



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

Río Purapel en Nirivilo

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	Modelo GR4J	12
2.1.1	Río Purapel en Nirivilo	12
2.1.2	Río Perquilauquén en San Manuel	14
3	Análisis de la información del modelo meteorológico PRECIS	15
3.1	Río Purapel en Nirivilo	16
4	Resultados futuros	18
4.1	Río Purapel en Nirivilo	19
4.1.1	Comentarios	19
5	Análisis de resultados	20
5.1	Río Purapel en Nirivilo	20
5.1.1	Estrés hídrico	20
5.1.2	Curva de Duración de la duración del déficit	22
5.1.3	Análisis de los caudales máximos	23
5.1.4	Curva de variación estacional	23
5.1.5	Comentarios de los resultados obtenidos	23
6	Conclusiones	24
6.1	Aspectos generales	24
6.2	Situación futura. Período 2035 a 2065. Escenario A2	24
6.3	Recomendaciones de estudios futuros	27

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 (μ , σ) 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 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 γ , 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, ρ , 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 δ 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

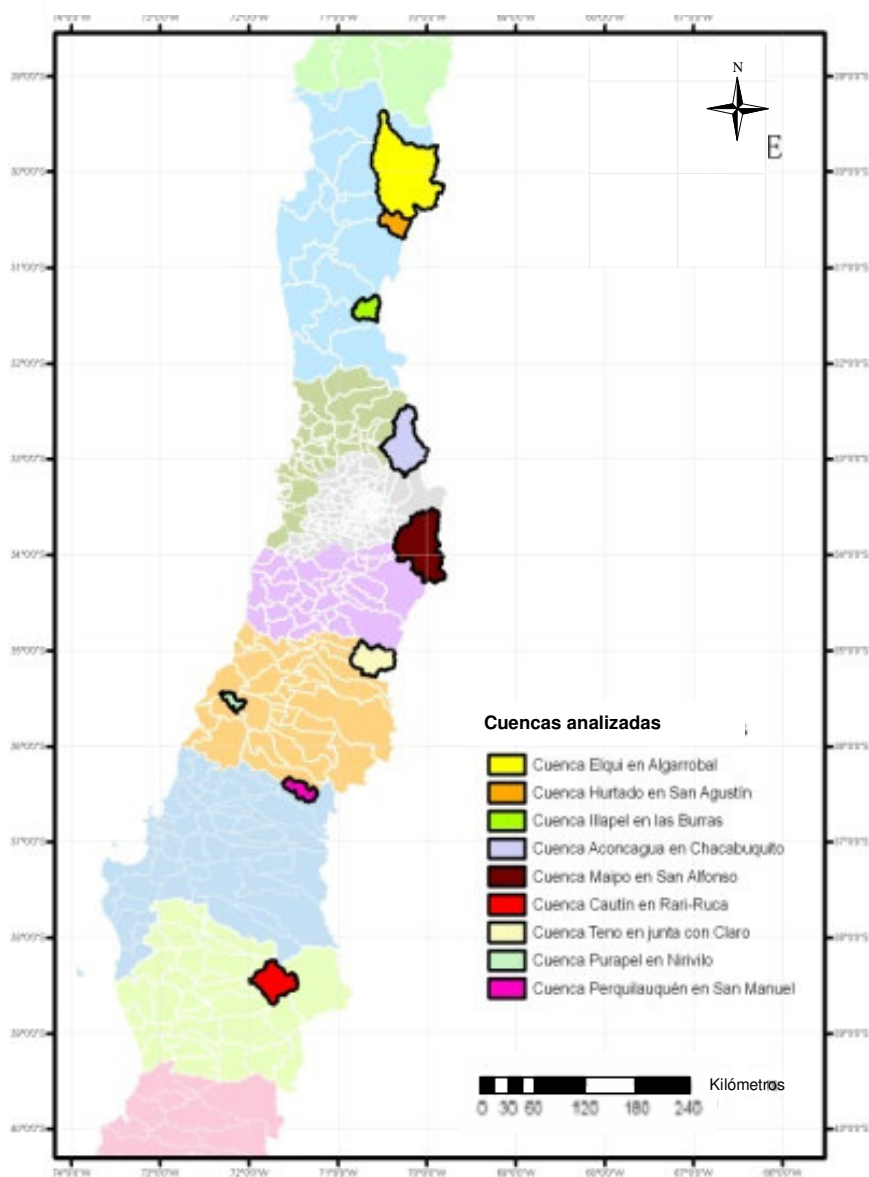


Figura 1.3-1: Ubicación de las cuencas seleccionadas

2 Calibración de modelos

2.1 Modelo GR4J

La metodología de calibración utilizada usando el modelo GR4J, comprende la utilización de Algoritmos Genéticos (AG's), los que a partir de condiciones estándar de operación, en conjunto con la utilización de la Función Objetivo de Nash-Sutcliffe, proceden a representar las simulaciones respectivas, fijando de esta manera los parámetros operacionales del modelo en las cuencas calibradas.

A continuación se presentan los resultados de la calibración del modelo en cada cuenca en que éste se aplicó, incluyéndose la comparación de la curva de duración de los caudales medios diarios y el análisis del proceso de calibración.

