



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**Departamento de Ingeniería Civil.
División de Recursos Hídricos y Medioambiente.**



**ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS FRENTE A ESCENARIOS DE
CAMBIO CLIMÁTICO PARA LAS CUENCAS CAUTÍN, ACONCAGUA, TENO E ILLAPEL”**

INFORME FINAL

SANTIAGO, OCTUBRE 2010

Equipo Ejecutor:

Ximena Vargas M. (Jefe de Proyecto).
Eduardo Rubio A. (Coordinador de Proyecto).
Pedro Sanzana (Ingeniero de Proyecto)
Álvaro Ayala R. (Ayudante de Investigación)
Miguel Lagos Z. Ayudante de Investigación)

James McPhee (Asesor)

INDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	5
2	RESUMEN DE RESULTADOS.....	6
3	METODOLOGÍA APLICADA.....	7
3.1	ESCALAMIENTO METEOROLÓGICO.....	7
3.1.1	<i>Escalamiento Espacial.....</i>	7
3.1.2	<i>Escalamiento Temporal.....</i>	9
3.2	CRITERIOS DE CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS CONSTRUIDOS.....	10
4	RESULTADOS.....	11
4.1	CUENCA ILLAPEL EN LAS BURRAS.....	11
4.1.1	<i>Escalamiento Meteorológico Illapel en Las Burras.....</i>	19
	Ajuste de la línea base (LB).....	19
	Ajuste del escenario A2.....	22
4.1.2	<i>Modelo Hidrológico Illapel en Las Burras.....</i>	25
	Resultados escenario A2.....	32
4.1.3	<i>Proyecciones del estrés hídrico futuro en Illapel en Las Burras.....</i>	34
	<i>Comentarios.....</i>	34
4.1.4	34
4.2	CUENCA ACONCAGUA EN CHACABUQUITO.....	35
4.2.1	<i>Escalamiento Meteorológico Aconcagua en Chacabuquito.....</i>	44
	Ajuste de la línea base (LB).....	44
	Ajuste del escenario A2.....	48
4.2.2	<i>Modelo Hidrológico Aconcagua en Chacabuquito.....</i>	51
	Resultados calibración línea base (LB).....	52
	Resultados escenario A2.....	56
4.2.3	<i>Variación del estrés hídrico.....</i>	58
	Probabilidad del 75%.....	58
	Probabilidad del 85%.....	58
	Probabilidad del 95%.....	58
4.2.4	<i>Comentarios.....</i>	59
4.3	CUENCA DEL RÍO TENO.....	59
4.3.1	<i>Escalamiento Meteorológico del río Teno.....</i>	67
	Ajuste de la línea base (LB).....	67
	En general se observa un ajuste aceptable tanto de las temperaturas mínimas como máximas para todo el periodo. La única diferencia se observa durante el mes de noviembre, en el que se subestima el valor registrado por la estación.....	73
	Ajuste del escenario A2.....	73
4.3.2	<i>Modelo Hidrológico del río Teno.....</i>	76
	Resultados calibración línea base (LB).....	77
	Resultados escenario A2.....	82
4.3.3	<i>Variación del estrés hídrico.....</i>	84
	Probabilidad del 75%.....	84
	Probabilidad del 85%.....	84
	Probabilidad del 95%.....	84
4.3.4	<i>Comentarios.....</i>	84
4.4	CUENCA CAUTÍN EN RARI-RUCA.....	85
4.4.1	<i>Escalamiento Meteorológico Cautín en Rari-Ruca.....</i>	93

Ajuste de la línea base (LB).....	93
Ajuste del escenario A2.	97
4.4.2 Modelo Hidrológico Cautín en Rari-Ruca.	100
Resultados Calibración.....	100
Resultados Línea Base.	103
Resultados escenario A2.	105
4.4.3 Variación del estrés hídrico.....	107
4.4.4 Probabilidad del 75%.....	107
4.4.5 Probabilidad del 85%.....	108
4.4.6 Probabilidad de excedencia del 95%.	110
4.4.7 Comentarios.	112
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113

1 Introducción y objetivos del proyecto.

En este momento, Chile se encuentra en proceso de elaboración de su Segunda Comunicación Nacional. Desde que Chile entregó su Primera Comunicación a Naciones Unidas, el Gobierno de Chile ha hecho cada vez un mayor esfuerzo para entender los impactos derivados del cambio climático, fomentar la adaptación del país a los efectos de éste, y participar constructivamente en su solución. En este contexto, se lanzó en diciembre de 2008 el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático, que constituye el marco de referencia para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, y mitigación de las emisiones de los gases de efecto invernadero en el país. El Plan contempla actividades en tres ejes: Adaptación a los Impactos del Cambio Climático, Mitigación de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Creación y Fomento de Capacidades para abordar el problema en Chile.

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 éstos, el más desfavorable corresponde al escenario denominado A2, el que se caracteriza por la autosuficiencia y conservación de las identidades locales lo cual 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 como el cambio tecnológico, están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

Bajo el eje de Adaptación, el Plan de Acción se concentra en generar una línea base de información sobre escenarios de impactos y opciones de adaptación en sectores considerados claves en el quehacer nacional, entre los cuales se pueden mencionar los recursos hídricos, el sector silvoagropecuario, el sector energía, los recursos marinos y pesqueros, el sector de infraestructura y zonas urbanas costeras, la biodiversidad, los servicios eco sistémicos y la salud.

En el marco del Plan, se contrató a AGRIMED, Universidad de Chile, para realizar el estudio “Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de Cambio Climático”. Este estudio se ha enfocado a los efectos que sobre estos sectores tiene el escenario A2, adoptando para el análisis del período 2035 a 2065. El estudio incluyó la aplicación de un modelo basado en subcuencas o áreas climáticamente homogéneas, considerando el downscaling dado por el modelo regional de clima PRECIS y ajustando los valores (precipitación y temperatura) del período base en base a datos observados en la estación meteorológica. Los datos meteorológicos estimados para el período 2070-2100 se trasladaron al período 2035-

2065, considerando la tendencia observada en los valores de la media y desviación de cada período. El estudio consideró 9 cuencas, entre las regiones de Coquimbo y Araucanía: Elqui, Hurtado, Illapel, Maipo, Aconcagua, Teno, Purapel Perquillauquen, y Cautín, respectivamente.

Posteriormente, en el estudio “La economía del cambio climático en Chile”, se revisó el estudio referido anteriormente, y se aplicó una mejora en el modelo generado por PRECIS, considerando todo el período 2010-2100 con un downscaling basado en los datos del modelo de circulación general HadCm3 (de menor resolución espacial), se corrigieron para ajustarlos a los valores observados en alguna estación y se aplicó un modelo hidrológico con la configuración de bandas de elevación climáticamente homogéneas, lo cual permitió una mejor modelación, que fue aplicada para las cuencas de Maipo, Maule y Laja.

Posteriormente, en el marco de la Segunda Comunicación del Cambio Climático, se contrató al Centro de Cambio Global de la Universidad de Chile para elaborar la “Propuesta del capítulo sobre la vulnerabilidad de Chile frente al fenómeno de cambio climático y las medidas actuales y potenciales de adaptación”, estudio en el que se utilizarán los resultados del estudio “La economía del cambio climático en Chile”, incluyendo los datos de las tres cuencas señaladas.

El objetivo del presente estudio es la aplicación del modelo hidrológico WEAP para las cuencas Illapel, Aconcagua, Teno y Cautín para el período 2010-2100, usando el escenario A2 de cambio climático. Los antecedentes meteorológicos básicos provendrán de los entregados por el modelo de circulación global HadCM3, los que deben escalarse y corregirse a base de los datos observados en las estaciones de medición. La información generada en este estudio se incorporará en la “Propuesta del capítulo sobre la vulnerabilidad de Chile frente al fenómeno de cambio climático y las medidas actuales y potenciales de adaptación”.

2 Resumen de resultados.

Respecto del escalamiento meteorológico implementado, este resulta satisfactorio pues permite llevar los datos del modelo de circulación general HadCM3 hacia un microsistema, como es el caso de una cuenca. Todos los sistemas pudieron ser correctamente escalados, pero sin duda que las cuencas andinas representan un desafío pues las funciones de transformación son complejas y más aún el clima en altura hace que estas funciones puedan ser no lineales en algunos casos, elevando inmediatamente la complejidad del sistema.

Los resultados son robustos, pero necesitan ser mirados con cuidado, no en la etapa del comportamiento, sino que en la magnitud de los cambios, producto principalmente que lo que se está resolviendo en este trabajo es un modelo hidrológico (sólo uno por sistema) con un modelo de circulación general. Es necesario acotar la incertidumbre con un estudio más profundo.

En general se puede destacar que todos los sistemas poseen porcentajes de reducción en caudal y precipitación entre el 20% y 40% y aumentos de temperatura entre 1 a 4°C. Existen cambios de estacionalidad, por ejemplo, en el caso del Aconcagua y Teno, produciéndose un adelantamiento de los caudales “peak” y significativas reducciones en la oferta de todos los sistemas. El comportamiento de cada sistema está estrictamente explicado por lo que ocurre climáticamente en su conjunto, esto es, por el comportamiento de la precipitación, temperatura y radiación.

3 Metodología Aplicada.

3.1 Escalamiento Meteorológico.

El escalamiento meteorológico es una metodología que tiene por objetivo principal llevar la información de un modelo climático global (GCM), en este caso el modelo HadCM3, a una escala local, tanto en el tiempo como en el espacio. Consta de 2 procesos, el primero es el escalamiento o desagregación espacial, que tiene por objetivo traspasar la información de la grilla del modelo GCM HadCM3 a una escala local o regional, en particular, a una cuenca y su punto de salida o punto con información meteorológica observada. El segundo proceso es el escalamiento temporal, el cual trata de ajustar los datos que provienen del escalamiento espacial a los datos observados, no solo en magnitud, sino que también en estacionalidad.

3.1.1 Escalamiento Espacial.

Para realizar el escalamiento de las variables meteorológicas entregadas por el modelo de circulación general HadCM3 se utilizó una adaptación de la metodología planteada por Wood et al (2002) en el Este de EEUU. Esta metodología se realiza de manera distribuida espacialmente. En ella se implementan dos correcciones a las series obtenidas desde el modelo global. La primera consiste en una corrección a las curvas de duración mensuales de cada variable (etapa denominada Bias Correction) y una desagregación espacial desde la escala global a una grilla más fina (Spatial Disaggregation).

Además de los resultados del modelo global, para utilizar la metodología original es necesario contar con una climatología observada distribuida espacialmente a una resolución superior a la del modelo global.

De manera simplificada, la metodología puede dividirse en las siguientes etapas:

1. Selección de un periodo base donde coincidan datos observados y los resultados del modelo global en el periodo histórico.
2. Agregación espacial de la climatología observada a la escala del modelo global. Aquí se promedian mensualmente todos los valores que se encuentren dentro de cada celda del modelo global.
3. Corrección de la distribución temporal de las variables de cada celda del modelo global mediante la comparación de las curvas de duración mensuales con las observadas (Bias Correction, BC).
4. Desagregación espacial de las series corregidas mediante campos de anomalías creados por la comparación de la interpolación de la grilla global y la grilla fina de la climatología observada (Spatial Disaggregation, SD).

Esta metodología ha sido utilizada en distintas zonas de EEUU y Francia (Wood 2002, Maurer 2007, Boé 2009, Quintana 2009).

Adaptación

La necesidad de realizar una modificación a la metodología original nace del tipo de modelo hidrológico planteado en las etapas posteriores de este estudio. En efecto, dicho modelo depende de las precipitaciones y temperaturas registradas en una estación base de cada sistema y la desagregación espacial al resto de la cuenca es realizada en una etapa posterior mediante gradientes altitudinales. Esta configuración sugiere realizar un tipo de downscaling directamente a un punto en particular y no a una grilla espacialmente distribuida. Todo esto permite realizar las correcciones directamente con las observaciones medidas en la estación.

Así, se definen dos etapas:

En la primera se plantea una interpolación al punto de interés mediante una relación, multiplicativa en el caso de la precipitación y aditiva para la temperatura, capaz de relacionar las variables meteorológicas observadas localmente y a gran escala. La meteorología observada a gran escala es obtenida de los reanálisis del NCEP/NCAR del National Oceanic & Atmospheric Administration de EEUU (NOAA) disponibles en la web <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>.

La relación planteada se resume en las 2 ecuaciones mostradas a continuación. La Ec 1 hace el supuesto que la proporción entre la precipitación observada y la precipitación en la celda observada (que proviene de los reanálisis del NCEP/NCAR) debe ser la misma que se define por la razón entre la precipitación de la estación que proviene del GCM y su promedio de celda. Así mismo la ecuación 2 afirma que la anomalía presente en la celda observada debe ser equivalente a la anomalía de la celda HadCM3.

$$\frac{P_{estación_OBS}}{P_{celda_OBS}} = \frac{P_{estación_GCM}}{P_{celda_GCM}} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$T_{estación_OBS} - T_{celda_OBS} = T_{estación_GCM} - T_{celda_GCM} \quad (\text{Ec. 2}).$$

En la Figura 3.1.1 se puede apreciar el esquema conceptual de esta corrección.

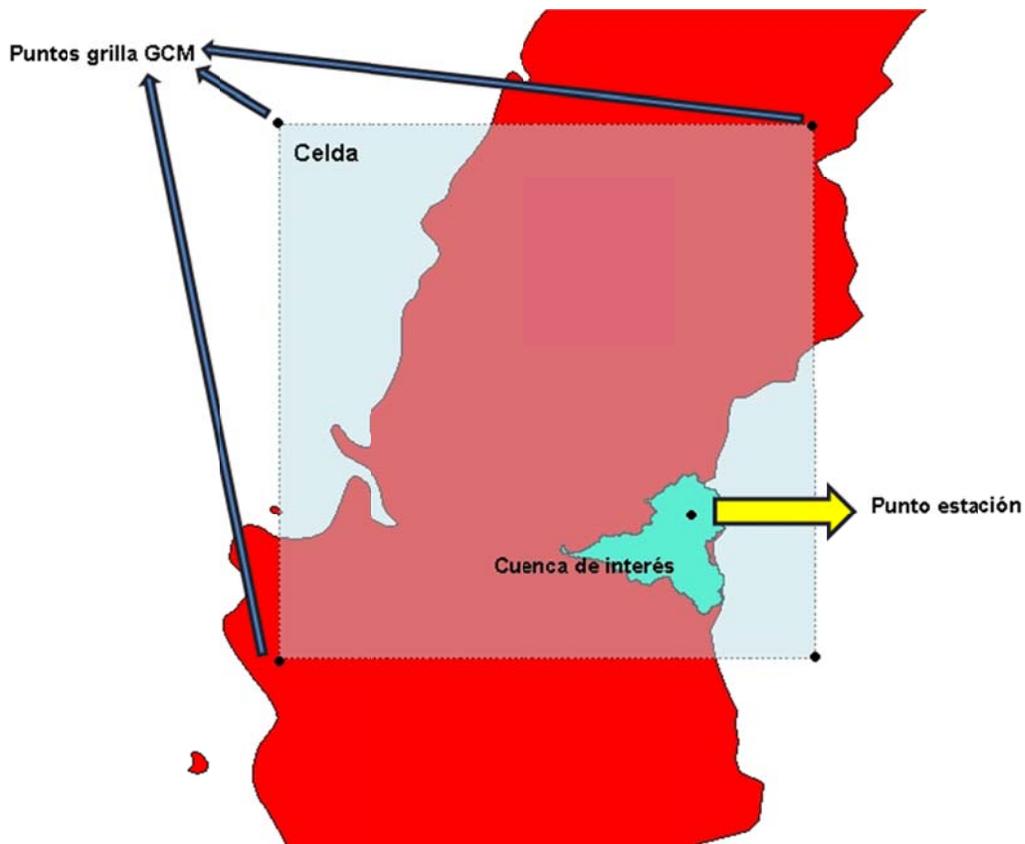


Figura 3.1.1: Esquema conceptual de la corrección del escalamiento espacial implementado.

3.1.2 Escalamiento Temporal.

En muchos casos se observa que tanto las precipitaciones como temperaturas que provienen del escalamiento están sub o sobre dimensionadas. Una manera de corregir eso es mediante las relaciones entre las curvas de duración de la línea base y los datos observados, las cuales posteriormente son aplicadas a las series futuras. Este procedimiento ha sido detallado ampliamente en el estudio para ERECC-CEPAL titulado: “Análisis de vulnerabilidad del sector hidroeléctrico: Disponibilidad futura de los recursos hídricos en Chile frente a escenarios de cambio climático” (Vargas, McPhee 2009). En este estudio se ha aplicado la misma metodología con la salvedad que a los umbrales no se les ha asociado una probabilidad de excedencia, de modo que se mantienen como montos fijos. Esto es porque ahora se ha adoptado el supuesto de que el escalamiento temporal es una corrección que apunta a una gran limitación que tiene el modelo, la escala espacial. Dado que el tamaño de la grilla de HadCM3 alberga 1 o 2 regiones y que lo que hace es promediar o interpolar la precipitación, esto hace que tanto los valores máximos como los valores mínimos sean poco reales, en el sentido que es factible tener un dato de HadCM3 con precipitación mayor a 0, cuando en realidad, no se ha medido precipitación en ese instante. Esto es un error muy común, en particular, para los meses de estiaje. Por lo tanto los umbrales de precipitación (El umbral que queda definido cuando la precipitación del GCM es positiva, pero la observada es nula) como los puntos de inflexión (Aquellos puntos para los cuales el comportamiento entre la precipitación observada y la del GCM cambia radicalmente) que se encuentran entre las relaciones entre las curvas de duración de precipitación y temperatura de la línea base del GCM y los datos observados se mantendrá en el futuro. Suponer que el umbral está asociado a una probabilidad de excedencia, que depende entonces de la ventana de tiempo analizada, es imponer intrínsecamente la evolución de los meses con y sin precipitación, proceso que además es de carácter estocástico y altamente variable.

3.2 Criterios de Calibración de los modelos hidrológicos construidos.

Para la evaluación de la calibración de los distintos modelos hidrológicos se ha decidido utilizar el índice de Nash-Sutcliffe, el cual está definido como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{promedio}^{obs})^2}$$

Cuando el NS es cercano a 1, el modelo es mejor y representa mejor la realidad observada.

Puesto que el tipo de conclusiones a las que se espera llegar tratan de apuntar a posibles cambios de estacionalidad y a estimaciones de la reducción (en términos de

valores medios) en porcentaje de precipitación, caudal y temperatura, los ajustes efectuados en la calibración se reportan en tres gráficos claves: La evolución del caudal promedio del período, este permite evaluar cambios de estacionalidad, la variación de la curva de duración, que permite la comparación de valores asociados a una probabilidad de excedencia (caudales ecológicos, etc) y la magnitud del caudal promedio anual, que informa de cuan certero es el porcentaje de reducción o aumento en el período estudiado.

Adicionalmente se presentan los gráficos de caudal simulado versus observado a una escala mensual y anual. En una buena calibración estos gráficos deberían tener una línea de tendencia de pendiente unitaria, con una nube de puntos en torno a ella y repartida homogéneamente, de modo de evitar errores sistemáticos asociados a montos de variables.

4 Resultados.

4.1 Cuenca Illapel en Las Burras.

La cuenca definida por la estación Río Illapel en las Burras se ubica en la Cuarta Región de Coquimbo al Este de la Comuna de "Illapel" limitando al norte con la comuna de Combarbalá y al sur con Salamanca. Específicamente entre las latitudes $31^{\circ}15'$ - $31^{\circ}35'$ (Lat Sur) y $70^{\circ}50'$ - $70^{\circ}30'$ Longitud Oeste. Presenta una fuerte componente cordillerana y su punto de salida está en las coordenadas $31^{\circ}30'45''$ (Lat Sur.) y $70^{\circ}48'49''$ (Long. Oeste). La Figura 4.1.1 presenta la ubicación general de la cuenca.

Ubicación General

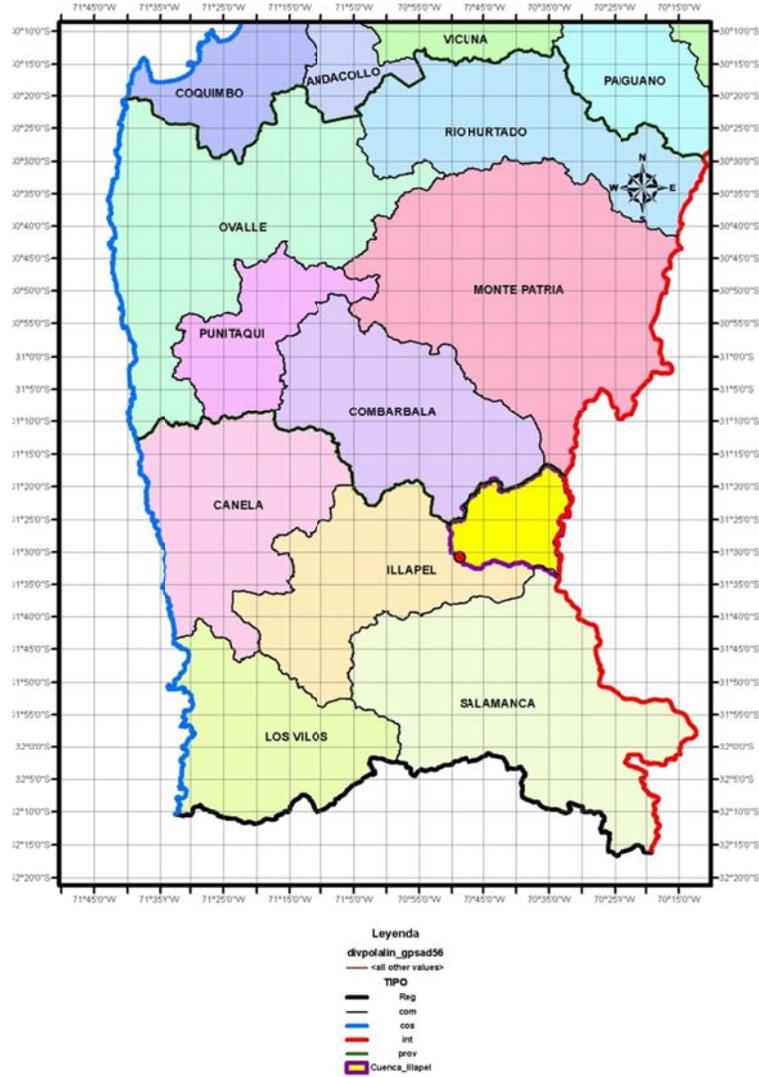


Figura 4.1.1: Mapa Político Administrativo de la cuenca Illapel en las Burras

La cuenca fue delimitada mediante el software WMS y un DEM obtenido de la USGS. (US Geological Survey).

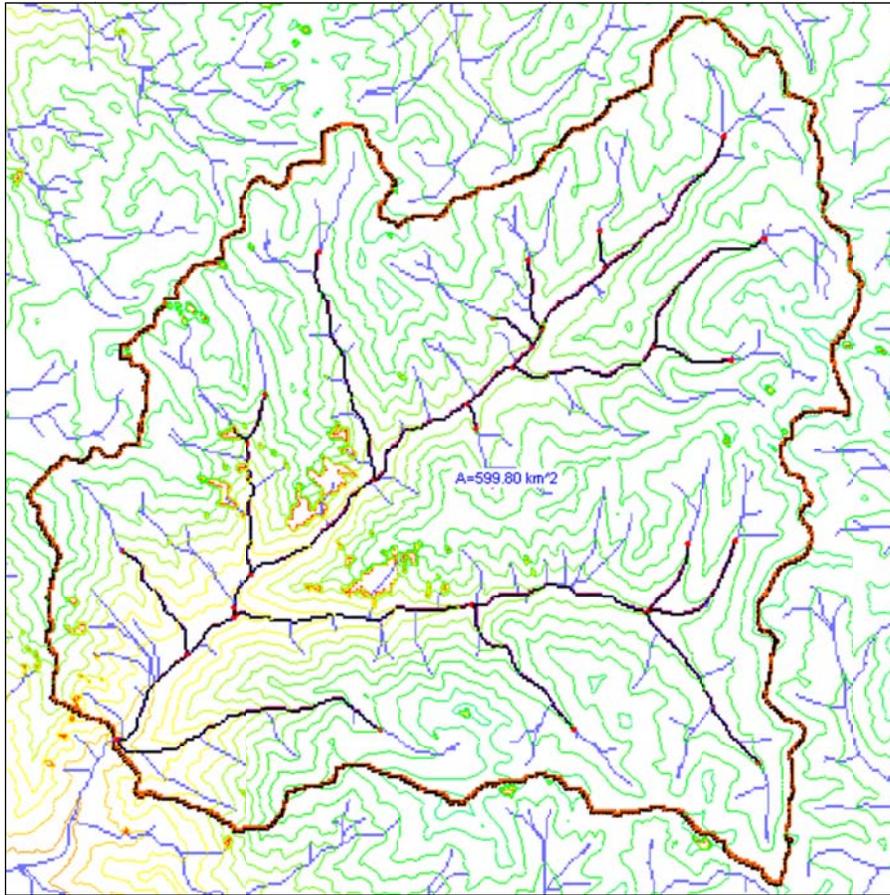


Figura 4.1.2: Delimitación de la cuenca del río Illapel en las Burras.

El área estimada de la cuenca es de 600 km².

El clima asociado a la cuenca es del tipo Templado Frío de altura, debido a la distribución cordillerana de la cuenca, favoreciendo nieves permanentes, altas precipitaciones y temperaturas frías.

La cuenca presenta características agroclimáticas resumidas en la Tabla 4.1-1 y la Figura 4.1.3

Tabla 4.1-1: Características Agroclimáticas Cuenca Illapel en las Burras.

Nombre del clima	TEMEM EOM	TEMEM EJA	EVAPM EDF	PRECM EJA	EVAPM EJA
ALTAR ALTO - QDA. MONTE PATRIA	18.80	11.70	500	105	125
CO. EL PENON - CO. NANCABALLO	18.00	12.00	450	125	125
CORD. BAJA POTRERO ALTO – ESTERO ALCAPARROSA	17.30	10.30	490	180	150
CORDILLERA ALTA	10.00	-5.00	580	100	200
CORDILLERA MEDIA CHOAPA	11.40	3.20	535	215	200
FRAY JORGE - TALINAY	15.60	10.60	345	102	85
LOS CRISTALES - CUESTA CAVILOLEN	18.00	12.00	400	125	92
RIO PETORCA - ALTO CAREN	16.50	8.00	600	224	155

Donde:

- CAMPO ALIAS
 NOMBCLIM : Nombre distrito agroclimático
 TEMEMEOM : Temperatura media meses Octubre-Marzo [°C]
 TEMEMEJA : Temperatura media meses Junio-Agosto [°C]
 EVAPMEDF : Evapotranspiración potencial meses Diciembre-Febrero.
 PRECMEJA : Precipitación meses Junio-Agosto.
 EVAPMEJA : Evapotranspiración meses Junio-Agosto.

Mapa Agroclimático

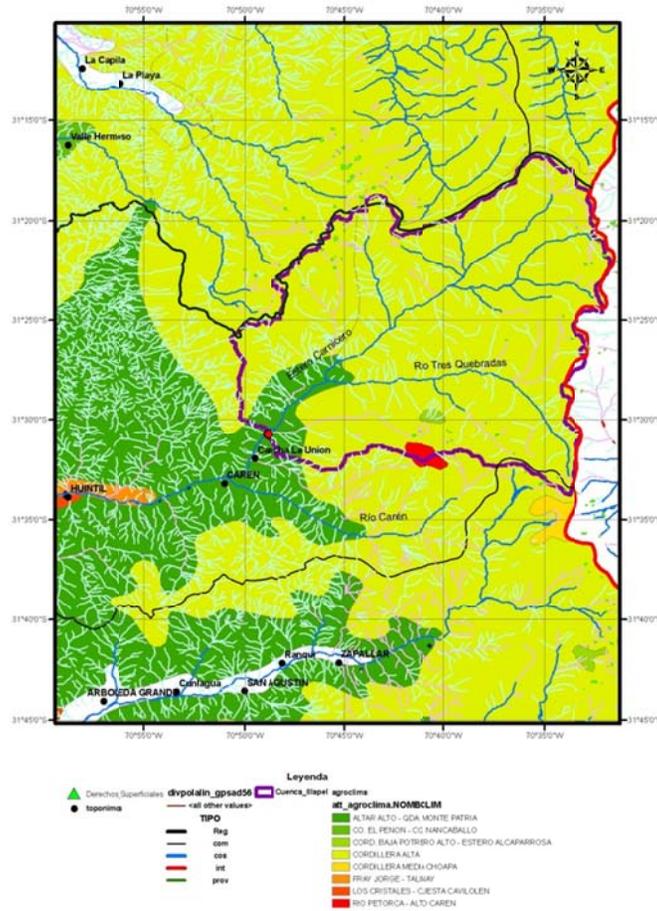


Figura 4.1.3: Mapa Agroclimático Cuenca Illapel en las Burras

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

En particular para el Río Illapel, según el informe de CADE-IDEPE (2004), presenta “Rocas JK3 de tipo Volcánicas del Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Secuencias volcánica, lavas, basálticas a riolíticos, domos brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos con intercalaciones clásticas continentales y marinas; ubicadas en la parte media del río.”

Los cauces principales son el Río Tres Quebradas y El estero Carnicero, ambos nacidos desde las faldas cordilleranas y que en su confluencia forman el Río Illapel.

Cauces Principales

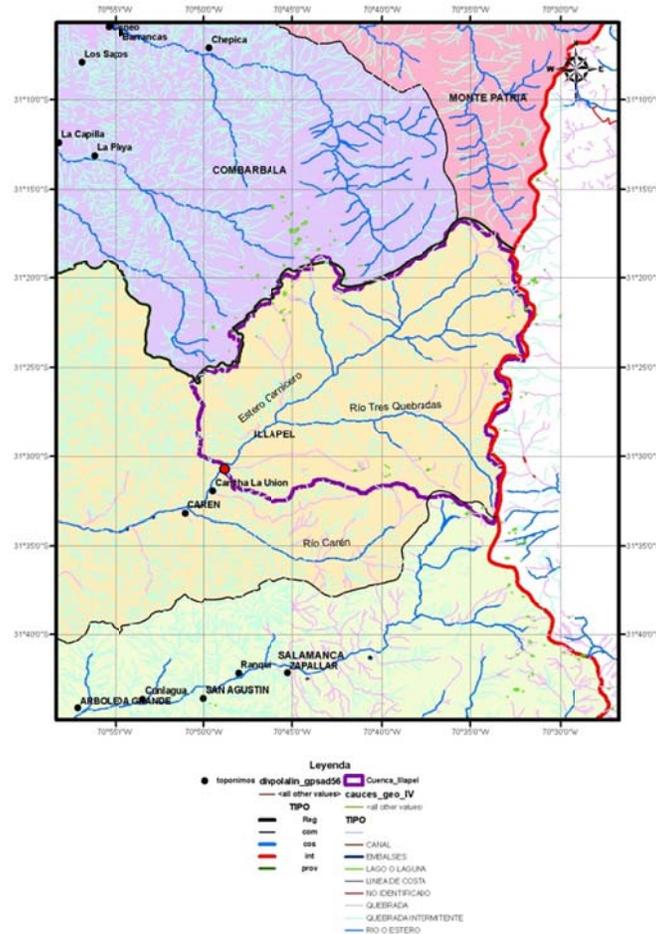


Figura 4.1.4: Cauces Principales Cuenca Illapel en las Burras

Con respecto a los acuíferos en el sistema, estos son más bien escasos y el desarrollo de la red acuífera de la zona se desarrolla aguas abajo del punto de salida de la cuenca, tal como lo indica la Figura 4.1.5

Acuíferos en el Sistema

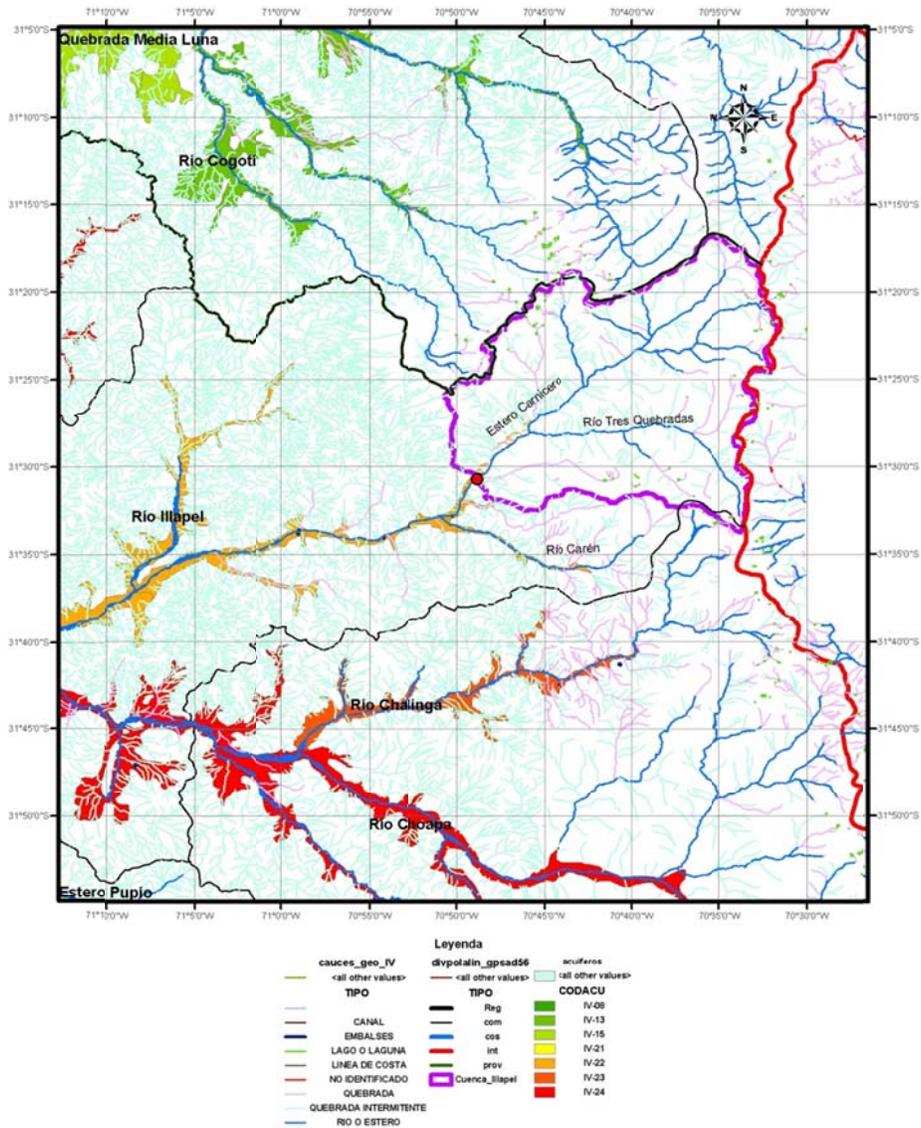


Figura 4.1.5: Acuíferos en Cuenca Illapel en las Burras (Fuente: elaboración propia y SIG Comisión Nacional de Riego)

Con respecto al uso del suelo cabe destacar que la cuenca presenta mayormente terrenos desprovistos de vegetación, luego zonas de humedales y finalmente matorrales en similar proporción que los humedales. Existe cultivo agrícola alrededor de las riberas del río Illapel, inmediatamente después de la confluencia entre el estero Carnicero y el Río Tres Quebradas. Esta distribución se indica en la Figura 4.1.6

Usos del Suelo

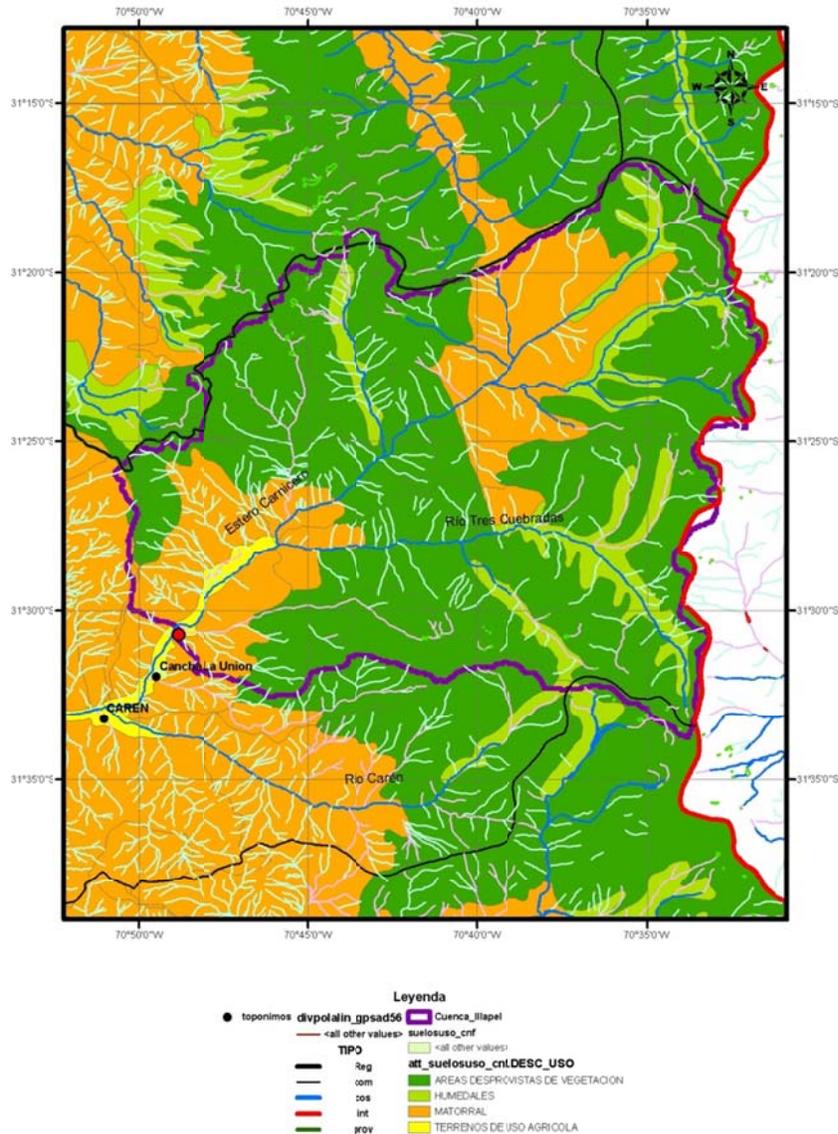


Figura 4.1.6: Usos de Suelo en Cuenca Illapel en las Burras

Por el momento no se han detectado captaciones superficiales ni subterráneas en la cuenca. La superficie de uso agrícola se extiende fuera de la cuenca en estudio y es muy inferior a la superficie de las áreas desprovistas de vegetación que concentran la mayoría del uso en la cuenca.

Curva de Variación Estacional para la cuenca Illapel en Las Burras.

La cuenca presenta un régimen netamente nival, con sus mayores caudales entre octubre y enero, producto de deshielos. Muestra muy poca influencia pluvial, salvo en el caso de años muy secos, en los cuales los caudales son muy uniformes a lo largo del año, presentándose los mayores entre julio y septiembre, producto de lluvias invernales. En la Figura 4.1.7 se presenta la curva de variación estacional para la cuenca.

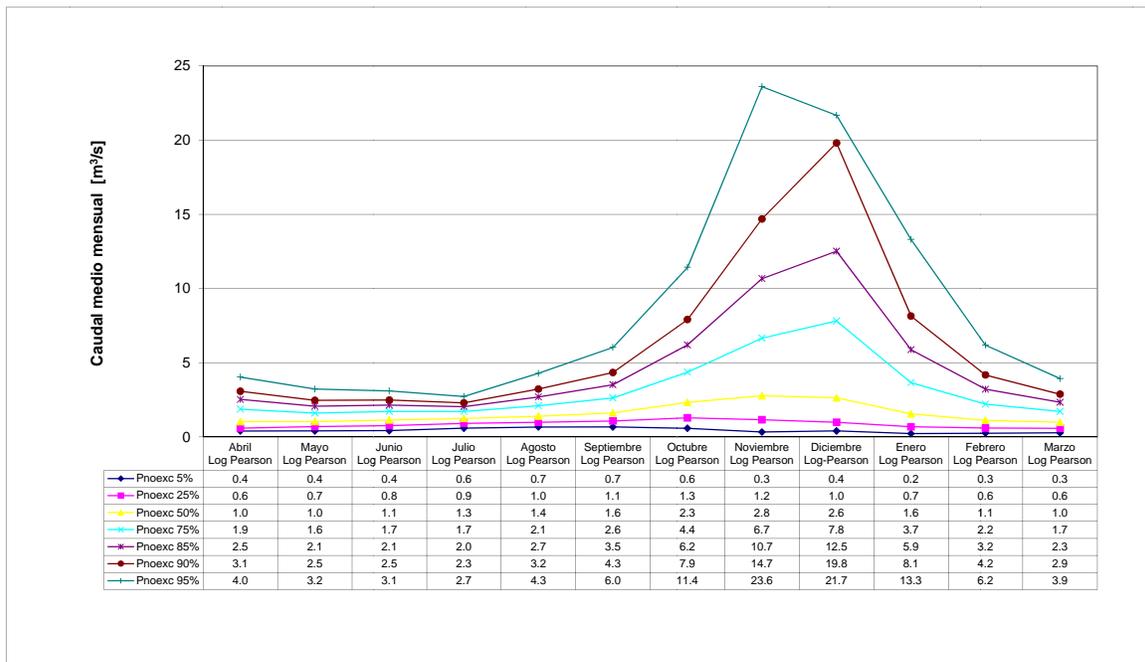


Figura 4.1.7: Curvas de Variación Estacional Cuenca Illapel en las Burras.

4.1.1 Escalamiento Meteorológico Illapel en Las Burras.

A continuación se muestran los resultados del proceso de *downscaling* para cada una de las variables y estaciones, en primera instancia se muestra el ajuste para el periodo de Línea Base, que en este caso corresponde al periodo 1966-1998. Finalmente se presentan los resultados de las proyecciones futuras según el escenario A2 para el futuro.

Ajuste de la línea base (LB).

Precipitación.

