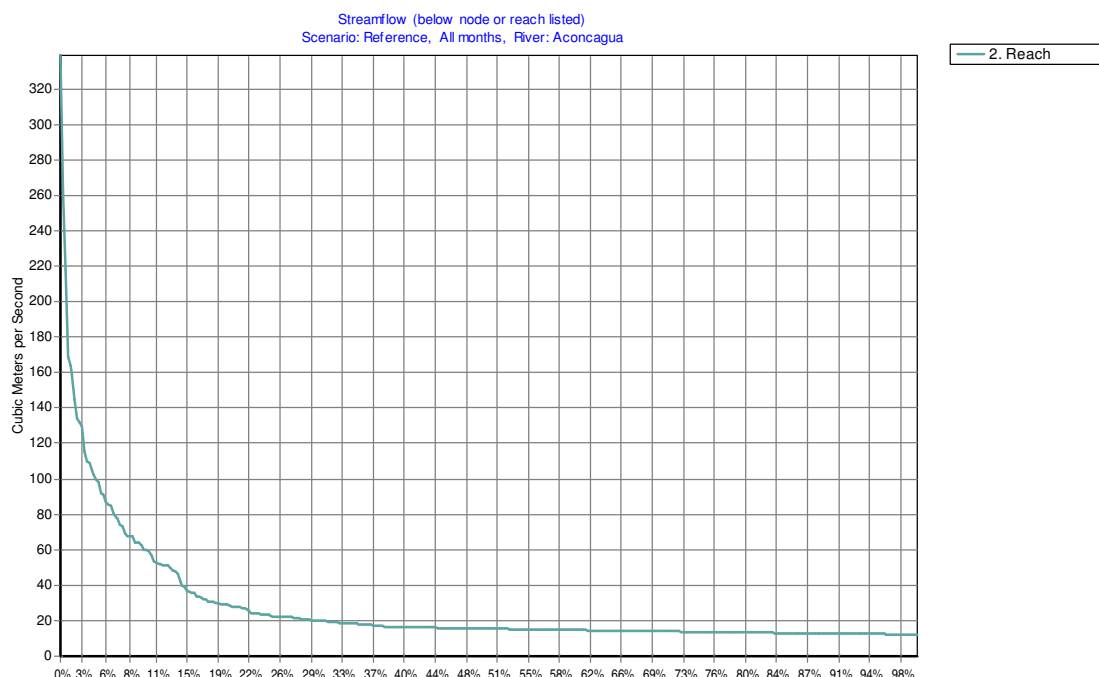


Figura 4.1-3: Curva de duración para la cuenca Aconcagua en Chacabuco (datos futuros)

#### 4.1.1 Comentarios

El período de precipitaciones se concentra principalmente, en promedio, entre abril y septiembre, con el máximo en el mes de junio. La Figura 4.4-1 indica que, en el período analizado, de 2035 a 2065, el aumento de la escorrentía promedio mensual comienza en agosto, mientras que en la actualidad el proceso de derretimiento se observa con claridad a partir de octubre, según el resultado mostrado en la Figura 2.1-10.

Un análisis de sensibilidad reveló que la variabilidad futura de la temperatura (pronosticada por PRECIS) es la responsable de una respuesta en el futuro con dos máximos de caudales medios mensuales, lo cual se debería a los menores valores promedio de temperatura en octubre con respecto a septiembre y diciembre.

El resultado indica un adelanto de, al menos, dos meses en la ocurrencia del derretimiento, reflejado a través de los caudales medios mensuales. El modelo revela una polarización de los máximos y mínimos. Por una parte, el monto de los caudales máximos será mayor en el futuro, pero por otro lado, los mínimos serán más frecuentes. De acuerdo a la curva de duración futura (Figura 4.4-3) y presente (Figura 2.1-12), los caudales menores a 20 m<sup>3</sup>/s aumentarán su presencia de un 45% del tiempo, a cerca de un 70% del tiempo en el futuro.

En general se prevé un cambio en las distribuciones mensuales de los montos de agua disponible. El cambio de la temporada de acumulación y derretimiento indica que las condiciones climáticas serán diferentes de las actuales en dimensiones que no es posible determinar a partir de los resultados.