2.1.1 Río Purapel en Nirivilo

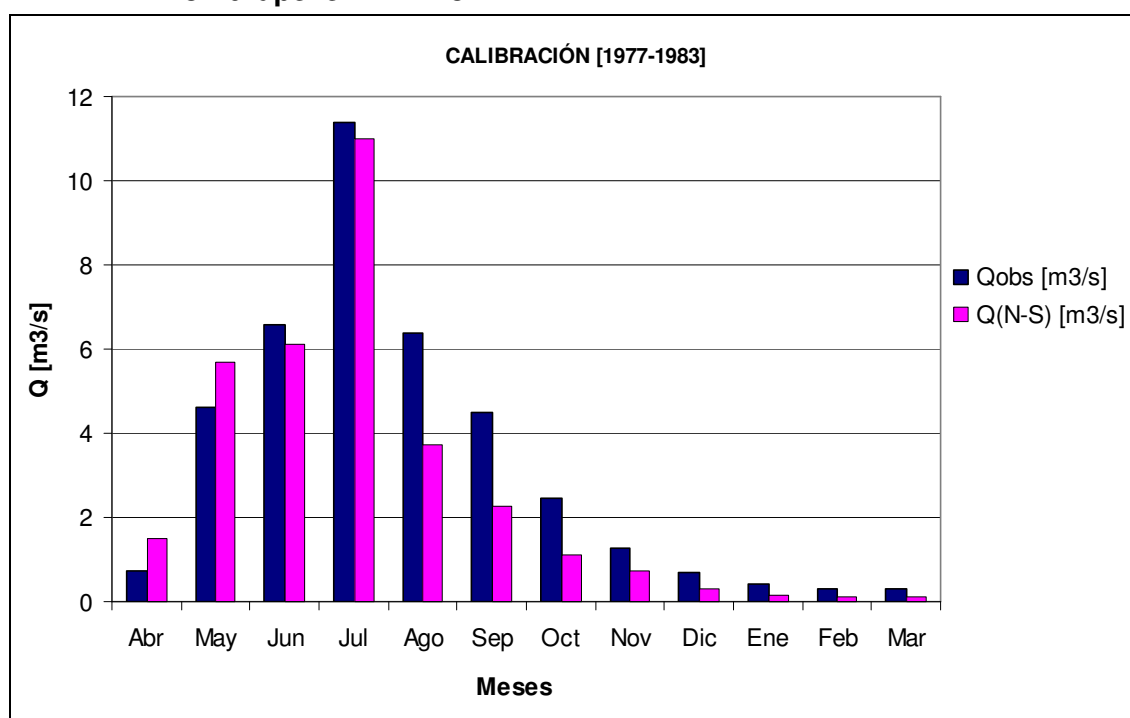


Figura 2.1-1: Calibración cuenca Purapel en Nirivilo

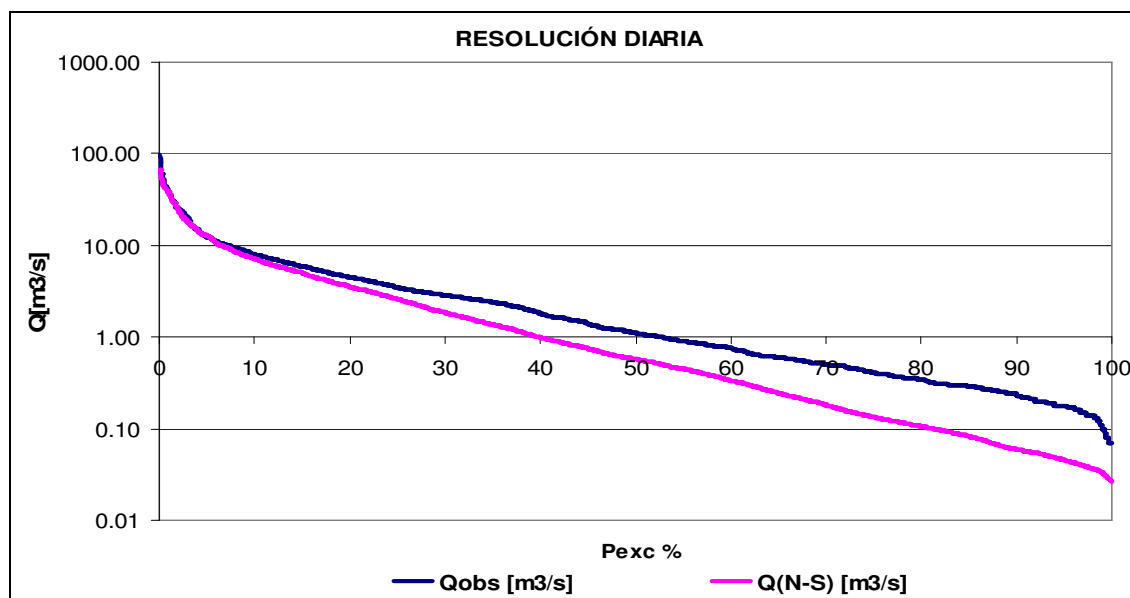


Figura 2.1-2: Curva de duración cuenca Purapel en Nirivilo

2.1.1.1 Comentarios calibración

De la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se destaca la gran representatividad que alcanza la Función Nash-Sutcliffe en sus generaciones, con respecto a los caudales observados en la cuenca para el período comprendido entre 1977 y 1983, logrando alcanzar un óptimo de 0,7 para el período anteriormente mencionado.

En general, la representatividad alcanzada por la Función Nash-Sutcliffe logra esquematizar asertivamente tanto los caudales mayores como menores del período calibrado, perdiendo exactitud para las magnitudes inferiores a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que es factible de distinguir en la curva de duración asociada a los caudales observados durante el período de calibración (ver Figura 2.1-2).