El escalamiento espacial y temporal de precipitación para las coordenadas de la Estación Huintil, muestra los siguientes resultados:

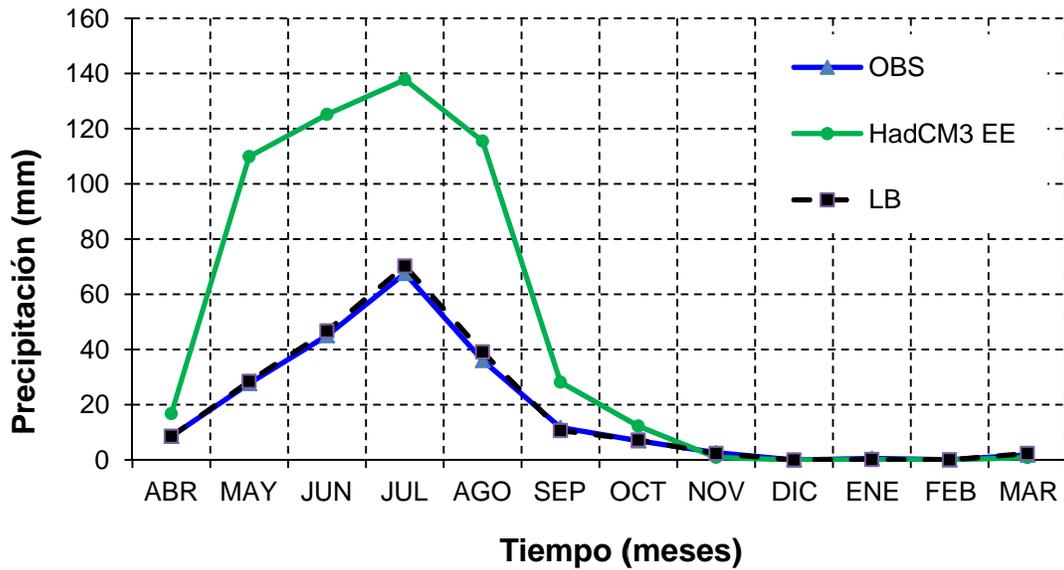


Figura 4.1.8: Resultado escalamiento promedios mensuales estación Huintil.

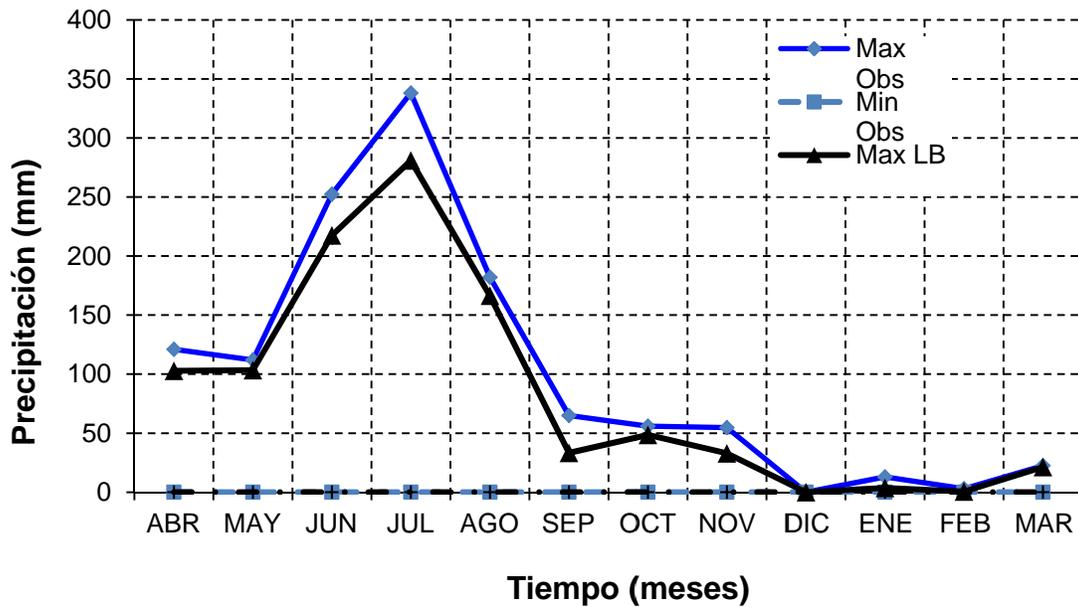


Figura 4.1.9: Resultado escalamiento máximo y mínimo de precipitación estación Huintil.

De las Figuras anteriores, se tiene que en promedio se logra replicar de forma correcta la precipitación observada en la estación Huintil, por parte de los máximos casi siempre se está subestimando estos valores, mientras que los mínimos presentan un ajuste correcto.

Temperatura

Para la Estación La Tranquilla, el escalamiento espacial y temporal de temperaturas muestra el siguiente resultado:

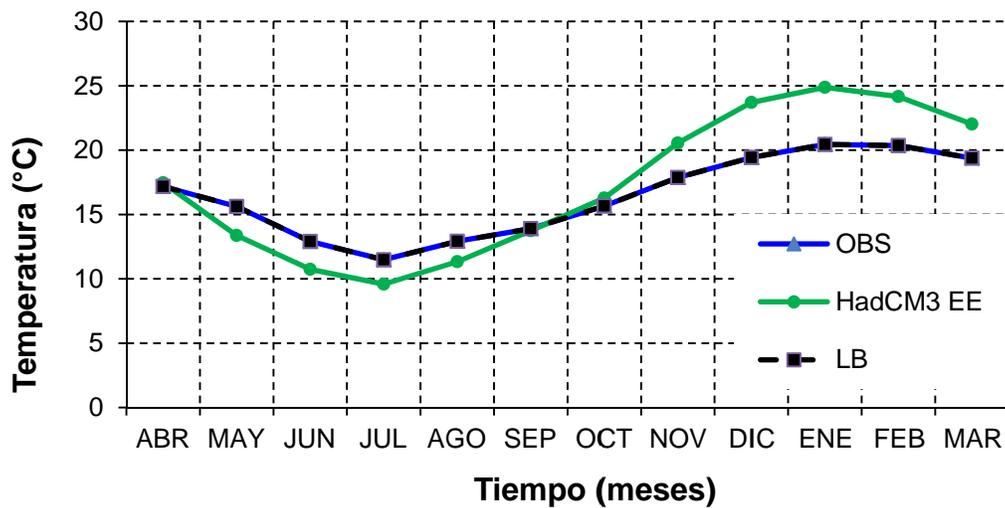


Figura 4.1.10: Resultado escalamiento promedios mensuales estación La Tranquilla.

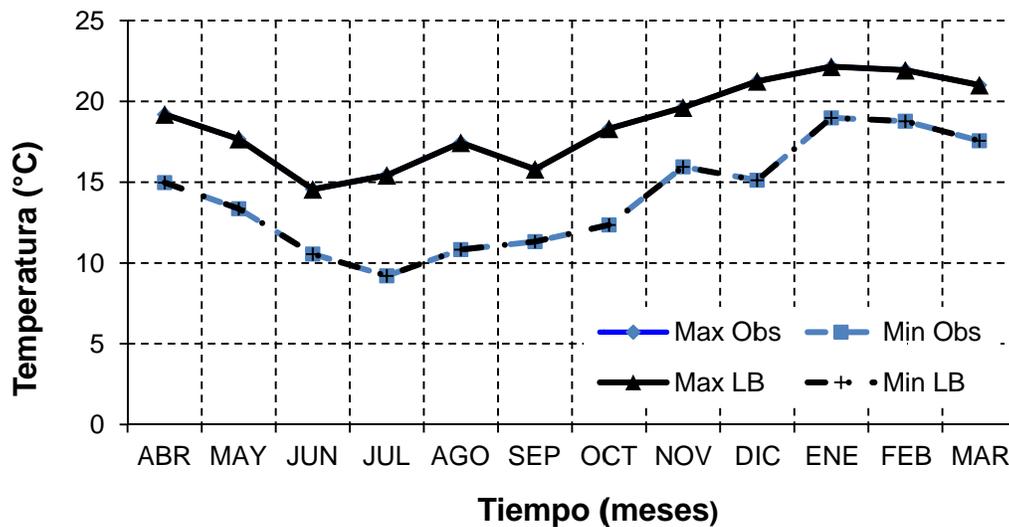


Figura 4.1.11: Resultado escalamiento máximo y mínimo de temperaturas estación La Tranquilla

Se puede observar en las Figuras anteriores, que el proceso de escalamiento entrega en general resultados del modelo HadCM3, semejantes a los observados por la estación la Tranquilla. Esto es válido tanto para los promedios mensuales así como para los valores máximos y mínimos.

Ajuste del escenario A2.

Al realizar el mismo ajuste pero para la serie HAD completa, en cada variable climática, se tienen los siguientes resultados:

Precipitación

Los resultados de proceso de escalamiento espacial y temporal aplicado al modelo HadCM3 en términos de precipitaciones para la estación Huintil, son los siguientes:

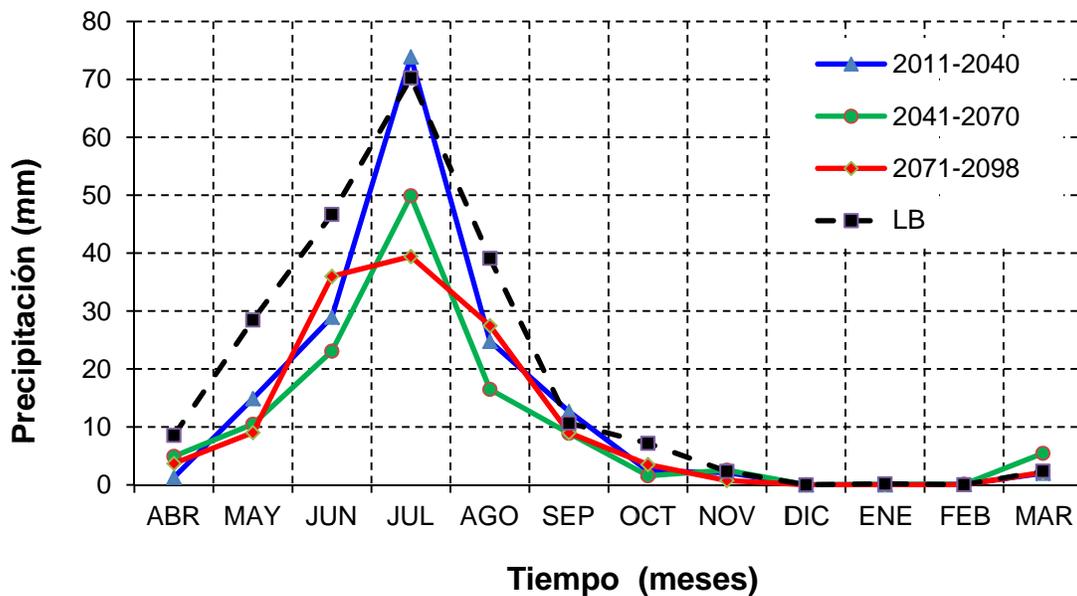


Figura 4.1.12: Resultado escalamiento de precipitaciones para el escenario A2

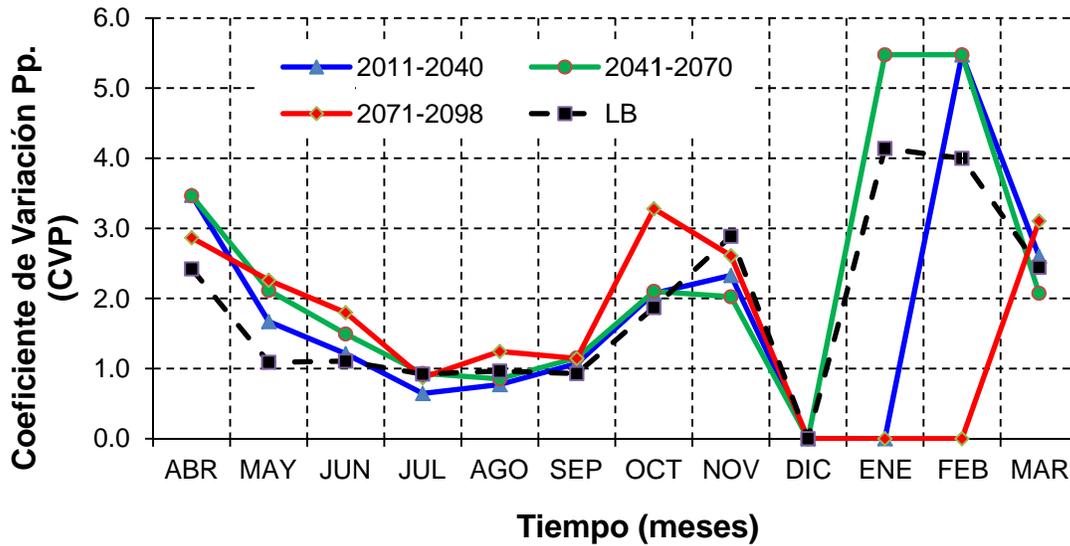


Figura 4.1.13: Resultado coeficiente de variación de precipitaciones para el escenario A2

En el caso de los ajustes de precipitación, se observa una disminución general de precipitaciones para la estación de Huintil, salvo para el mes de junio donde en promedio habría un aumento para la última parte del siglo XXI. Los altos valores del coeficiente de variación en época estival, se deben a que son meses con precipitación media muy cercana a cero, por tanto cualquier valor no nulo registrado provoca aumento de la desviación estándar y su correspondiente aumento del coeficiente en estudio.

Temperatura

Los resultados de proceso de escalamiento espacial y temporal aplicado al modelo HadCM3 en términos de temperatura para la estación La Tranquilla, son los siguientes:

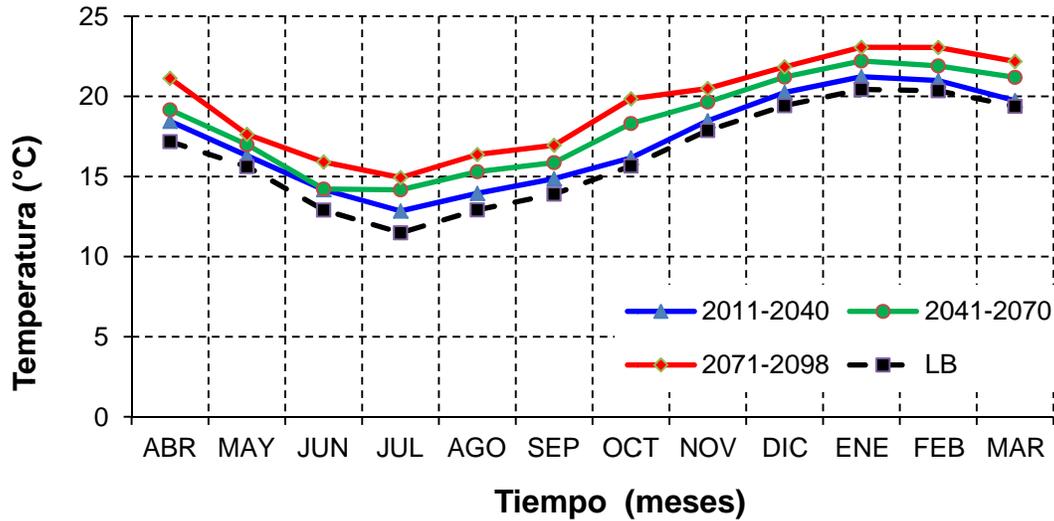


Figura 4.1.14: Resultado escalamiento de temperaturas para el escenario A2

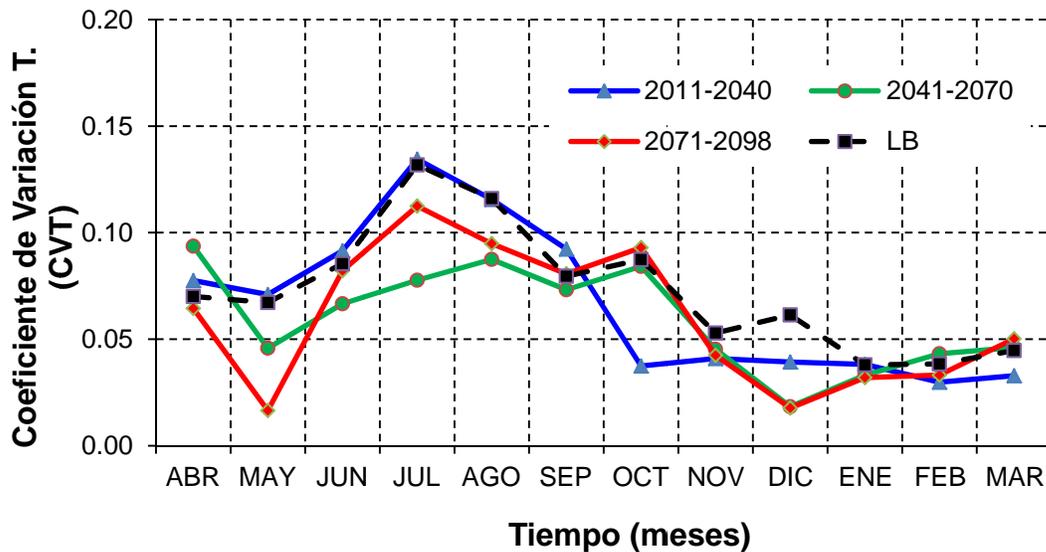


Figura 4.1.15: Resultado coeficiente de variación de temperaturas para el escenario A2

Cómo puede apreciarse, la tendencia en promedio es al alza de temperaturas para la estación La Tranquilla, lo que tiene perfecta concordancia con las predicciones climáticas esperadas para Chile central (DGF, 2006). La variabilidad en este caso es bastante menor puesto que las temperaturas a diferencia de las precipitaciones presentan un comportamiento menos variable a lo largo de los años, teniendo una marcada estacionalidad. Sumado a esto, dado que en La Tranquilla se tenían registros del año 1966, se tuvo una estadística extensa para realizar un mejor escalamiento.

4.1.2 Modelo Hidrológico Illapel en Las Burras.

Al ser los principales datos de entrada del modelo precipitación y temperatura, se buscó en base a la cantidad de la información disponible y la extensión de la misma, cuál de estas podría representar de mejor forma las características meteorológicas de la cuenca. Las estaciones utilizadas se muestran en la Tabla 4.1-2

Tabla 4.1-2: Estaciones Meteorológicas utilizadas Illapel en Las Burras

Nombre	Institución	Código BNA	Periodo de registro		UTM N	UTM E	Altitud [m]	Tipo [Pp,T,Q]
	Responsable		Inicio	Final				
La Canela (DMC)	DGA	04732001-1	ene-73	Vigente	6523271	266193.1	290	Pp
Las Burras	DGA	04721002-k	jun-89	Vigente	6509526.5	326895.2	1150	Pp
Santa Virginia	DGA	04722001-7	may-18	Vigente	6507639.6	325556.3	980	Pp
Huintil Hacienda	DGA	04723002-0	may-14	Vigente	6505757.6	311791.7	650	Pp
La Tranquilla	DGA	04710001-1	ene-66	Vigente	6469057.8	342185.8	1000	T, n
Rio Illapel en las Burras	DGA	04721001-1	may-65	Vigente	6512415.4	327669.2	1079	Q

Calibración línea base (LB).

El modelo para la cuenca de Illapel, se desagregó inicialmente en ocho bandas de elevación, el criterio utilizado para escoger las bandas se fijó en bandas de igual área, en el caso de la banda de elevación más baja, presentó un desnivel entre su altura máxima y mínima superior a los mil metros, por lo que la primera banda se dividió en dos teniendo aproximadamente el mismo desnivel entre ellas, tal y como se resume en la siguiente tabla:

Tabla 4.1-3: Bandas de Elevación utilizadas

Banda	Hmin [msnm]	Hmax [msnm]	ΔH [m]	Área [km ²]	Hmedia [msnm]
1	1151	1751	600	25	1451
2	1751	2347	596	50	2049
3	2347	2810	463	75	2579
4	2810	3077	267	75	2944
5	3077	3275	198	75	3176
6	3275	3428	153	75	3352
7	3428	3550	122	75	3489
8	3550	3691	141	75	3621
9	3691	4264	573	75	3978

Las siguientes Figuras muestran el grado de calibración alcanzado por este modelo:

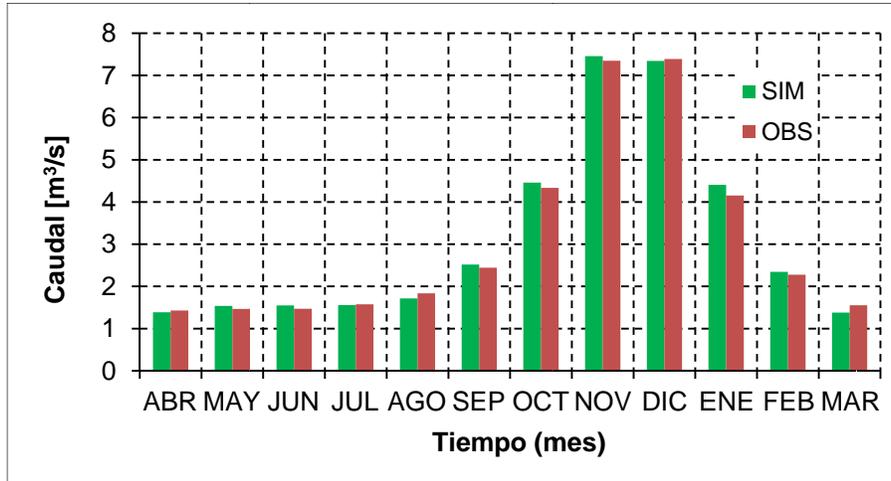


Figura 4.1.16: Caudales medios mensuales simulados en la calibración.

Tal y como se puede apreciar en la Figura anterior, se tiene que el modelo logra replicar mensualmente de buena forma a lo observado, siendo la mayor diferencia porcentual el mes de marzo, sin embargo en promedio esta diferencia alcanza un 0.4% más de caudal respecto a lo observado.

Los resultados totales anuales se muestran en la siguiente Figura:

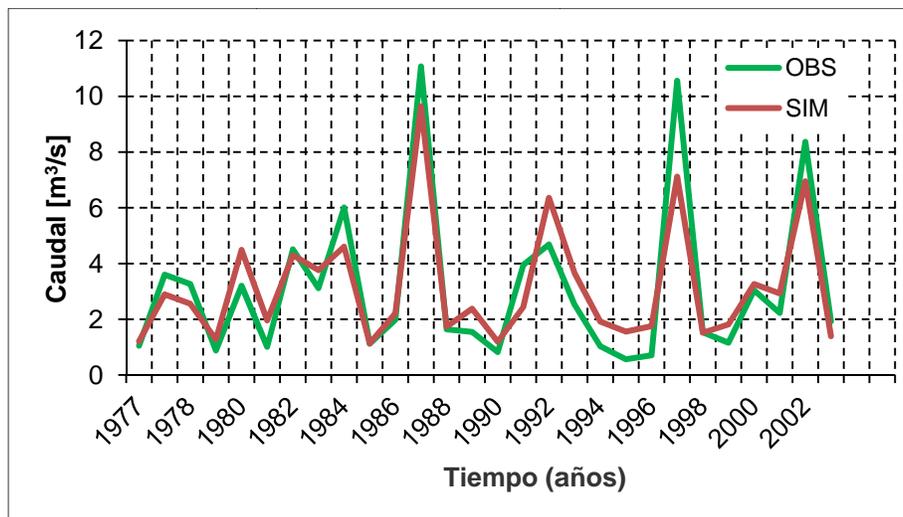


Figura 4.1.17: Caudal Total Anual periodo de calibración.

De la Figura anterior se puede concluir que en general se subestiman los caudales máximos, mientras que se sobreestiman los más bajos, esto último se debe principalmente a que en años en donde se registraron efectivamente precipitaciones la

estación Illapel en las Burras, no genera una crecida; de este modo se usó como criterio tener un mejor ajuste de los valores medios, lo que logra representarse.

En la Figura 4.1.18 se puede apreciar la curva de duración de los caudales para el periodo de calibración, de ésta se concluye que se tiene un mejor ajuste en los caudales de alta probabilidad de excedencia (es decir caudales bajos), mientras que para las crecidas se subestiman en general los valores de las crecidas.

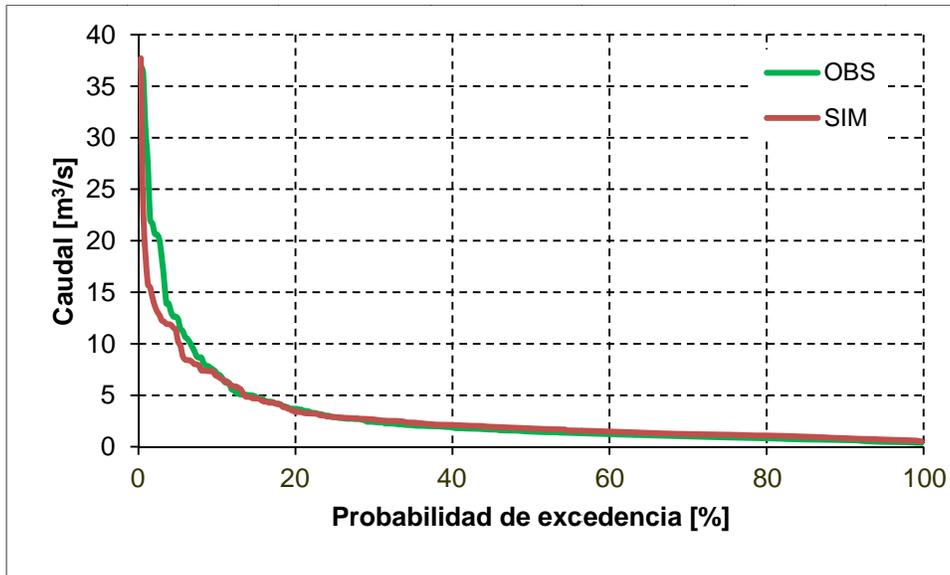


Figura 4.1.18: Curva de Duración de los caudales medios mensuales en el periodo de calibración.

La Figura 4.1.19 que presenta la bondad de ajuste del modelo. Al lado izquierdo se puede apreciar una adecuada simulación del caudal observado a nivel mensual, con puntos en torno a una recta de pendiente cercana a 1, se aprecia una dispersión elevada para caudales elevados, que se condice con lo observado en la Figura 4.1.17. Con respecto a los montos anuales estos quedan bien ajustados aunque ligeramente subestimados.

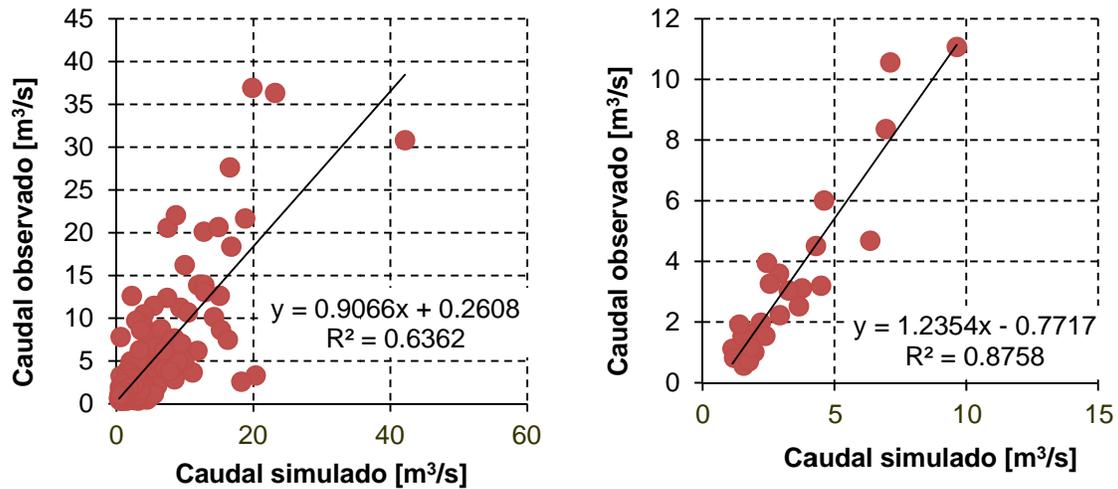


Figura 4.1.19: Curva de Duración de los caudales medios mensuales (izq) y anuales (der) en el periodo de calibración.

La etapa de calibración se realizó entre los años 1976-1997 encontrándose un índice de Nash Sutcliffe (NS) 0.60; mientras que para el periodo de validación (1998-2004) se tiene un valor de NS=0.85.

Variaciones Climáticas para la Cuenca Illapel en Las Burras

Para estimar la variabilidad de las condiciones de precipitación y temperatura, se ponderó el promedio anual de cada variable para cada una de las bandas de elevación, por la fracción del área total representada por cada una de ellas, de este modo se tienen las siguientes proyecciones de cambio climático para la Cuenca de Illapel en las Burras:

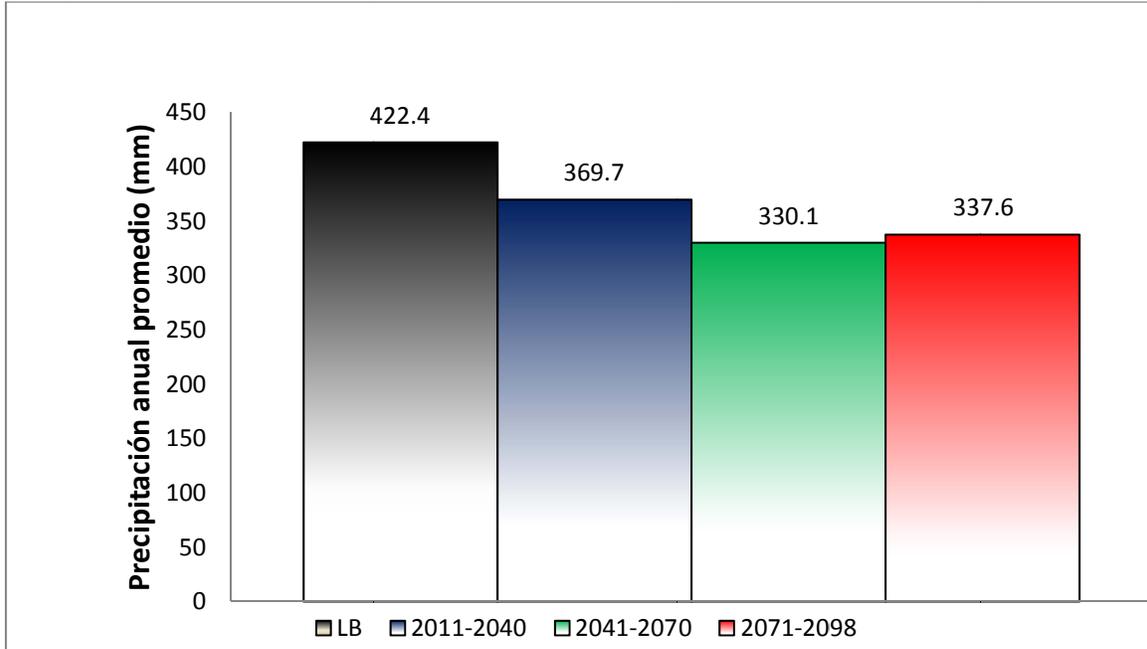


Figura 4.1.20: Proyecciones de precipitación media anual de la cuenca

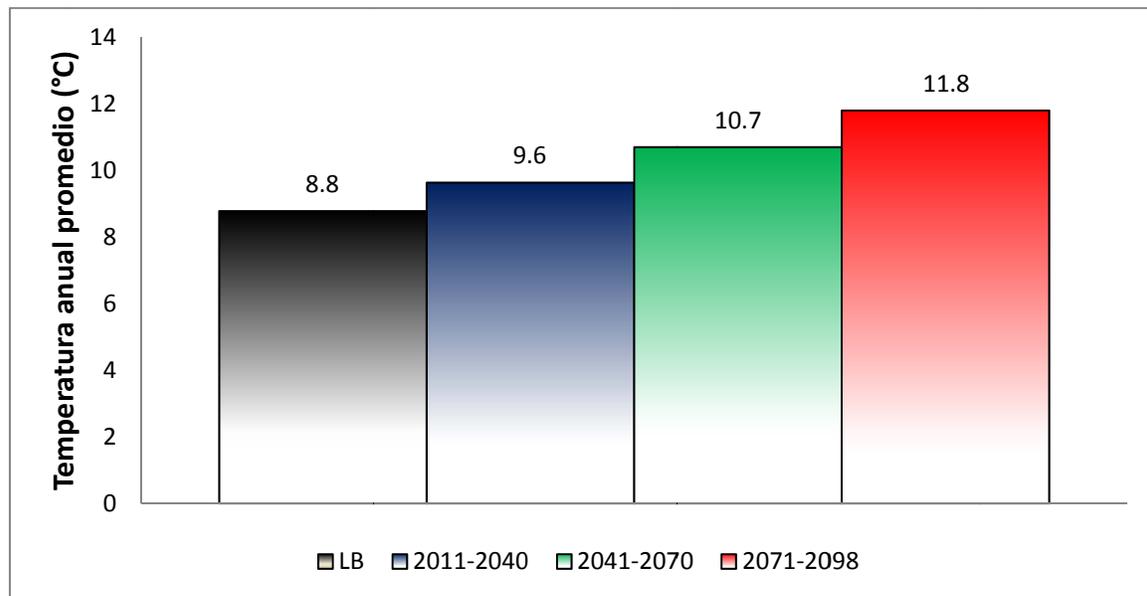


Figura 4.1.21: Proyecciones de temperatura media anual de la cuenca

De las Figuras anteriores se aprecia en promedio una disminución de precipitación hacia finales del siglo XXI de aproximadamente un 20%, mientras tanto que la temperatura media para la cuenca en estudio, proyecta para el escenario A2, un aumento a fines de siglo en 3° C.

De este modo, los resultados esperados al aplicar el modelo escalado de HadCM3, sería una disminución de los caudales máximos producto de la menor cantidad de nieve acumulable, del mismo modo se esperaría un cambio de estacionalidad producto del aumento de las temperaturas, en donde la nieve comenzaría a derretirse más tempranamente que en el periodo actual.

La línea base comprende para este caso el periodo entre los años 1976 y 1998, al comparar los resultados de simulados con datos Had y simulados con datos observados, se tienen los siguientes resultados:

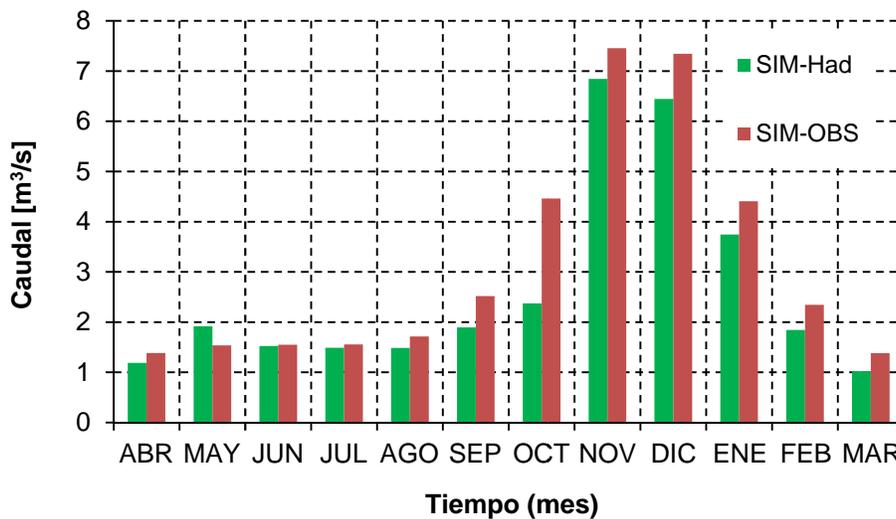


Figura 4.1.22: Resultados de los caudales simulados observados y simulados HadCM3.

En la Figura anterior, se puede apreciar que en promedio el modelo con datos Had subestima las épocas de deshielo, lo que ha de tenerse en consideración a la hora de analizar resultados futuros.

En la Figura 4.1.23 es posible observar que la tendencia a subestimar los resultados obtenidos en el periodo de calibración con datos observados claro, tanto a nivel anual como a nivel mensual.

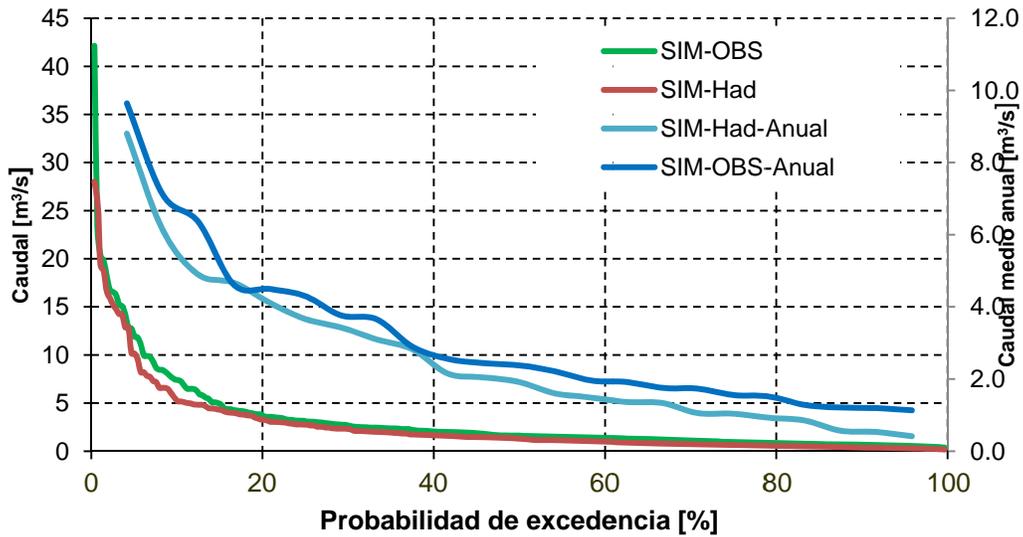


Figura 4.1.23: Curvas de duración mensual y anual para la línea base en el sistema Illapel.

El resumen de información meteorológica así como de caudales para Illapel en Las Burras, con datos observados y escalados del modelo Had, se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 4.1-4: Resumen de resultados de simulaciones para la precipitación, temperatura y caudal en la línea base del sistema Illapel.

Mes	Precipitación [mm]		Temperatura [°C]		Caudal [m ³ /s]		
	OBS	HadCM3	OBS	HadCM3	OBS	SIM_OBS	SIM_HadCM3
Abr	44.2	32.9	9.7	9.7	1.4	1.4	1.2
May	66.1	58.5	8.2	8.2	1.5	1.5	1.9
Jun	57.3	60.5	5.3	5.3	1.5	1.5	1.5
Jul	81.3	65.8	3.9	3.9	1.6	1.6	1.5
Ago	60.7	55.4	5.2	5.2	1.8	1.7	1.5
Sep	43.4	39.3	6.4	6.4	2.4	2.5	1.9
Oct	10.6	11.0	8.1	8.1	4.3	4.5	2.4
Nov	4.2	4.4	10.4	10.4	7.3	7.5	6.8
Dic	0.0	0.0	11.9	11.9	7.4	7.3	6.4
Ene	0.6	0.2	12.9	12.9	4.2	4.4	3.7
Feb	0.2	0.1	12.7	12.7	2.3	2.3	1.8
Mar	4.0	3.2	11.9	11.9	1.6	1.4	1.0
Anual	372.6	331.2	8.9	8.9	3.1	3.1	2.6

Resultados escenario A2.

Del resultado de escalamiento se esperaba un adelantamiento del derretimiento de los caudales, en conjunto a una disminución de los caudales máximos, lo que se aprecia en la siguiente Figura:

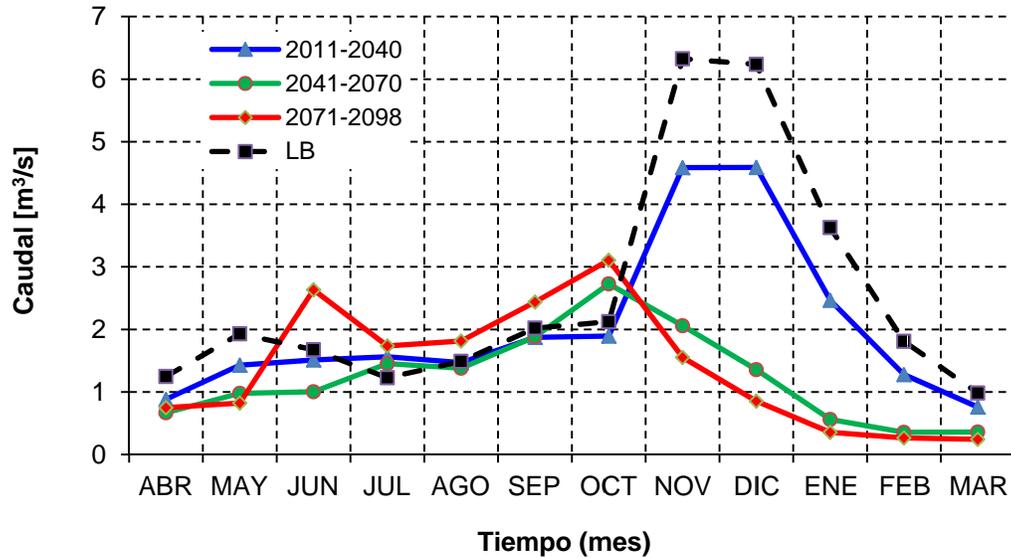


Figura 4.1.24: Caudales para el año promedio en el escenario A2 para el sistema Illapel.

La Figura 4.1.24 presenta un resultado muy relevante en cuanto a la caracterización de la variabilidad interanual. Se puede apreciar una disminución en promedio de los caudales, sumado a un aumento de la variabilidad en el futuro lejano.