## 5 Análisis de resultados

Con el fin de analizar los efectos que los caudales obtenidos para el escenario futuro A2 tienen sobre el uso de los recursos hídricos, se han adoptado como valores de referencia de demanda aquellos correspondientes a los valores de caudal medio mensual disponibles en el período observado para probabilidades de excedencia de 75%, 85% y 95%, valores que se obtienen en cada cuenca a base de la curva de duración. Para dichos valores se realiza el análisis del porcentaje de tiempo en que falla el suministro, es decir el caudal disponible es inferior a la demanda. Se comparan las situaciones presentes y futuras analizando la distribución mensual de las fallas y la persistencia de la falla en cada período. Esta última se analiza a través de las curvas de duración de persistencia de las fallas, midiendo dicha persistencia como el número consecutivo de meses en que la falla se mantiene.

Para los caudales máximos se analizó y comparó la frecuencia de ocurrencia de los mayores valores ocurridos anualmente en el período observado y futuro. Para estos efectos, se obtiene en cada año el mes en que dicho caudal máximo se produce y luego se calcula el porcentaje de veces en el período en que dicho máximo se produce en cada mes.

### 5.1 Río Aconcagua en Chacabuquito

#### 5.1.1 Estrés hídrico

##### 5.1.1.1 Probabilidad de excedencia del 75%

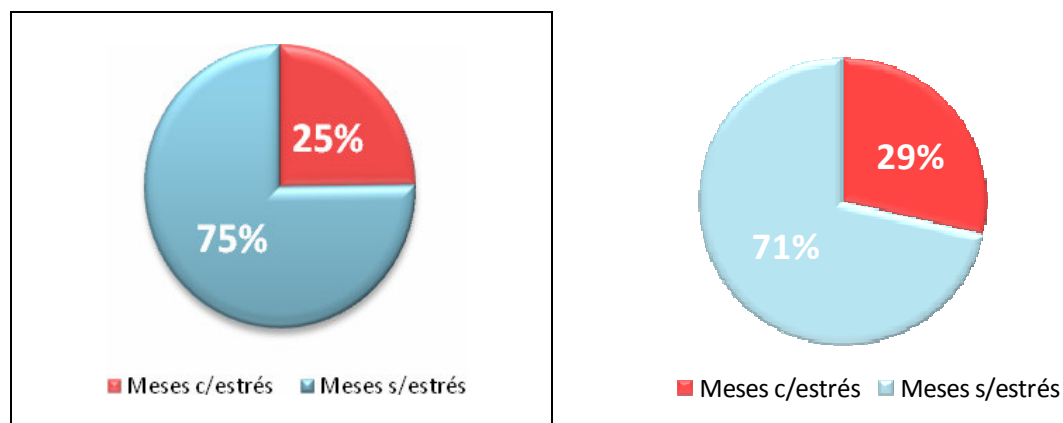


Figura 5.1-1: Estrés hídrico actual (izquierda) y futuro (derecha) para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito. Demanda 75%

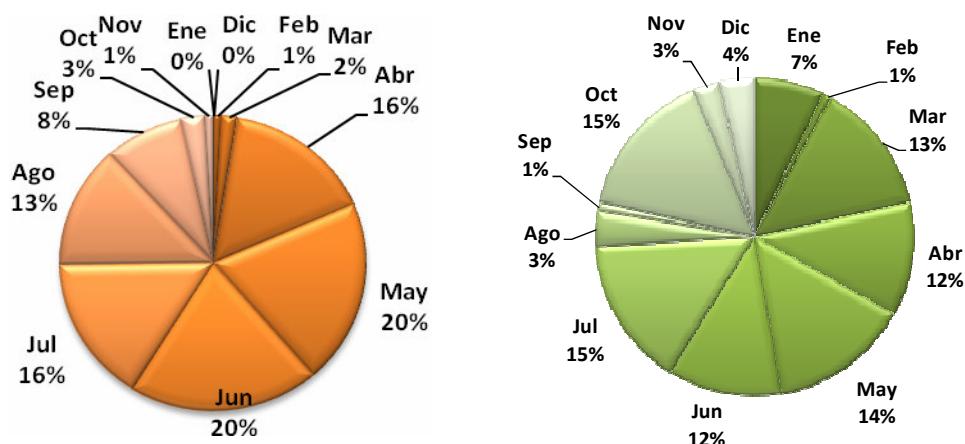


Figura 5.1-2: Probabilidad de ocurrencia del estrés hídrico actual (izquierda) y futuro (derecha) del 75% de demanda a nivel mensual para la cuenca río Aconcagua en Chacabucito

En la situación futura, para una probabilidad de excedencia del 75% se genera un leve aumento del estrés, no obstante, esta variación puede ser equivalente al error del modelo, por lo que el resultado no es concluyente y debe ser considerado únicamente como una posible tendencia.