2.1.2 Río Perquillauquén en San Manuel

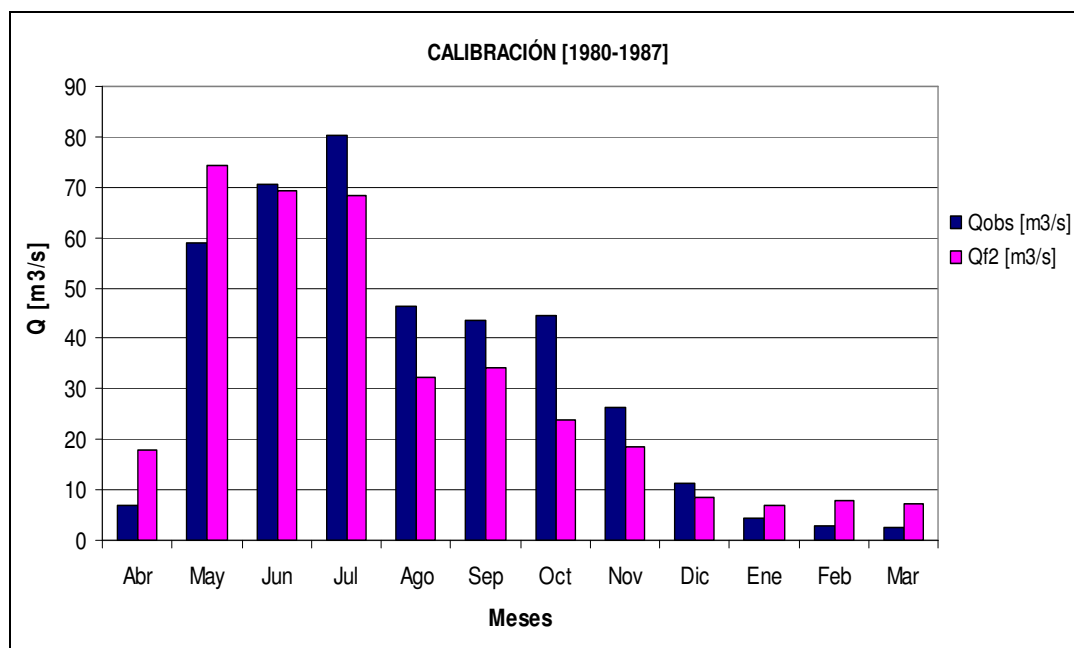


Figura 2.1-3: Calibración cuenca Perquillauquén en San Manuel

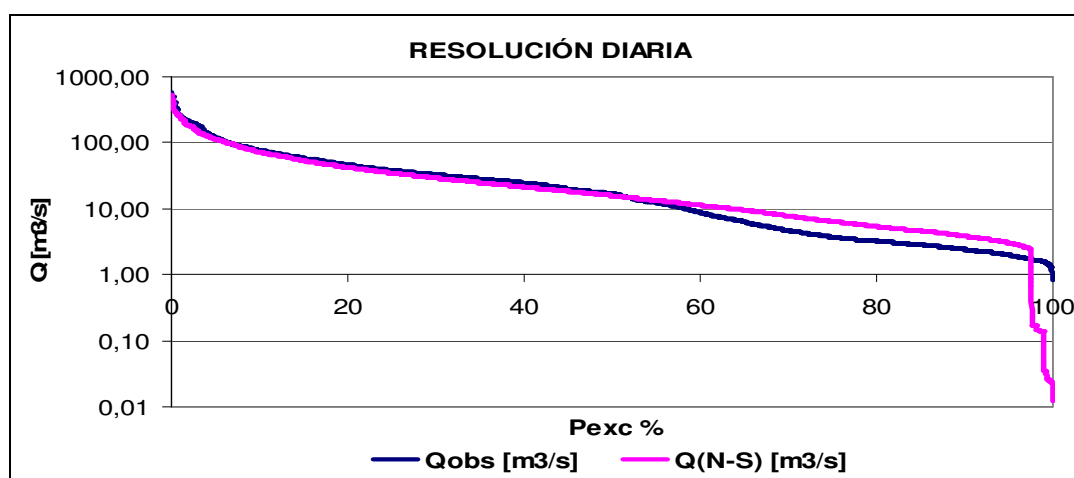


Figura 2.1-4: Curva de duración cuenca Perquillauquén en San Manuel

2.1.2.1 Comentarios calibración

De la Figura 2.1-3 y la Figura 2.1-4 se logra observar un buen ajuste de la Función Nash-Sutcliffe para los caudales medios mensuales mayores e inferiores observados en el período de calibración (años 1980 a 1987), alcanzando un óptimo de 0,66.

Al existir un pequeño aporte nival en la cuenca, entre los meses de septiembre a noviembre, se produce un desfase en la curva de duración entre los caudales simulados y observados, para magnitudes inferiores a los 10 m³/s, lo que es factible de distinguir en la curva de duración asociada a los caudales observados durante el período de calibración (ver Figura 2.1-4).

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 (μ_i) de cada variable y sus desviaciones (σ_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 (μ_i, σ_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 (μ_i, σ_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 Purapel en Nirivilo

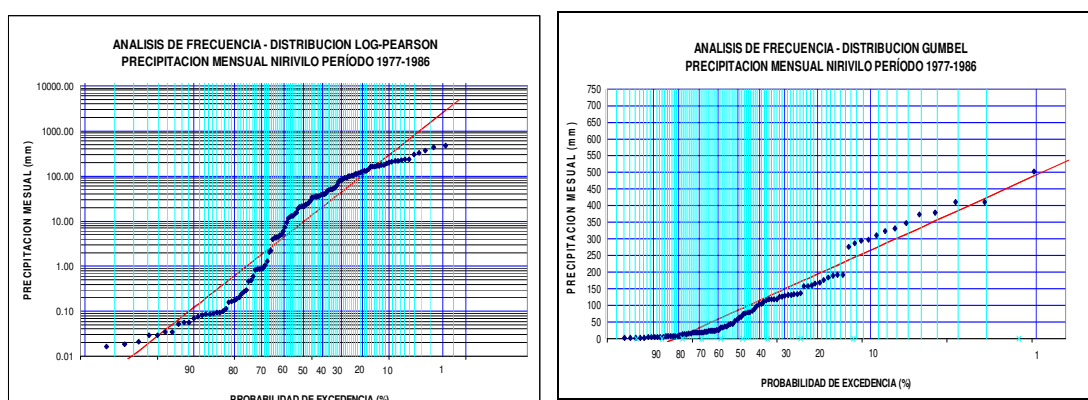


Figura 3.1-1: Análisis de frecuencia de precipitación línea base, modelo PRECIS (izquierda) y precipitación observada (derecha) en período concurrente [años 1977 a 1986]. Cuenca Purapel en Nirivilo

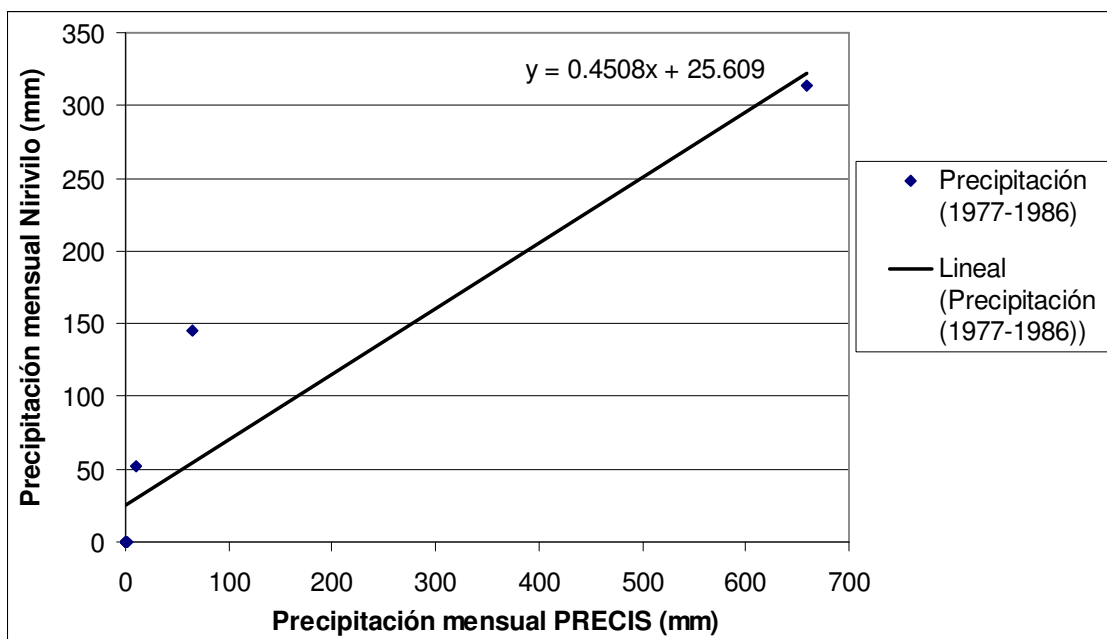


Figura 3.1-2: Corrección de precipitación simulada PRECIS. Cuenca Purapel en Nirivilo