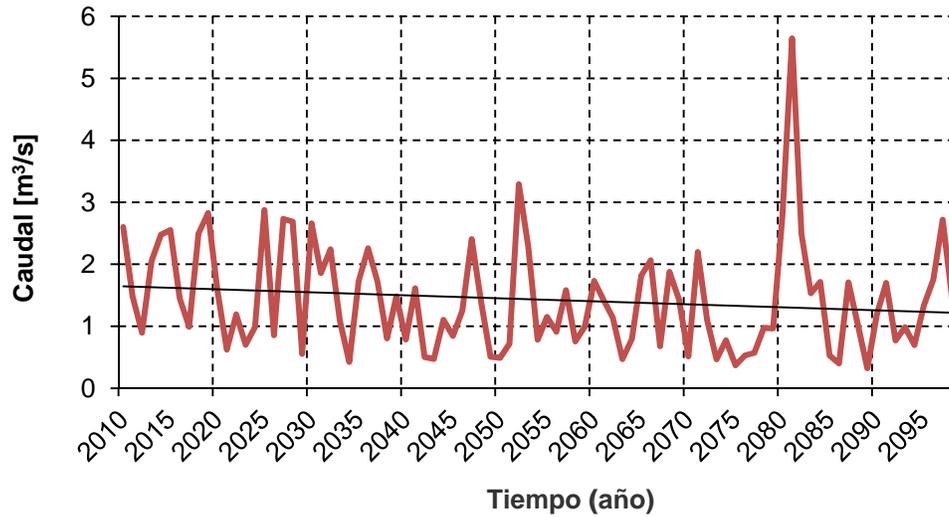


Figura 4.1.25: Caudales Anuales en el escenario A2 para el sistema Ilapel

En la siguiente Figura se aprecia la variabilidad que presentan los distintos tramos de los modelos, siendo para el futuro lejano en época de crecidas aquel que presenta una mayor variabilidad. Mensualmente se aprecia una estacionalidad en la variabilidad de los resultados, aumentando en general para época de crecidas salvo el caso 2071-2098 en donde al observarse un cambio de régimen, la variabilidad es mayor para las crecidas pluviales generadas.

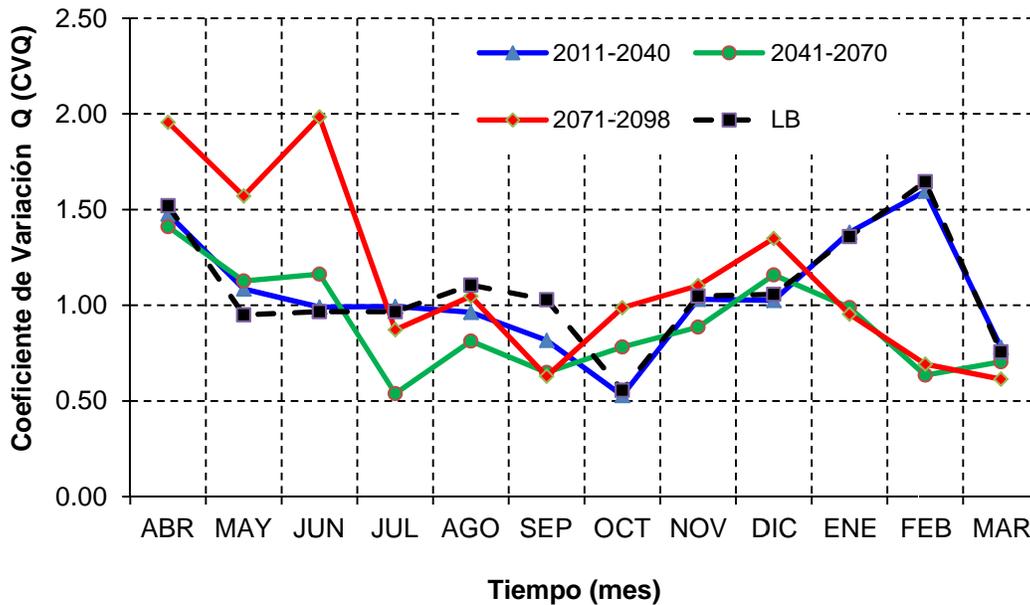


Figura 4.1.26: Coeficiente de variación de Caudales medios mensuales en el escenario A2 para el sistema Ilapel

Finalmente la Tabla 4.1-5 se presenta un resumen con las variaciones de precipitación, temperatura y caudal para las diferentes ventanas de tiempo, así como también informa de la elasticidad del caudal con la precipitación.

Tabla 4.1-5: Resumen de los resultados futuros para el sistema Illapel

Período	Caudal [m ³ /s]	Variación [%]	Pp [mm]	Variación [%]	Temp. [°C]	Variación [°C]	Q/Pp [mm/mm]
LB	2.6		422		8.8		0.07
2011-2040	1.6	-36.1	370	-12.5	9.6	0.9	0.05
2041-2070	1.2	-51.8	330	-21.8	10.7	1.9	0.04
2070-2098	1.4	-46.0	338	-20.1	11.8	3.0	0.05

4.1.3 Proyecciones del estrés hídrico futuro en Illapel en Las Burras.

Gráficos de Torta. Probabilidad del 75%, 85% y 95% (EN PROCESO)

4.1.4 Comentarios

El presente caso cumple con los objetivos principales indicados en la propuesta de estudio. Se da a conocer el escalamiento meteorológico completo de precipitaciones y temperaturas para el sistema Illapel.

Se ha logrado calibrar satisfactoriamente el modelo hidrológico asociado al río Cautín, considerando aquellos posibles problemas de la estación fluviométrica Illapel en las Burras, en donde no se registran crecidas frente a diversos eventos de precipitación observados, sin embargo se obtiene con este modelo, una serie futura bajo el escenario A2, de los caudales medios mensuales, la cual será proporcionada en el Anexo Digital de este informe.

Cabe señalar que dado que la altitud media de la cueca es 3200 [msnm], y la información a la que se le extrae información pluviométrica está a una cota inferior a 1000 [msnm], resulta complejo elaborar un gradiente de precipitaciones puesto que suponer que este seguirá la misma pendiente que desde La Canela y Las Burras es un supuesto que puede no resultar válido.

Finalmente de los resultados de caudales obtenidos para el escenario A2, guarda relación estrecha con lo observado en el proceso de *downscaling*, puesto que se tiene un desfase estacional producto del aumento de temperaturas y una disminución de caudales máximos debido a la menor cantidad de nieve que se acumula producto del descenso en los montos de precipitación, por ende se espera para esta cuenca en particular tener un mayor estrés hídrico que en la actualidad

4.2 Cuenca Aconcagua en Chacabucuito.

Esta cuenca está ubicada en la V región de Valparaíso y es la subcuenca de cabecera de la cuenca del río Aconcagua, que define la disponibilidad hídrica hacia aguas abajo. Se encuentra entre las latitudes °32 25 ´ a 33° 10´ (Lat Sur) y longitud °70 32´ a 69° 58´. La ubicación de la cuenca se muestra en la Figura 4.2.1. El área de la cuenca fue delimitada con WMS y los respectivos DEMS del USGS, esta tiene un valor de 2024 km².

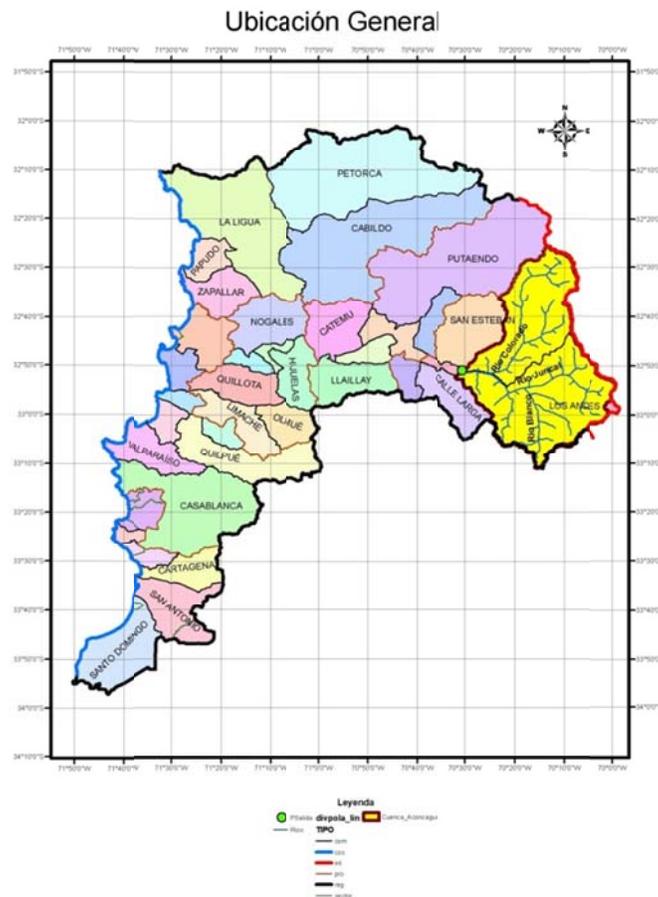


Figura 4.2.1: Mapa Político Administrativo de la cuenca Aconcagua en Chacabucuito

Con respecto al clima, citando a CADE-IDEPE (2004) este se caracteriza por ser el “Clima Frío de Altura, localizado en la Cordillera de los Andes por sobre los 3.000 metros de altura. Las bajas temperaturas y las precipitaciones sólidas caracterizan este tipo climático, permitiendo la acumulación de nieve y campos de hielo de tipo permanentes en cumbres y quebradas de la alta Cordillera”.

A continuación se presentan los distritos agroclimáticos presentes en la zona. La Tabla 4.2-1 muestra las principales características de los distritos presentes en la cuenca, mientras que la Figura 4.2.2 muestra los distritos y su ubicación espacial en la cuenca.

Tabla 4.2-1: Características Agroclimáticas Cuenca Aconcagua en Chacabuquito.

DISTAGRO	TMXM_ANU	TMNM_ANU	TMM_ANU	RSDM_ANU	EPT_ANU	PP_ANU
5-10	1.30	-4.11	-1.33	352	810.00	1240.10
5-16	20.46	5.15	12.23	402	1182.00	335.90
5-17	16.40	2.30	8.93	397	1110.00	391.90
5-18	12.80	1.60	6.88	390	1080.00	444.90
5-19	4.85	-3.90	0.46	365	870.00	778.30
5-21	20.55	7.57	13.43	389	1230.60	495.00
5-23	3.00	-3.80	-0.37	352	834.00	1323.20
5-24	11.60	1.37	6.18	363	1038.00	1527.00
5-25	8.16	-1.10	3.37	359	966.00	1400.10

Donde:

TMXM_ANU	T max media prom año
TMNM_ANU	T min media prom año
TMM_ANU	T media prom año
RSDM_ANU	R S D media prom año
EPT_ANU	Ev pot total prom año
PP_ANU	Precip Total año

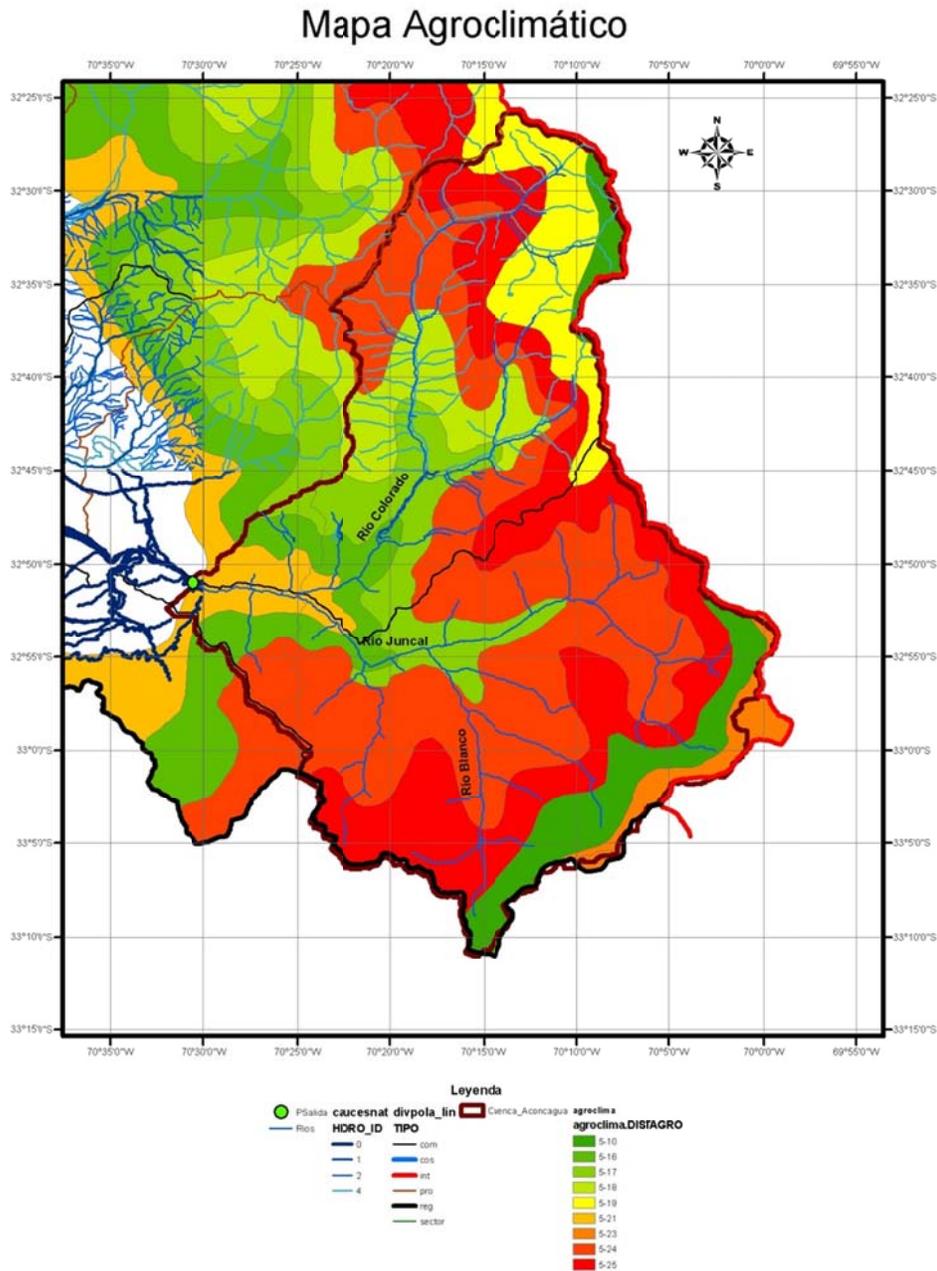


Figura 4.2.2: Mapa Agroclimático Cuenca Aconcagua en Chacabuco

Dentro de los cauces principales de la subcuenca se encuentra el río Juncal, el cual se origina en la cordillera de igual nombre, que divide las aguas con la cuenca del Maipo, en una gran lengua de ventisquero llamado glaciar Juncal Norte. En su desarrollo de 35 km recibe por ambas riberas numerosos arroyos, la mayoría originados también en glaciares colgados. Entre esos tributarios está el río Juncalillo o Juncalito, al cual se le reúne el emisario de la laguna del Inca. Este es un cuerpo de agua elevado a 3.200

m.s.n.m., de forma elíptico-elongada con un eje mayor de 4 km y un ancho medio de 600 - 700 metros.

Por otro lado, el río Blanco se genera al pie norte de los cerros La Copa y El Altar, en el cordón de displuvio con la cuenca alta del río Mapocho; se dirige al NW con una gran pendiente y una longitud de 15 km. Su tributario más importante es el río Los Leones, que se genera en áreas englaciadas alrededor del cerro Alto de Los Leones (5.400 m).

En el tramo río Blanco-Los Andes, el tributario más importante por la ribera norte es el río Colorado. Debe su nombre al limo y otros sedimentos rojizos que enturbian sus aguas en las crecidas. El río Colorado se origina al pie del paso del Rubio, de los esteros del Portillo Hondo y de Los Azules. En su recorrido de 58 km, drena una amplia porción del cordón limítrofe y recibe, por lo tanto, numerosos tributarios, entre los cuales se cuentan el estero de Las Piedras y quebrada El Tordillo. Por la derecha recibe los esteros del Bolsillo, los Columpios del Diablo, Lagunillas y El Maitén.

Otros afluentes menores hacen sus aportes al Aconcagua en este tramo. Los más importantes son el estero Riecillos, que con su afluente de Las Gualtatas desaguan las llamadas lagunas Corraladas, y el estero Vilcuya.

Para mayor detalle se presentan los 3 cauces principales en la Figura 4.2.3

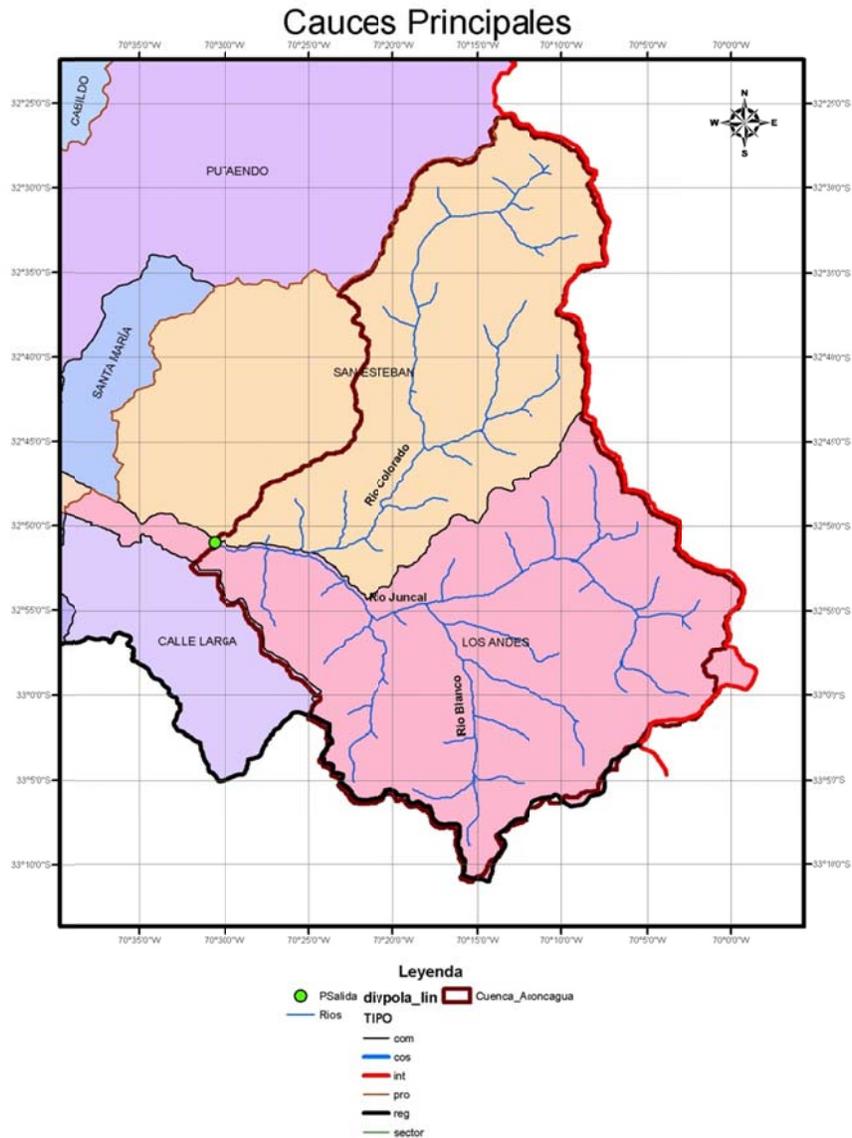


Figura 4.2.3: Cauces Principales Cuenca Aconcagua en Chacabuco

Con respecto a la red de acuíferos, estos no presentan desarrollo en la cuenca propiamente tal, sino que se forman aguas abajo del punto de salida, por lo que tampoco se tienen captaciones subterráneas. Inmediatamente aguas abajo del punto de salida de la cuenca se tiene el acuífero: “Río Aconcagua, 1ª Sección”. Para más detalle véase la Figura 4.2.4.

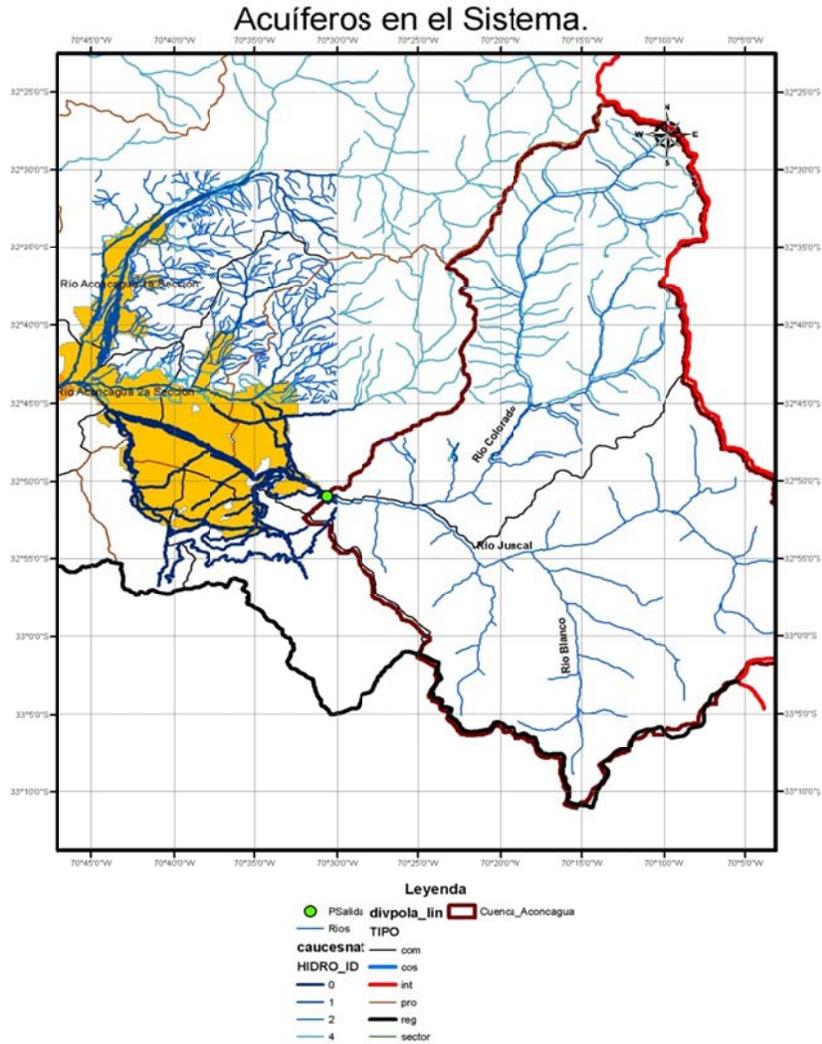


Figura 4.2.4: Acuíferos en Cuenca Aconcagua en Chacabucuito

Con respecto a los usos del suelo esta, la mayoría de los suelos de uso agrícola, o la producción agrícola comienza inmediatamente aguas abajo del punto de salida de la cuenca. Por lo que en la cuenca no se produce un uso intensivo de los recursos y la mayoría de la cubierta corresponde a matorrales y vegetación de altura. Para mayor detalle véase Figura 4.2.5.

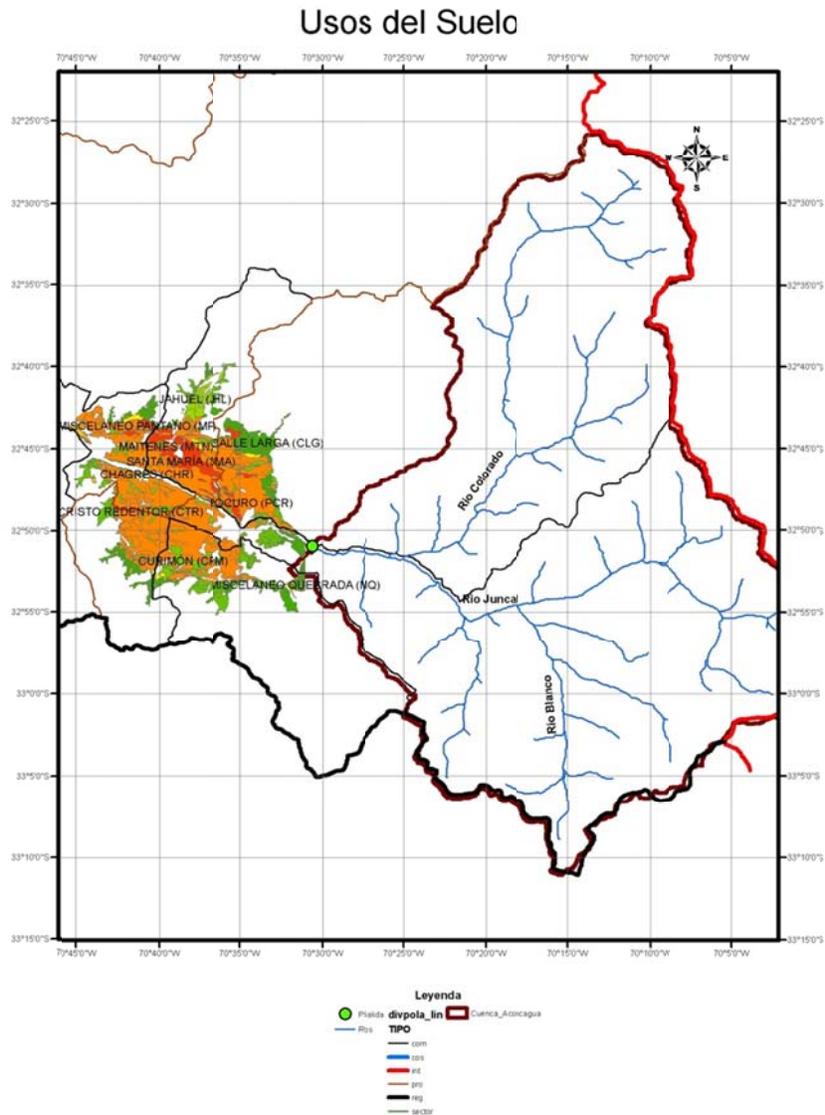


Figura 4.2.5: Usos de Suelo en Cuenca Aconcagua en Chacabuco.

Con respecto a las captaciones, derechos de agua, etc, cabe destacar que se tienen derechos superficiales que se presentan en la Figura 4.2.6, pero no se posee información sobre derechos de agua subterráneas dentro de la cuenca. Toda la información disponible ubica pozos fuera de la cuenca, lo cual ratifica el hecho de que no hay acuíferos en la cuenca, o al menos, éstos no están explotados.

Captaciones superficiales y subterráneas.

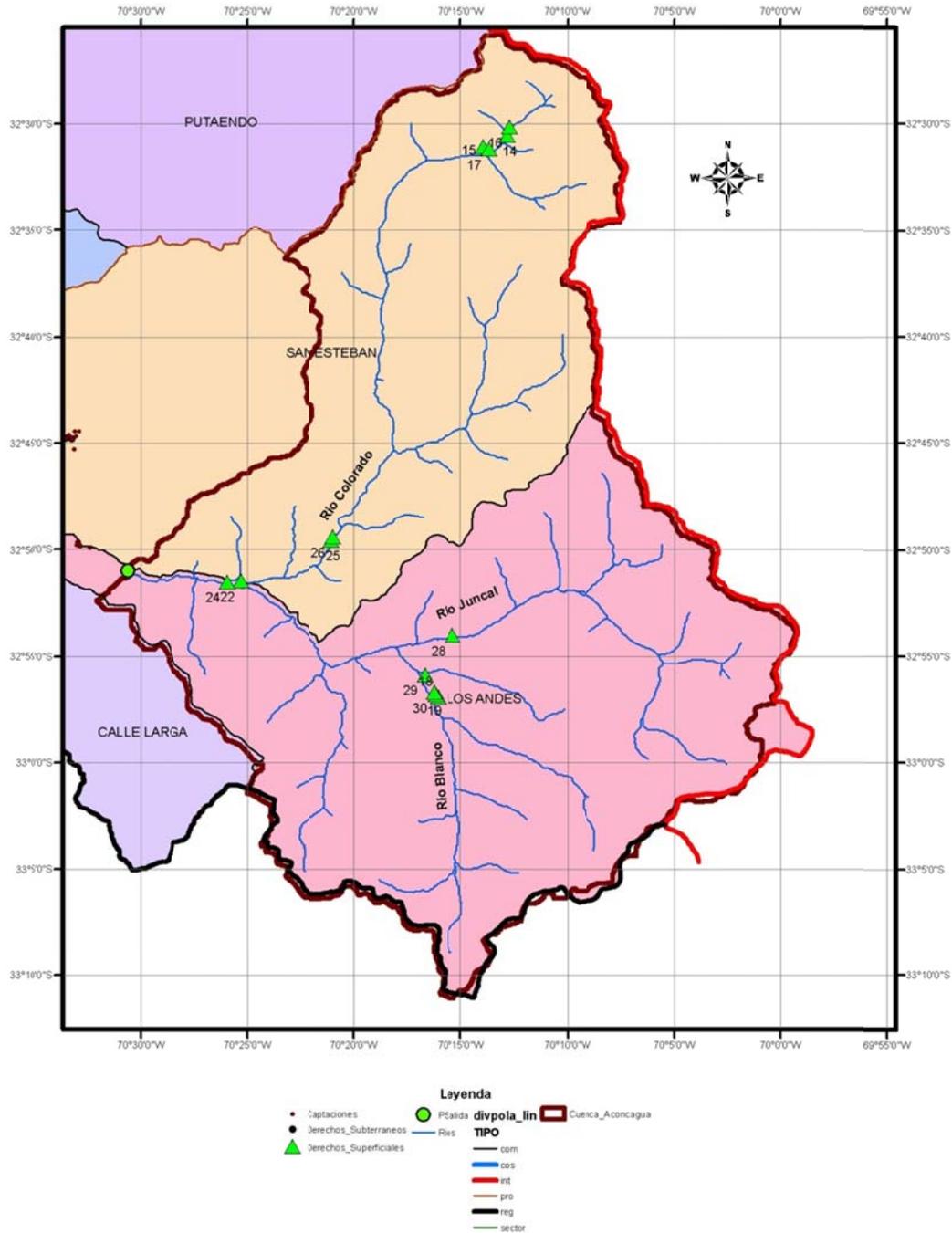


Figura 4.2.6: Captaciones Superficiales y Subterráneas en Cuenca Aconcagua en Chacabuquito.

Tabla 4.2-2: Derechos de Agua Superficiales. Cuenca Aconcagua en Chacabucuito.

ID	NORTE	ESTE	FUENTE	Q (l/s)	TIPO	EJERC.	USO	TITULAR
14	6402400	386030	Quebrada Pimentón	70			I	Cía. Minera Bernstein y Thomson Ltda.
15	6401400	384300	Estero Portillo Hondo	200			I	Cía. Minera Bernstein y Thomson Ltda.
17	6401200	384730	Río Blanco	200			I	Cía. Minera Bernstein y Thomson Ltda.
18	6353600	381500	Ríos Blanco y Los Leones	4500			I	Codelco - División Andina
19	6353800	381300	Estero Polvareda	500			I	Codelco - División Andina
22	6363500	367000	Río Aconcagua	3000	NC		I	Empresa Hidroeléctrica Guardia
24	6363400	366000	Río Aconcagua	-	NC		I	Empresa Hidroeléctrica Guardia Vieja
25	6367100	373600	Río Colorado	2000	NC	PC	I	Empresa Hidroeléctrica Guardia Vieja
26	6367400	373700	Río Colorado	2000	NC	EC	I	Empresa Hidroeléctrica Guardia Vieja
28	6359000	382500	Río Juncal	3000			I	Minera Valparaíso S.A. - Hidroeléctrica Guardia Vieja
29	6355500	380500	Río Juncal y Blanco	-			I	Minera Valparaíso S.A. - Hidroeléctrica Guardia Vieja
30	6354000	381200	Río Blanco	-	NC	EC	I	Empresa Hidroeléctrica Guardia Vieja

Las coordenadas de la Tabla 4.2-2 están referidas al huso 19 datum PSAD 1956.

Curva de Variación Estacional cuenca Aconcagua en Chacabucuito.

La cuenca posee un régimen marcado nival. En la Figura 4.2.7 se presenta la Curva de variación estacional para la estación Juncal en Juncal, ubicada aguas arriba de la estación Aconcagua en Chacabucuito. En este caso la cuenca en Chacabucuito podría presentar hasta un régimen nivo-pluvial.

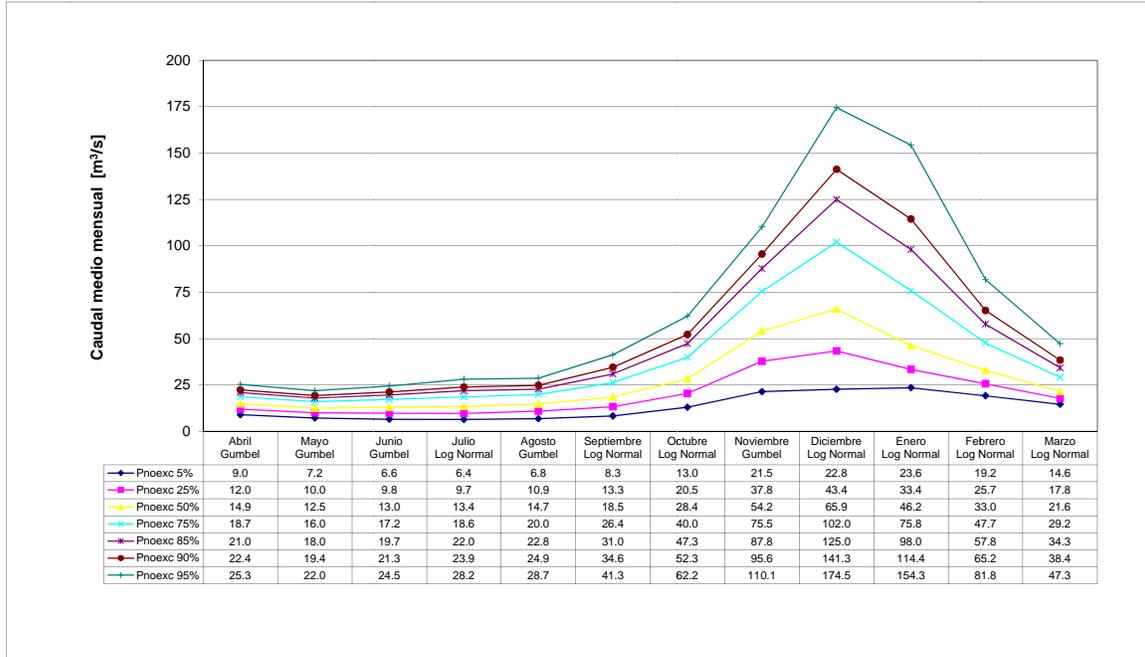


Figura 4.2.7: Curva de Variación Estacional Cuenca Aconcagua en Chacabuco.

4.2.1 Escalamiento Meteorológico Aconcagua en Chacabuco.

Ajuste de la línea base (LB).

La línea base considerada va desde el mes de Abril de 1976 hasta Marzo de 1998, tanto para la precipitación como para la temperatura. Las estaciones meteorológicas utilizadas para este ajuste y para el modelo hidrológico de la cuenca se presentan en la Tabla 4.2-3.

Tabla 4.2-3: Estaciones Hidro-Meteorológicas de la cuenca Aconcagua en Chacabuco.

Nombre	Institución Responsable	Código BNA	Periodo de registro		Latitud S	Longitud W	Altitud [m]	Tipo [Pp,T,Q,n]
			Inicio	Final				
Jahuel	DGA	05415004-0	01-abr-89	Vigente	32° 41'01	70° 35'60	1020	Pp
Vilcuya	DGA	05410006-K	01-dic-64	Vigente	32° 51'37	70° 28'19	1100	Pp
Riecillos	DGA	05403006-1	01-ago-69	Vigente	32° 55'22	70° 21'19	1290	Pp
Portillo	DGA	05401007-9	01-may-00	Vigente	32° 50'40	70°06'39	3000	Pp
Vilcuya	DGA	05410006-K	01-dic-64	Vigente	32° 51'37	70°28'19	1100	T
El Yeso	DGA	05703008-9	01-abr-62	Vigente	33°40'36	70°05'19	2475	T
Portillo	DGA	05401007-9	01-may-04	Vigente	32° 50'40	70°06'39	3000	T
El Yeso	DGA	05703008-9	01-ene-75	Vigente	33°40'36	70°05'19	2475	n
Chacabuco	DGA	05410002-7	01-sep-36	Vigente	32°51'01	70°30'34	950	Q

Precipitación.

La precipitación tuvo un tratamiento en base a gradientes altitudinales. La información de la estación Portillo fue clave en este procedimiento, pues es la única estación que posee información en altura (3000 msnm), lo que permitió ajustar el gradiente para no exagerar la cantidad de precipitación en la cuenca. Se dividió la cuenca en 2 tramos altitudinales (a los 1200 msnm), permitiendo “aplanar” el gran gradiente que se obtiene con las estaciones de menor altura. La Figura 4.2.8 presenta un esquema del gradiente mientras que en la Tabla 4.2-4 están los valores mensuales para cada tramo calculado.

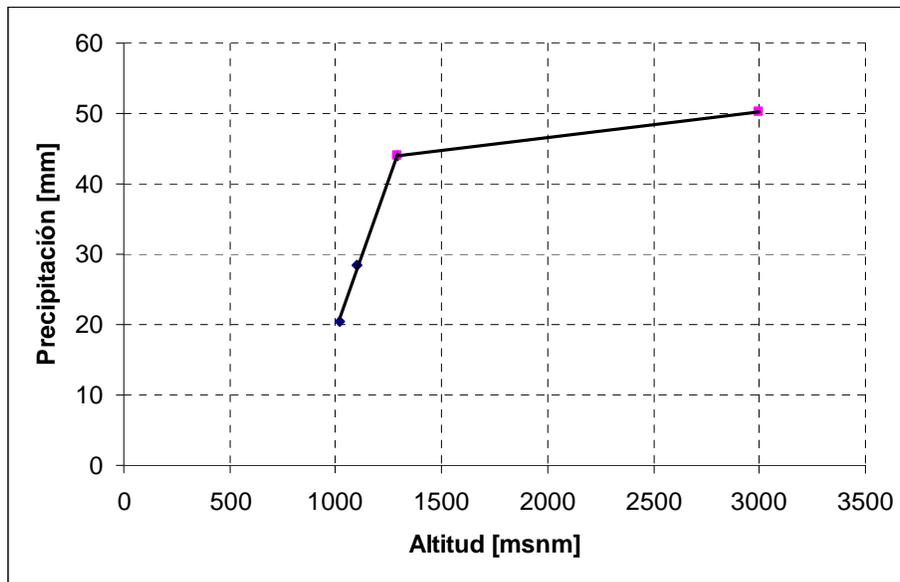


Figura 4.2.8: Gradiente de precipitación en altura para la cuenca Aconcagua en Chacabuco.

Tabla 4.2-4: Gradientes de precipitación para la cuenca Aconcagua en Chacabuco.

Mes	Tramo 1	Tramo 2
	[mm/Km]	[mm/Km]
Enero	8.0	0.6
Febrero	22.6	0.5
Marzo	17.1	0.7
Abril	52.9	1.8
Mayo	174.6	7.0
Junio	221.5	10.1
Julio	230.2	8.2
Agosto	179.0	7.2
Septiembre	48.8	5.8
Octubre	41.2	1.4
Noviembre	26.0	0.0
Diciembre	12.2	0.5

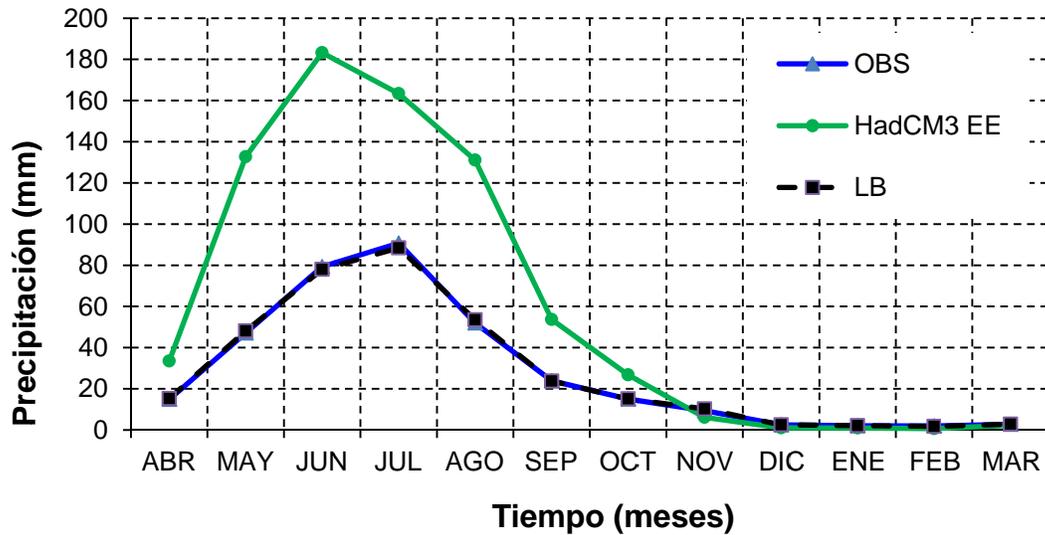


Figura 4.2.9: Ajuste de la curva de variación estacional del año promedio para Aconcagua en Chacabuquito.

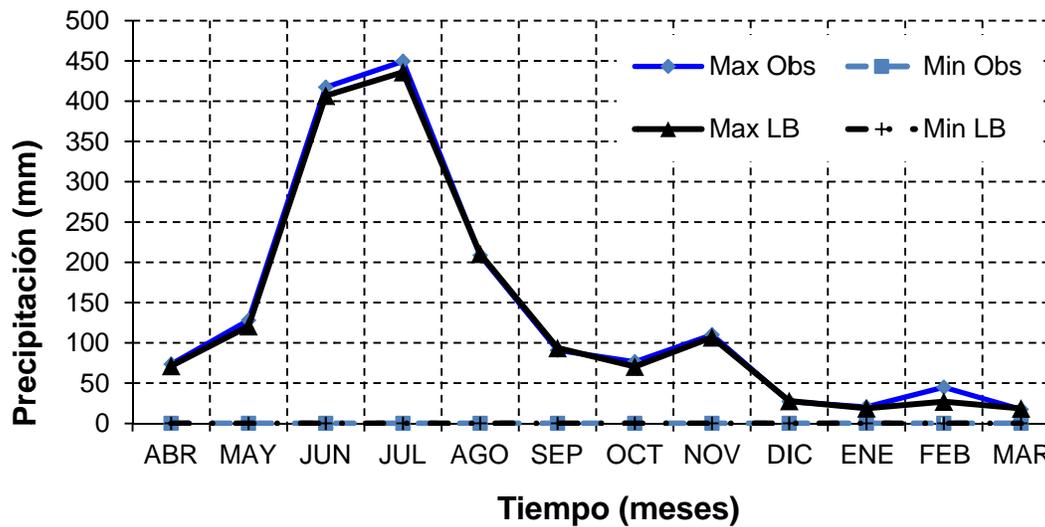


Figura 4.2.10: Representación de valores máximos y mínimos observados y corregidos HadCM3.