#### 5.1.1.2 Probabilidad de excedencia del 85%

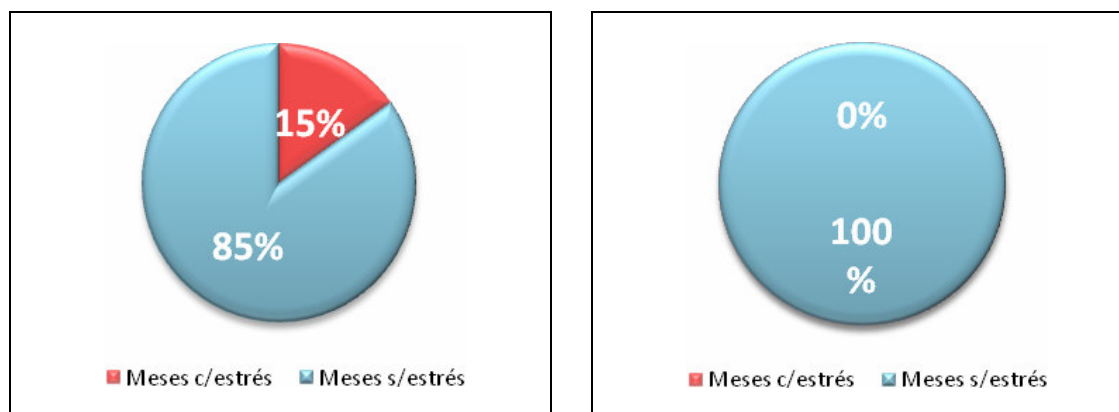


Figura 5.1-3: Estrés hídrico actual (izquierda) y futuro (derecha) para la cuenca río Aconcagua en Chacabucito. Demanda 85%

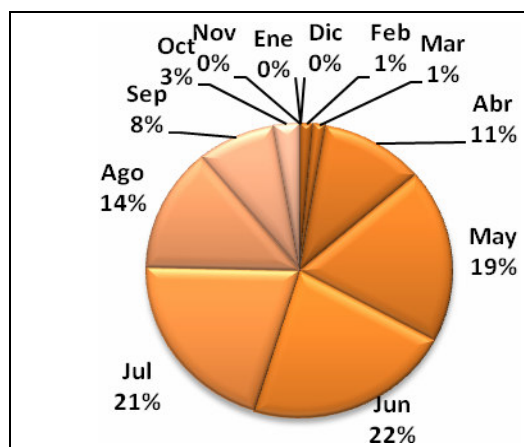


Figura 5.1-4: Probabilidad de ocurrencia del estrés hídrico actual del 85% de demanda a nivel mensual para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito.

En la situación futura, para una probabilidad de excedencia del 85%, no se genera estrés, por lo que no aplica la generación de una probabilidad de ocurrencia del estrés hídrico de demanda a nivel mensual.