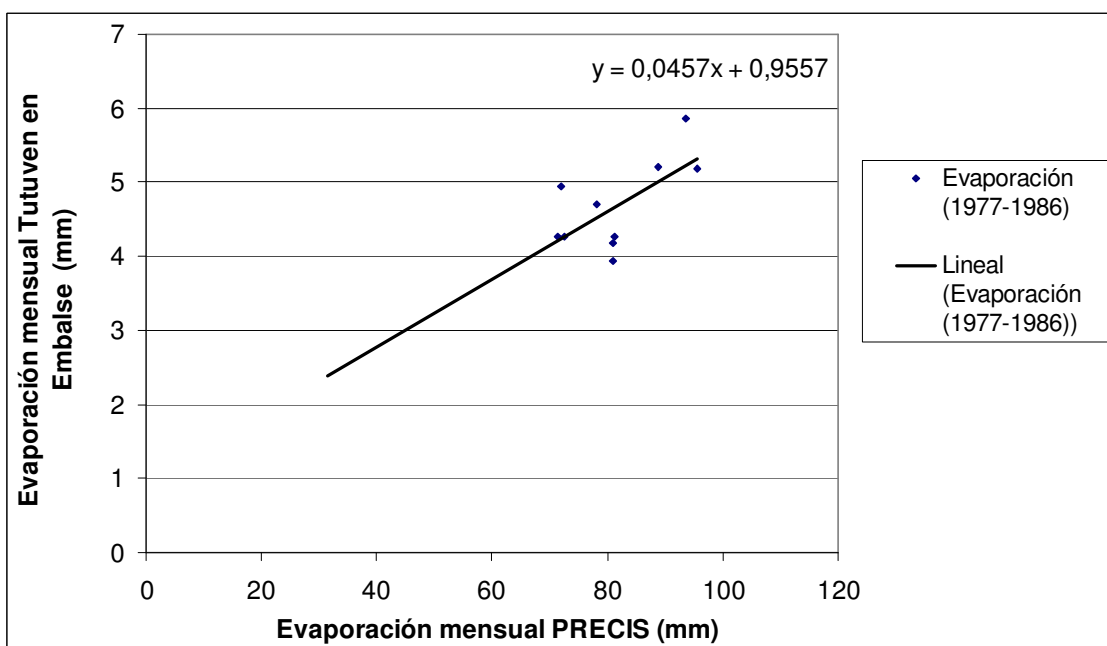


Figura 3.1-3: Corrección de evaporación simulada PRECIS en mes noviembre. Cuenca Purapel en Nirivilo

AÑO/MES	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2035												25.7
2036	25.6	26.3	26.4	34.7	103.9	88.1	72.2	31.2	31.7	26.2	25.7	25.7
2037	25.6	25.6	33.5	39.8	58.3	90.8	178.5	68.2	30.1	25.9	25.7	25.7
2038	25.6	25.6	26.2	65.7	83.3	115.1	136.0	103.3	73.3	33.3	25.7	25.7
2039	25.6	25.8	26.9	26.8	33.6	122.3	49.7	32.6	65.5	26.0	26.2	25.7
2040	25.6	25.6	28.4	56.3	47.0	73.6	67.2	58.8	39.3	25.9	25.8	26.1
2041	26.2	25.7	33.8	43.6	35.9	210.7	76.6	41.1	73.3	37.2	32.1	29.5
2042	25.7	25.6	58.9	30.3	86.9	94.8	101.3	35.3	29.9	27.2	25.7	25.7
2043	25.6	26.9	28.2	30.6	32.6	148.4	42.5	77.0	28.8	29.8	25.7	25.7
2044	25.6	25.6	30.7	70.1	69.0	116.2	71.6	141.8	36.0	28.8	25.7	25.7
2045	25.6	25.6	35.2	35.7	87.2	55.6	50.1	61.0	28.0	26.0	25.7	26.0
2046	25.6	25.9	27.0	32.1	25.8	89.5	35.5	41.8	38.3	26.1	34.1	25.7
2047	25.6	25.6	32.2	43.6	53.4	144.5	138.7	55.6	33.8	30.8	25.7	25.7
2048	26.1	26.4	26.1	27.0	60.1	139.1	60.1	72.5	40.8	26.1	25.7	25.7
2049	25.7	25.6	26.2	35.3	28.6	96.9	49.5	43.0	31.2	27.4	25.8	25.7
2050	25.6	25.7	28.7	35.6	62.2	98.4	35.2	43.2	30.1	26.7	25.7	25.7
2051	25.6	25.7	26.1	75.9	42.5	104.7	106.1	58.6	64.5	27.1	25.7	25.7
2052	26.4	25.6	26.4	138.5	61.1	222.7	89.8	50.1	33.9	27.3	30.4	25.7
2053	25.7	25.6	26.2	32.2	78.1	54.9	62.9	33.9	28.8	26.0	25.7	25.7
2054	25.6	25.6	26.3	56.6	50.5	80.1	66.7	88.7	36.3	31.5	26.6	25.7
2055	25.6	28.5	26.1	37.5	137.6	50.6	114.5	62.7	28.1	26.5	25.7	25.7
2056	25.6	27.6	26.1	37.8	161.7	192.1	64.7	70.0	27.9	26.0	25.7	25.7
2057	25.7	25.6	28.2	77.9	117.0	47.3	160.9	96.3	35.6	26.5	27.5	26.9
2058	26.7	28.0	26.5	42.6	96.4	71.2	44.5	81.8	28.5	31.8	25.8	26.1
2059	25.6	25.7	28.7	31.3	115.7	42.5	56.3	44.0	28.0	29.4	25.8	25.7
2060	25.6	25.6	30.4	35.9	73.1	55.5	57.1	47.3	30.0	26.0	26.0	25.7
2061	25.6	25.6	28.5	48.8	132.5	141.6	47.5	40.9	112.2	26.0	25.7	25.7
2062	25.6	28.1	38.0	33.7	77.5	37.4	147.0	47.9	34.5	27.7	27.6	25.7
2063	26.9	25.6	26.2	26.8	28.9	51.4	43.8	42.0	27.8	45.0	25.8	25.7
2064	25.7	25.6	26.2	34.7	43.0	50.6	38.4	34.9	28.1	26.3	27.2	25.7
2065	25.6	25.6	27.2	48.8	42.8	63.4	42.1	50.5	33.9	32.9	26.9	25.6