En la Figura 4.2.10 se puede observar el excelente ajuste que se tiene para los valores máximos y mínimos encontrados en la línea base. Sólo existe una ligera subestimación en los meses de Junio y Julio (del orden de 10 mm). La subestimación de Febrero es de menor importancia pues la cantidad de precipitación en esos meses es escasa y por ende de gran variabilidad.

Temperatura.

El ajuste del año promedio en la temperatura fue tan bueno como el visto en el de precipitaciones. Dicho ajuste puede verse en la Figura 4.2.11. El ciclo anual puede verse perfectamente representado.

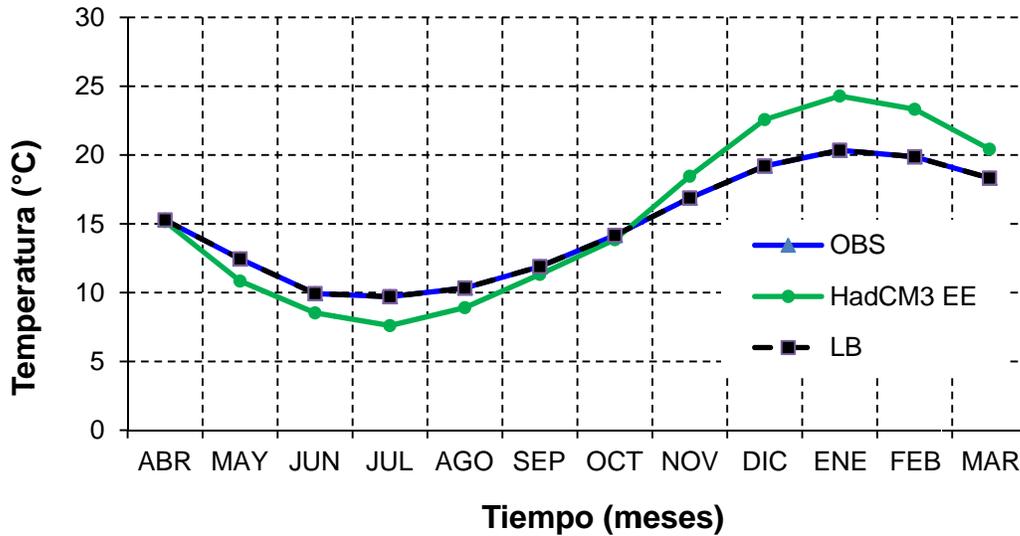


Figura 4.2.11: Curva de Temperaturas Medias Mensuales Observadas y Ajustadas HadCM3.

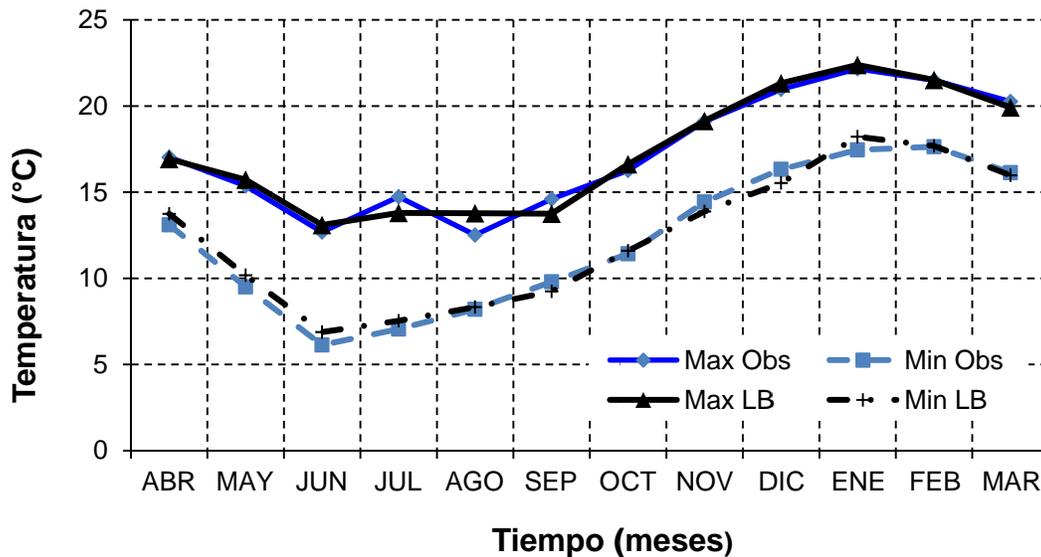


Figura 4.2.12: Temperaturas máximas y mínimas observadas y ajustadas HadCM3.

La Figura 4.2.12 muestra el grado de ajuste de las temperaturas extremas. Este ajuste puede considerarse como aceptable, las temperaturas mínimas en general presentan diferencias del orden de 0.5°C, mientras que en el caso de las máximas se observa un buen ajuste, salvo para los meses de Julio y Agosto. Sin embargo esto no representa una dificultad para el modelo hidrológico o una incertidumbre en sus resultados, puesto que las temperaturas mínimas (que finalmente definen el congelamiento para el período pluvial) están correctamente estimadas y las temperaturas de derretimiento extremas y promedio mensuales en el periodo Octubre-Marzo están correctamente estimadas.

Ajuste del escenario A2.

Precipitación

Se aplicaron las funciones de corrección encontradas en el período de línea base, pero ahora a las diferentes ventanas de tiempo analizadas. Dichos resultados se pueden apreciar en la Figura 4.2.13. Se puede destacar la disminución del “peak” de Julio en las 3 ventanas pero también el adelantamiento del “peak” de precipitaciones hacia el mes de Junio para la ventana del 2071-2098. Además la reducción ocurre prácticamente sólo en el período pluvial de la cuenca.

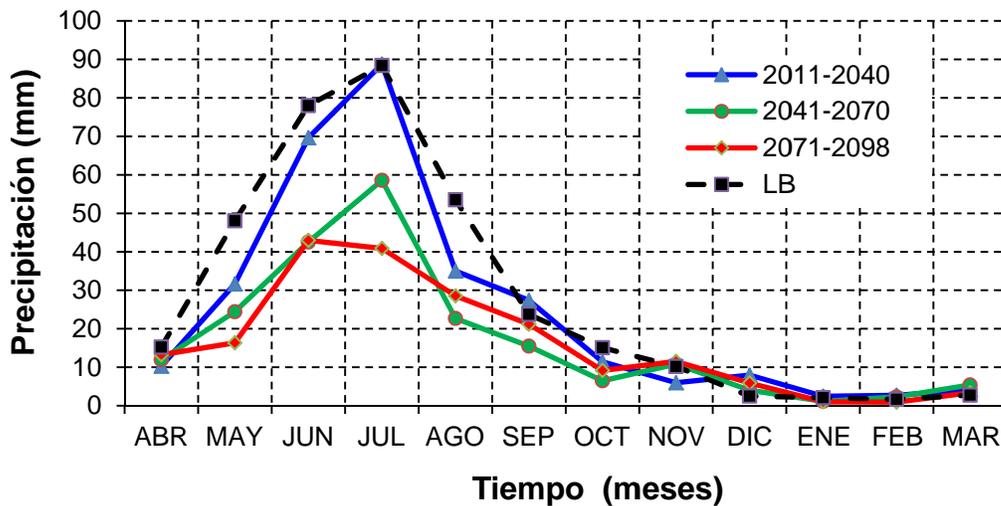


Figura 4.2.13: Variación estacional del año promedio de precipitaciones para las distintas ventanas de tiempo analizadas.

El comportamiento de la precipitación puede también entenderse con la Figura 4.2.14. En esta figura se puede apreciar que el coeficiente de variación en el período pluvial aumenta. Esto se debe a la disminución sostenida de la precipitación y el aumento de la desviación estándar por período, es decir, hay menos precipitación en el futuro, pero además aumenta el número y magnitud de eventos extremos (los valores máximos aumentan). Esta situación se revierte en el período de deshielo, en donde el coeficiente

de variación decae sostenidamente en el periodo 2011-2040, pero luego comienza a aumentar hasta recuperar parte de su variabilidad en la ventana 2070-2098, específicamente en los meses de Enero y Febrero, pero para los demás meses se mantiene menor que lo obtenido en línea base. Por esta razón la precipitación en general no varía significativamente en el período de deshielo.

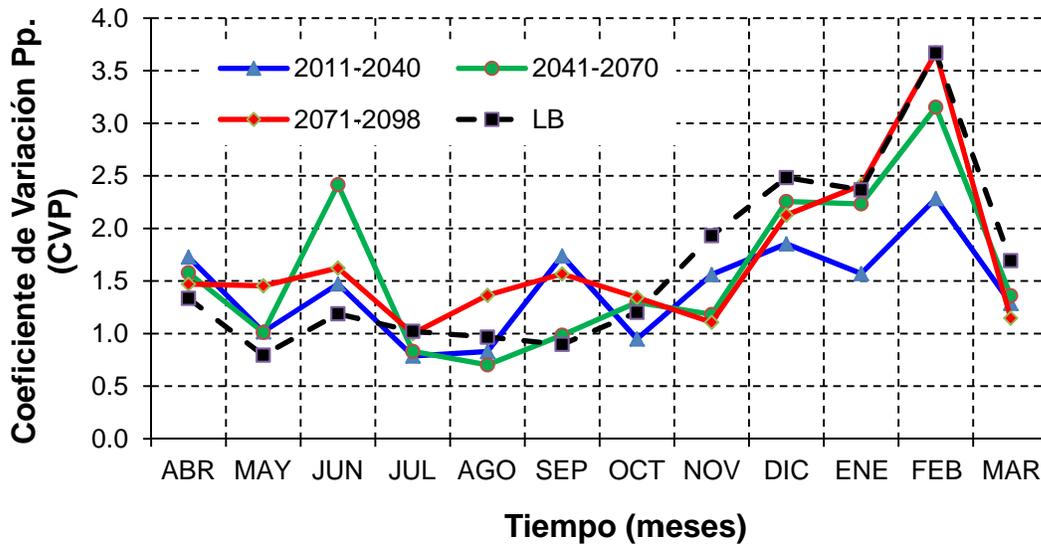


Figura 4.2.14: Coeficiente de Variación de la precipitación para las distintas ventanas de tiempo.

Finalmente la reducción de los montos de precipitación representativos de la cuenca se presenta en la Figura 4.2.15. La reducción alcanza a un 34% hacia el 2070-2098.

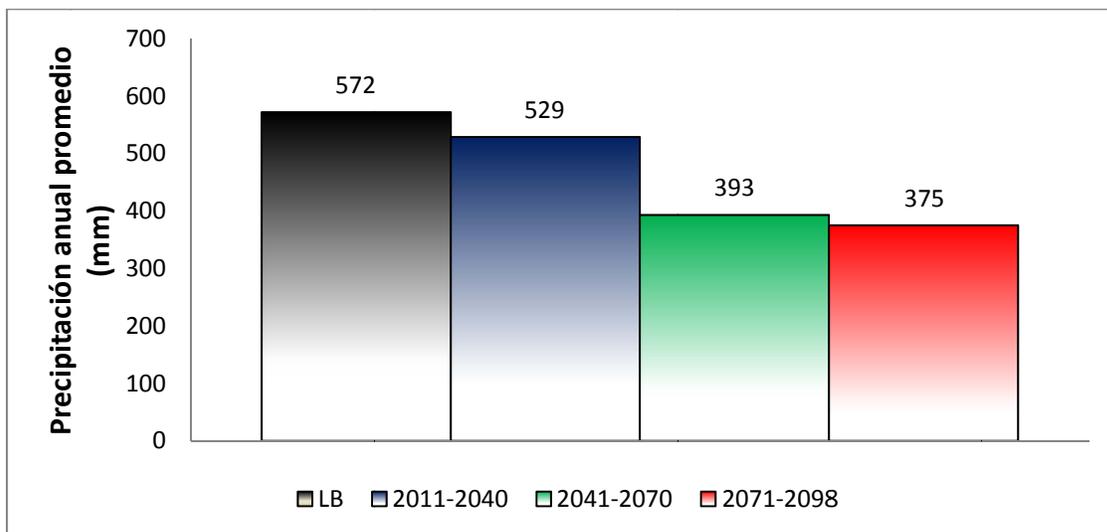


Figura 4.2.15: Precipitación representativa de la cuenca por período.

Temperatura.

El caso de la temperatura es igualmente interesante. En la Figura 4.2.16 se observa que en el período pluvial existe una disminución de la temperatura para el período pluvial para la ventana del 2011-2040 y luego se eleva la temperatura sostenidamente para las demás ventanas. Además el aumento de la temperatura está concentrado en la época de deshielo (Octubre-Marzo), con un “peak” de aumento en el mes de Enero.

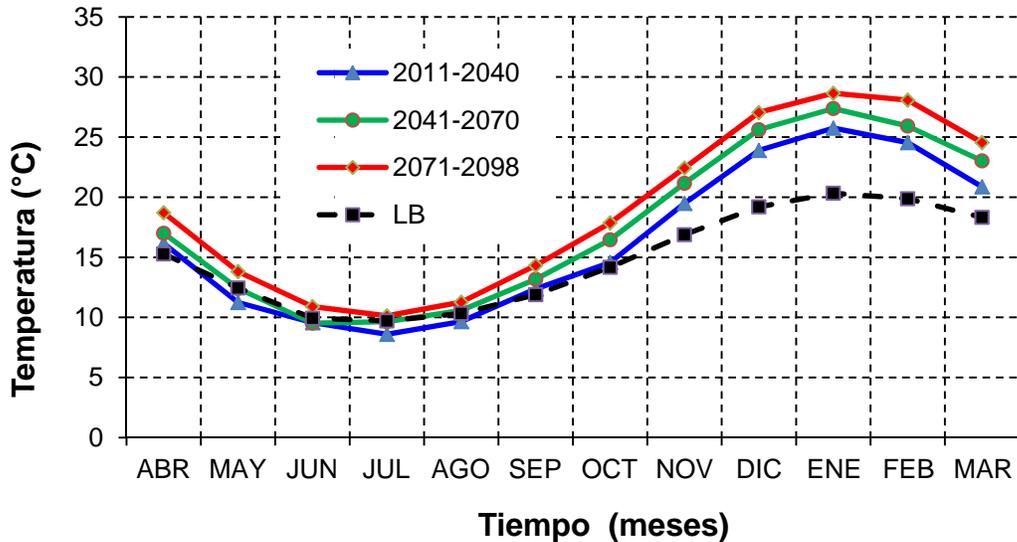


Figura 4.2.16: Temperaturas medias mensuales para los distintos períodos.

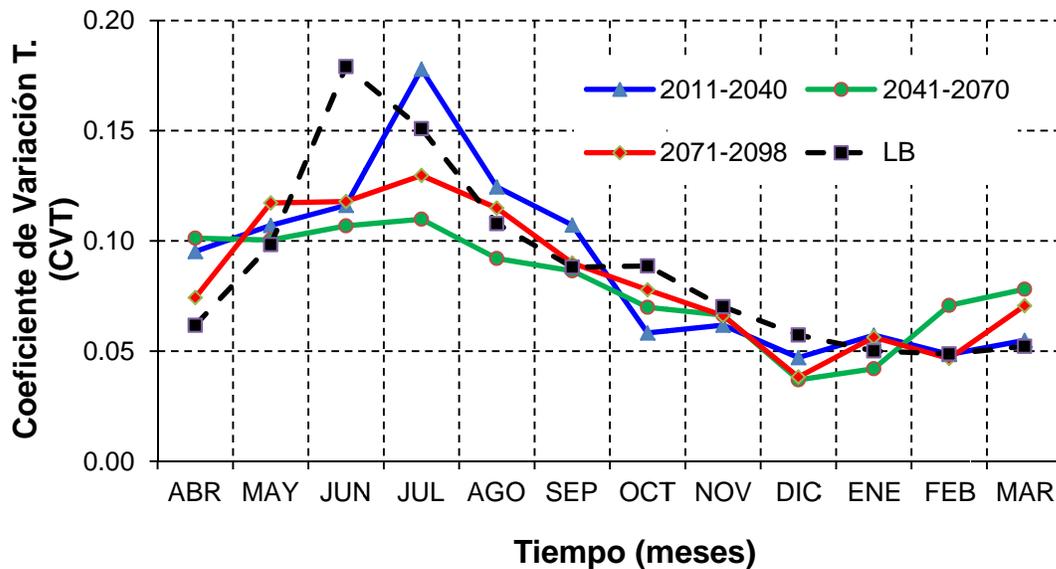


Figura 4.2.17: Coeficiente de Variación de la temperatura para las distintas ventanas de tiempo.

La Figura 4.2.17 muestra la variación estacional del coeficiente de variación. En general este disminuye para todos los períodos de tiempo, salvo para Julio – Septiembre de la ventana del 2011-2040, donde a pesar de que aumenta el valor medio de la temperatura como puede verse en la Figura 4.2.18, también lo hace la desviación estándar, lo que quiere decir que las temperaturas extremas, tanto máximos como mínimos aumentan al menos en su magnitud (temperaturas más frías y más cálidas). El aumento de temperatura representativo de la cuenca (esto es, promediado espacialmente sobre la cuenca, por el área de cada banda de elevación, al igual que en la Figura 4.2.15) alcanza los 4°C para la ventana del 2070-2098.

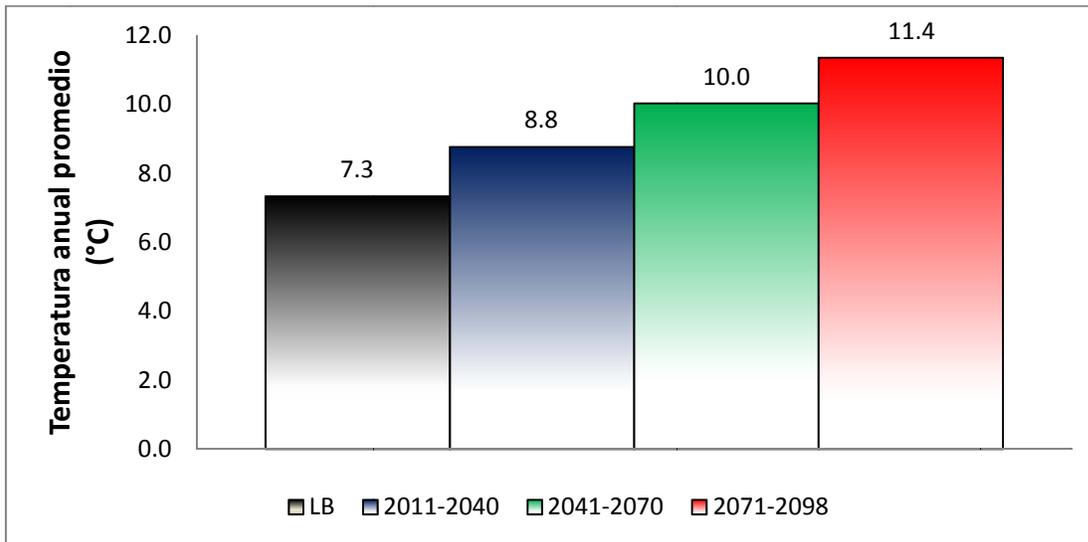


Figura 4.2.18: Temperatura promedio anual representativa de la cuenca por período de análisis.

4.2.2 Modelo Hidrológico Aconcagua en Chacabuquito.

Se realizó una modelación de la cuenca en forma de bandas. Estas bandas se separaron con un criterio conservación de rangos de elevación. En la Tabla 4.2-5/Figura 4.3.20 se muestran los principales parámetros de la cuenca y en la Tabla 4.2-6, los valores de las bandas escogidas para implementar el modelo de simulación hidrológico en WEAP.

Tabla 4.2-5: Resumen de Características cuenca Aconcagua en Chacabuquito.

Área total [Km2]	2116.0
Altura mínima [msnm]	900.0
Altura máxima [msnm]	6000.0
Desnivel [msnm]	5100.0
Ancho banda [m]	300.0
Nº bandas	17.0

Tabla 4.2-6: Bandas de Elevación adoptadas para la modelación.

Cota	Área	% Área
[msnm]	[Km²]	[%]
5700-6000	0.1	0.0
5400-5700	1.7	0.1
5100-5400	4.1	0.2
4800-5100	10.5	0.5
4500-4800	34.7	1.6
4200-4500	98.0	4.6
3900-4200	206.0	9.7
3600-3900	366.6	17.3
3300-3600	380.7	18.0
3000-3300	265.6	12.6
2700-3000	204.3	9.7
2400-2700	146.4	6.9
2100-2400	125.4	5.9
1800-2100	96.8	4.6
1500-1800	81.4	3.8
1200-1500	62.9	3.0
900-1200	31.1	1.5

Resultados calibración línea base (LB).

Como resultado de la calibración del modelo se obtuvo un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.87 para los valores mensuales y un coeficiente R^2 de 0.87 también.

La muestra el nivel de ajuste alcanzado por el modelo en el período de calibración (1976-1998). En la figura de la izquierda se presenta la bondad de ajuste a nivel mensual, esto es todos los caudales simulados y observados para un mismo mes y año de toda la serie de tiempo. En un buen ajuste la pendiente debería tener el valor de 1. En este caso se obtiene un ajuste muy bueno, con una dispersión controlada y de buena pendiente. En la figura de la derecha se representa lo mismo, pero a nivel anual, e informa de la estimación de los montos de caudal a nivel anual, que definen la disponibilidad. El ajuste también es bueno, con una ligera sobreestimación.

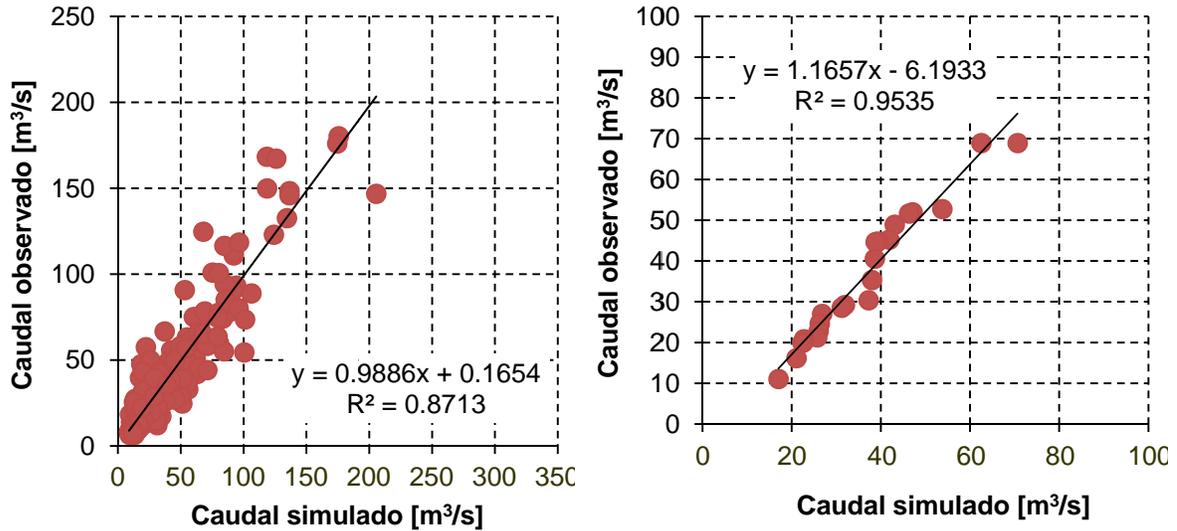


Figura 4.2.19: Resultados bondad de ajuste del modelo calibrado. Se presenta la comparación a nivel mensual (izq) y (der) a nivel anual.

El ajuste estacional del año promedio en el período de calibración puede verse en la Figura 4.2.20. En general el ajuste obtenido es bueno, con una ligera sobreestimación en el período de deshielo.

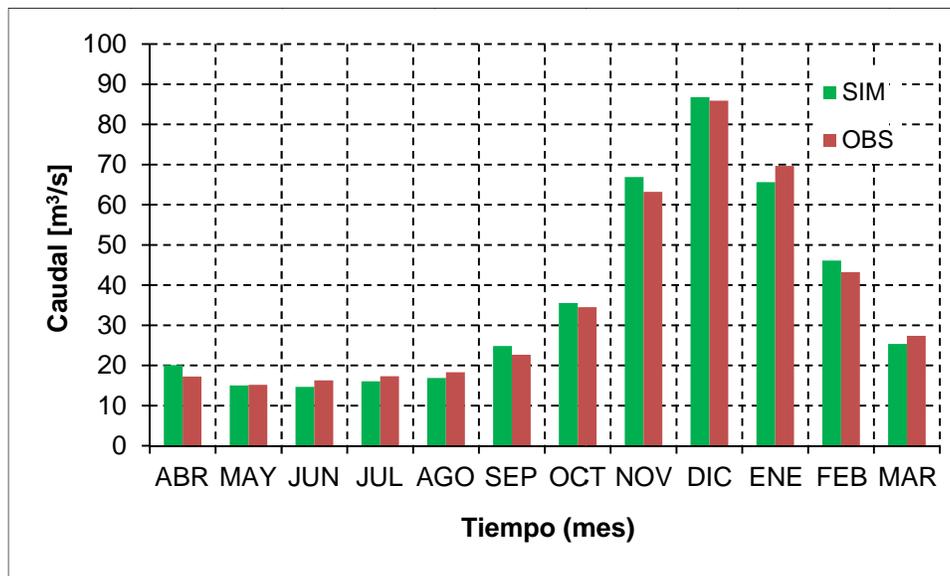


Figura 4.2.20: Caudales Medios Mensuales Observado y Simulados.

Ajuste año promedio mensual.

En la Figura 4.2.21 se puede observar la estimación de los caudales medios anuales. Esta es correctamente estimada, salvo para el año 1985-1986 y 1994-1995.

En general la estimación puede ser considerada robusta.

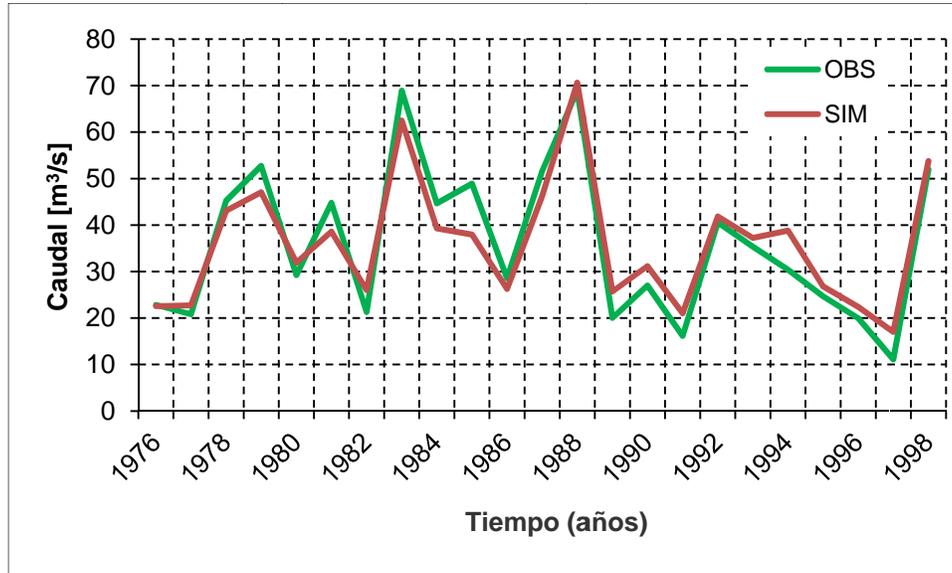


Figura 4.2.21: Serie de caudales medios anuales.

Curvas de duración mensual y anual.

La Figura 4.2.22 presenta la curva de duración de los caudales medios mensuales en el período de calibración (1976-1998). El ajuste es considerado como aceptable pese a que se observa una subestimación de los caudales asociado a las probabilidades de excedencia entre el 3% y 10%.

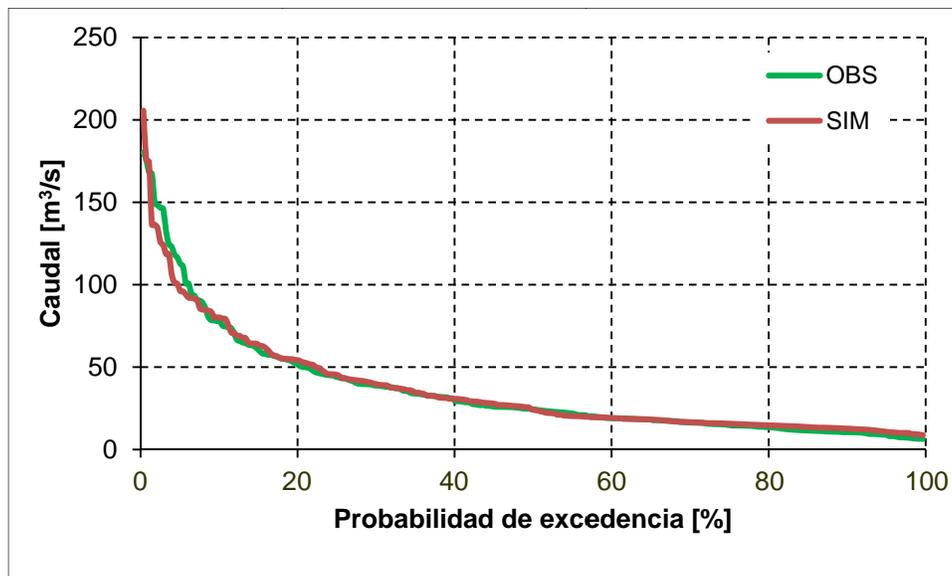


Figura 4.2.22: Curva de duración de caudales medios mensuales.

Luego de aceptar la calibración del modelo se simula con los datos de la línea base ajustada de HadCM3. En la Figura 4.2.23 puede observarse el ajuste de los caudales medios mensuales encontrados. En general se encuentra una subestimación por parte de la línea base de HadCM3, pese a conservar perfectamente la estacionalidad.

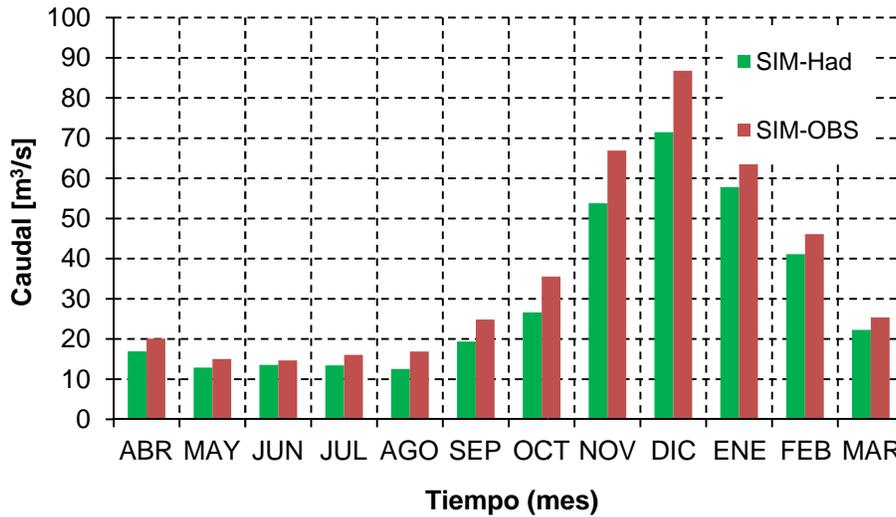


Figura 4.2.23: Resultados de los caudales simulados observados y simulados HadCM3.

Con respecto a la curva de duración ésta sub estima los valores encontrados entre el rango del 5% al 20%. Las curvas de duración anuales se separan para probabilidades del 35% al 50%, produciéndose una subestimación.

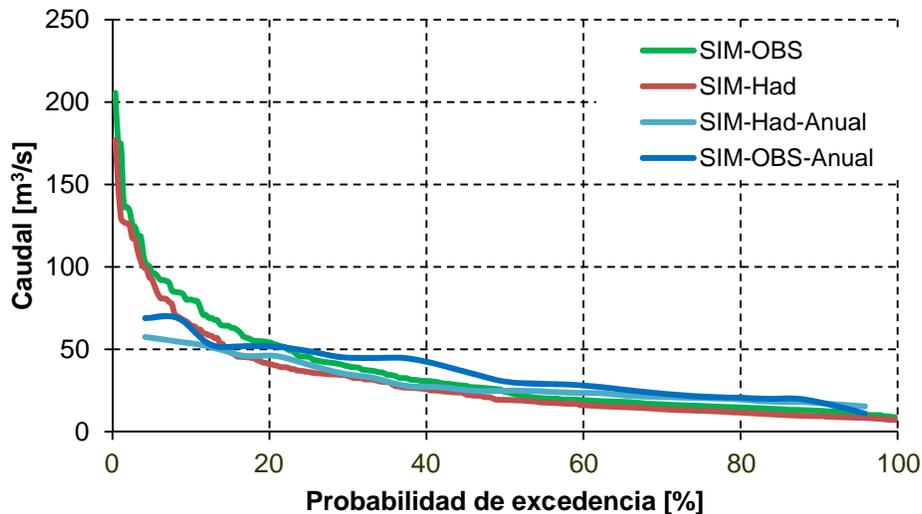


Figura 4.2.24: Curva de duración para los caudales medios mensuales y anuales en la línea base. Sistema Aconcagua.

Finalmente se presenta la Tabla 4.2-7 que establece un resumen de los resultados más importantes.

Tabla 4.2-7: Resumen de Precipitación, Temperatura y Caudal en periodo de Calibración y línea base.

Mes	Precipitación [mm]		Temperatura [°C]		Caudal [m³/s]		
	OBS	HadCM3	OBS	HadCM3	OBS	SIM_OBS	SIM_HadCM3
Abr	33.8	24.4	8.2	8.9	17.2	20.1	16.9
May	94.7	89.5	3.3	4.5	15.1	15.0	12.9
Jun	145.8	138.7	1.1	1.4	16.3	14.6	13.5
Jul	180.0	140.6	0.3	1.2	17.3	16.0	13.4
Ago	101.1	79.8	0.8	1.6	18.3	16.9	12.5
Sep	43.2	38.3	3.2	4.2	22.6	24.8	19.4
Oct	25.2	25.7	4.9	6.0	34.5	35.5	26.6
Nov	14.0	18.5	8.0	9.0	63.2	66.9	53.8
Dic	3.8	4.4	11.6	12.3	85.9	86.8	71.5
Ene	4.5	4.4	12.9	13.7	69.7	65.6	57.8
Feb	4.4	2.0	12.6	13.3	43.2	46.1	41.1
Mar	6.2	5.2	10.9	11.7	27.4	25.3	22.3
Anual	656.7	571.6	6.5	7.3	35.9	36.1	30.1

Resultados escenario A2.

Las variables escaladas temporalmente, para los periodos futuros, precipitación, temperatura y radiación, aplicadas en el modelo hidrológico permiten obtener las series de caudales futuros. De esta manera se construyen las curvas de caudales medios mensuales para los distintos horizontes.

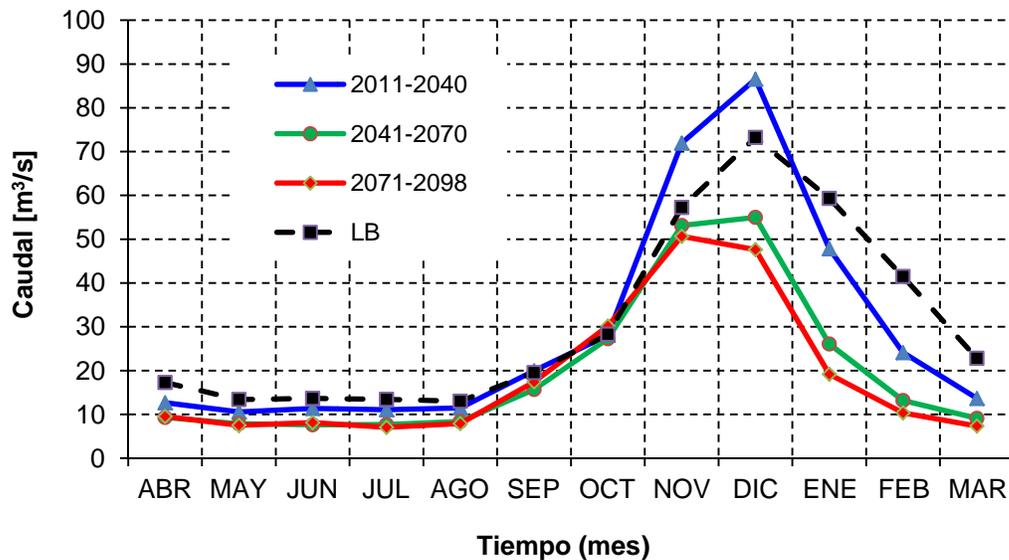


Figura 4.2.25: Caudales para el año promedio en el escenario A2 para el sistema Aconcagua.

La Figura 4.2.25 presenta los resultados de la variación estacional de los caudales para las distintas ventanas de tiempo. En el período 2010-2040 se presenta un fenómeno muy interesante que está relacionado con el comportamiento de la precipitación y temperatura en la etapa del escalamiento. Se observa un aumento del caudal de deshielo pero también una recesión más severa, lo que hace que en términos de volumen no haya grandes cambios. Los caudales del período pluvial disminuyen en general, pero en el futuro se observa que los caudales de deshielo disminuyen severamente, encontrándose incluso que para la ventana del 2070-2098 existe un adelantamiento del “peak” al mes de Noviembre.

Los caudales anuales presentados en la Figura 4.2.26 muestra una clara tendencia al descenso, pero también una pérdida en cuanto a la variabilidad, principalmente si se compara con el período 2010-2040, la frecuencia de eventos extremos disminuye, pero los que ocurren son más intensos, haciendo que el año más seco y húmedo disminuyan y aumenten respectivamente en magnitud.

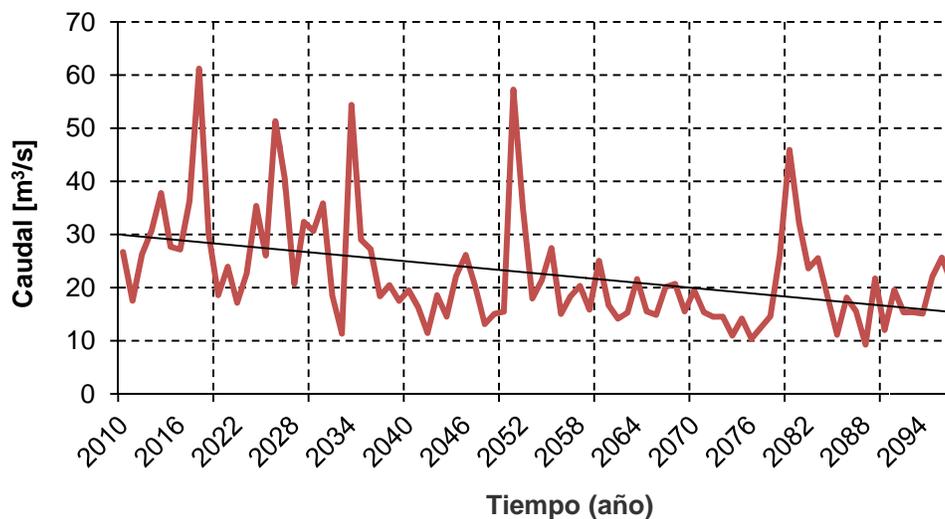


Figura 4.2.26: Caudales Anuales en el escenario A2 para el sistema Aconcagua.

Por otra parte la variabilidad de los caudales, vista en la Figura 4.2.27, tiende a disminuir con respecto a la línea base, pero conforme avanza el tiempo existe una recuperación de la variabilidad, que se observa en la ventana del 2070-2098, sin embargo la magnitud de los caudales ya ha disminuido bastante.

Finalmente se presenta un resumen los resultados encontrados en la Tabla 4.2-8. Aquí se puede destacar el alto porcentaje de reducción de caudal (43%) como un valor a tratar de revisar. Sin duda que el efecto de la temperatura hace que el derretimiento de las altas cumbres ocurra en los períodos anteriores dejando la ventana del futuro lejano muy mermada en cuanto a recursos.

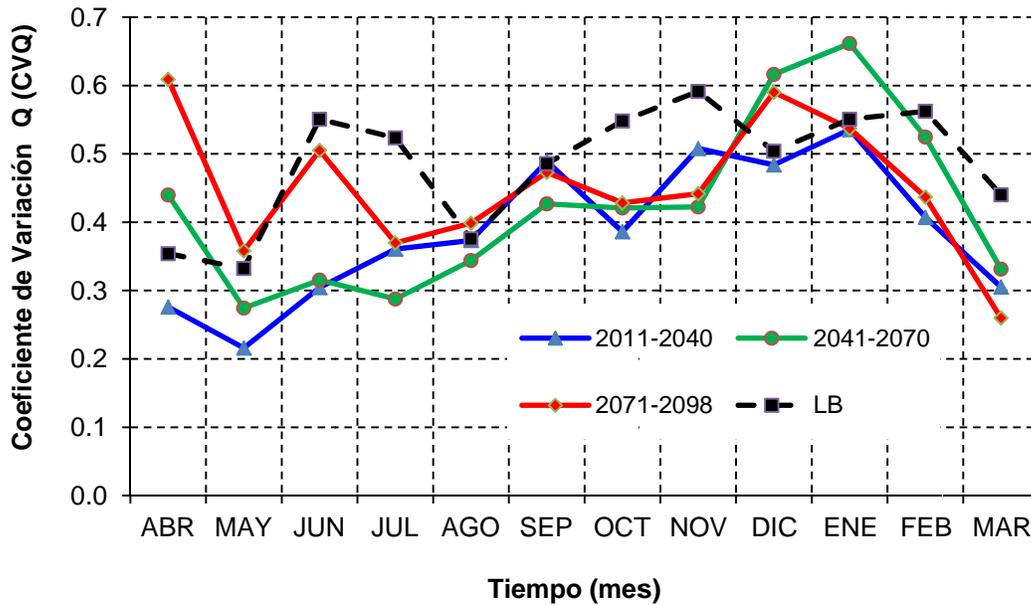


Figura 4.2.27: Coeficientes de variación de caudal en el escenario A2 para el sistema Aconcagua.