### 5.1.1.3 Probabilidad de excedencia del 95%

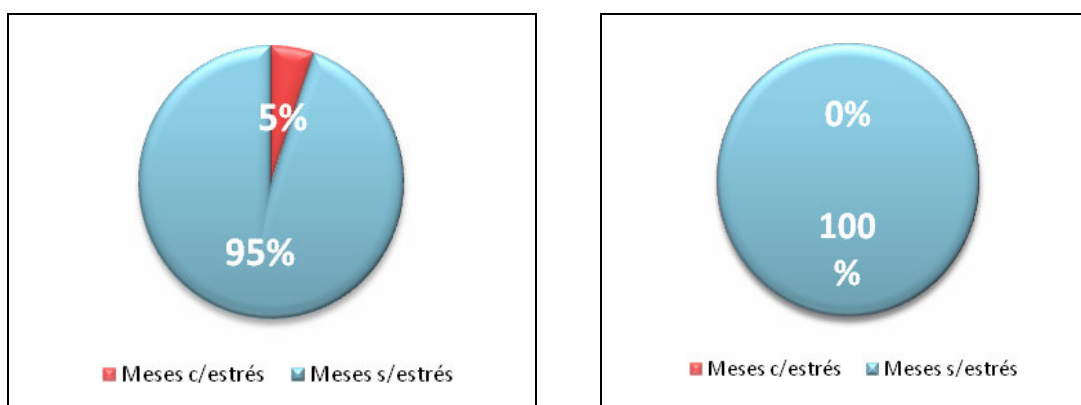


Figura 5.1-5: Estrés hídrico actual (izquierda) y futuro (derecha) para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito. Demanda 95%



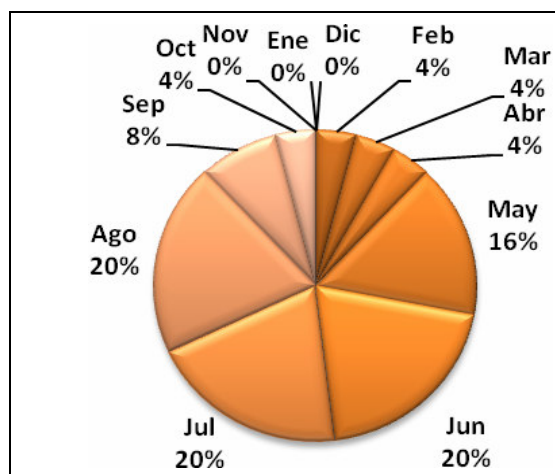


Figura 5.1-6: Probabilidad de ocurrencia del estrés hídrico actual del 95% de demanda a nivel mensual para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito

En la situación futura, para una probabilidad de excedencia del 95% no se genera estrés, por lo que no aplica la generación de una probabilidad de ocurrencia del estrés hídrico de demanda a nivel mensual.

### 5.1.2 Curva de Duración de la duración del déficit

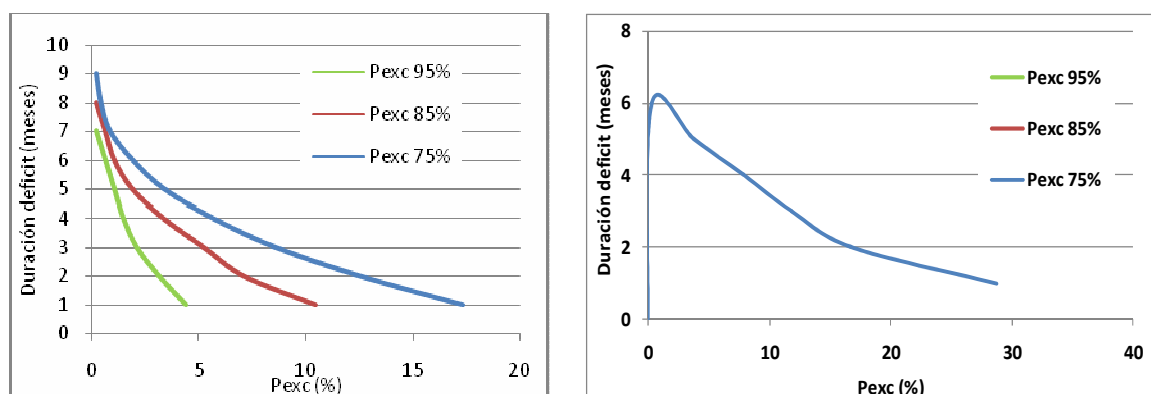


Figura 5.1-7: Curva de Duración de la duración del déficit actual (izquierda) y futuro (derecha) para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito

En la situación futura, sólo es posible construir curvas de duración con respecto a duraciones del déficit para la probabilidad de excedencia de 75%, pues para caudales menores no hay déficit simulado.