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

AÑO	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2035												5.1
2036	6.0	5.4	3.8	2.1	1.3	0.9	1.2	1.5	2.2	3.6	4.9	6.3
2037	6.6	6.0	3.8	2.0	1.4	0.9	1.2	1.6	2.2	3.4	4.9	5.1
2038	6.2	5.6	4.1	2.1	1.3	1.0	1.2	1.4	2.3	3.3	4.6	6.3
2039	6.6	5.9	3.9	2.1	1.3	1.0	1.2	1.5	2.1	3.4	4.8	6.2
2040	5.8	6.0	3.8	2.0	1.4	1.0	1.2	1.6	2.0	3.6	4.6	6.7
2041	5.7	6.3	3.8	2.0	1.3	1.1	1.2	1.5	2.2	3.3	4.6	6.6
2042	6.5	5.5	3.9	2.1	1.3	0.9	1.2	1.4	2.3	3.5	4.5	6.5
2043	5.1	5.8	3.9	2.0	1.4	1.0	1.2	1.6	2.3	3.4	4.8	5.5
2044	6.3	6.7	3.8	2.1	1.4	1.0	1.2	1.4	2.4	3.5	4.8	5.4
2045	5.4	5.7	3.8	2.1	1.5	0.9	1.2	1.6	2.2	3.6	5.6	6.3
2046	5.7	6.1	4.0	2.1	1.2	1.0	1.2	1.6	2.3	3.4	5.5	5.5
2047	5.2	6.5	3.8	2.2	1.3	1.0	1.2	1.5	2.1	3.4	4.9	5.4
2048	5.4	5.6	4.0	2.2	1.4	0.9	1.2	1.6	2.4	3.4	5.5	6.0
2049	6.5	6.0	4.0	2.1	1.3	1.0	1.2	1.5	2.1	3.5	5.1	5.2
2050	5.7	6.0	3.9	2.1	1.3	1.0	1.2	1.5	2.3	3.5	5.5	5.9
2051	6.0	6.2	3.9	2.0	1.5	1.0	1.2	1.5	2.4	3.3	4.7	5.6
2052	5.5	5.9	3.9	2.2	1.4	1.1	1.2	1.6	2.3	3.5	4.9	5.6
2053	5.1	6.2	4.0	2.1	1.4	1.0	1.2	1.6	2.0	3.5	5.0	6.2
2054	6.0	6.6	4.0	2.0	1.4	1.0	1.2	1.5	2.3	3.4	4.8	5.5
2055	4.8	6.2	4.1	2.1	1.4	1.0	1.2	1.5	2.3	3.5	5.3	6.0
2056	4.9	6.1	3.9	2.0	1.3	1.1	1.2	1.5	2.2	3.4	5.0	4.9
2057	5.4	6.4	4.1	2.1	1.5	1.0	1.2	1.6	2.1	3.5	4.7	5.6
2058	6.4	6.2	4.0	2.1	1.3	0.9	1.2	1.5	2.1	3.4	5.4	6.3
2059	5.8	6.4	4.0	2.1	1.4	0.9	1.2	1.4	1.8	3.5	5.2	5.9
2060	5.6	6.2	3.9	2.0	1.4	1.0	1.2	1.6	2.0	3.7	5.2	5.7
2061	6.2	6.0	3.8	2.3	1.4	1.0	1.2	1.5	2.3	3.5	5.3	5.7
2062	5.6	5.8	4.0	2.1	1.4	0.9	1.2	1.5	2.0	3.3	5.1	5.5
2063	6.3	5.8	4.0	2.2	1.2	1.0	1.2	1.5	1.6	3.4	4.5	5.1
2064	5.7	6.3	4.0	2.0	1.3	1.1	1.2	1.4	1.9	3.6	5.0	5.7
2065	4.7	6.5	3.9	2.1	1.3	1.0	1.2	1.4	1.5	3.5	5.0	

Tabla 3.1-2: Serie mensual de evaporación simulada para el período 2035 a 2065, en mm

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 Purapel en Nirivilo

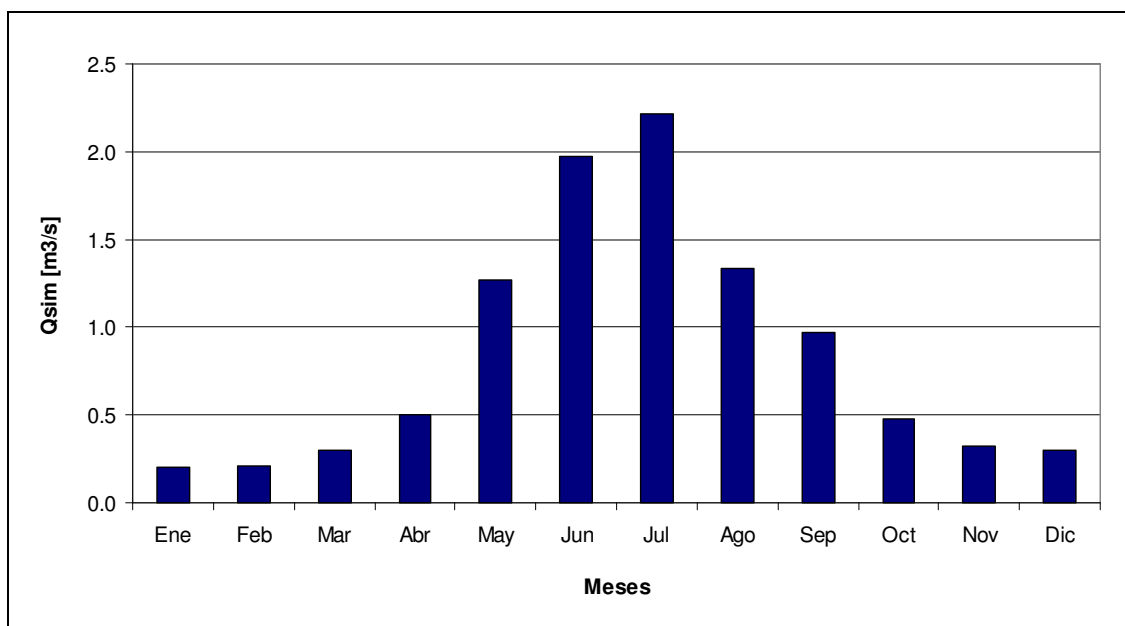


Figura 4.1-1: Promedio mensual para la cuenca Purapel en Nirivilo

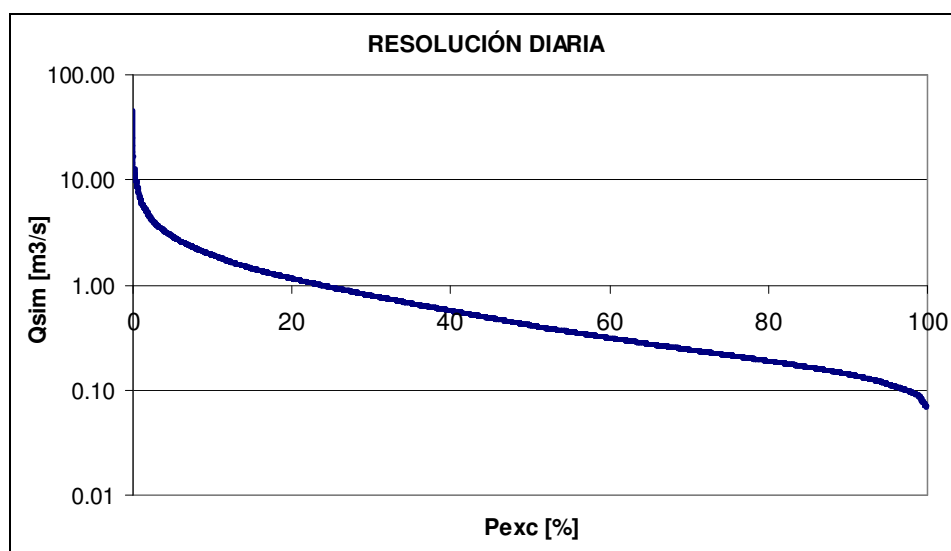


Figura 4.1-2: Curva de duración para la cuenca Purapel en Nirivilo

4.1.1 Comentarios

De las Figuras 3.6-1 y 3.6-2, con respecto a las magnitudes observadas en el período de calibración (ver Figuras 1.2-1 y 1.2-2), se destaca una disminución de importancia en las magnitudes de los caudales medios mensuales a partir de las series futuras de evaporación y precipitación generadas utilizando el ajuste realizado a la información proveniente de PRECIS, manteniendo en el mismo intervalo de meses el período en donde se observan los mayores caudales medios mensuales, estando el intervalo de mayor escorrentía superficial observado en el período que va desde el año 1977 hasta

1983, comprendido por los meses de mayo a agosto, con julio como el mes de mayor caudal medio mensual observado, al igual que para el caso de caudales medios mensuales generados para el período que va del año 2035 al 2065.