Tabla 4.2-8: Resumen de los resultados futuros para el sistema Aconcagua.

Período	Caudal [m ³ /s]	Variación [%]	Precipitación [mm]	Variación [%]	Temperatura [°C]	Variación [°C]	Q/Pp [mm/mm]
LB	28		572		7.3		0.72
2011-2040	29	20.1	529	-7.5	8.8	1.4	0.82
2041-2070	20	32.3	393	-31.3	10.0	2.7	0.76
2070-2098	19	43.5	375	-34.4	11.4	4.0	0.74

4.2.3 Variación del estrés hídrico.

EN PROCESO.

Probabilidad del 75%

Probabilidad del 85%

Probabilidad del 95%

4.2.4 Comentarios.

Como comentario puede destacarse lo complejo que fue el escalamiento meteorológico fue bastante complejo. Los resultados en general deben observarse con cautela, dado que se conoce que existe una subestimación en la línea base de alrededor de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ promedio. Sin embargo los resultados tanto en precipitación y temperatura son sólidos, por lo que los cambios de estacionalidad encontrados en el caudal son robustos, aunque el porcentaje de reducción podría ser un poco menos severo, pero igualmente la reducción estaría enmarcada dentro de un rango entre el 35 al 40%, lo que la hace muy significativa para una cuenca que representa la disponibilidad u oferta hídrica de un valle dedicado a la agricultura en base a riego.

En general, los resultados de la calibración son muy satisfactorios y los resultados para el escenario A2 se corresponden con lo que ocurre para la precipitación y temperatura en cuanto a variabilidad y estacionalidad, dado que un aumento sostenido de la temperatura (4°C) cambia claramente, con un adelantamiento en este caso, la estacionalidad del “peak” de caudales. El porcentaje de reducción de caudales va de mano con el observado en la precipitación para la ventana del 2040-2070, pero para la ventana cercana, para una reducción en precipitación del 7.5%, se obtiene una reducción en caudal del 20% y al revés de esta situación, para una reducción del 34% de precipitación en el 2070-2098, la reducción es del orden del 40%, esto se debe principalmente a que la misma cuenca se adapta y se vuelve más eficiente en su uso, basta con mirar las elasticidades del caudal con la precipitación, que pasa de un valor de 0.82 en la ventana del 2011-2040, hacia un valor de 0.74 en la ventana del 2070-2098.

4.3 Cuenca del río Teno.

La cuenca “río Teno después de junta con río Claro” se encuentra al noreste de la ciudad de Curicó, Séptima Región del Maule, Chile. Su punto de salida se ubica en la localidad de Los Queñes específicamente en la Estación de medición “Río Teno después de junta con río Claro”. Las coordenadas del punto de salida de la cuenca son $34^\circ 59'$ Lat Sur y $70^\circ 49'$ Long. Oeste (Datum psad56). La cuenca forma parte de la comuna de Romeral tal como se indica en la Figura 4.3.1.

Ubicación General

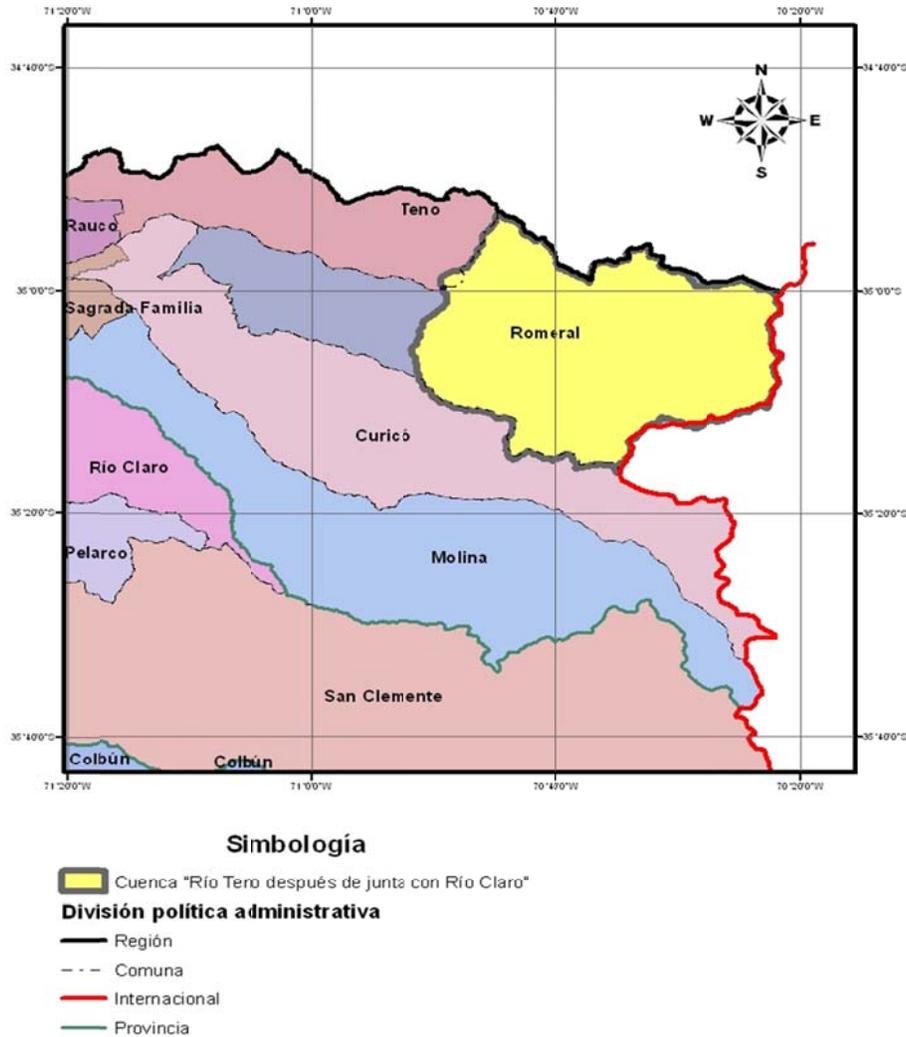


Figura 4.3.1: Mapa Político Administrativo de la cuenca Teno después de Junta con Claro

La cuenca fue delimitada con WMS y los respectivos DEMS del USGS. Tiene un valor de 1200 km².

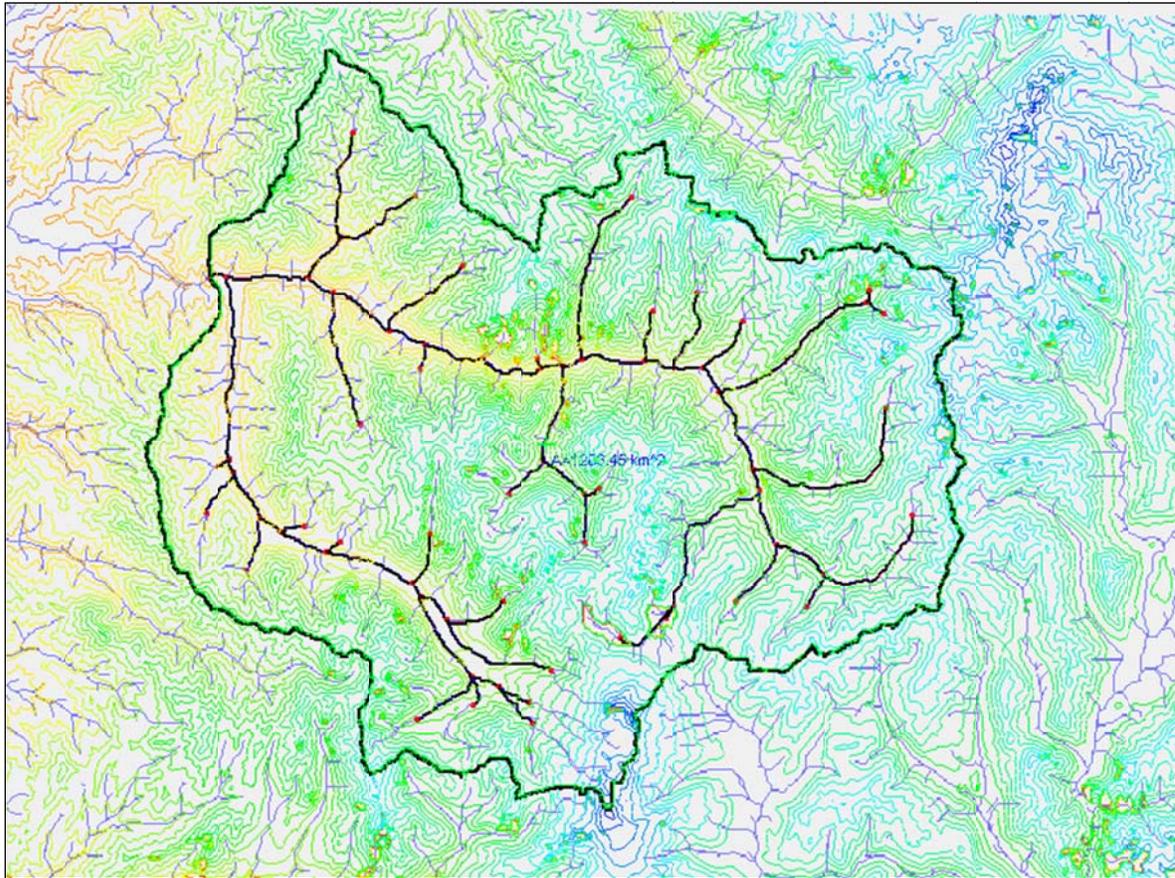


Figura 4.3.2: Delimitación cuenca río Teno después de junta con Claro.

La característica climática que predomina en la Región del Maule es del tipo mediterráneo, con algunas variaciones derivadas del aumento de latitud y altitud. Así, se distinguen cuatro tipos de climas de los cuales dos afectan a la cuenca los cuales son clima templado-frío correspondiente a las partes de la Cordillera de los Andes y clima templado correspondiente a precordillera. La temperatura media anual es de 19° C, con una máxima de 30° C y una mínima de 7° C. El período seco es de seis meses. (Geografía física de la Séptima Región del Maule). En este caso correspondería más al clima templado de precordillera.

En la cuenca se distinguen distintos sectores agroclimáticos. Éstos se detallan en la Figura 4.3.3

Mapa Agroclimático

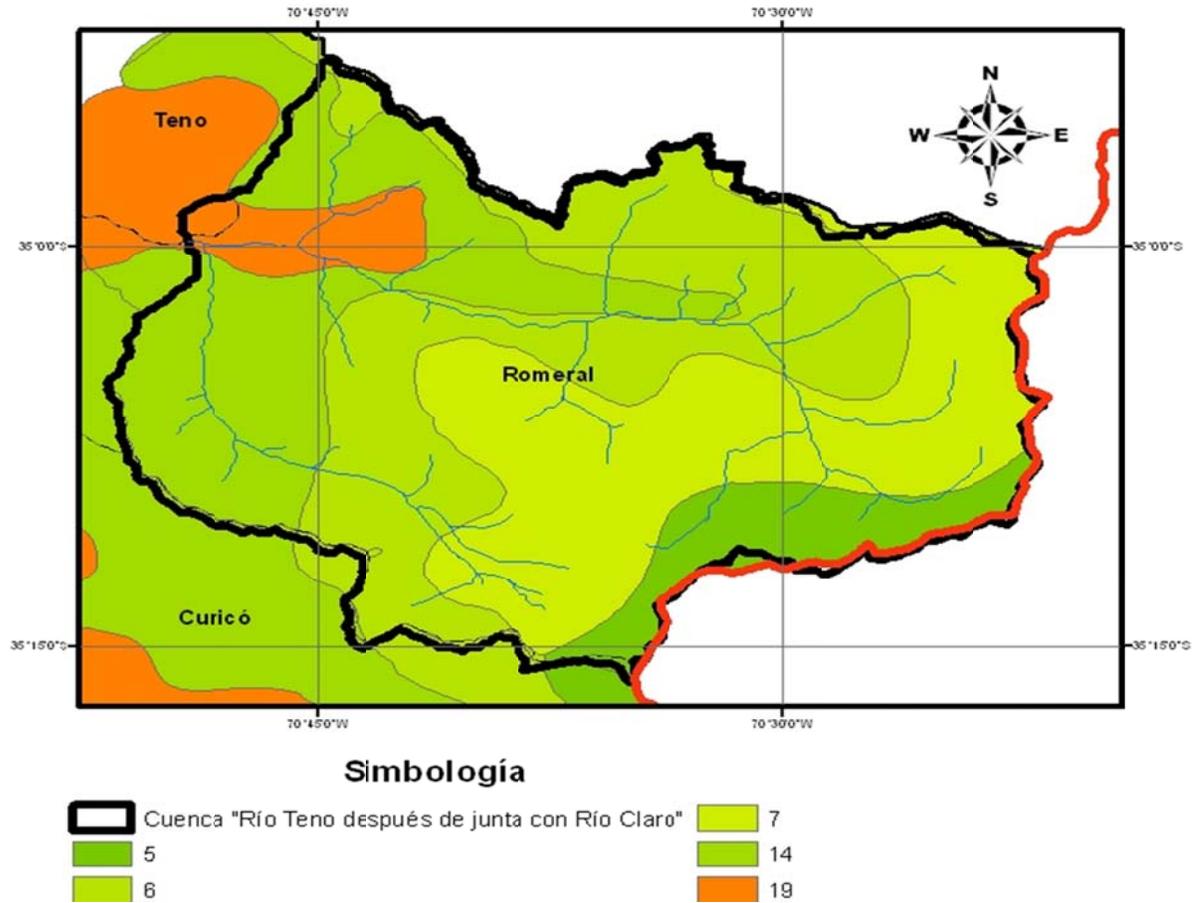
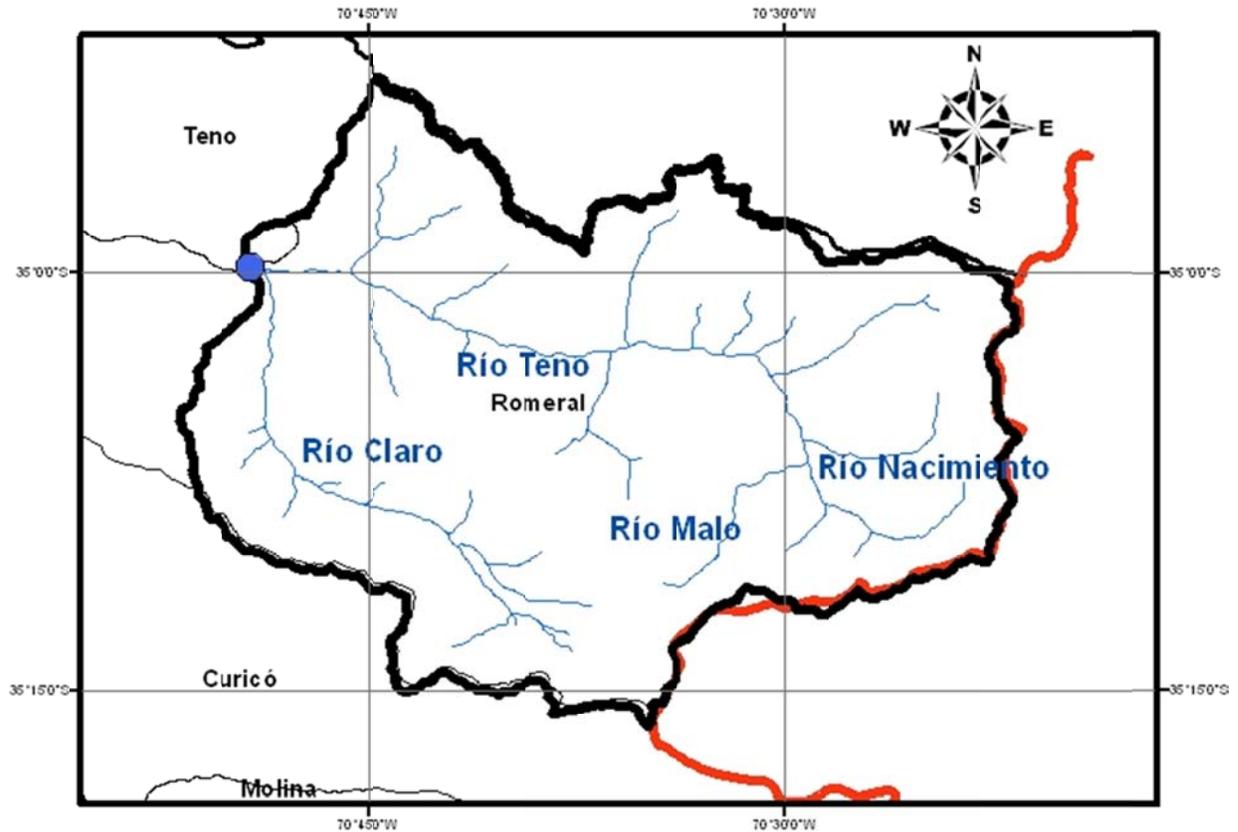


Figura 4.3.3: Mapa Agroclimático Cuenca Teno después de Junta con Claro

Con respecto a los cauces principales cabe destacar que el río Teno se forma de la confluencia de los ríos del Nacimiento y Malo. El río Malo nace de las dos lagunas de Teno, situadas al norte del volcán Planchón. El río nacimiento nace cerca de la frontera con Argentina. Para más detalle véase la Figura 4.3.4

Cauces Principales



Simbología

- Cuenca "Río Teno después de junta con Río Claro"
- Punto salida de cuenca Río Teno Después de junta con Río Claro
- Cauces

Figura 4.3.4: Cauces Principales en Cuenca Teno después de Junta con Claro

El más importante tributario por el sur es el Claro, que se le une en Los Queñes, a unos 30 km del nacimiento, el cual ocurre en la zona englaciada del volcán Planchón. (Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. CADE-IDEPE, Diciembre 2004.)

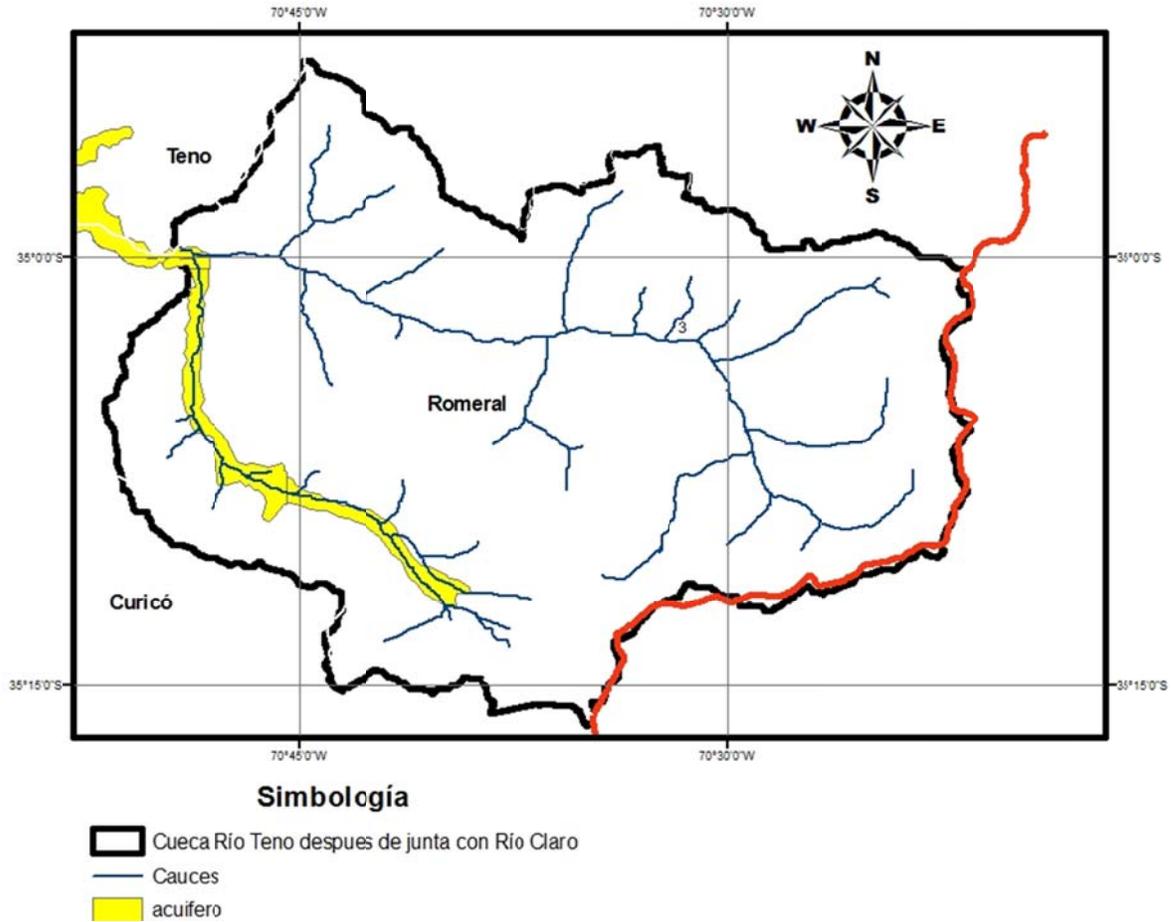
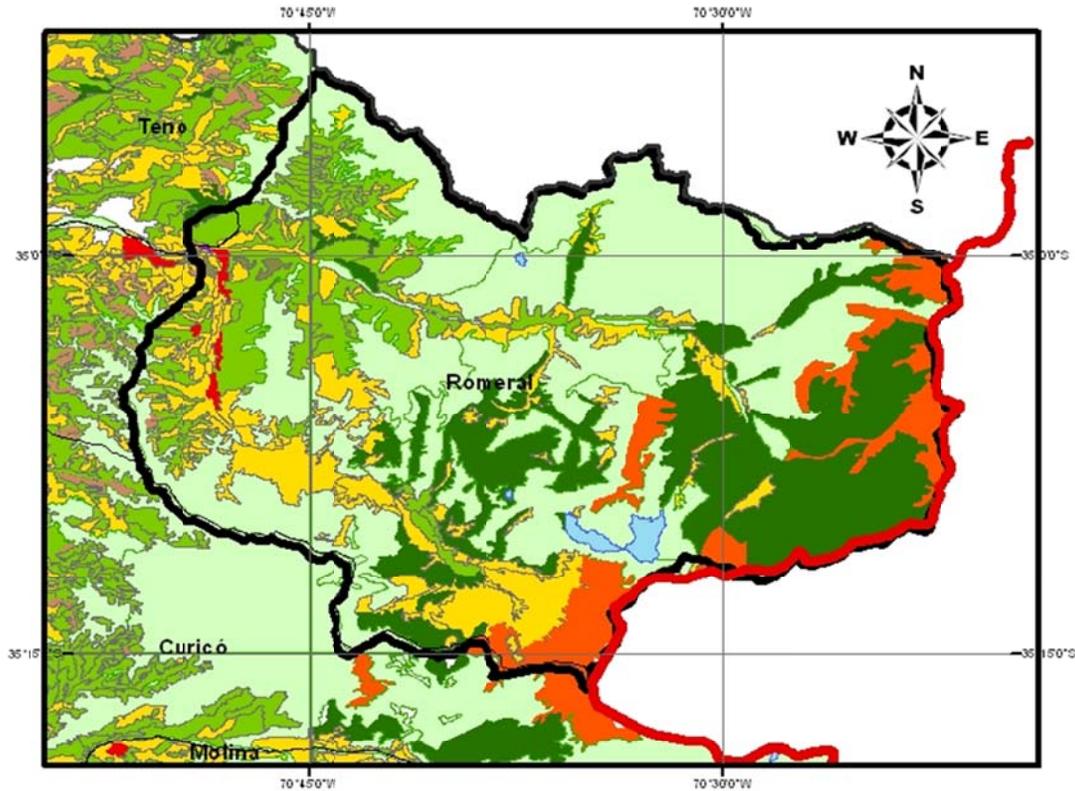


Figura 4.3.5: Acuíferos en Cuenca Teno después de Junta con Claro

Los suelos de la cuenca han sido explotados en las laderas del Río Claro por medio de la rotación cultivo-pradera (datos SIG CNR), estas áreas de cultivo son despreciables en términos de las demandas de agua para la modelación del sistema completo. Como se puede apreciar en la figura la mayor parte de la cuenca está formada por zonas desprovistas de vegetación y praderas y glaciales.

Usos de Suelo



Simbología

	Cuenca "Río Teno después de junta con Río Claro"		MATORRAL
	AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION		MATORRAL-PRADERA
	BOSQUE NATIVO		NIEVES Y GLACIARES
	BOSQUES PLANTACIONES		PRADERAS
	CIUDADES-PUEBLOS-ZONAS INDUSTRIALES		ROTACION CULTIVO-PRADERA
	CUERPOS DE AGUA		

Figura 4.3.6: Usos de Suelo en Cuenca Teno después de Junta con Claro

La localidad de Los Queñes extrae aguas del acuífero "Ríos Teno Lontue" para abastecer la demanda de consumo. En las riberas del río Claro se capta agua para riego. (SIG CNR), Dicha bocatoma se denomina "El Peñón".

Esta bocatoma está ubicada en las siguientes coordenadas:

Norte: 6121492 m Este: 335256 m
 Huso: 19 Hora 14:30
 Datum: SAM-56 Carta IGM Escala 1:50.000 Estero Upeo
 Fecha: 37/08/99
 Y capta un caudal nominal de 400 l/s equivalente a 20 acc.

Captaciones Superficiales y Subterráneas

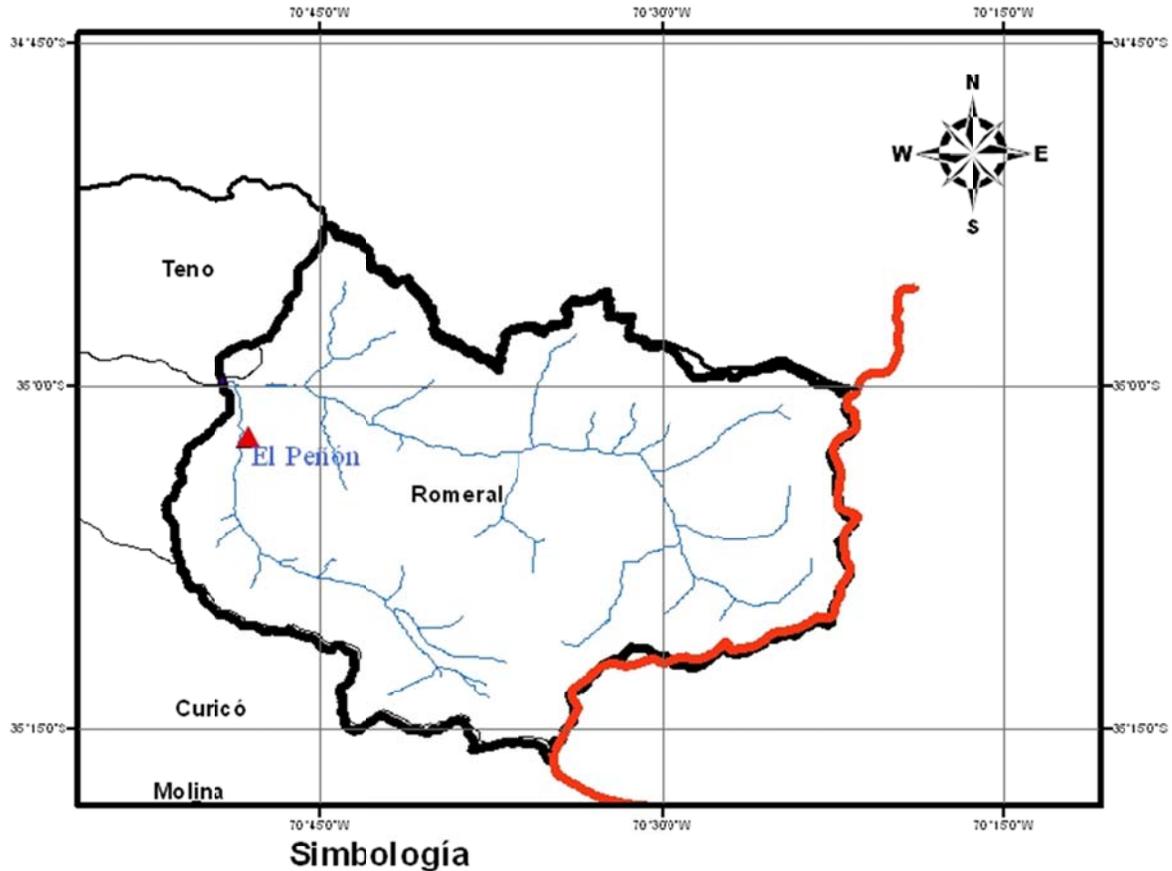


Figura 4.3.7: Captaciones Superficiales y Subterráneas en Cuenca Teno después de Junta con Claro

Curva de Variación Estacional Río Teno después de junta con Claro.

La construcción de la Curva de Variación Estacional (CVE) se realizó a partir de datos medidos en la estación fluviométrica "Río Teno después de Junta con Río Claro", previamente corregidos y completados, desde el año 1961 a 2007.

Se consideró que la cuenca se encuentra en régimen natural dado que la demanda que tiene asociada en los ríos Teno y Claro son muy inferiores en comparación al caudal que lleva el río en todo el año.

Para el detalle del análisis de esta cuenca en particular se puede consultar: "Análisis de los efectos de los cambios climáticos globales sobre los regimenes de caudales en las cuencas de Chile Central" (Molina S., 2007).

En base de los análisis de frecuencia calculados y el test chi cuadrado, se eligió la distribución de mejor ajuste, se obtuvieron los caudales versus su probabilidad de no excedencia asociada.

A partir de las CVE se determinó que el régimen de la cuenca estudiada es nivo-pluvial, es decir, los máximos caudales medios mensuales se presentan en el periodo de deshielo entre los meses de Octubre y Marzo.

A continuación se presenta CVE de caudales medios de la cuenca “Río Teno después de junta con Río Claro”.

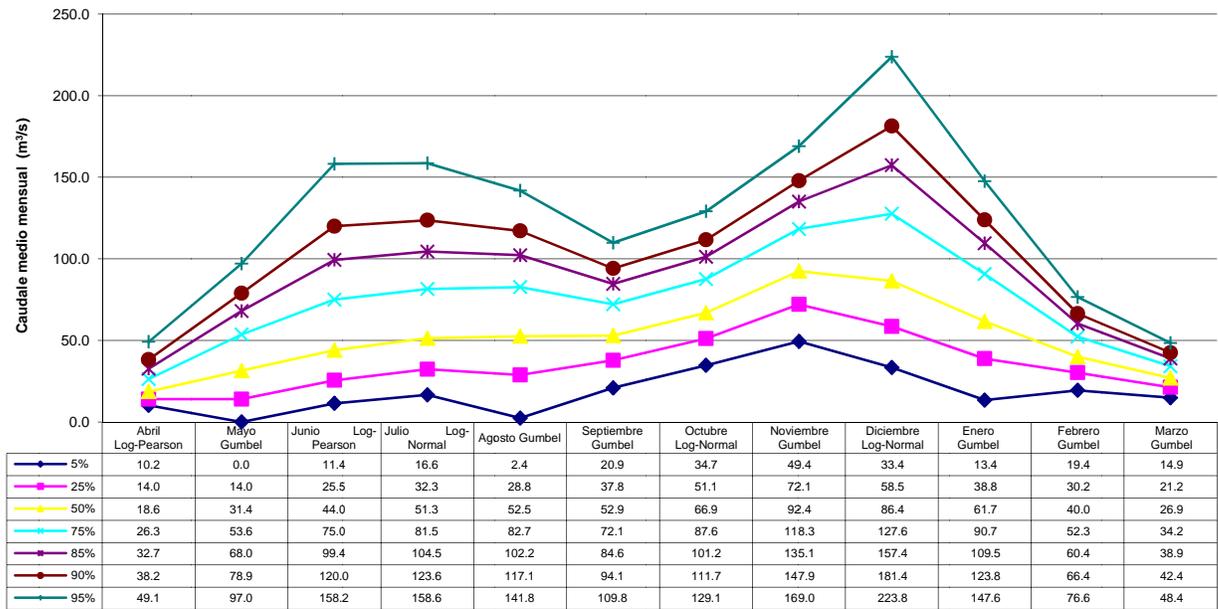


Figura 4.3.8: Curva de Variación Estacional para la cuenca río Teno en junta con Claro.

4.3.1 Escalamiento Meteorológico del río Teno.

Ajuste de la línea base (LB).

El periodo línea base estudiado corresponde al los años comprendidos entre 1968 y 1998 para precipitación y entre 1971 y 1998 para la temperatura. En la

Tabla 4.3-1 se muestran las estaciones utilizadas para desarrollar el presente estudio de la Cuenca del Río Teno.

Tabla 4.3-1: Estaciones Hidro-Meteorológicas de la Cuenca Río Teno.

Nombre	Institución	Código BNA	Periodo de registr		Latitud S	Longitud W	Altitud [m]	Tipo [Pp,T,Q]
			Inicio	Final				
Los Queñes	DGA	09130001-K	01/11/87	Vigente	38° 41'	72° 00'	500	Pp
R. Teno despues de Junta R. Claro	DGA	09122001-6	01/03/70	Vigente	38° 26'	71° 54'	500	Pp,Q
Convento Viejo	DGA	08350002-6	01/10/55	Vigente	38° 13'	71° 49'	830	T
Termas del Flaco	DGA	09104003-4	01/05/84	Vigente	38° 14'	72° 20'	350	T

Para obtener información sobre el gradiente de precipitación que fuera representativa de toda la cuenca se analizaron las isoyetas de precipitación anual presentadas por el Balance Hídrico DGA (1987). Según puntos del interior de la cuenca se obtuvo el gráfico presentado en la Figura 4.3.9.

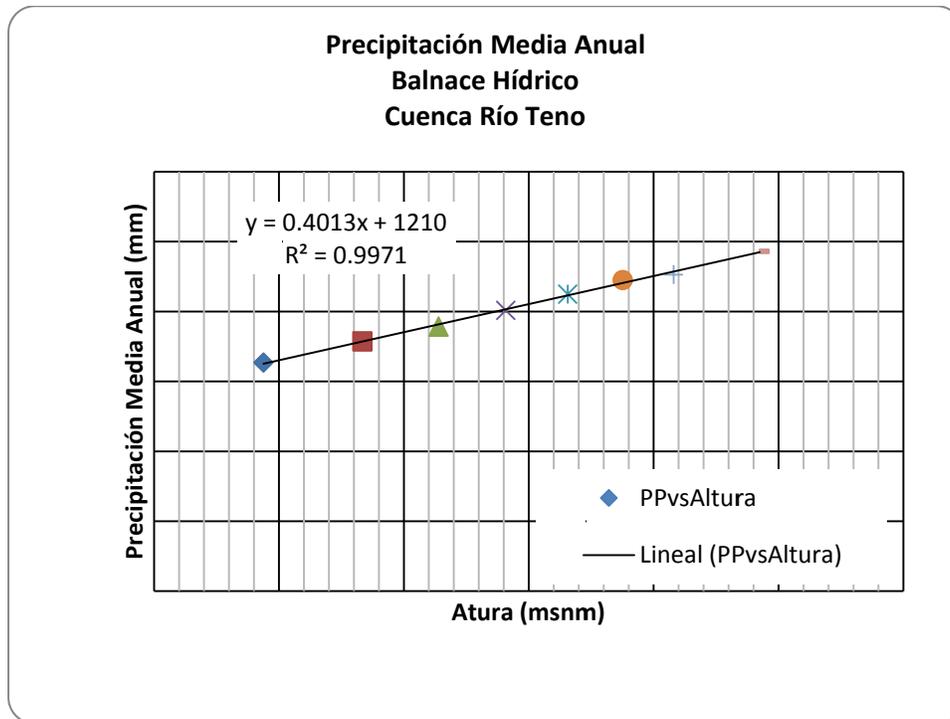


Figura 4.3.9: Gradiente de Precipitación obtenido del Balance Hídrico

En la Figura 4.3.9 se observa un gradiente de 40 mm/100 m promedio para toda la cuenca.

Según la información obtenida de la estación Convento Viejo y Termas el Flaco se obtuvo un gradiente de temperatura representativo de la zona ubicada entre las cotas 350 y 830 msnm, no se utilizó la información del Balance Hídrico debido a que en la parte más alta presenta valores de 4º C anual, lo que se contradice con la presencia de

nieve en la zona. En la Tabla 4.3-2 se muestra el gradiente mensual representativo de la parte baja de la cuenca.

Tabla 4.3-2: Gradiente de Temperatura para la cuenca del Río Teno.

Mes	Gradiente [°C/Km]
Enero	3.3
Febrero	3.0
Marzo	2.9
Abril	2.6
Mayo	2.4
Junio	2.9
Julio	2.8
Agosto	3.0
Septiembre	3.6
Octubre	3.4
Noviembre	3.9
Diciembre	3.8

La información obtenida a partir de los registros mensuales de las estaciones Convento Viejo y Termas el Flaco sólo es representativa de los gradientes de temperatura en la parte baja de la cuenca. Se considera como referente el gradiente estándar de 6.5°C/km representativo para la zona sin información en la cuenca del río Teno.

A continuación se muestra el ajuste de Precipitación y Temperatura proporcionada por el modelo HadCM3, a los valores registrados por la estación.

Precipitación.

Los valores de precipitación se ajustaron a la Estación Río Claro en Teno, de manera mensual. En la Figura 4.3.10 se muestra como ejemplo el ajuste de precipitación realizado para el mes de mayo, en el que se corrigieron los valores de precipitación entregando valores aceptables para la curva de duración.

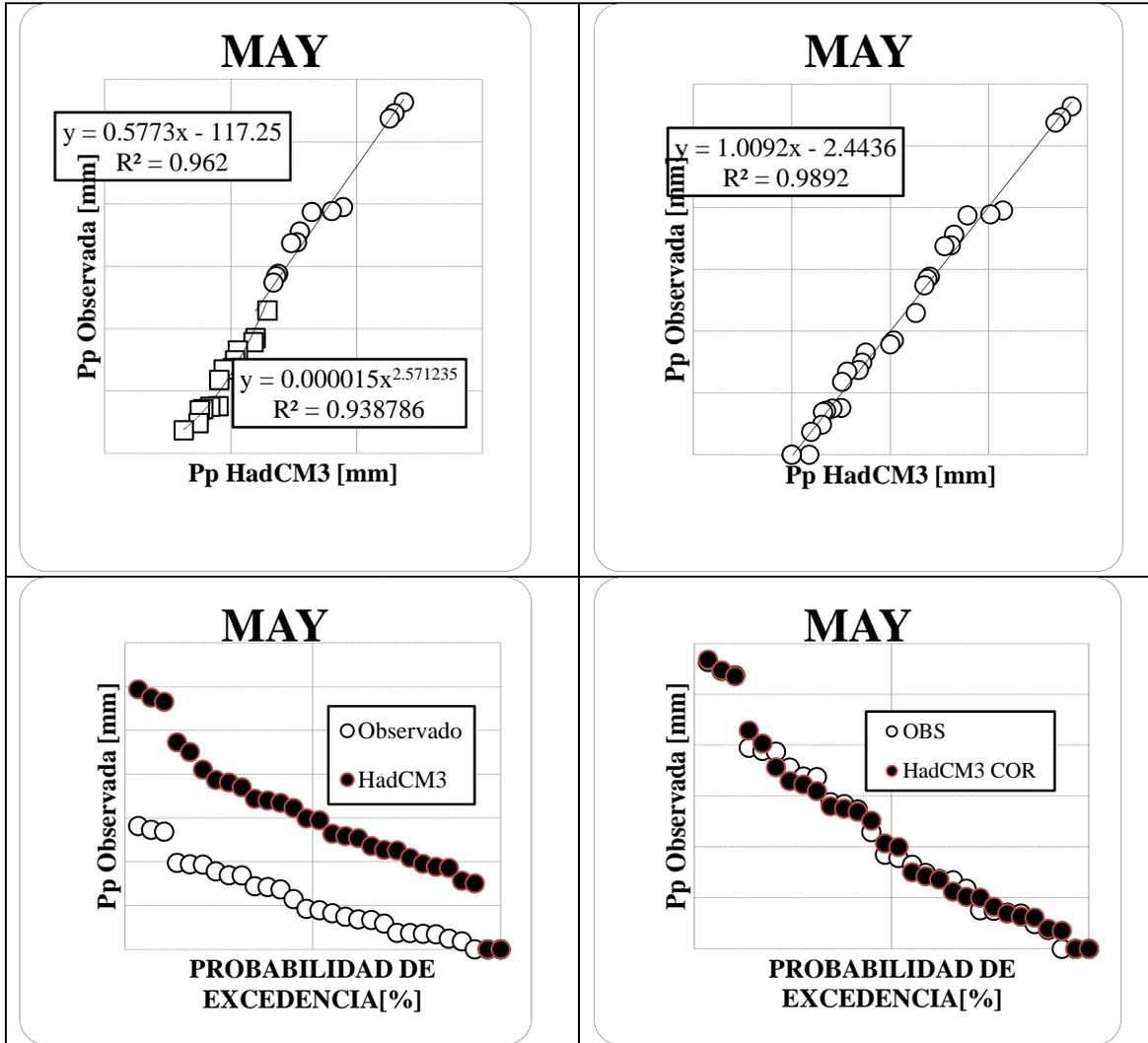


Figura 4.3.10: Ajuste de Precipitación Mensual de valores HadCM3 con registros observados.

En la Figura 4.3-11 se muestra la curva de variación estacional para el periodo de línea base en la Cuenca del Teno, con la estadística original de HadCM3, la estadística corregida de HadCM3 y la curva de variación estacional observada por la Estación Río Teno en Junta con Río Claro.