El resultado obtenido tiene dos perspectivas. Por una parte, aunque los meses consecutivos con estrés disminuyen de siete a seis, la probabilidad de enfrentar un período de escasez aumenta considerablemente para caudales menores a 14 m<sup>3</sup>/s (75% de probabilidad de excedencia). No obstante, en el otro extremo se observa que el estrés tiene como cota inferior a caudales del orden de los 11 m<sup>3</sup>/s (85% de probabilidad de excedencia). Es decir, aunque aumentarán los períodos con caudales bajo los 14 m<sup>3</sup>/s, estos no serán menores a 11 m<sup>3</sup>/s en ningún instante.

De esta forma, el resultado indica que existirán caudales bajos durante períodos más extensos, tal como se señaló respecto a la Figura 4.4-3. Sin embargo, el resultado no es

concluyente, pues el modelo tiene problemas para modelar correctamente lo que sucede en cuencas de régimen nival, lo que impide incorporar correctamente la variabilidad observada en temporadas de deshielo.

Es posible concluir, por lo tanto, que existirán más períodos con bajo caudal de lo que existe actualmente, pero respecto al mínimo caudal, es posible que el modelo no sea capaz de simularlo.

### 5.1.3 Análisis de los caudales máximos

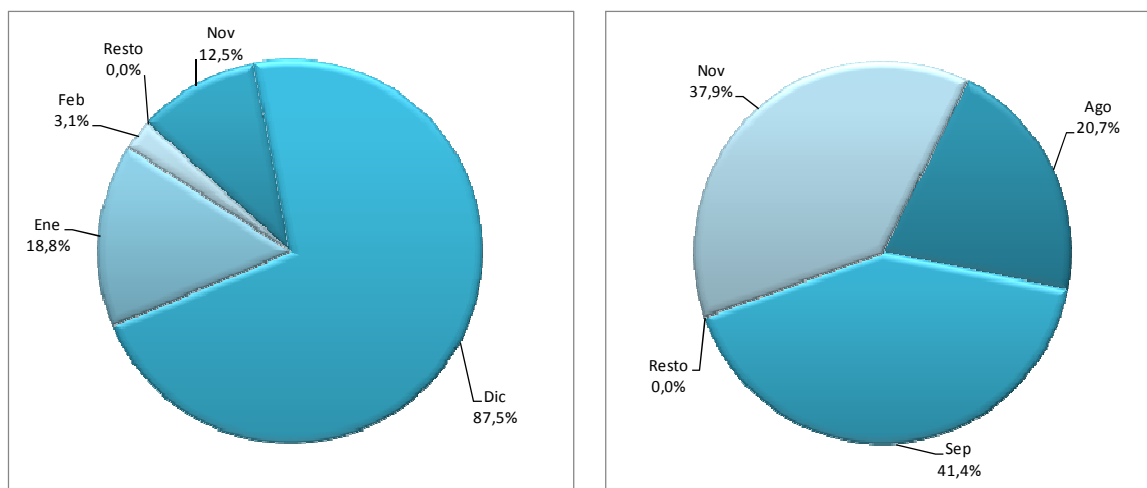


Figura 5.1-8: Caudales máximos actuales (izquierda) y futuros (derecha) para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito

### 5.1.4 Curva de variación estacional

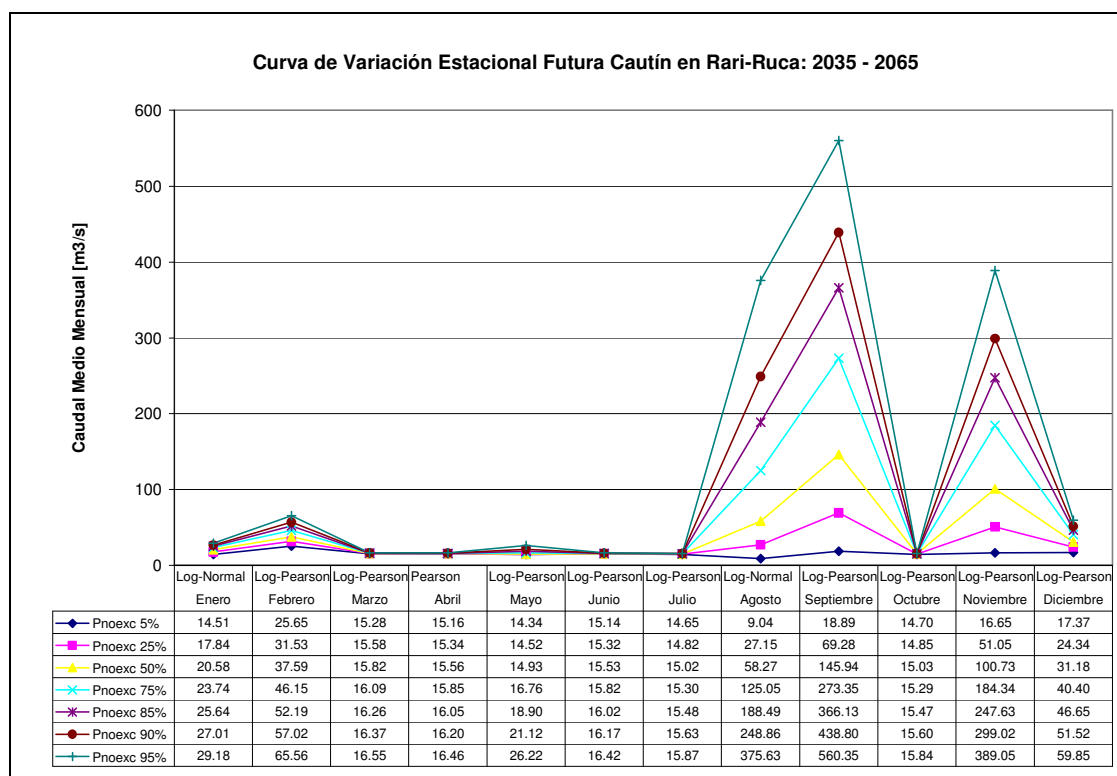


Figura 5.1-9: Curva de variación estacional (futuro) para la cuenca Aconcagua en Chacabuquito

### 5.1.5 Comentarios de los resultados obtenidos

El resultado obtenido para la cuenca Aconcagua en Chacabuquito es menos intuitivo de lo que parece, pues desde una perspectiva global, se espera que los efectos del calentamiento afecten las reservas de agua dulce, especialmente aquellas almacenadas en forma de nieves y glaciares. De todas formas, los resultados no son considerados concluyentes, pues se reconoce la dificultad de WEAP para modelar cuencas nivales.

Por una parte, PRECIS estima que, en forma global, el agua caída sobre la cuenca Aconcagua en Chacabuquito disminuirá aproximadamente un 15% al comparar las medias de línea base y datos interpolados para el período 2035-2065, sin embargo, también predice un aumento considerable de la magnitud los eventos extremos.

Por otra parte, la relación de transformación entre los datos observados y PRECIS demuestra que el modelo meteorológico sobrestima considerablemente el monto total de precipitación sobre la cuenca. Sin embargo, al utilizar dicha relación para obtener una serie “observada” futura (años 2035 a 2065), se suavizan los máximos y los mínimos, produciendo una homogeneización de la serie de precipitación. Lo anterior queda patente en el casi nulo aumento del estrés hídrico en el futuro y el aumento de los caudales mínimos disponibles.

No se puede concluir si existirá estrés o no en el futuro, pero el cambio de las temporadas de caudales mínimos y las mayores crecidas implican que la estacionalidad de los cultivos podría verse seriamente afectada. También existirá un cambio en el patrón de inundaciones, por lo que es importante revisar las zonas pobladas que

corresponden a la posible planicie de inundación futura del río, en caso de que se produzca el aumento de los caudales máximos.

## **6 Conclusiones**

### **6.1 Aspectos generales**

Los modelos WEAP y GR4J usados para modelar desde el punto de vista hidrológico las cuencas en estudio pudieron ser calibrados de manera satisfactoria en todos los casos. Sin embargo, es necesario destacar que la función objetivo utilizada permite representar de mejor manera las condiciones promedio de las cuencas, lo que muchas veces va en detrimento de la representatividad de los valores extremos.

El modelo PRECIS que se utiliza para la obtención de las variables atmosféricas no representa exactamente los valores observados en la estación meteorológica aunque probabilísticamente se logra establecer una relación con un alto grado de correlación. Es conveniente hacer notar que, en general, PRECIS sobreestima las precipitaciones y subestima las temperaturas.