Con respecto a los menores caudales del sistema, se destaca la disminución de los caudales medios mensuales que se encuentran por sobre $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver Figuras 1.2-2 y 3.6-2), de un 50% en el período comprendido entre 1977 y 1983 a un 24,9% en el período que va desde 2035 hasta 2065.

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 Purapel en Nirivilo

5.1.1 Estrés hídrico

5.1.1.1 Probabilidad de excedencia del 75%

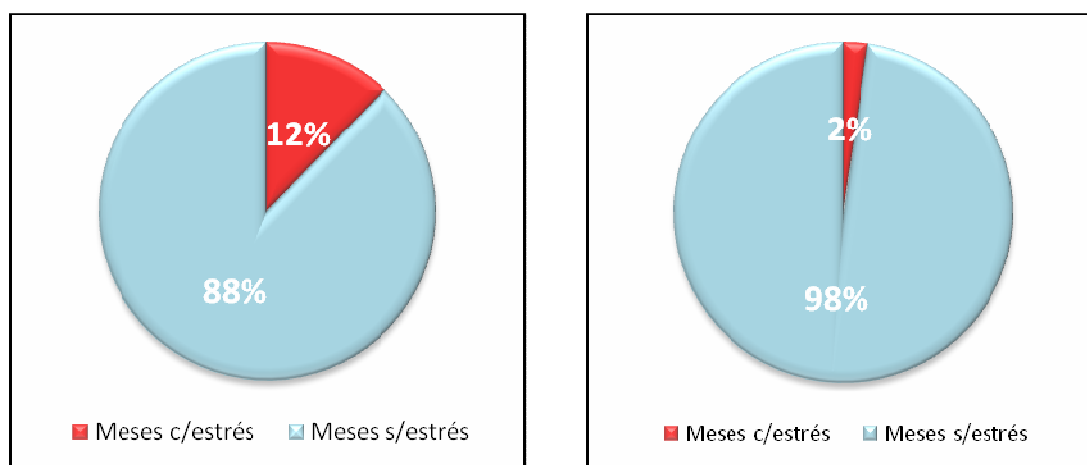


Figura 5.1-1: Estrés hídrico actual (izquierda) y futuro (derecha) para la cuenca Purapel en Nirivilo. Demanda 75%

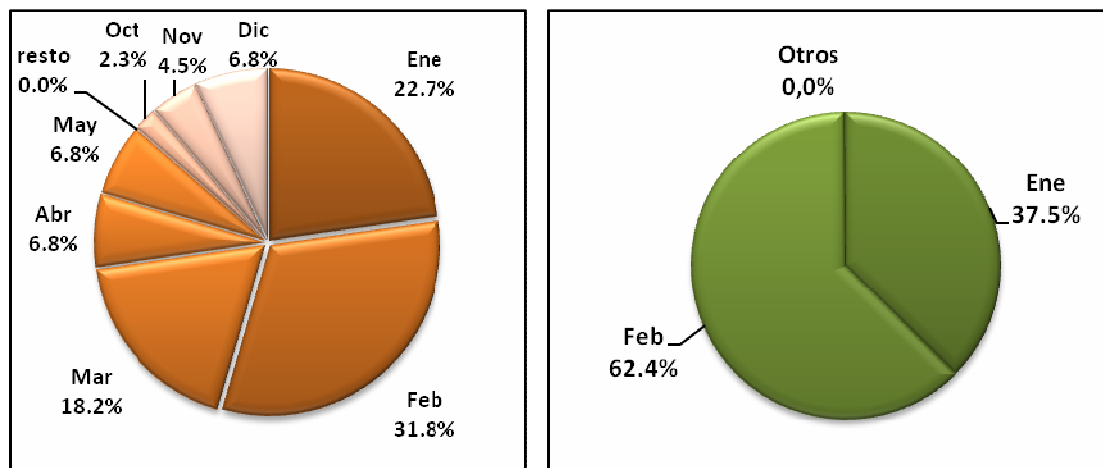


Figura 5.1-2: Probabilidad de ocurrencia del estrés hídrico actual (izquierda) y futuro (derecha) del 75% de demanda a nivel mensual para la cuenca Purapel en Nirivilo

5.1.1.2 Probabilidad de excedencia del 85%

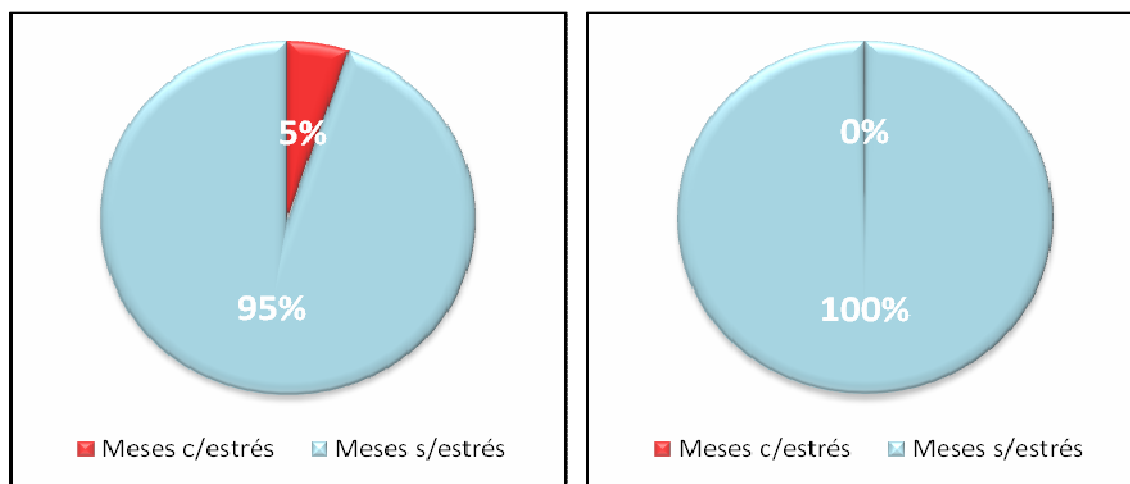


Figura 5.1-3: Estrés hídrico actual (izquierda) y futuro (derecha) para la cuenca Purapel en Nirivilo. Demanda 85%

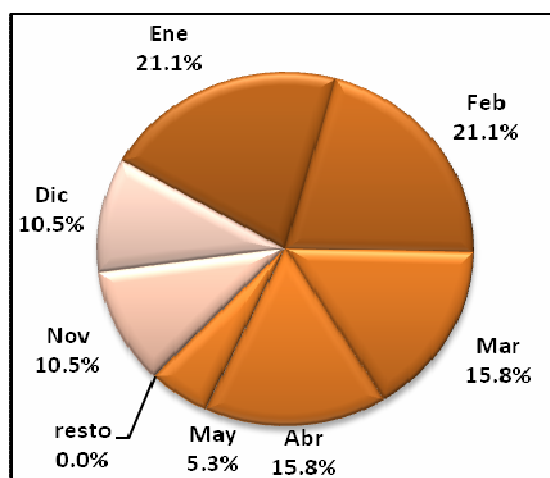


Figura 5.1-4: Probabilidad de ocurrencia del estrés hídrico actual del 85% de demanda a nivel mensual para la cuenca Purapel en Nirivilo

En este caso, para la situación futura, y para una probabilidad de excedencia del 85%, no existe un estrés asociado, por lo cual no aplica la generación de probabilidades de ocurrencia del estrés hídrico de demanda a nivel mensual.