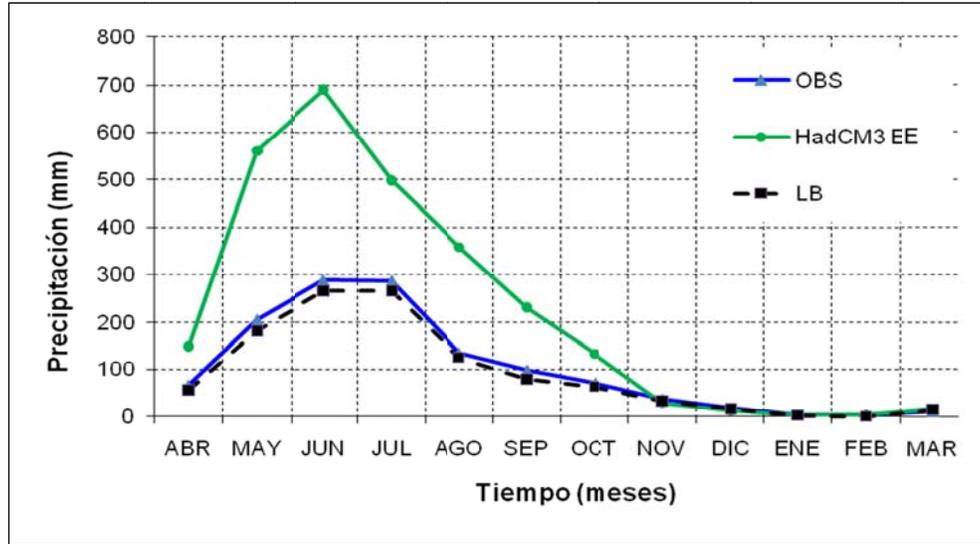


Figura 4.3.11: Ajuste de Curva de Variación Estacional de Precipitación Río Teno

Se observa en general un buen ajuste a los valores mensuales, sin embargo se nota una leve subestimación durante los meses abril y octubre.

En la Figura 4.3.12 se muestran los valores máximos y mínimos observados en la estación y los valores corregidos de HadCM3. Se observa que en general los valores máximos mensuales se subestiman durante el periodo Línea Base.

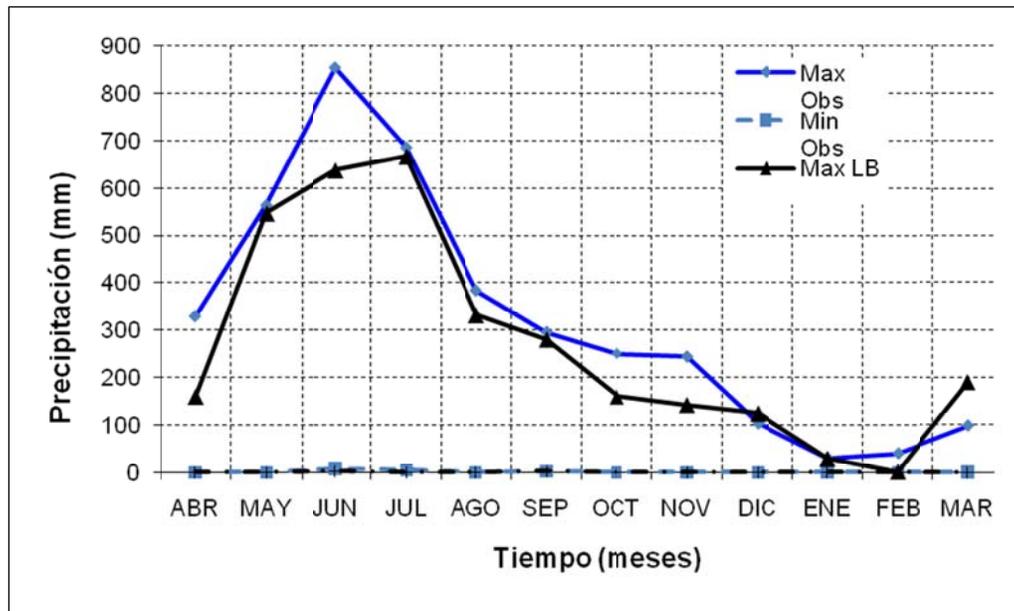


Figura 4.3.12 Representación de valores máximos y mínimos observados y corregidos HadCM3.

Temperatura.

El ajuste de temperatura se realizó en base a los registros de la estación Convento Viejo. En la Figura 4.3.13 se muestran las diferentes curvas de temperaturas medias mensuales para los valores observados por la estación, obtenidos de HadCM3 y los valores ajustados mediante regresiones mensuales.

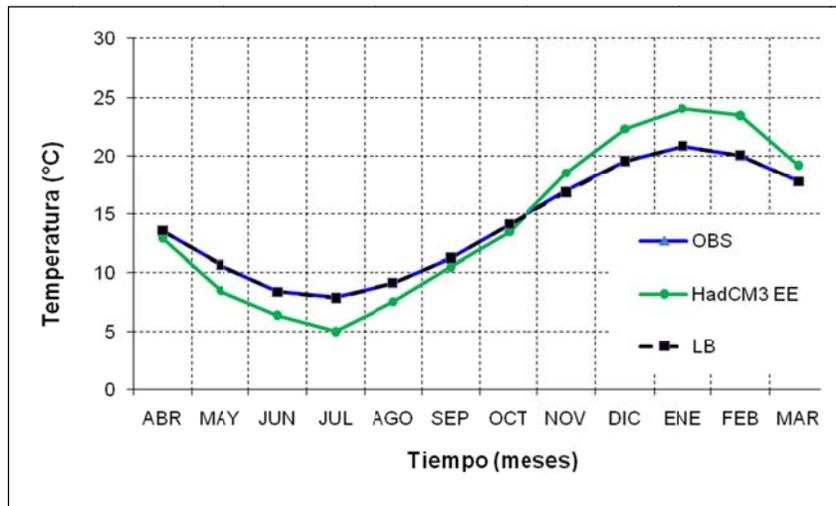


Figura 4.3.13 Curva de Temperaturas Medias Mensuales Observadas y Ajustadas HadCM3.

En general se observa un buen ajuste para la serie de temperatura medias mensuales durante todo el periodo en estudio de línea base.

En la Figura 4.3.14 se muestran los valores máximos y mínimos observados y ajustados de HadCM3 y de la estación Convento Viejo.

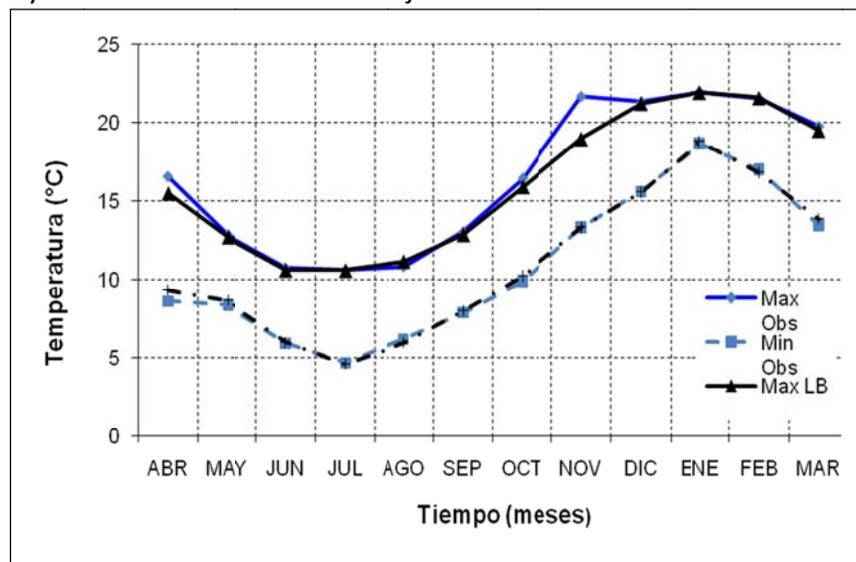


Figura 4.3.14 Temperaturas máximas y mínimas observadas y ajustadas HadCM3.

En general se observa un ajuste aceptable tanto de las temperaturas mínimas como máximas para todo el periodo. La única diferencia se observa durante el mes de noviembre, en el que se subestima el valor registrado por la estación.

Ajuste del escenario A2.

Precipitación.

Con los valores de HadCM3 Corregido se procedió a corregir las series de precipitación futura. Se realizó en base al supuesto que los ajustes lineales obtenidos en el periodo línea base son válidos para corregir los montos de precipitación en periodos futuros.

En la Figura 4.3.15 se muestran los valores de precipitación media mensual obtenida para los diferentes periodos de este estudio.

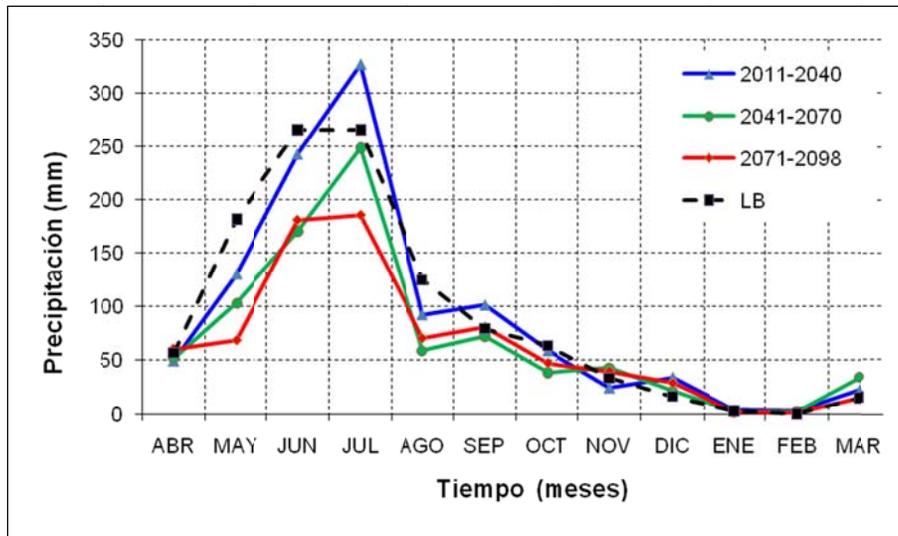


Figura 4.3.15 Precipitación media mensual para diferentes periodos de análisis.

Se observa que el periodo cercano (2011-2040) se espera en general una disminución de la precipitación, salvo para los meses de Julio, Septiembre y Diciembre. Para el periodo 2041-2070 se espera una disminución de la precipitación salvo para los meses de Noviembre y Marzo. Por último para el periodo 2071-2098 se espera una disminución de los montos de precipitación para todos los meses.

En la Figura 4.3.16 se muestra el coeficiente de variación mensual para el periodo línea base y los diferentes horizontes de tiempo futuro.

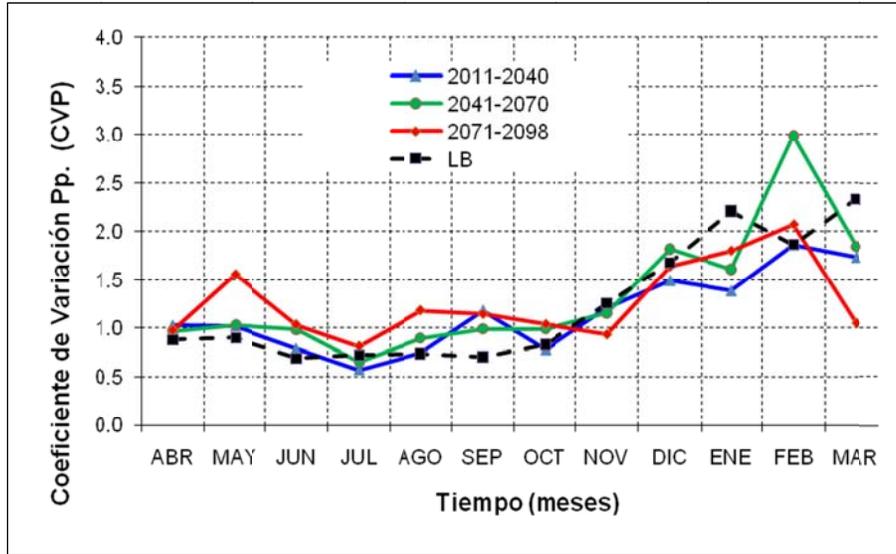


Figura 4.3.16 Coeficiente de Variación para diferentes periodos Línea Base y Futuro.

Se observa para el periodo cercano (2011-2040) en general una disminución en el coeficiente de variación. Para el periodo (2041-2070) se muestra una mantención del coeficiente de variación. Por último para el periodo (2071-2098) en general un aumento del coeficiente de variación para los meses de abril-octubre y una disminución para los meses octubre-marzo.

La precipitación representativa de la cuenca se obtuvo mediante ponderación de áreas y consideración de un gradiente de precipitación medio de 50 mm/ 100 m según el Balance hídrico. En la Figura 4.3.17 se muestra la disminución de la precipitación para los diferentes periodos en estudio. En general se observa una disminución de la precipitación sostenida para los diferentes periodos en estudio.

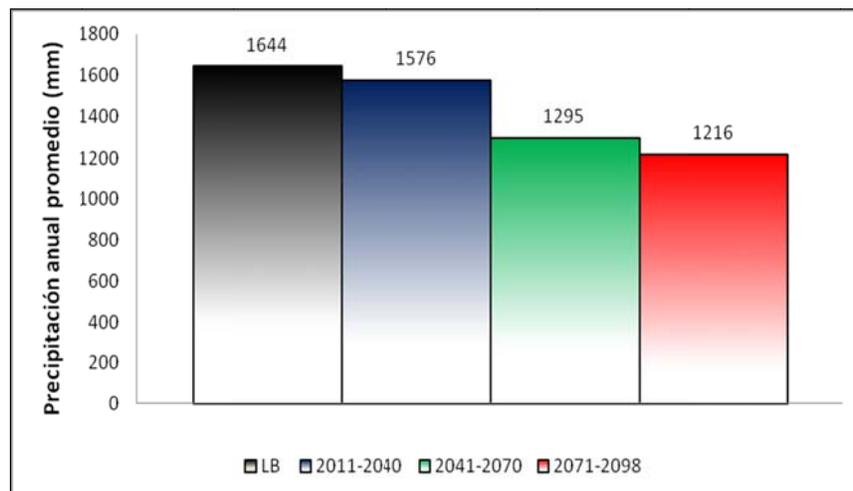


Figura 4.3.17 Precipitación Representativa de la Cuenca Río Teno.

Temperatura.

Al realizar el escalamiento temporal de las series de temperatura a nivel mensual se procedió a obtener los gráficos de Temperatura para el periodo línea base y para los diferentes escenarios futuros. En la Figura 4.3.18 se muestra los valores de temperatura para los distintos escenarios.

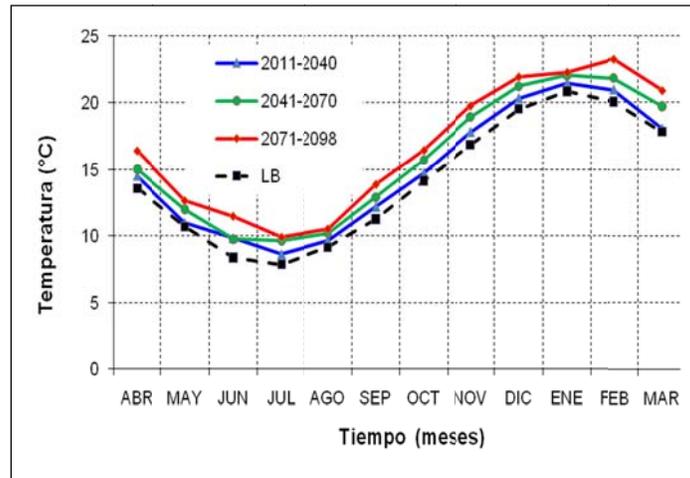


Figura 4.3.18 Temperaturas Medias Mensuales para distintos periodos.

Se observa un leve aumento para el periodo cercano (2011 – 2040), en forma sostenida un aumento para el periodo (2041-2070) y (2071-298). En los meses de Julio, Agosto y Enero se muestra una similitud con las temperaturas de los últimos periodos de estudio. En Figura 4.3.19 la se muestra el coeficiente de variación para los distintos periodos.

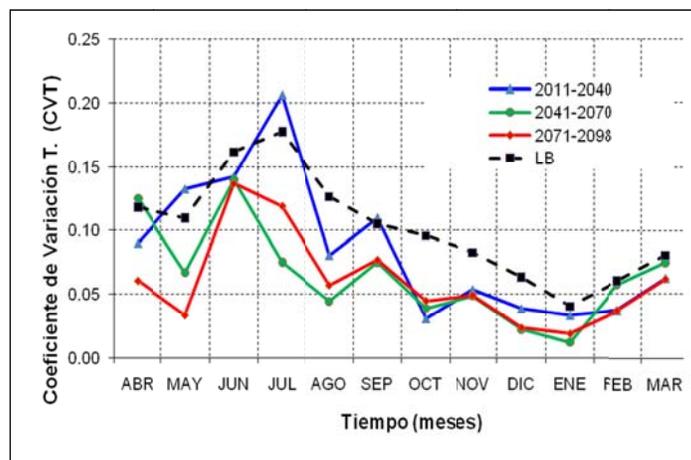


Figura 4.3.19 Coeficiente de Variación de Temperaturas.

Considerando un gradiente de temperatura para la parte de baja de 3.5°C/1000 km y de 6.5 °C/ 1000 km se obtuvo la temperatura media representativa de la Cuenca del Río Teno. En la Figura 4.3.20 se muestran las temperaturas medias para los distintos periodos de tiempo.

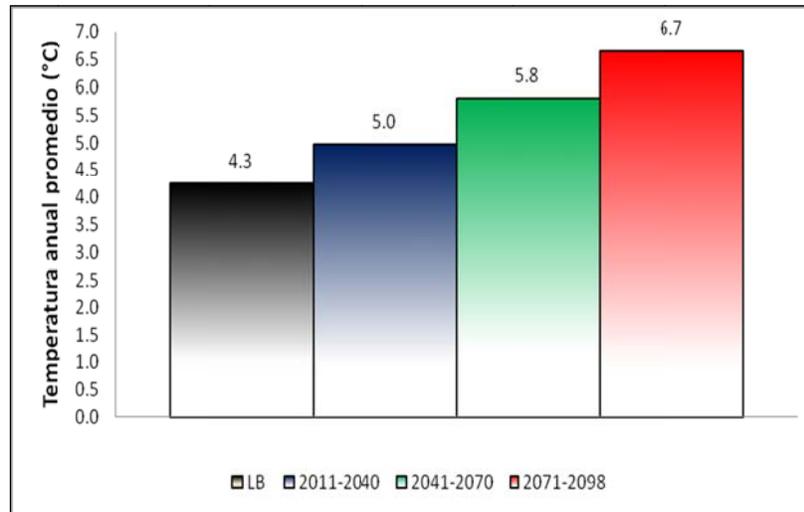


Figura 4.3.20 Temperatura media en la Cuenca Río Teno.

Se observa un aumento sostenido de la temperatura para los diferentes periodos de estudio. Desde una diferencia de 0.7 °C para el periodo cercano (2011-2040), hasta 2.4°C en el periodo futuro más lejano (2071-2098).

4.3.2 Modelo Hidrológico del río Teno.

Se realizó una modelación de la cuenca en forma de bandas. Estas bandas se separaron con un criterio conservación de áreas. En la Tabla 4.3-3 se muestran los principales parámetros de la cuenca y los valores de las bandas escogidas para implementar el modelo de simulación hidrológico en WEAP.

En la Tabla 4.3-4 se muestra el resumen de las bandas, en cuanto a área. Las últimas dos bandas se dividieron en dos sub-áreas (120 y 30) para dar mayor resolución en las bandas que tienen una acumulación nival más importante.

De esta manera se implementa el modelo hidrológico con el fin de simular y calibrar el periodo línea base.

Tabla 4.3-3: Características de Río Teno.

Área total [Km ²]	1200
Altura mínima [msnm]	645
Altura máxima [msnm]	4047
Desnivel [msnm]	3402
Área banda 1 a 7 [m]	150
Área banda 8 [m]	120
Área banda 9 [m]	30
Nº bandas	9.0

Tabla 4.3-4: Características y representación de áreas.

Cota [msnm]	Área [Km ²]	% Área [%]
645 - 1264	150	13%
1264 - 1589	150	13%
1589 - 1876	150	13%
1876 - 2137	150	13%
2137 - 2369	150	13%
2369 - 2572	150	13%
2572 - 2800	150	13%
2800 - 3137	120	10%
3137 - 4047	30	3%

Resultados calibración línea base (LB).

Como resultado de la calibración del modelo se obtuvo un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.75 para los valores mensuales y un coeficiente R^2 de 0.75, al revisar los datos mensuales. En la Figura 4.3.21 se muestran los valores simulados versus los valores observados por la estación Río Teno en Junta con Río Claro.

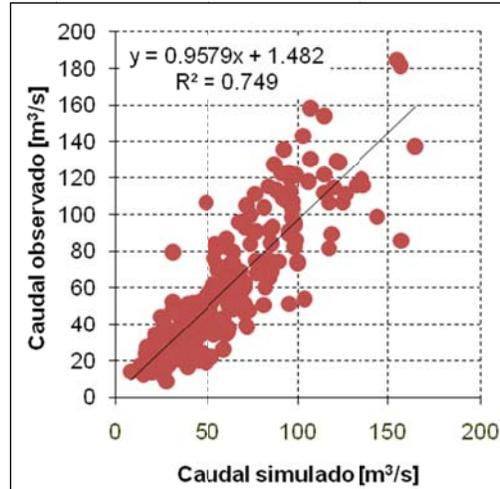


Figura 4.3.21 Caudales Mensuales Simulados vs Caudales Mensuales Observados.

Se observa que la pendiente del ajuste tiende a ser cercana a 1 (0.957), esto quiere decir que se tiende a subestimar y sobreestimar igual cantidad de registros.

En la Figura 4.3.22 se muestran los valores de caudales medios anuales simulados versus observados.

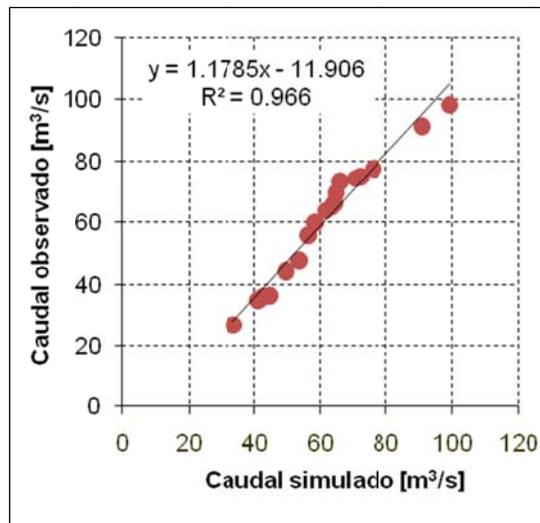


Figura 4.3.22 Caudales Mensuales Simulados vs Caudales Mensuales Observados.

Se observa que en términos de caudales medios anuales el modelo es capaz de representar los valores de manera satisfactoria.

En la Figura 4.3.23 se muestra las curvas de variación estacional simuladas versus las observadas. En ella se observa en general una leve sobrestimación, salvo para los meses abril, mayo, septiembre y febrero.

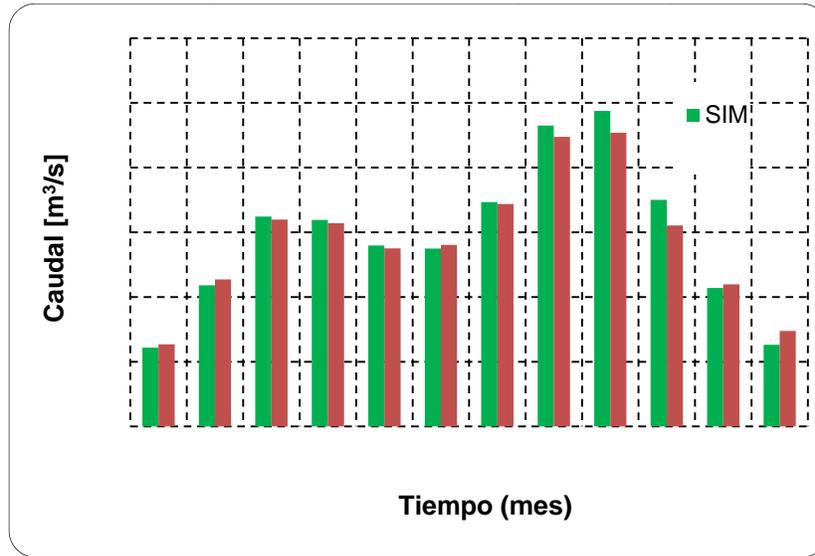


Figura 4.3.23 Caudales Medios Mensuales Observado y Simulados.

En general se observa un buen comportamiento del modelo para simular los valores medios mensuales en todos los meses, representando caudal “peak” para el mes de diciembre y el caudal más bajo para el mes de abril.

Ajuste año promedio mensual.

En la Figura 4.3.24 se muestra el ajuste de los caudales medios anuales para todo el periodo de calibración 1979-1998.

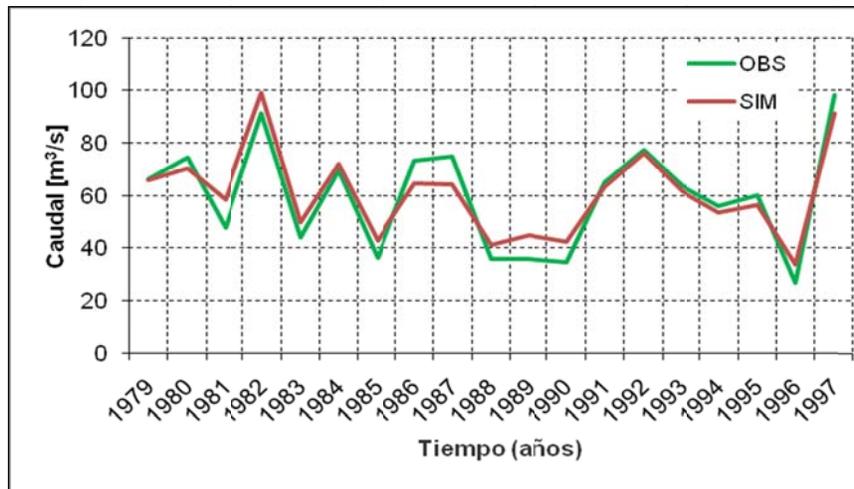


Figura 4.3.24 Series de Caudales Medios Anuales.

En general se observa un buen comportamiento del modelo salvo para los periodos 1986-1987 y 1988-1991. Esta diferencia no fue posible de reducir debido a que

perjudicaba el buen comportamiento obtenido en los otros años, por lo que se presume una subestimación y sobrestimación en el caudal o la estadística utilizada.

Curvas de duración mensual y anual.

Al contar con la estadística de caudales mensuales es posible comparar la curva de duración observada y simulada. En la Figura 4.3.25 se muestran los resultados obtenidos por el modelo y de los registros de la estación.

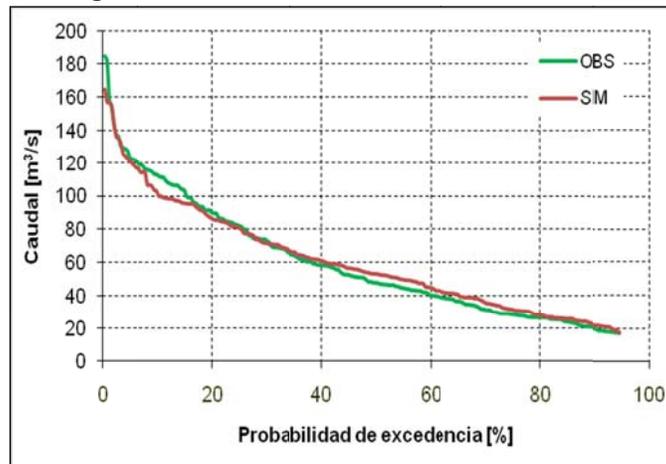


Figura 4.3.25 Curva de duración de Caudales Mensuales.

Se observa en general una subestimación de los caudales altos, y a partir de la probabilidad de excedencia de 30% se observa una leve subestimación. En general el modelo es capaz de representar correctamente el comportamiento de la curva de duración.

Simulación WEAP con datos observados vs simulación con datos HadCM3

Con el modelo calibrado y las series de tiempo escaladas temporalmente es posible utilizar el Modelo hidrológico para obtener los caudales en periodo Línea Base y Futuros.

Se procede a comparar los caudales obtenidos con datos de precipitación, temperatura y radiación observados, versus los caudales obtenidos con datos de HadCM3 corregidos. En la Fi se muestra los caudales medios mensuales obtenidos con datos observados y los obtenidos con datos HadCM3.

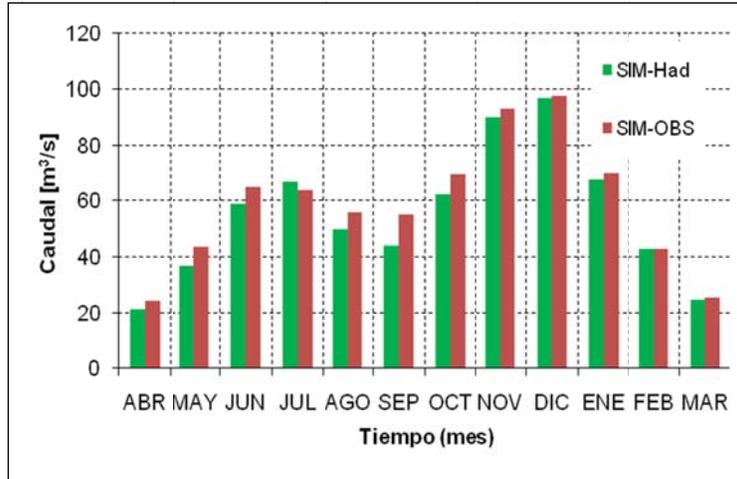


Figura 4.3.26 Caudales Medios Mensuales con datos observados y simulados.

Se observa un comportamiento similar tanto en la estacionalidad de los caudales (nivo-pluvial), como en valores de caudal “peak” (julio y diciembre).

En la Figura 4.3.27 se procede a comparar las curvas de duración mensual y anual, para caudales obtenidos con valores observados y valores HadCM3 corregidos.

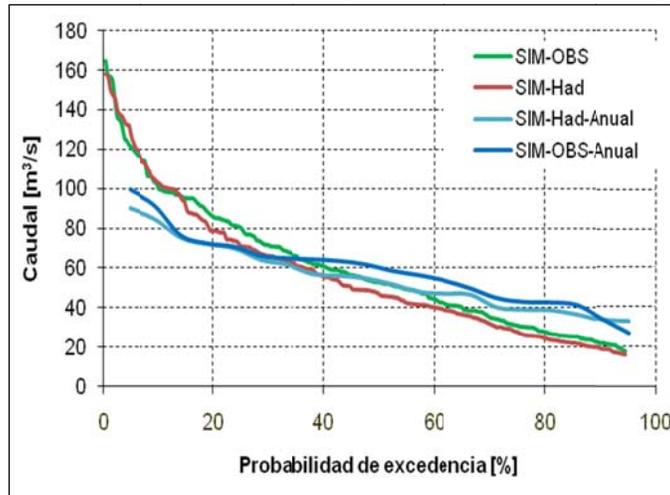


Figura 4.3.27 Curvas de duración de caudales medios mensuales y anuales.

Se consideran aceptables tanto la curva de duración mensual como la curva de duración anual, por lo que el modelo se procede a utilizar con valores simulados para las series futuras. En la se muestra el resumen de los valores mensuales de precipitación, temperatura y caudal.

Tabla 4.3-5: Resumen de Precipitación, Temperatura y Caudal en periodo de Calibración.

Mes	Precipitación [mm]	Temperatura [°C]	Caudal [m ³ /s]	
	OBS	OBS	OBS	SIM
Abr	131.3	4.3	25.4	24.4
May	276.6	1.1	45.4	43.6
Jun	340.1	-1.2	63.9	64.9
Jul	316.2	-1.7	62.8	63.8
Ago	197.6	-0.3	55.0	55.9
Sep	159.8	1.8	56.1	55.0
Oct	111.8	4.7	68.8	69.4
Nov	53.6	7.6	89.5	93.0
Dic	37.5	10.1	90.8	97.5
Ene	31.6	11.2	62.1	70.0
Feb	21.4	10.6	43.9	42.8
Mar	68.5	8.5	29.5	25.2
Anual	1746.0	4.7	57.8	58.8

Resultados escenario A2.

Las variables escaladas temporalmente, para los periodos futuros, Precipitación, Temperatura y Radiación, aplicadas en el modelo hidrológico permiten obtener las series de caudales futuros. De esta manera se construyen las curvas de caudales medios mensuales para los distintos horizontes.

En la Figura 4.3.28 se muestran los caudales medios para el periodo 2010-2098.

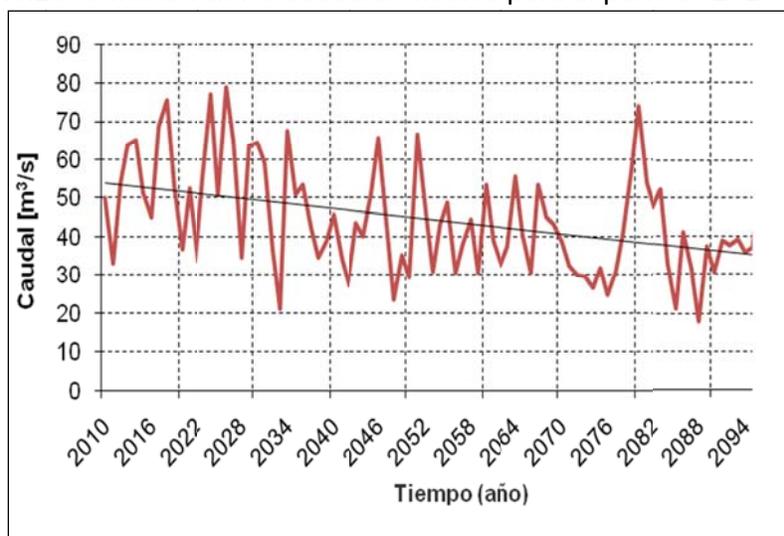


Figura 4.3.28 Serie de Caudales Mensuales Futuros.

Al ajustar un ajuste lineal se observa una tendencia a la disminución en los caudales medios. En la Figura 4.3.29 se muestran los caudales medios mensuales para los distintos horizontes.

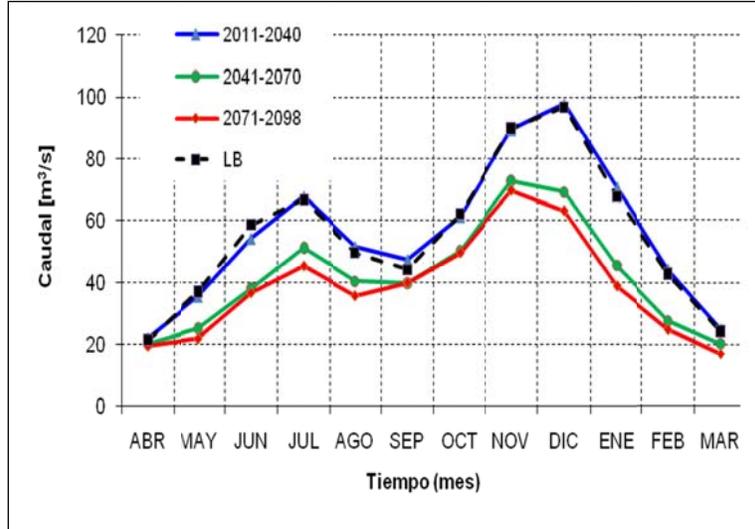


Figura 4.3.29 Curvas de duración de caudales medios mensuales y anuales.

Se observa una disminución y desplazamiento de caudal peak. La disminución es de 97 a 69 m³/s para el periodo (2071-2098), y el mes peak se adelanta un mes quedando en noviembre.

En la Figura 4.3.30 se muestran el coeficiente de variación para los distintos horizontes de tiempo. Se observa una tendencia a la disminución de la variabilidad de los caudales en el horizonte medio (2041-2070), en general la máxima variabilidad se desplaza al mes de Junio para el horizonte (2071-2098).

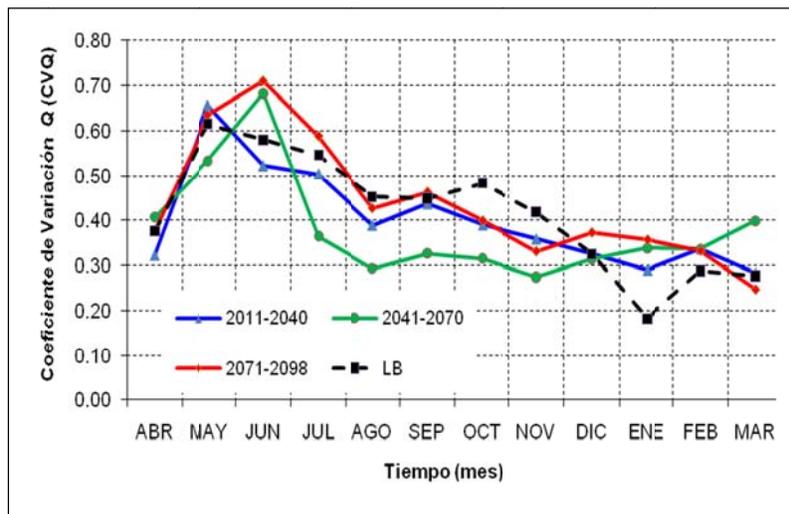


Figura 4.3.30 Coeficiente de variación mensual para diferentes horizontes futuros.

En la Tabla 4.3-6 se muestra un resumen de las variables Precipitación, Temperatura y Caudal.

Tabla 4.3-6: Resumen de Caudales para Horizontes Futuros en Cuenca Teno.

Período	Caudal [m ³ /s]	Variación [%]	Precipitación [mm]	Variación [%]	Temperatura [°C]	Variación [°C]	Q/Pp [mm/mm]
LB	55.1		1644		4.3		0.88
2011-2040	55.6	1%	1576	-4%	5.0	0.7	0.93
2041-2070	41.7	-24%	1295	-21%	5.8	1.5	0.85
2070-2098	38.4	-30%	1216	-26%	6.7	2.4	0.83

Se observa que frente a un aumento de 2.4 °C y una disminución del 26 % en la precipitación el caudal medio disminuye un 30% en la Cuenca del Río Teno para el periodo de estudio 2070-2098.

4.3.3 Variación del estrés hídrico.

EN PROCESO.

Probabilidad del 75%

Probabilidad del 85%

Probabilidad del 95%

4.3.4 Comentarios.

Se concluye satisfactoriamente el proceso de escalamiento temporal de las variables de precipitación y temperatura. En la que se logra ajustar las series para el periodo de línea base generados en el modelo HadCM3 y los registrados por estaciones Río Claro después de Junta Río Claro (Pp) y Convento viejo (T°).

El modelo hidrológico se ajusta a la serie de caudales de manera razonable, en el que se obtiene un coeficiente de Nash-Suclife de 0.75, por lo que se considera válido el modelo para generar una serie futura de caudales.

Se observa una disminución sostenida en los valores medios de temperatura y precipitación por los diferentes horizontes de estudio. Esto genera una disminución en el caudal medio. El cambio más dramático ocurre frente a un aumento de 2.4 °C y una

disminución del 26 % en la precipitación el caudal medio disminuye un 30% en la Cuenca del Río Teno para el periodo de estudio 2070-2098.

4.4 Cuenca Cautín en Rari-Ruca.

La cuenca, indicada en la Figura 4.4.1, tiene su salida definida por la estación fluviométrica de la DGA del mismo nombre: “Cautín en Rari-Ruca”. Esta cuenca se ubica en la comuna de Curacautín, IX Región de la Araucanía, en la zona alta del río Cautín, el cual es afluente al río Imperial. Su punto de salida (estación fluviométrica) se ubica aproximadamente a 2 Km. aguas abajo de la confluencia del río Blanco con el río Cautín. Las coordenadas del punto de salida de la cuenca son 5742485 N, 237928 E H19, según Datum psad56 (Fuente: Plataforma SIG CNR).

Ubicación General

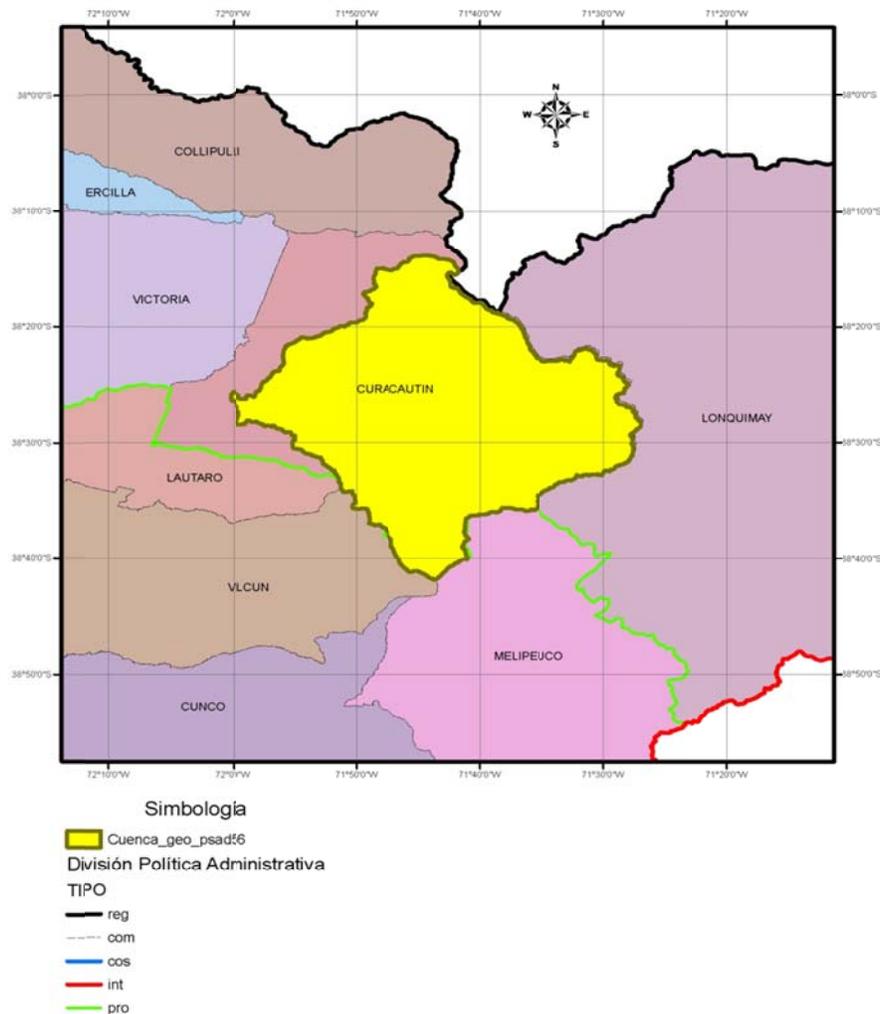


Figura 4.4.1: Mapa Político Administrativo de la cuenca Cautín en Rari-Ruca

La cuenca fue delimitada mediante el software WMS y un DEM obtenido de la U.S. Geological Survey (USGS).