### **6.2 Situación futura. Período 2035 a 2065. Escenario A2**

Los resultados obtenidos para los caudales medios anuales en el período 2035 a 2065, señalan una tendencia a la disminución de éstos. También se aprecia que en la cuenca del río Hurtado en San Agustín, los caudales medios mensuales mayores resultan más extremos que los actuales y produce una mayor variabilidad a lo largo del año. En la cuenca de Aconcagua en Chacabucuito se produce un reordenamiento de los caudales, por cuanto los valores extremos son más altos y el intervalo de probabilidad de encontrar caudales menores a 20 m<sup>3</sup>/s aumenta de 60% a 70%, tal como lo indica la curva de duración asociada. Sin embargo, se debe hacer notar que en la calibración los caudales simulados menores a 20 m<sup>3</sup>/s son ligeramente superiores a los observados, lo que origina que los períodos de estrés no se presenten para las probabilidades de excedencia más altas (85% y 95%). Esto indica que no se puede asegurar o concluir acerca de la existencia, o no, de estos períodos por la incertidumbre asociado al modelo hidrológico.

También se aprecia en la mayoría de las cuencas un desplazamiento del centro de gravedad de la distribución mensual, el que generalmente se adelanta. La cuenca del río Perquilauquén en San Manuel tiene un comportamiento distinto ya que en este caso el centro de gravedad se desplaza hacia fines del año.

En relación con los períodos de déficit, en general aumentan para las distintas probabilidades, excepto en Aconcagua en Chacabucuito y en Purapel en Nirivilo. Las duraciones de éstos, en general, aumentan y ocurren con mayor frecuencia. En Hurtado en San Agustín y Teno en Junta con Claro, si bien ocurren más frecuentemente, son de menor duración. Existe variabilidad en cuanto a los cambios que se observan en el futuro en los meses en que ocurren estos déficits, así, en algunos casos no existen modificaciones mientras en otros cambia significativamente.

Finalmente, el porcentaje de veces en que el máximo caudal medio mensual del año ocurre en un cierto mes, en general se modifica pero no de una forma única. En algunos

casos se distribuye en forma más uniforme mientras en otras se intensifica el período temporal en que éste ocurre, lo que se relaciona con el adelanto o atraso del centro de gravedad de la curva de variación estacional.