5.1.1.3 Probabilidad de excedencia del 95%

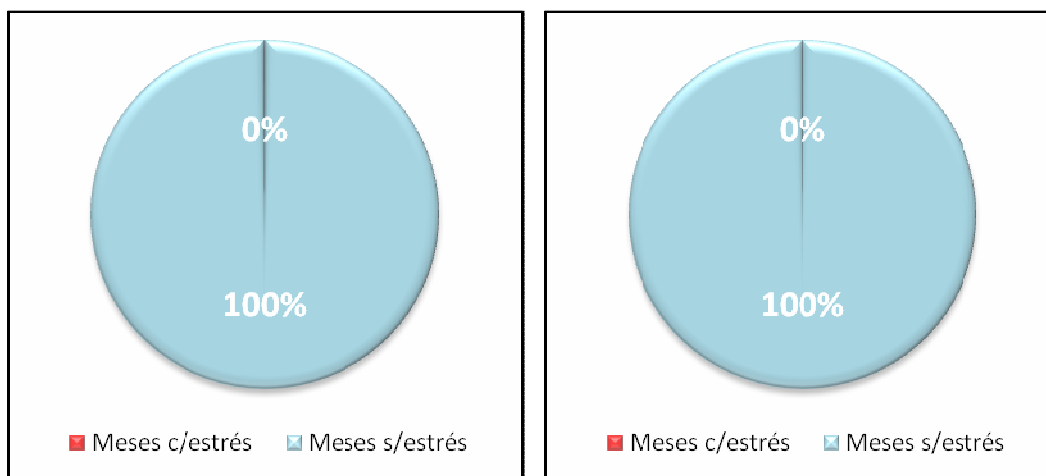


Figura 5.1-5: Estrés hídrico actual (izquierda) y futuro (derecha) para la cuenca Purapel en Nirivilo. Demanda 95%

Tanto para la situación futura como actual, para una probabilidad de excedencia del 95%, no existe un estrés asociado, por lo que no se generó la figura de probabilidades de ocurrencia del estrés hídrico de demanda a nivel mensual.

5.1.2 Curva de Duración de la duración del déficit

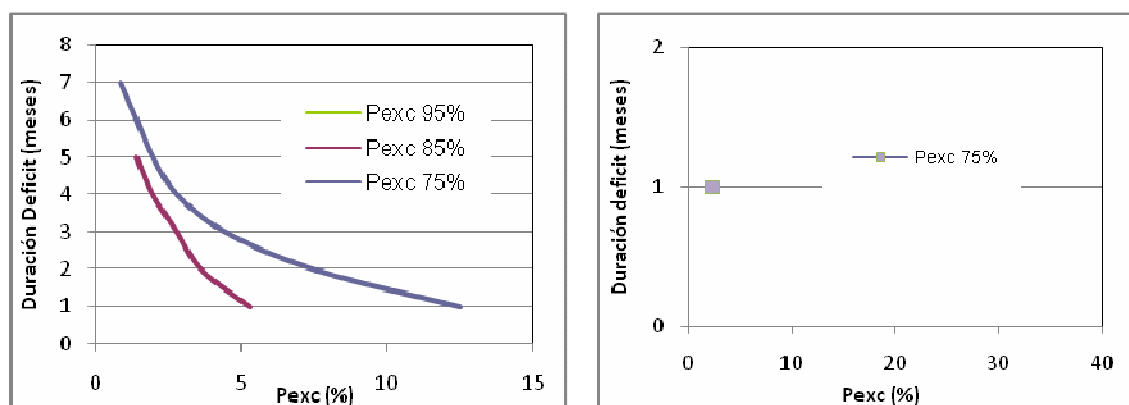


Figura 5.1-6: Curva de Duración de la duración del déficit actual(izquierda) y futuro (derecha) para la cuenca Purapel en Nirivilo

5.1.3 Análisis de los caudales máximos

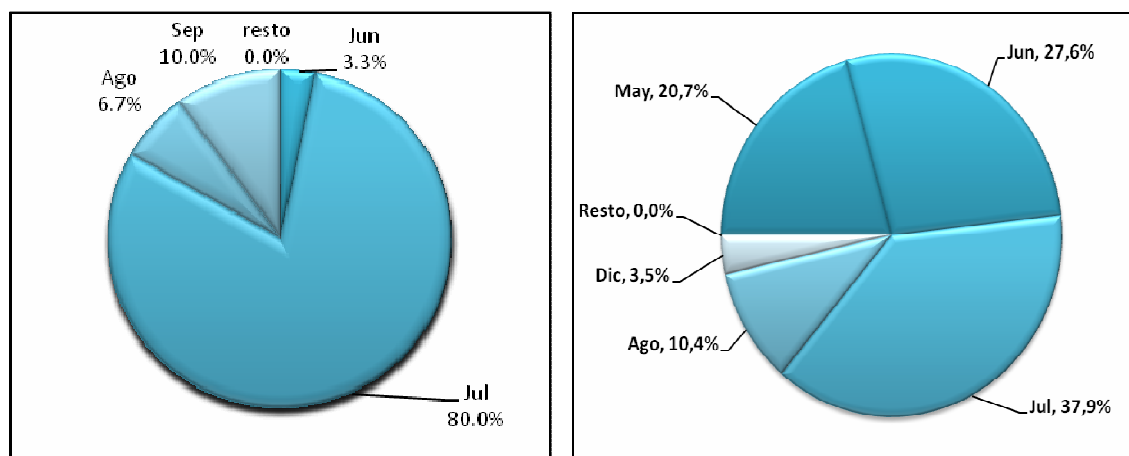


Figura 5.1-7: Caudales máximos actuales (izquierda) y futuros (derecha) para la cuenca Purapel en Nirivilo