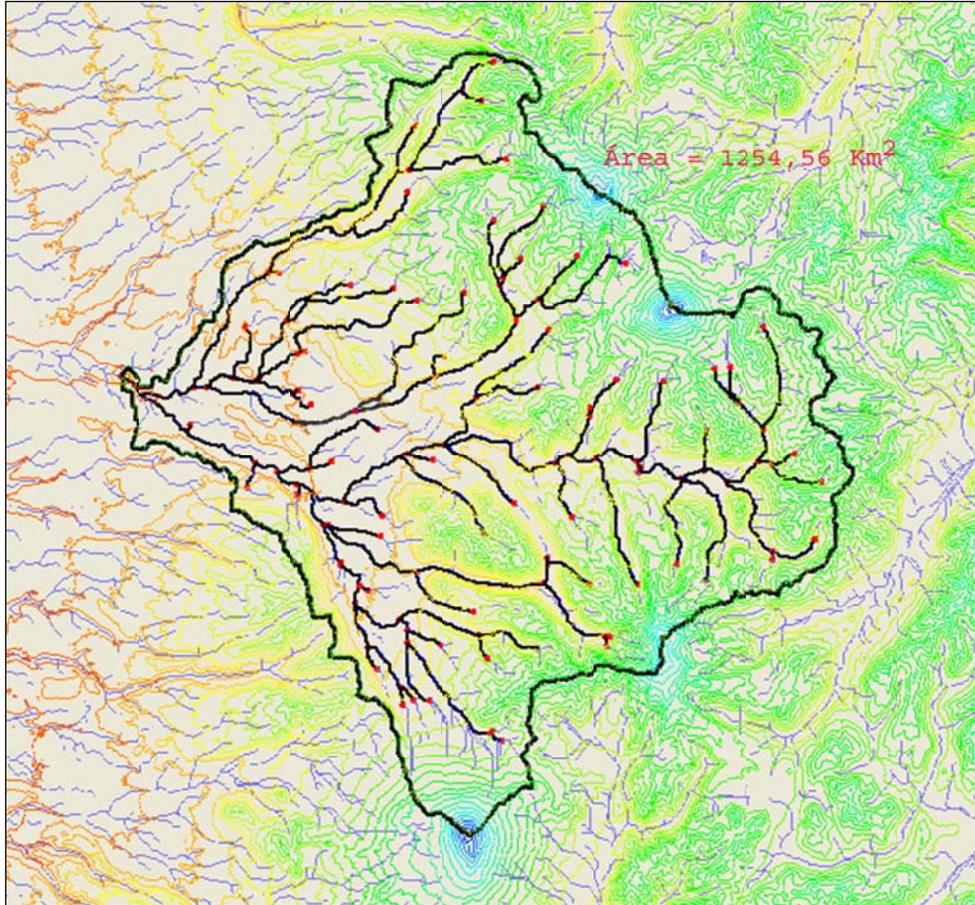


Figura 4.4.2: Delimitación cuenca Cautín en Rari-Ruca.

El área drenada por la cuenca es de 1255 km², considerando sólo la superficie proyectada en un plano.

La cuenca, ubicada en la zona precordillerana, posee un clima templado frío lluvioso, con influencia mediterránea, caracterizado principalmente por las bajas temperaturas durante todo el año y el aumento de las precipitaciones con la altura, las cuales llegan a los 3.000 mm anuales sobre los 1.200 m.s.n.m. Por ejemplo, la estación Lonquimay se ubica a los 900 m.s.n.m. y presenta una temperatura promedio anual de 8,4 °C y una precipitación total anual de 1.850 mm (Fuente: Cade – Idepe, 2004).

En la zona existen dos unidades principales, el volcán Llaima y el Complejo Volcánico Lonquimay, además de los volcanes Tolhuaca y Sierra Nevada. A continuación se expone la geología de las dos unidades principales, por ser las más estudiadas e importantes en cuanto al relieve de la cuenca (Fuente: Sernageomin).

El río Cautín tiene su nacimiento en la falda occidental de la cordillera de Las Raíces y atraviesa todo el llano con un desarrollo de 174 km, siendo el principal afluente del Imperial, en atención a su caudal. La superficie total drenada por el Cautín asciende a 3.100 km² (Fuente: Cade – Idepe, 2004).

La cuenca en estudio involucra el nacimiento del río Cautín, hasta su confluencia con el río Blanco, con un área total (en planta) de 1.255 Km². Dos son las cumbres más importantes de la cuenca, desde donde nacen los principales afluentes al río Cautín.

Por una parte, el volcán Llaima, ubicado en el Parque Nacional Conguillío, es uno de los volcanes más voluminosos de la zona volcánica de los Andes del Sur comprendida entre los 37-46º S. El volcán comprende el edificio principal cónico de 3.125 m.s.n.m., destacando en unos 1.200 m por sobre las cumbres circundantes. La altura total del edificio volcánico se puede estimar en unos 2.400 m sobre su base, de topografía irregular, con un promedio de unos 740 m.s.n.m. El drenaje radial del volcán Llaima está representado principalmente por la hoyas superiores de los ríos Captrén, Quepe y, parcialmente, del río Allipén, mediante varios ríos y esteros (Fuente: Sernageomin), siendo el río Captrén uno de los principales afluentes al río Cautín dentro de la cuenca estudiada.

Por otro lado, el Complejo Volcánico Lonquimay (CVL), ubicado en la Reserva Nacional Malalcahuello, comprende un cono principal, el volcán Lonquimay, y una cadena de centros adventicios ubicados hacia NE, a lo largo de una fisura de 8 km de longitud (Cordón Fisural Oriental). El Lonquimay (38º22'S-71º35'W) es un estratovolcán con forma de cono truncado, ligeramente elongado en dirección WSW-ENE. Su cumbre principal se eleva a 2.865 m.s.n.m. y aproximadamente 1.300 m sobre su base. El Cordón Fisural Oriental está formado por una docena de cráteres, fisuras menores, conos piroclásticos y domos (Fuente: Sernageomin). Desde la cumbre del volcán Tolhuaca (ubicado al norte del volcán Lonquimay) nace, entre otros, el río Blanco, este último afluente al río Cautín previo a la salida de la cuenca. Desde el volcán Lonquimay nace el río Cautín y recibe aportes el río El Indio, que a su vez es afluente al río Blanco (Fuente: Cartas IGM). El detalle de la red hidrográfica se presenta en la Figura 4.4.3.

Cauces Principales

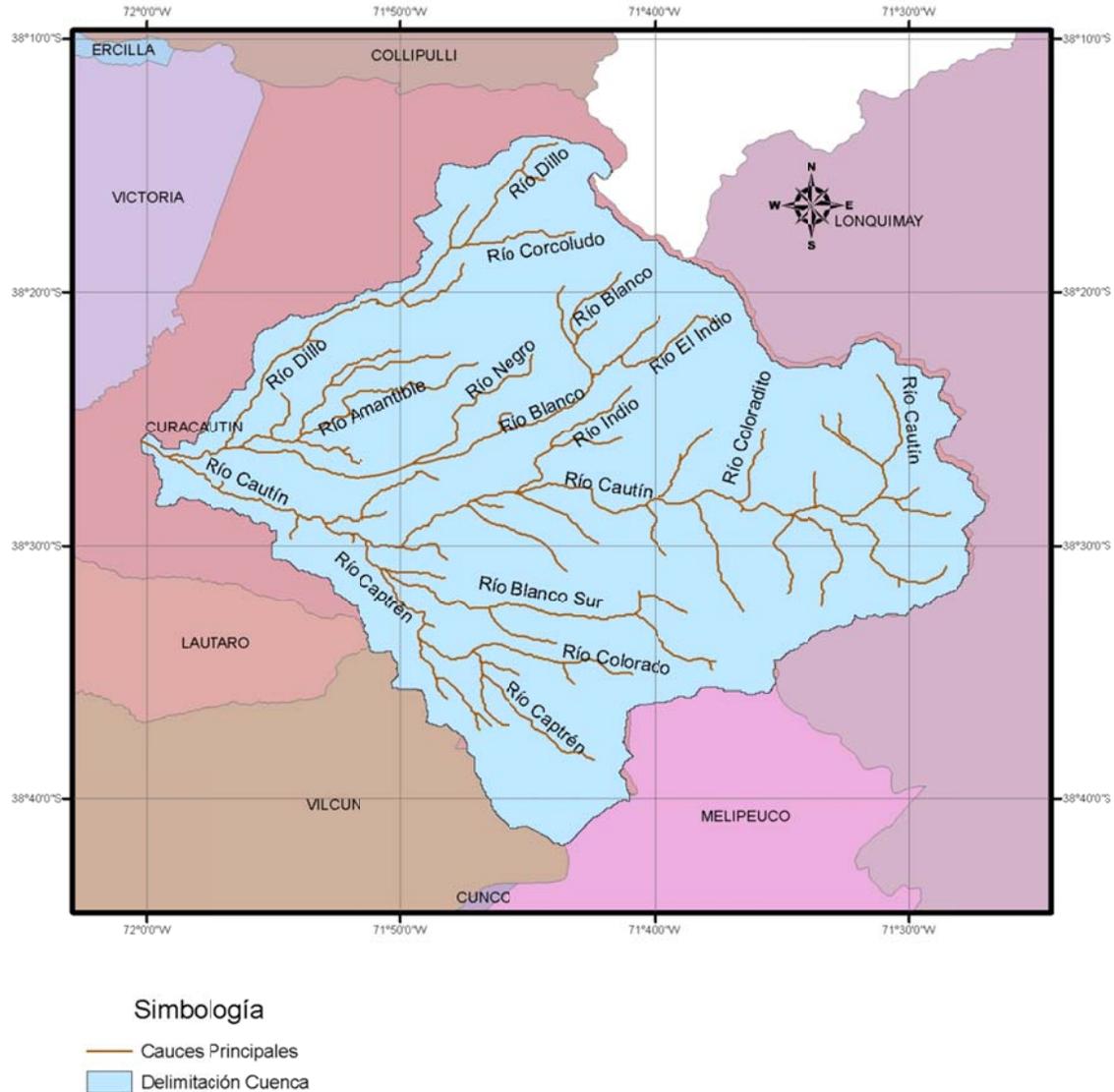


Figura 4.4.3: Cauces principales en Cuenca Cautín en Rari-Ruca

De acuerdo a la información contenida en la base de datos de la CNR, contenida en formato SIG, la cuenca Cautín en Rari-Ruca presenta un solo gran acuífero de importancia, caracterizado por poseer una permeabilidad muy baja debido a la presencia de formaciones rocosas de origen volcánico del período Terciario y Cuaternario, período en el cual también se han formado los volcanes de Tolhuaca, Lonquimay, Sierra Nevada y Llaima, que son los formadores del relieve de la zona (Fuente: Cade – Idepe, 2004).

Las formaciones rocosas están constituidas principalmente por andesitas e ignimbritas que adoptan la forma de coladas, brechas y tobas de baja permeabilidad y que forman

el basamento de esta zona. De acuerdo a las características de permeabilidad, las infiltraciones escurren al acuífero por el subsuelo hasta las depresiones de las cuales el cauce del río Cautín forma parte de una zona de material no consolidado o relleno bajo (Fuente: Cade – Idepe, 2004).

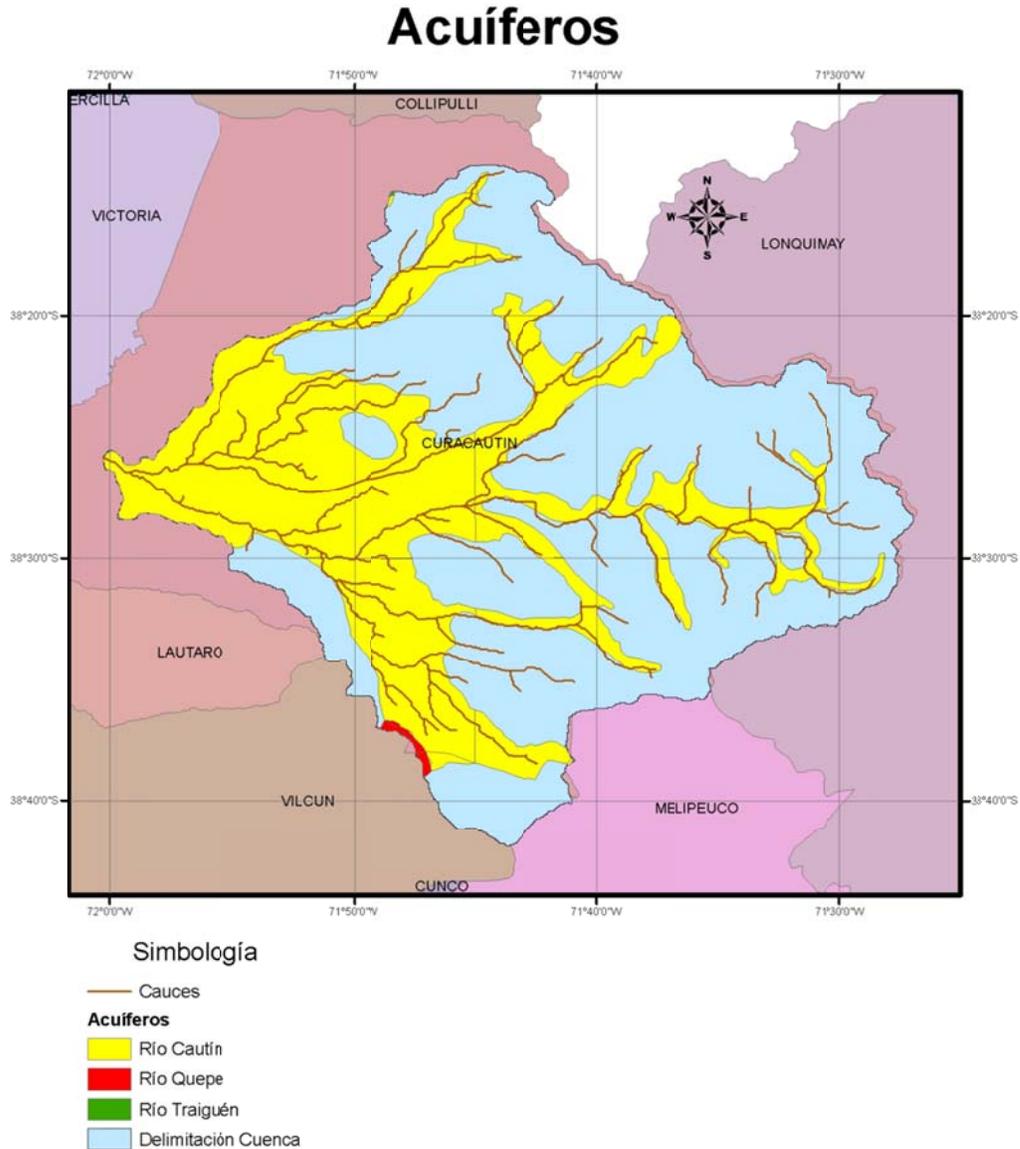
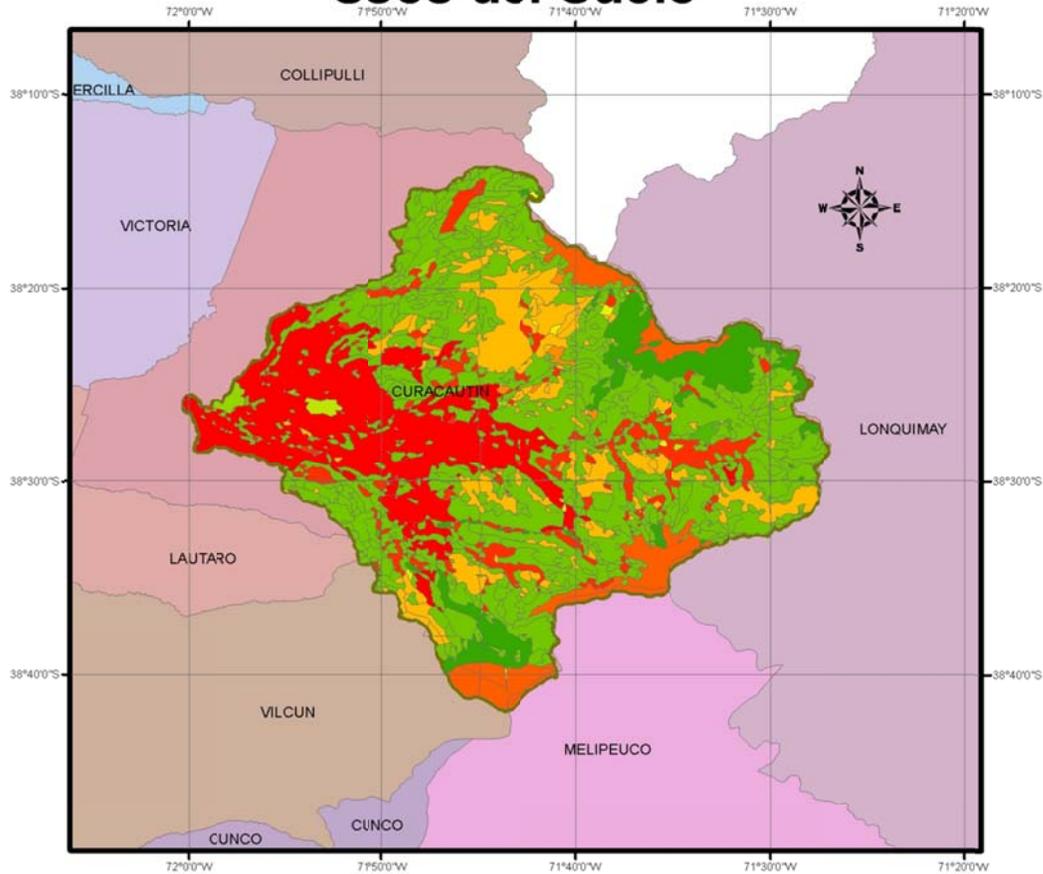


Figura 4.4.4: Cuenca Cautín en Rari-Ruca

La información contenida en SIG permite cuantificar la superficie de suelo según sus usos, tal como lo indica la Figura 4.4.5 y la Tabla 4.4-1.

Usos del Suelo



Simbología

Usos del Suelo

- AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION
- BOSQUE MIXTO
- BOSQUE NATIVO
- BOSQUES PLANTACIONES
- CIUDADES-PUEBLOS-ZONAS INDUSTRIALES
- CUERPOS DE AGUA
- HUMEDALES
- MATORRAL
- MATORRAL-PRADERA
- NIEVES Y GLACIARES
- PRADERAS
- ROTACION CULTIVO-PRADERA

Figura 4.4.5: Usos de Suelo en Cuenca Cautín en Rari-Ruca

De la Tabla 4.4-1 se desprende que la Cuenca Cautín en Rari-Ruca se encuentra escasamente urbanizada y con un fuerte predominio de bosque nativo (40%). Además, se tiene un 10% de la superficie ocupada por nieves y glaciares, lo que da cuenta de una importante fuente de recursos hídricos para la época de riego.

Tabla 4.4-1: Resumen de Superficies según su uso

Codigo	Nombre	Uso Suelos IX Región [ha]	Cuenca Cautín en Rari-Ruca [ha]
1	CIUDADES-PUEBLOS-ZONAS INDUSTRIALES	10 735.3	391.8
2	MINERIA INDUSTRIAL	-	-
3	TERRENOS DE USO AGRICOLA	6 739.2	-
4	ROTACION CULTIVO-PRADERA	948 353.8	34 225.2
5	AGRICULTURA DE RIEGO	-	-
6	PRADERAS	479 966.1	9 362.1
7	MATORRAL-PRADERA	94 058.8	484.5
8	MATORRAL	136 263.7	15 611.0
9	BOSQUES PLANTACIONES	360 027.8	1 015.3
10	BOSQUE NATIVO	907 512.9	69 693.6
11	BOSQUE MIXTO	19 048.2	327.3
12	HUMEDALES	23 138.1	144.0
13	AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION	63 447.2	10 980.6
14	NIEVES Y GLACIARES	76 758.3	15 960.9
15	CUERPOS DE AGUA	54 944.1	126.6
16	AREAS NO RECONOCIDAS	1 407.8	-
Total [Km2]		31 824.0	1 583.2

Si se considera que cerca del 10% se encuentra ocupado por matorral, un 6% por praderas y un 7% por áreas desprovistas de vegetación, se tiene que más del 75% de la cuenca se encuentra en estado natural o con escasa intervención humana. Sin embargo, un 22% de la cuenca se encuentra ocupada por áreas de rotación cultivo-pradera, especialmente en la zona baja de la cuenca, a partir de lo cual se concluye que la mayor parte de la superficie utilizada por el hombre está destinada a usos agrícolas y ganaderos.

Los vacíos corresponden a falta de información en los expedientes consultados, inclusive habiéndose realizado un relleno de coordenadas mediante las descripciones disponibles en algunos casos de las zonas de captación y/o restitución.

Hay que señalar que existe una gran cantidad de derechos otorgados en base a la descripción aproximada de la ubicación de la captación y/o restitución, lo cual ha significado que, en muchos casos, no haya sido posible determinar fehacientemente las coordenadas geográficas asociadas a las descripciones. Dicha labor ha sido realizada en el presente estudio en aquellos puntos donde la descripción es lo bastante clara como para definir coordenadas sobre la base de las cartas IGM disponibles.

No existe, en varios casos, claridad acerca de los derechos otorgados, que para efectos de la modelación son los que se considerarán. En total se estiman en alrededor de 2000 [l/s] los derechos sin información de coordenadas geográficas y/o los derechos solicitados que no poseen información del total otorgado.

Los derechos disponibles están comprendidos entre los años 1985 y 2004, pero se estima que al menos un 10% de los derechos existentes no se encuentran en el listado, debido a que el sistema de información aún no está 100% integrado a las diversas fuentes de registros (conservador de bienes raíces, notarías, etc.).

Curva de Variación Estacional cuenca Cautín en Rari-Ruca.

Se observa un claro régimen pluvial, con un período entre mayo y septiembre con gran abundancia de precipitaciones. Además, existe un descenso paulatino de los caudales en las estaciones primavera-verano, lo que se debería a la presencia de precipitaciones durante dicho intervalo, incluso en períodos secos.

Se evidencia un cambio muy marcado en las precipitaciones entre los meses de abril y mayo, el cual es más pronunciado en años húmedos. También es posible observar cómo se produce una disminución paulatina de las precipitaciones a partir de septiembre, con diferencias cada vez menos marcadas en años secos, lo cual tiene relación con la prolongada estación húmeda de la zona, con un período seco de apenas 3 meses (CIREN-CORFO, 1990).

El máximo caudal se produce mayoritariamente en mes de junio, aunque en años secos este se puede desplazar a agosto.

La información con la cual se realizó el análisis fue la de caudales medios mensuales en régimen natural de los años hidrológicos 1929-30 a 2004-5, con vacíos en ciertos años que variaron la cantidad de datos disponibles, pero nunca bajo los 70 datos.

Las curvas de variación estacional se realizaron a partir de un análisis de frecuencia efectuado para cada mes, encontrando la distribución de mejor ajuste mediante el test χ^2 .

Curva de Variación Estacional Cautín en Rari-Ruca

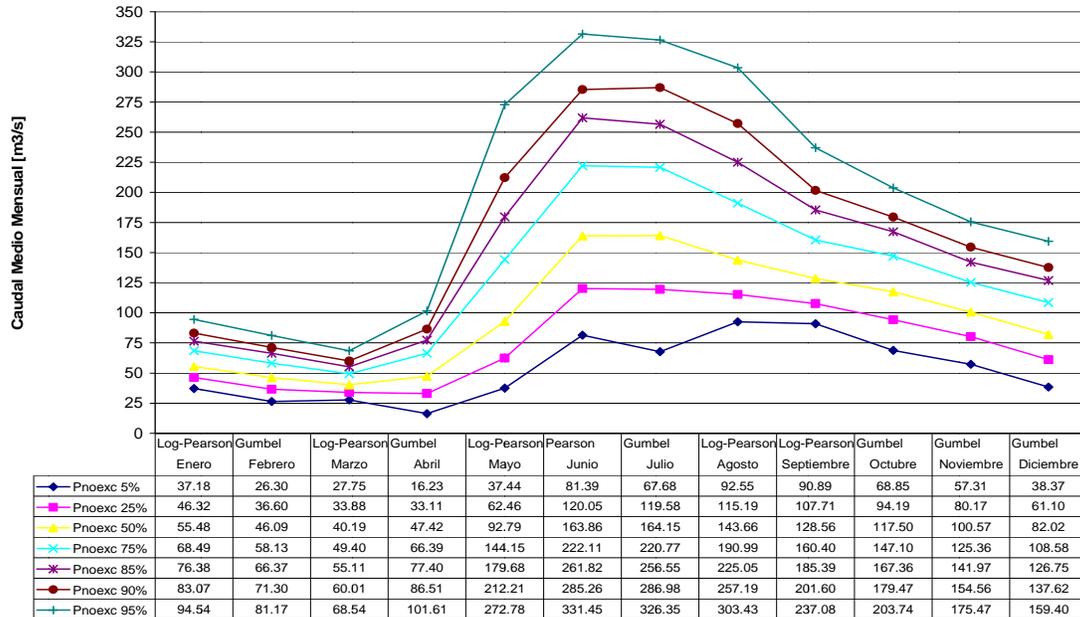


Figura 4.4.6: Curva de Variación Estacional en cuenca Cautín en Rari-Ruca.

4.4.1 Escalamiento Meteorológico Cautín en Rari-Ruca.

Ajuste de la línea base (LB).

El ajuste de la línea base comprendió los años 1989-1998. Cabe destacar que la información disponible para este análisis es más escasa que en los otros sistemas, y como se puede deducir, en un período tan corto de 11 años no existe una gran diversidad climática para tener años húmedos, normales y secos, pero en particular los años húmedos, cuyos máximos están previo al año 1989, mientras que el año 1997-1998 es conocido por ser uno de los períodos más secos, siendo superado sólo por la sequía del año 1969.

La información meteorológica utilizada para el escalamiento se presenta en la Tabla 4.4-2.

A continuación se presenta un análisis por variable meteorológica de interés.

Tabla 4.4-2: Resumen de estaciones meteorológicas utilizadas para Cautín en Rari-Ruca.

Nombre	Institución Responsable	Código BNA	Periodo de registro		Latitud S	Longitud W	Altitud [m]	Tipo [Pp,T,Q]
			Inicio	Final				
Cherquenco	DGA	09130001-K	01/11/87	Vigente	38° 41'	72° 00'	500	Pp
Curacautín	DGA	09122001-6	01/03/70	Vigente	38° 26'	71° 54'	500	Pp
Laguna Malleco	DGA	08350002-6	01/10/55	Vigente	38° 13'	71° 49'	830	Pp
Las Mercedes (Victoria)	DGA	09104003-4	01/05/84	Vigente	38° 14'	72° 20'	350	Pp
Lautaro	DGA	09124001-7	01/07/53	Vigente	38° 31'	72° 26'	210	Pp
Malalcahuello	DGA	09120003-1	01/12/88	Vigente	38° 28'	71° 34'	950	Pp
Pueblo Nuevo (Temuco)	DGA	09129005-7	01/07/53	Vigente	38° 28'	72° 33'	115	Pp
Quillén	DGA	09111002-4	01/11/59	Vigente	38° 28'	72° 25'	250	Pp
Vilcún	DGA	09131002-3	01/02/65	Vigente	38° 40'	72° 14'	290	Pp
Malalcahuello	DGA	09120003-1	01/12/88	Vigente	38° 28'	71° 34'	950	T
Cautín en Rari-Ruca	DGA	09123001-1	01/03/1929	Vigente	38° 26'	72° 00'	424	Q

Precipitación.

El ajuste de precipitación necesitó, como en la mayoría de los modelos, la determinación de un gradiente de precipitación con la altura. Los gradientes utilizados se presentan en la Tabla 4.4-3.

Tabla 4.4-3: Gradientes de Precipitación para la cuenca Cautín en Rari-Ruca

Mes	Pendiente [mm/Km]
Enero	161.7
Febrero	229.1
Marzo	308.7
Abril	233.0
Mayo	159.9
Junio	140.8
Julio	154.2
Agosto	94.9
Septiembre	116.0
Octubre	55.8
Noviembre	34.3
Diciembre	56.1

Aplicando la metodología del escalamiento descrita en el capítulo 3, se obtuvo el ajuste de la línea base para la cuenca. La Figura 4.4.7 presenta el ajuste estacional para el año promedio.

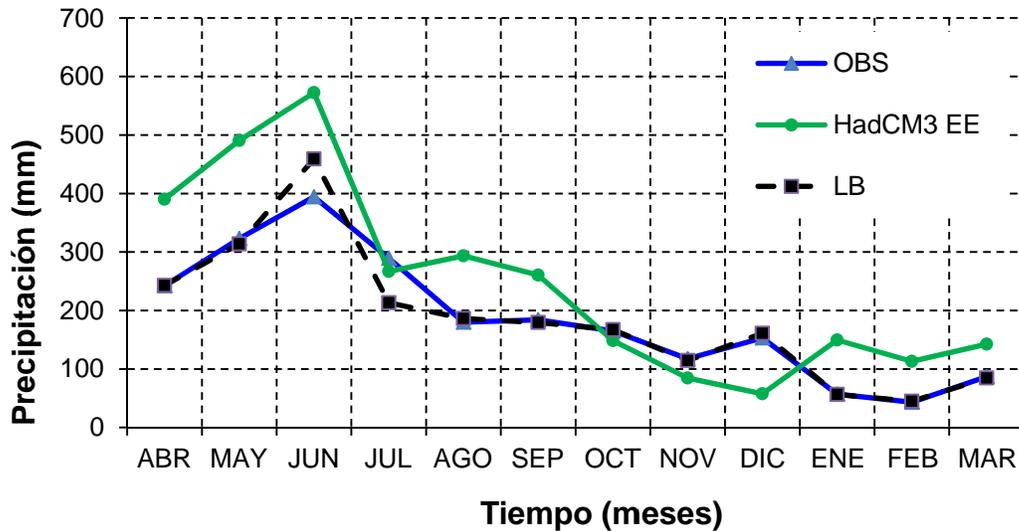


Figura 4.4.7: Ajuste de Curva de Variación Estacional del año promedio de Precipitación de Cautín en Rari-Ruca.

Como se puede apreciar, el ajuste de la línea base es bastante adecuado salvo en el mes de junio en donde se presenta una sobreestimación de la lluvia.

Con respecto a la simulación de los años húmedos y secos, cabe destacar que en general existe una sobreestimación de los máximos de precipitación por los ajustes, y en el caso de los mínimos se observa una correcta estimación, salvo la sobreestimación del mes de junio. (véase Figura 4.4.8)

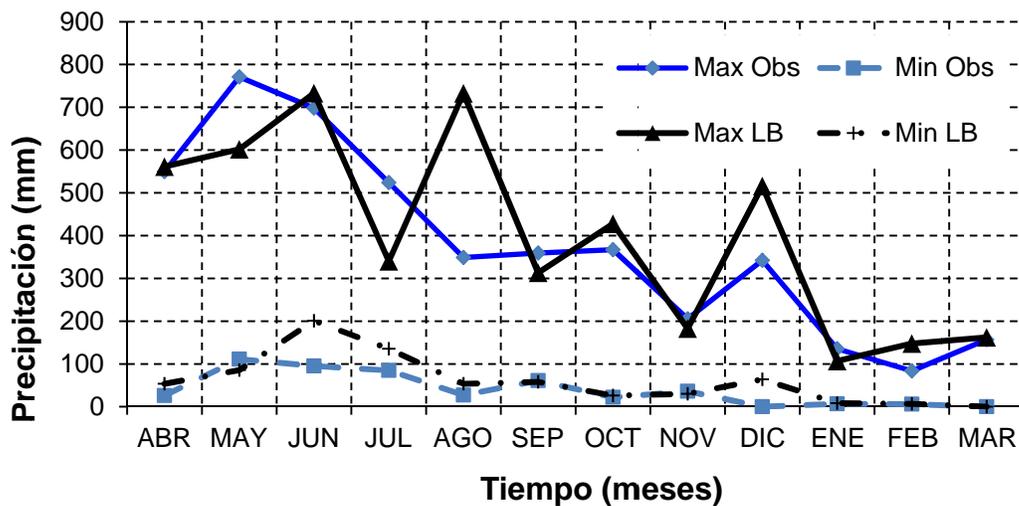


Figura 4.4.8: Representación de valores máximos y mínimos observados y corregidos HadCM3.

Temperatura.

El ajuste de la temperatura es satisfactorio. El año promedio queda bien representado y se respeta correctamente el ciclo anual promedio. (véase Figura 4.4.9)

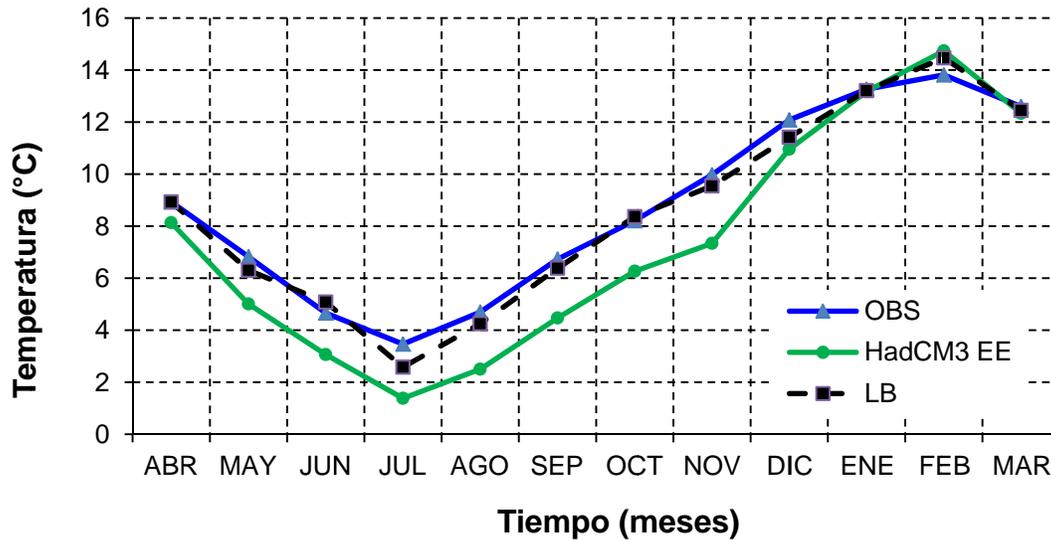


Figura 4.4.9: Curva de temperaturas medias mensuales observadas y ajustadas HadCM3.

El ajuste de los años extremos es aceptable, y en general se produce una subestimación de las temperaturas para los máximos y de sobrestimación en los mínimos. (Figura 4.4.10)

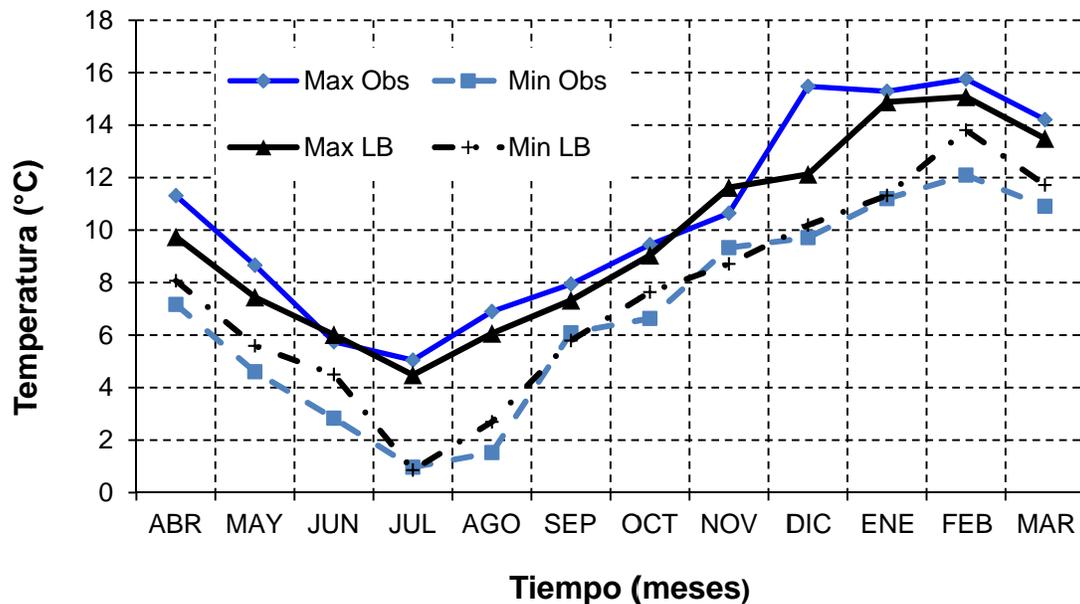


Figura 4.4.10: Temperaturas máximas y mínimas observadas y ajustadas HadCM3.

Ajuste del escenario A2.

Precipitación.

Una vez obtenidas las curvas de ajuste para el período de línea base se aplica esta corrección mensual para los valores simulados en el período 1999-2098. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.4.11. En general se observa una disminución de las precipitaciones en el futuro, principalmente en el período pluvial salvo para el mes de Julio, en donde para las dos primeras ventanas existen eventos extremos que hacen elevar la precipitación por sobre la línea base.

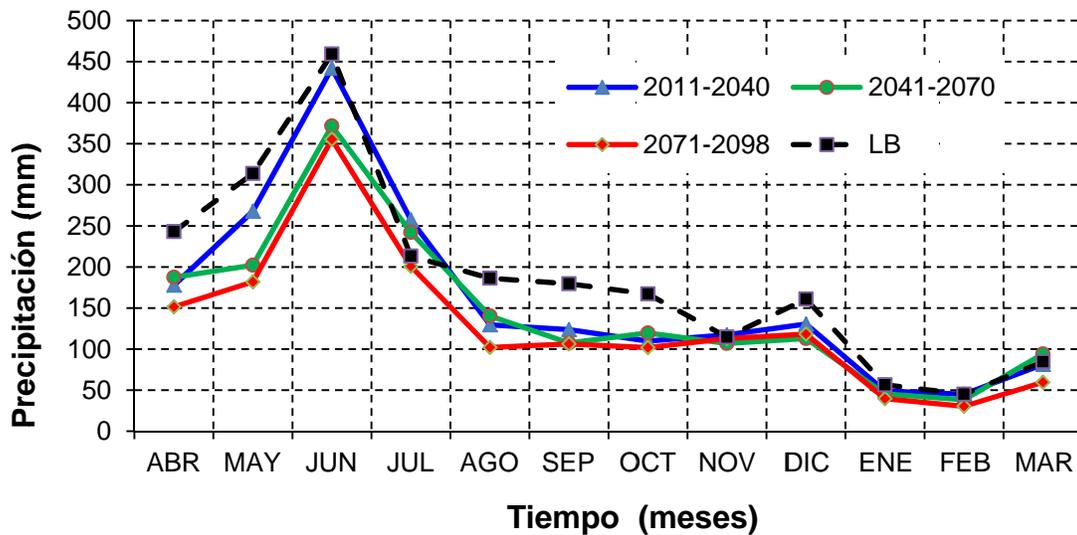


Figura 4.4.11: Variación estacional del año promedio de precipitaciones para las distintas ventanas de tiempo analizadas.

Con respecto a la variabilidad por cada período se puede observar que ésta cambia muy poco en las primeras 2 ventanas de tiempo (salvo para el mes de octubre), pero para la ventana de futuro más lejana esta ya presenta un aumento haciéndose mayor que la observada en línea base para casi todos los meses.

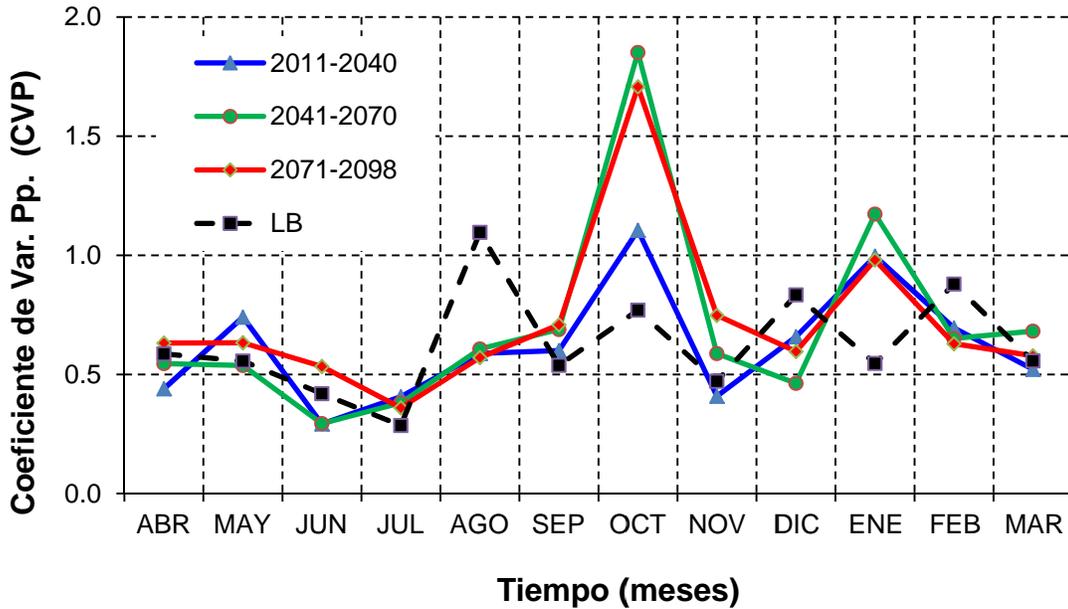


Figura 4.4.12: Coeficiente de Variación para diferentes periodos Línea Base y Futuro.