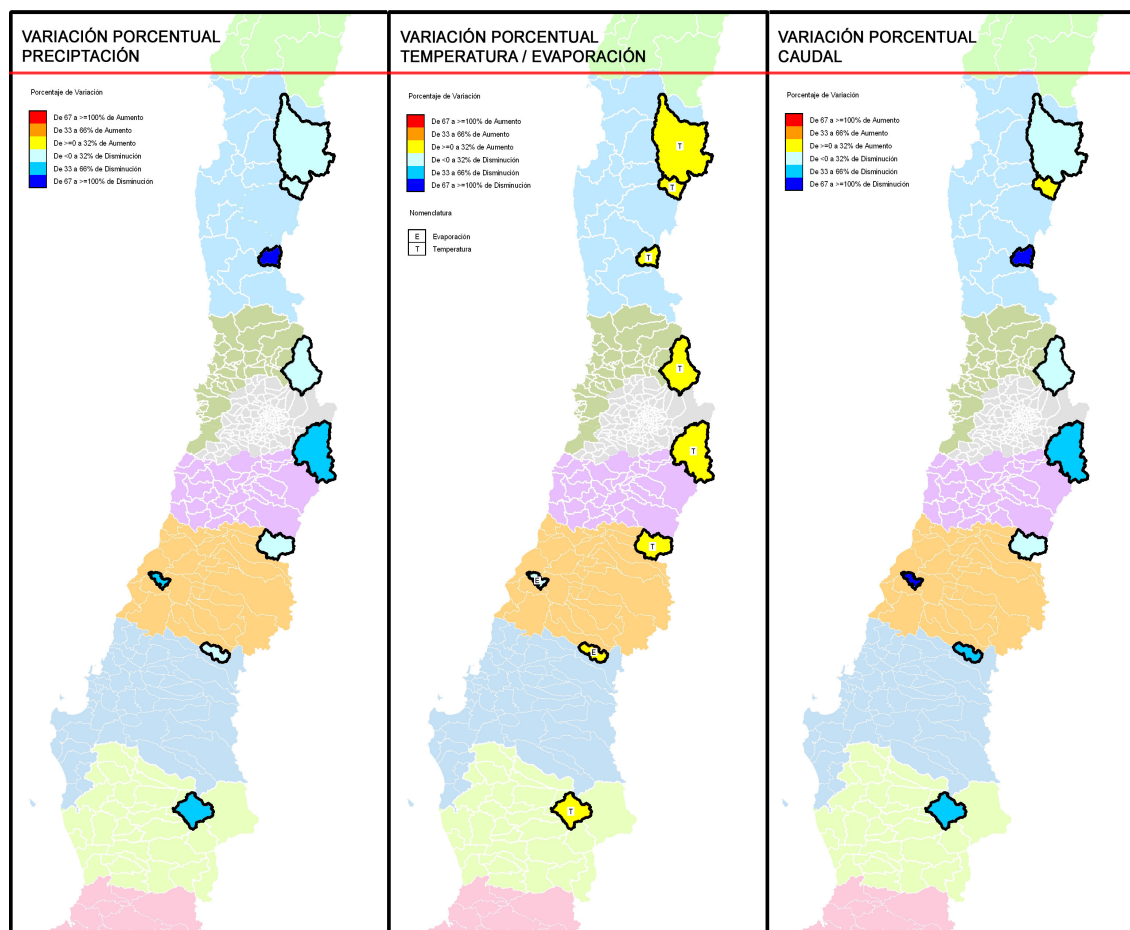


Figura 6.2-1: Resumen de resultados para las tendencias de precipitación, temperatura, evaporación y caudal a nivel anual para cada cuenca

Tabla 6.2-1: Resumen de resultados a nivel anual para las variables de precipitación, temperatura, evaporación y caudal para cada cuenca

Cuenca	P %	T %	E %	Q %
Elqui	-8,6	1,4		-17,1
Hurtado	-0,4	1,4		1,8
Illapel	-75,4	0,1		-77,3
Aconcagua	-16,8	0,4		-17,3
Maipo	-62,4	0		-62
Teno	-26,1	0,2		-29,1
Purapel	-43,7		-0,5	-71,9
Perquillauquén	-14,8		13,2	-39,2
Cautín	-50,7	0,2		-48,3

### 6.3 Recomendaciones de estudios futuros

- En cada una de las cuencas consideradas, resulta necesario validar los antecedentes de entrada a los modelos de simulación hidrológica, por ello se recomienda:
  - Generar un conjunto de series alternativas susceptibles de ocurrir que mantengan las características del clima futuro promedio para cada escenario SRES.
  - Generar el clima futuro promedio para cada escenario SRES de interés utilizando otros modelos de circulación global.
  - Generar a escala local las series de tiempo de las variables de interés, usando otros modelos atmosféricos regionales (distintos de PRECIS) incluyendo también el *downscaling* estadístico
- Utilizar otros modelos de simulación hidrológica, distintos a los aquí usados (WEAP y GR4J), que permitan validar el comportamiento futuro de las series de recursos hídricos en cada una de las cuencas de cabecera aquí estudiadas y extender el análisis a otras que se consideren representativas para definir el impacto en los usos del recurso hídrico.
- Utilizar otros modelos de simulación hidrológica, distintos a los aquí usados (WEAP y GR4J), que permitan validar el comportamiento futuro de las series de recursos hídricos en cada una de las cuencas de cabecera aquí estudiadas y extender el análisis a otras que se consideren representativas para definir el impacto en los usos del recurso hídrico.
- Seleccionar aquellas cuencas que posean glaciares e incorporar la modelación de estos para el análisis futuro de la disponibilidad de recursos hídricos.
- Estudiar el impacto de la disponibilidad futura del recurso hídrico en los distintos usos. Para ello se propone seleccionar hoyas hidrográficas representativas de ciertos usos y realizar en éstas un modelo de simulación hidrológica operacional que permita el análisis de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas.
- Estudiar el impacto de la disponibilidad futura del recurso hídrico en hoyas hidrográficas de la zona norte, centro y sur del país, a través de modelos de simulación hidrológica operacional que permitan optimizar la gestión del recurso hídrico disponible para los distintos usos.