5.1.4 Curva de variación estacional

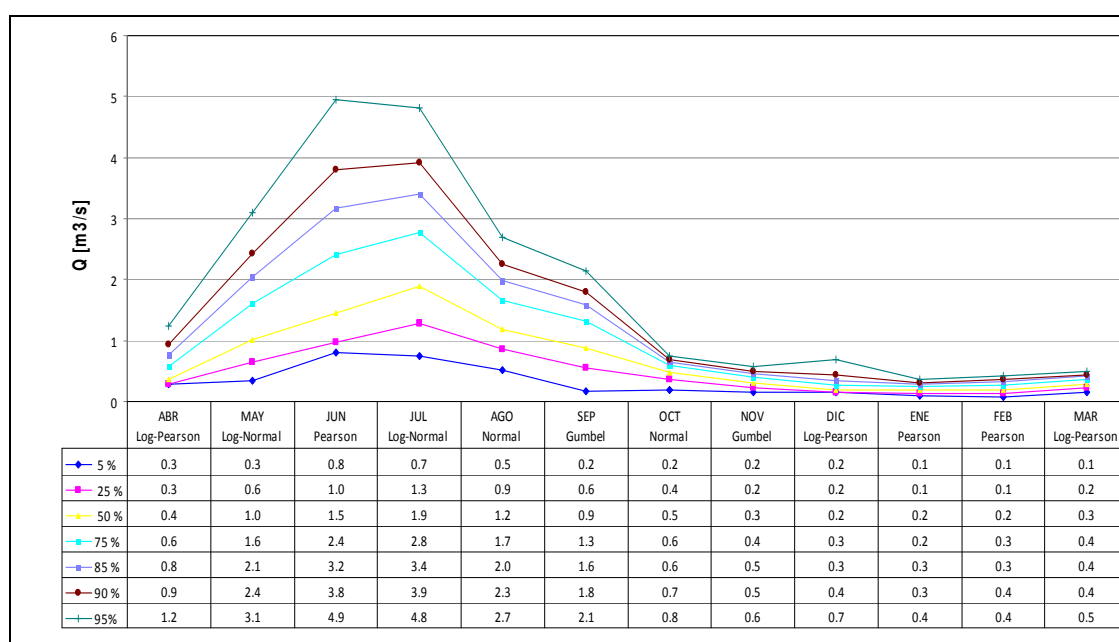


Figura 5.1-8: Curva de variación estacional (futuro) para la cuenca Purapel en Nirivilo

5.1.5 Comentarios de los resultados obtenidos

El estrés hídrico que se da a conocer para la cuenca de Purapel en Nirivilo se configura a partir de los menores caudales medios mensuales que se obtienen del análisis de frecuencia realizado para la situación actual, asociados a las probabilidades de excedencia de 75%, 85% y 95%, los que se obtienen para los períodos de deshielo del sistema, con magnitudes de 0,2 m³/s, 0,1 m³/s y 0 m³/s.

A partir de las Figuras 4.6-1, 4.6-3 y 4.6-5, se destaca un mayor estrés comparativo para las series actuales, lo que es producto de los bajos caudales utilizados en el criterio de estrés hídrico, provenientes de una base de datos de caudales actuales que no expresa cifras decimales que puedan dar una mayor precisión al estudio, pues si bien es cierto para la situación futura existe una gran cantidad de información de caudales mínimos cercanos a la unidad, las cifras decimales de estos últimos evitan el estrés hídrico asociado al criterio anteriormente mencionado.

Dado que el caudal asociado a una probabilidad de excedencia de 95% es mínimo, tanto la situación actual como futura se encuentran exentas de estrés hídrico para dicha probabilidad de excedencia, haciendo no aplicable la estimación de la probabilidad de estrés hídrico de demanda a nivel mensual, para la cuenca Purapel en Nirivilo.

En relación a la distribución de los caudales máximos observados en la cuenca Purapel en Nirivilo (ver Figura 4.6-8), se destaca el mes de julio como aquel que posee los mayores caudales medios mensuales asociados durante el año hidrológico en un mayor porcentaje de tiempo (80%), mientras que para la serie futura la tendencia arroja una distribución más homogénea en la ubicación temporal de los mayores caudales, que se suceden entre los meses de mayo, junio, julio y agosto, lo que puede observarse con claridad a partir de la curva de variación estacional de la serie futura de caudales medios mensuales (ver Figura 4.6-9).

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 Chacabucquito 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 m³/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 m³/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 Chacabuquito 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.

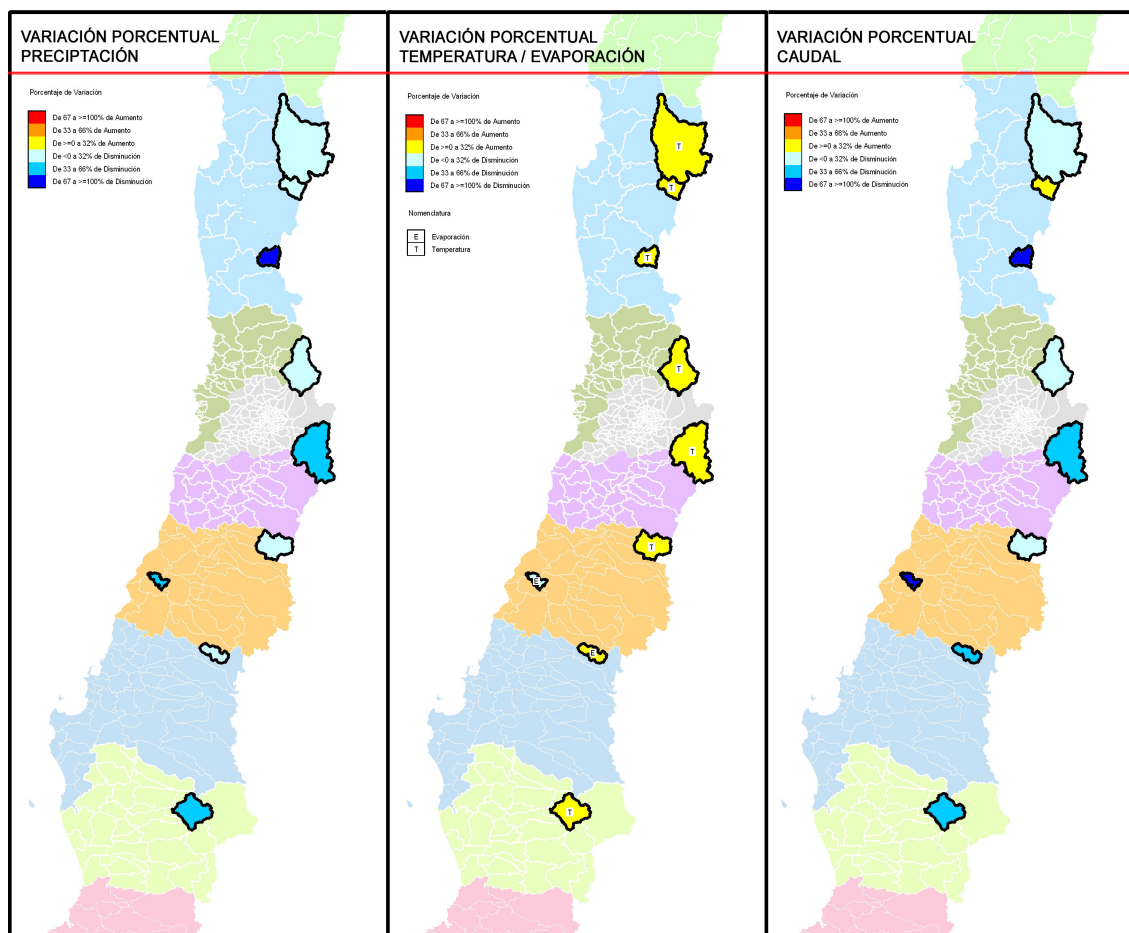


Figura 6.2-1: Resumen de resultados para las tendencias de precipitación, temperatura, evaporación y caudal a nivel anual para cada cuenca

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.