Finalmente se presenta en la la reducción de la precipitación media anual representativa de la cuenca (promediada por bandas de elevación) por período de análisis. Esta reducción alcanza hasta un 25% hacia la ventana del 2070-2098.

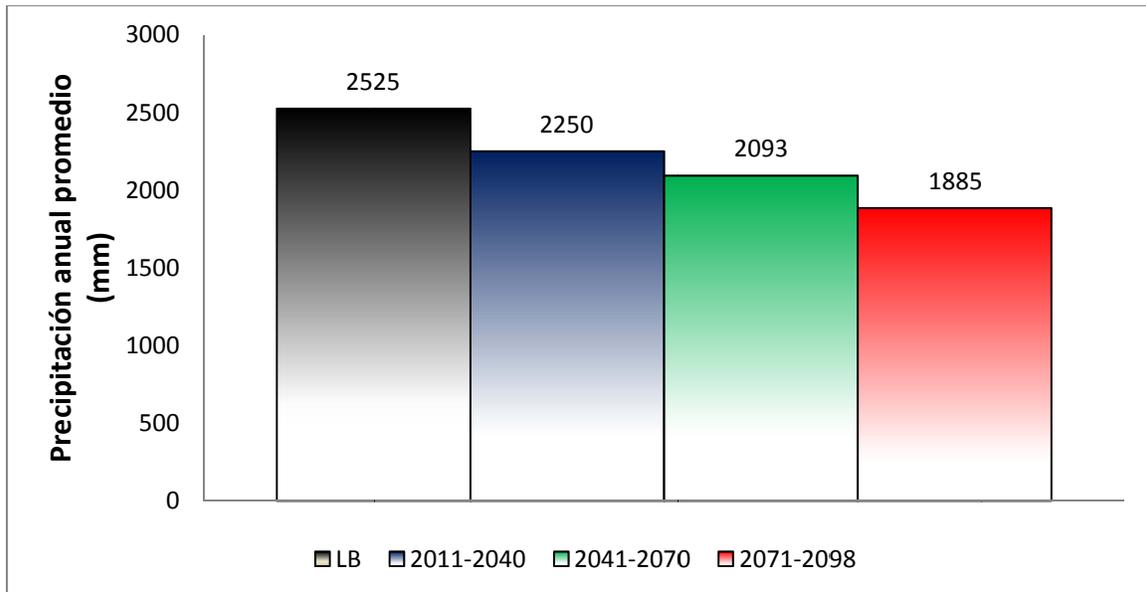


Figura 4.4.13: Precipitación representativa de la cuenca por período.

Temperatura.

Para la temperatura se obtiene un aumento sostenido, consolidando un aumento de casi 3°C con respecto a la línea base para el período 2070-2098. La variación estacional se presenta en la Figura 4.4.14.

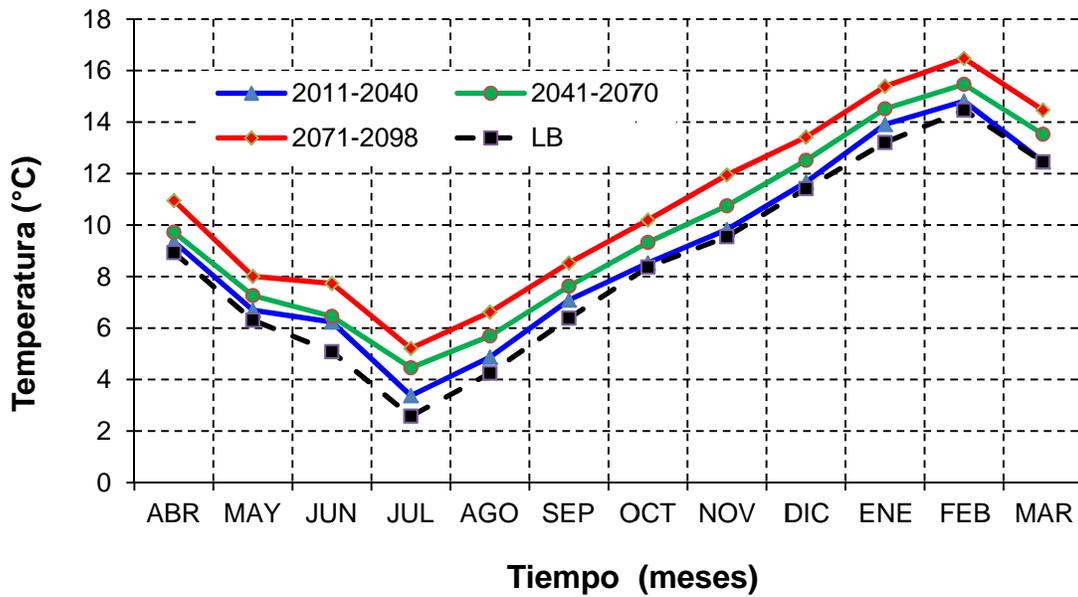


Figura 4.4.14: Temperaturas medias mensuales para los distintos períodos.

La variabilidad mensual de la temperatura se muestra en la Figura 4.4.15.

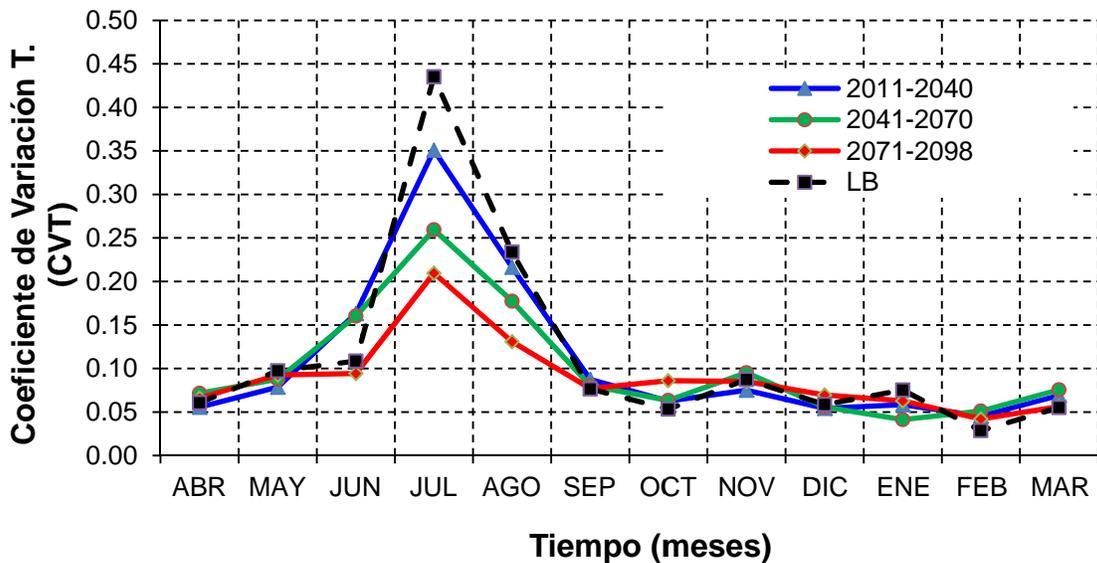


Figura 4.4.15: Coeficiente de Variación de la temperatura para las distintas ventanas de tiempo.

Como se puede observar la variabilidad en general se mantiene estable en las ventas de tiempo, salvo para el mes de Julio en donde decae de 0.45 a 0.25. Esto quiere decir que la dispersión de los valores de temperatura en general se hace menor respecto de su valor medio, por lo que el aumento de temperatura de 3°C presentado anteriormente no presentaría tanta variación y podría ser considerado robusto, el aumento de temperatura representativo de la cuenca para cada ventana de tiempo puede observarse en la Figura 4.4.16.

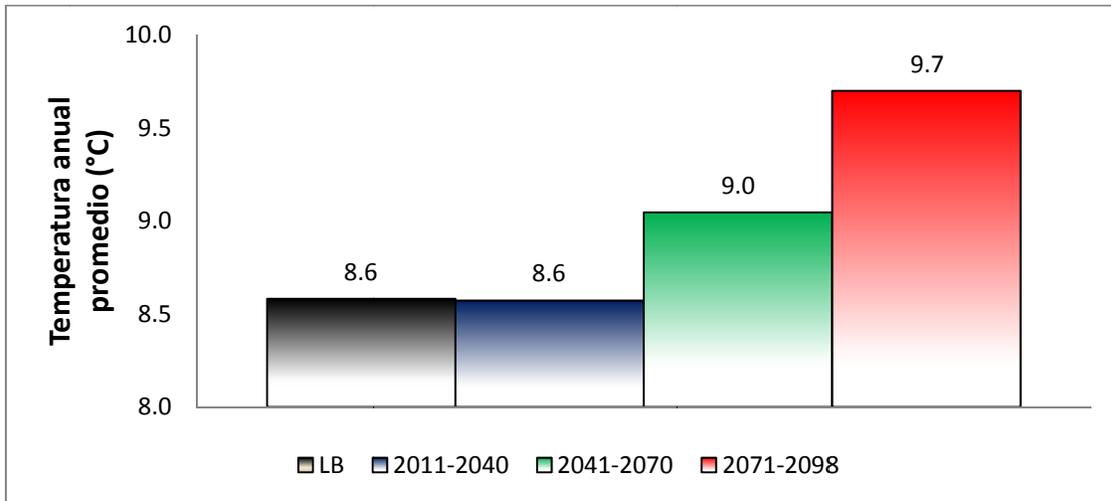


Figura 4.4.16: Temperatura promedio anual representativa de la cuenca por período de análisis.

4.4.2 Modelo Hidrológico Cautín en Rari-Ruca.

Resultados Calibración

El periodo de calibración del modelo fue desde Abril de 1989 hasta Marzo de 2007. El esquema de bandas de elevación utilizado se presenta en la Tabla 4.4-4.

Tabla 4.4-4: Bandas de elevación usadas en la modelación.

Cota [msnm]	Área [Km ²]	% Área [%]
2400-2700	7.6	0.5
2100-2400	18.0	1.3
1800-2100	46.6	3.3
1500-1800	191.1	13.5
1200-1500	315.5	22.3
900-1200	362.5	25.6
600-900	321.6	22.7
300-600	152.0	10.7

Se obtuvo un índice de Nash de 0.83, considerado bueno.

Las siguientes figuras muestran el grado de la calibración alcanzado para este modelo.

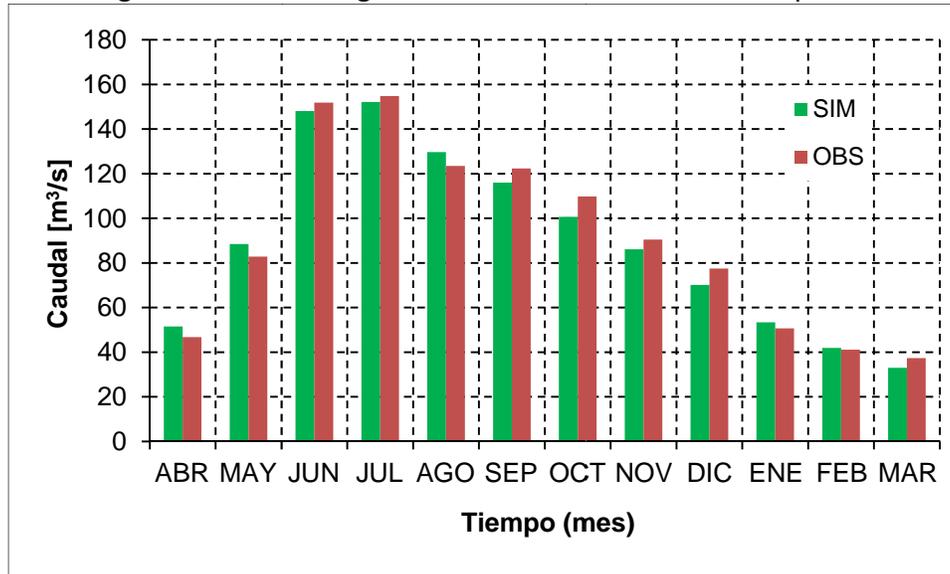


Figura 4.4.17: Caudales medios mensuales simulados en la calibración.

Tal como se puede apreciar en la Figura 4.4.17 los caudales simulados tienden a sobrestimar el periodo entre Abril a Agosto (periodo pluvial), mientras que en el periodo Octubre- Marzo se produce una ligera subestimación.

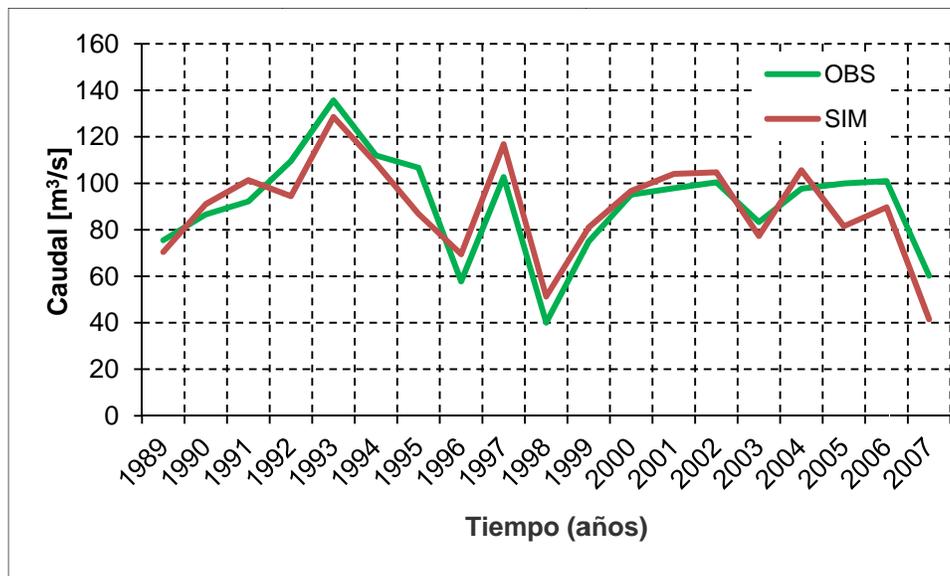


Figura 4.4.18: Caudal Total Anual periodo de calibración.

Con respecto a los montos anuales de escorrentía (Figura 4.4.18) cabe destacar que los montos son correctamente modelados siendo imposible un aumento en la exactitud. En general se describen un tramo en donde ocurre una subestimación del total anual acentuado hacia los extremos del periodo de calibración, mientras que desde el año 1993 hacia el 2000 se producen buenos ajustes con una leve tendencia a la sobreestimación.

En la Figura 4.4.19 se puede apreciar la curva de duración de los caudales para el periodo de calibración. Se puede apreciar un excelente ajuste pese a que se tiende a subestimar los caudales asociados a probabilidades de excedencia entre el 5 y 20%.

Por último se presenta la Figura 4.4.20 que presenta la bondad de ajuste del modelo. Al lado izquierdo se puede apreciar una adecuada simulación del caudal observado a nivel mensual, con puntos en torno a una recta de pendiente cercana a 1, aunque existe una dispersión controlada en los rangos de los valores medios de caudal. Con respecto a los montos anuales estos quedan bien ajustados aunque ligeramente subestimados.

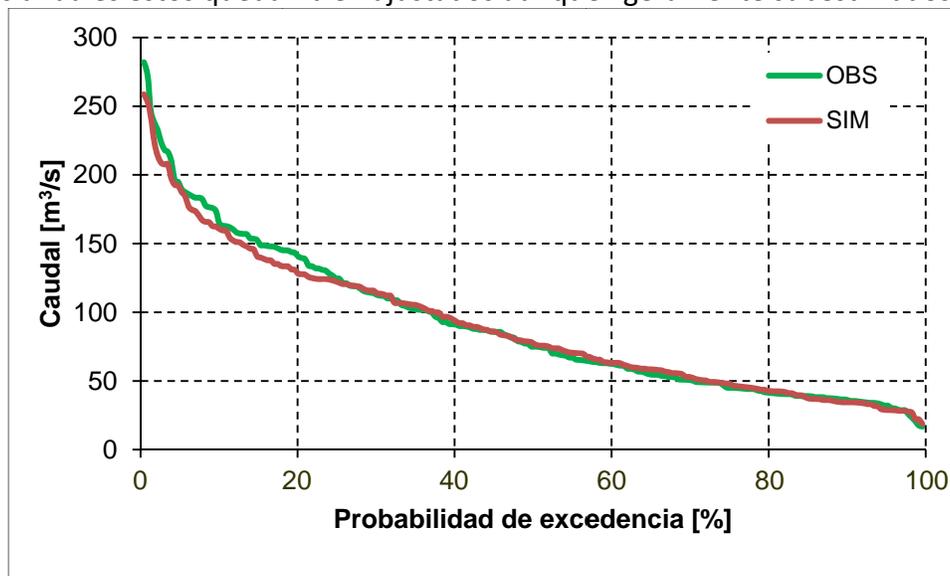


Figura 4.4.19: Curva de Duración de los caudales medios mensuales en el periodo de calibración.

Finalmente la Tabla 4.4-5 presenta un resumen de las variables precipitación, temperatura y caudal encontrados en el período de calibración.

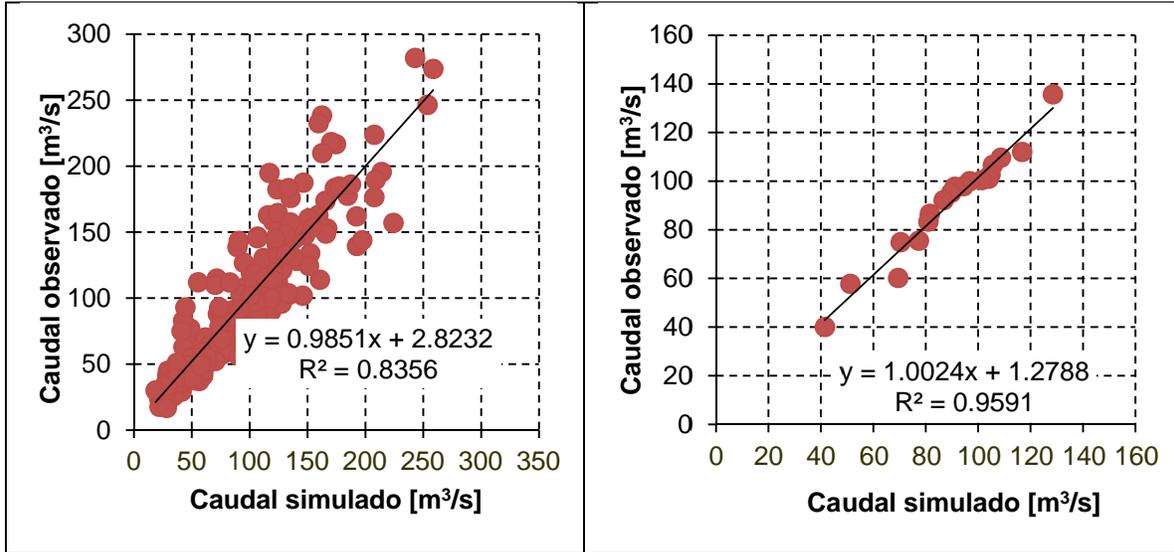


Figura 4.4.20: Resultados bondad de ajuste del modelo calibrado. (Izq) Se presenta la comparación a nivel mensual y (der) a nivel anual.

Tabla 4.4-5: Resumen de Precipitación, Temperatura y Caudal en periodo de Calibración

Mes	Precipitación [mm]		Temperatura [°C]		Caudal [m³/s]	
	OBS		OBS		OBS	SIM
Abr	372.8		8.8		46.8	51.6
May	491.5		6.8		82.9	88.5
Jun	710.4		4.5		151.8	148.0
Jul	506.0		3.5		154.8	152.1
Ago	362.7		4.8		123.5	129.7
Sep	316.3		6.6		122.3	116.0
Oct	325.2		8.3		109.8	100.7
Nov	238.9		9.9		90.4	86.1
Dic	257.2		11.9		77.5	70.1
Ene	124.3		13.3		50.7	53.4
Feb	92.3		13.9		41.2	41.9
Mar	160.7		12.2		37.3	33.0
Anual	3958.3		8.7		90.7	89.3

Resultados Línea Base.

La línea base comprendió desde el año 1989 (Abril) hasta el mes de Marzo de 1998. Los principales resultados se presentan a continuación.

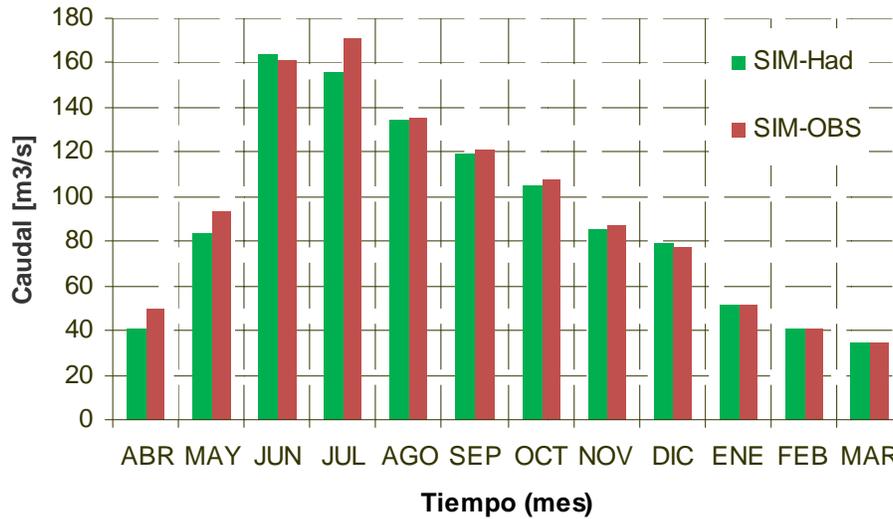


Figura 4.4.21: Resultados de los caudales simulados observados y simulados HadCM3.

Tal como se puede apreciar en la figura anterior los caudales simulados observados y HadCM3, posterior al escalamiento meteorológico, son bastante similares, pero las máximas diferencias se concentran entre los meses de Abril a Julio. Para efectos de comparaciones estas se efectuarán teniendo como base los caudales simulados con HadCM3.

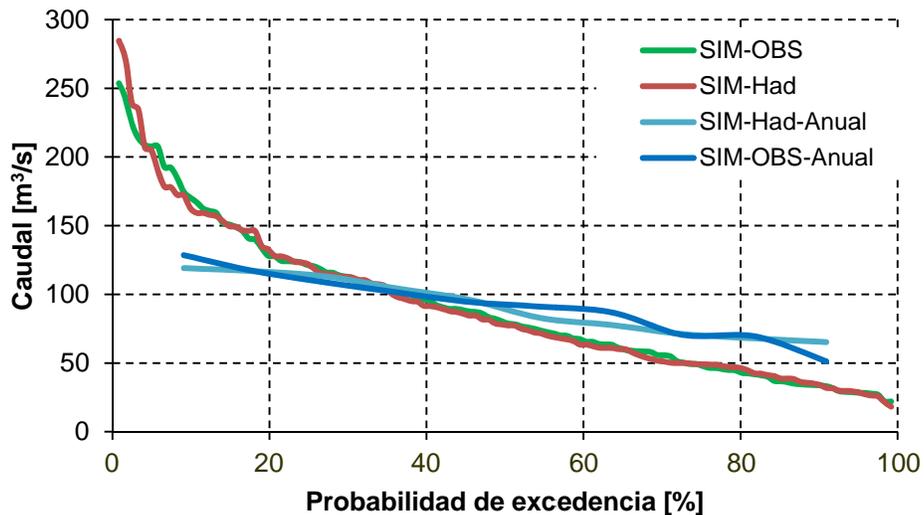


Figura 4.4.22: Curva de duración para los caudales medios mensuales y anuales en la línea base. Sistema Cautín.

Las curvas de duración mostradas en la figura 4.11 permiten concluir sobre la gran similitud entre los resultados simulados observados y simulados Had, solo un pequeño

rango asociado entre el 5 y 10% de probabilidad de excedencia hacen que la simulación con HadCM3 sea un poco subestimada.

La Tabla 4.4-6 muestra, para la línea base, un resumen de las simulaciones de precipitación, temperatura y caudal obtenidas. En general los resultados permiten concluir que la línea base ha sido muy bien representada.

Tabla 4.4-6: Resumen de resultados de simulaciones para la precipitación, temperatura y caudal en la línea base del sistema Cautín.

Mes	Precipitación [mm]		Temperatura [°C]		Caudal [m ³ /s]		
	OBS	HadCM3	OBS	HadCM3	OBS	SIM_OBS	SIM_HadCM3
Abr	226.9	227.0	8.9	8.9	50.9	54.2	52.4
May	303.7	296.1	6.8	6.3	99.8	103.2	97.5
Jun	375.6	429.0	4.7	5.1	157.4	161.1	175.9
Jul	276.3	212.7	3.5	2.6	147.3	157.1	145.2
Ago	175.2	179.8	4.7	4.2	121.7	130.2	129.4
Sep	174.6	170.9	6.7	6.4	120.3	117.4	116.9
Oct	161.6	163.3	8.2	8.4	107.5	100.6	99.2
Nov	112.2	109.9	10.0	9.5	84.4	83.0	82.1
Dic	143.4	151.6	12.1	11.4	83.2	69.0	70.3
Ene	56.3	55.7	13.3	13.2	50.4	52.6	53.5
Feb	41.3	42.8	13.8	14.5	40.1	39.8	40.4
Mar	80.1	78.0	12.6	12.5	36.0	30.8	31.0
Anual	2127.2	2116.7	8.8	8.6	91.6	91.6	91.2

Resultados escenario A2.

En la Figura 4.4.23 se puede apreciar la gran disminución de los caudales para el sistema. Los máximos comienzan a darse en el mes de Julio y en comparación, el descenso está más concentrado entre los meses de Mayo a Octubre que en los meses de verano propiamente tal.

La Figura 4.4.24 presenta un resultado muy relevante en cuanto a la caracterización de la variabilidad interanual. Si se observa con atención se podrá notar como la variabilidad está concentrada en los años que comprenden el futuro cercano y el futuro lejano, mientras que el horizonte medio es una etapa de transición, de hecho entre el 2034 y 2064 prácticamente no hay cambios en la variabilidad interanual.

Finalmente la Tabla 4.4-7 presenta un resumen con las variaciones de precipitación, temperatura y caudal para las diferentes ventanas de tiempo, así como también informa de la elasticidad del caudal con la precipitación.

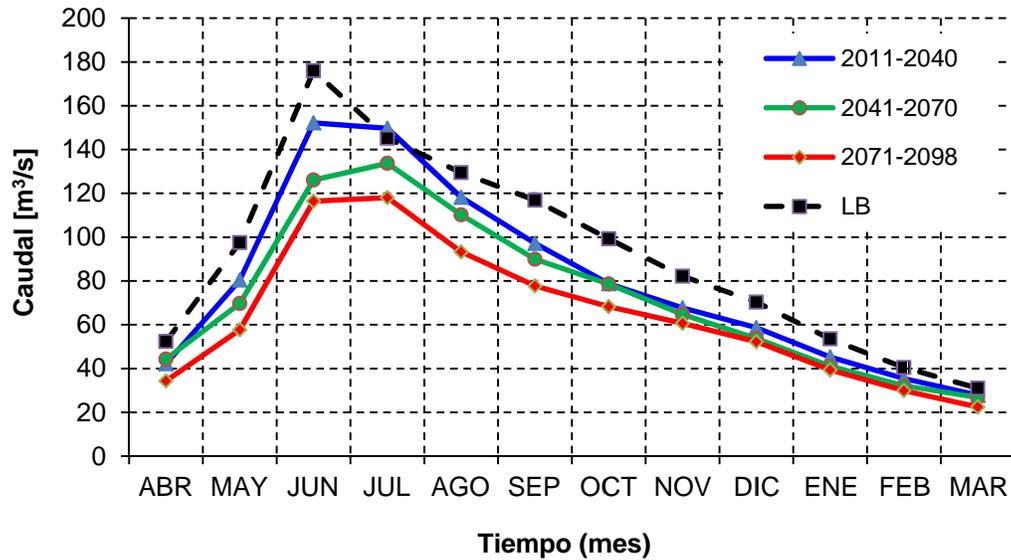


Figura 4.4.23: Caudales para el año promedio en el escenario A2 para el sistema Cautín en Rari-Ruca.

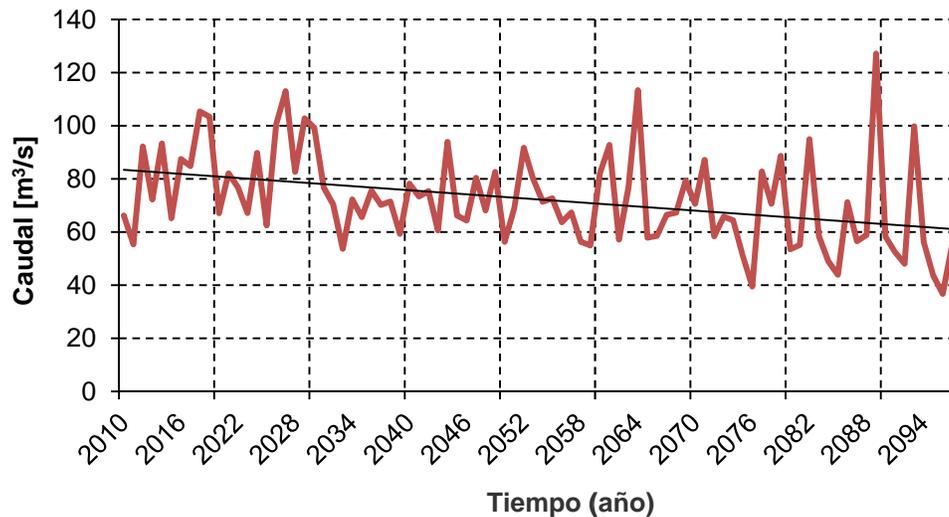


Figura 4.4.24: Caudales Anuales en el escenario A2 para el sistema Cautín.

Tabla 4.4-7: Resumen de los resultados futuros para el sistema Cautín.

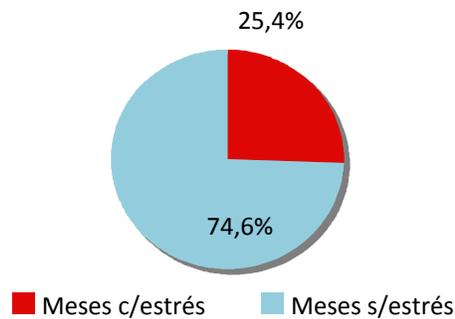
Período	Caudal [m ³ /s]	Variación [%]	Precipitación [mm]	Variación [%]	Temperatura [°C]	Variación [°C]	Q/Pp [mm/mm]
LB	91.2		2525		8.6		0.80
2011-2040	79.5	-12.8	2250	-10.9	8.6	0.0	0.79
2041-2070	72.6	-20.4	2093	-17.1	9.0	0.5	0.77
2070-2098	64.2	-29.6	1885	-25.4	9.7	1.1	0.76

4.4.3 Variación del estrés hídrico.

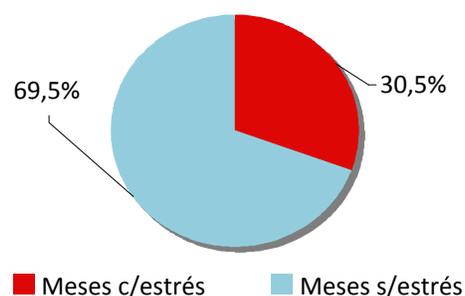
4.4.4 Probabilidad del 75%.

El criterio de estrés hídrico se definió como el caudal del 75%, que en este caso alcanzo los 45.5 m³/s.

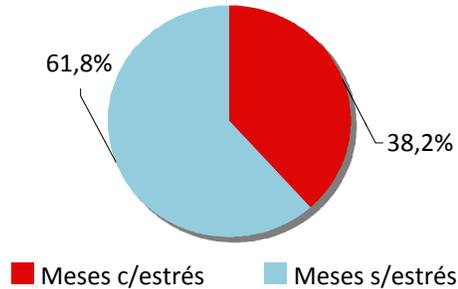
Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 75% Pexc Período 1989-2007



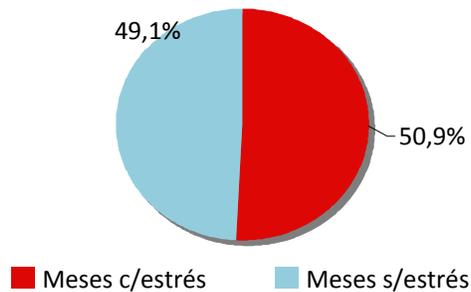
Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 75% Pexc Período 2011-2040



Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 75% Pexc Período 2041-2070



Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 75% Pexc Período 2071-2098

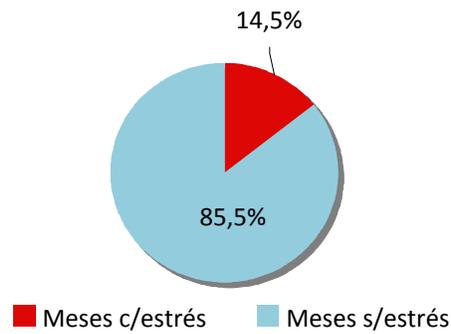


En este caso particular se aprecia cómo se pasa de una condición de estrés del 25% del tiempo a una del 51% en el futuro lejano, esto, de mantenerse la demanda en un caudal del 75% de probabilidad de excedencia, por lo que el resultado podría ser eventualmente más agudo aun.

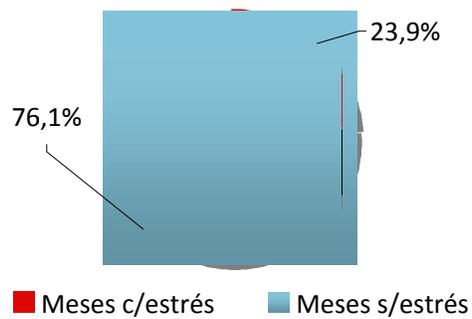
4.4.5 Probabilidad del 85%.

El criterio de estrés hídrico fue fijado en $39 \text{ m}^3/\text{s}$. Los resultados son los siguientes.

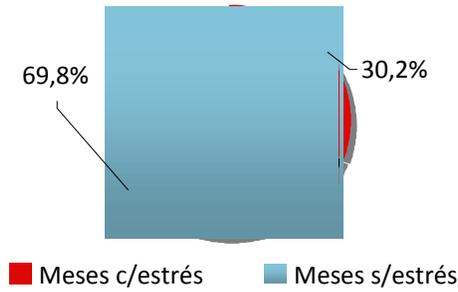
Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 85% Pexc Período 1989-2007



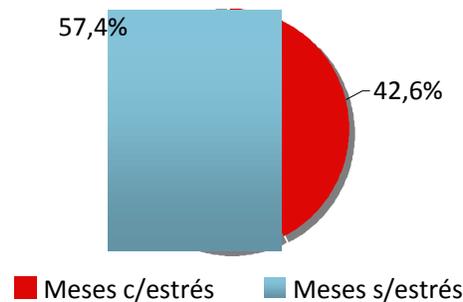
Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 85% Pexc Período 2011-2040



Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 85% Pexc Período 2041-2070



Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 85% Pexc Período 2071-2098

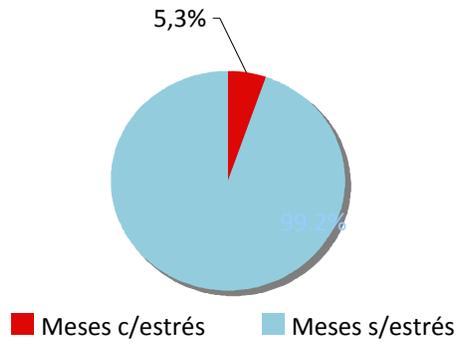


La demanda del 85% es una demanda clave desde el punto de vista agrícola. En este caso se puede apreciar como la cantidad de meses con estrés aumenta paulatinamente aumentando 3 veces la cantidad meses con estrés al llegar a la ventana de tiempo mas lejana.

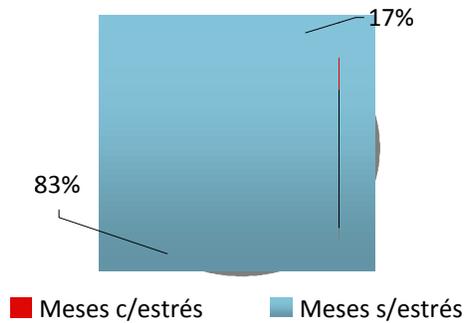
4.4.6 Probabilidad de excedencia del 95%.

En este caso el valor escogido fue de 33 m³/s como criterio de estrés hídrico.

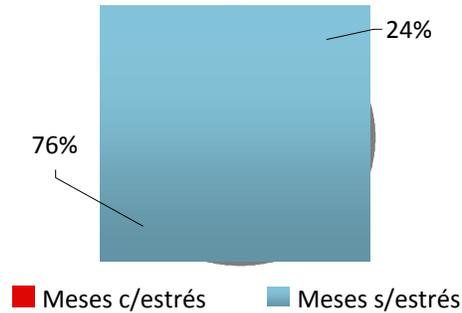
Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 95% Pexc Período 1989-2007



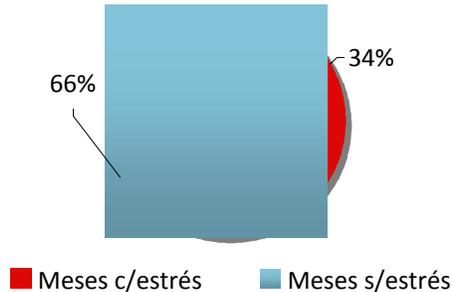
Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 95% Pexc Período 2011-2040



Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 95% Pexc Período 2041-2070



Porcentaje total del Tiempo con Déficit de Agua: Caudales Menores a Caudal Observado de 95% Pexc Período 2071-2098



En este caso, similar a los otros, se demuestra un aumento considerable en la cantidad de meses con estrés. Cabe destacar que se ha supuesto intrínsecamente que la demanda no varíe a lo largo del tiempo, supuesto fuerte, pero que permite tener un antecedente de cuál podría ser la situación a futuro de mantenerse el estado actual.

4.4.7 Comentarios.

En general la calibración del modelo es bastante buena, sin embargo lo que presenta más dificultades es el ajuste del escalamiento temporal. Los porcentajes de reducción

encontrados son robustos, pero los máximos de precipitaciones no son correctamente estimados en todos los casos, por lo que este resultado tiene un grado de dispersión que podría tanto aumentar como disminuir esta reducción, pero en ningún caso algo más allá de un rango del 5%.

Los procesos de escalamiento resultaron ser muy complejos y pueden ser revisados. Los cambios en la satisfacción de la demanda son en verdad alarmantes, con un aumento del orden del 10% para cada probabilidad de excedencia.

5 Conclusiones y recomendaciones.

El propósito principal de este trabajo es conocer la respuesta de los sistemas Illapel, Aconcagua, Teno y Cautín frente al escenario de cambio climático A2. La calibración de cada sistema ha sido bastante compleja principalmente debido a que la cantidad y calidad de la información es altamente variable en las zonas, pero principalmente por que el comportamiento de las cuencas al norte y al sur es muy distinto. Los modelos de circulación general como HadCM3 poseen una grilla muy grande y terminan con una sobrestimación en las cuencas andinas del norte y producen un efecto inverso hacia el sur. Esto hace que los ajustes de los escalamientos meteorológicos sean más complejos, principalmente en los meses donde la precipitación es escasa. Se hace altamente recomendable probar con distintos modelos de circulación general, que sean consistentes, como por ejemplo ECKAM, para estudiar la dispersión de los resultados, así como también probar con otro modelo hidrológico, con un tratamiento especial para cuencas andinas y por ende con un modelación nival más robusta.

En general las calibraciones obtenidas para todos los sistemas son buenas. Illapel pese a tener un índice de Nash del orden de 0.6, tiene una correcta estimación de la variación estacional de los caudales, así como en su curva de duración. El índice resulta bajo pues en los caudales anuales que el modelo no logra estimar son muy extremos, haciéndose que el índice caiga rápidamente. Los demás sistemas presentan un índices de Nash sobre 0.75.

Existe un problema generalizado en estos sistemas, que pasa por el traspaso de la precipitación y temperatura con la altura. El método utilizado corresponde al gradiente altitudinal, pero como se puede observar en el caso del Aconcagua, este gradiente cambia fuertemente al pasar los 1200 msnm. Es imprescindible contar con información sobre los 3000 msnm, puesto que los gradientes bajo los 1100 msnm son marcadamente pluviales, de alto valor y no consideran el fenómeno de congelamiento en la altura. Distinto sería el caso de tener un valor de precipitación líquida y sólida sobre los 3000 msnm, pues permitiría corregir desde ya todas las isoyetas y recalcular gradientes más representativos. En este caso esta fue una de las etapas más costosas en tiempo y análisis junto con la determinación de las funciones de corrección pues están estrictamente ligadas.

Finalmente los valores de reducción y aumento de precipitación, temperatura y caudal pueden ser considerados como robustos para el modelo hidrológico escogido y para el modelo de circulación general utilizado. Los cambios de estacionalidad tienen su explicación producto del comportamiento de las variables meteorológicas y el desafío es la modelación con más modelos de circulación general para poder acotar la incertidumbre en cuanto a la magnitud de los cambios, y a la prueba de nuevos modelos hidrológicos que permitan resolver la gran complejidad de estos sistemas con un costo computacional acotado, que es a lo que apunta WEAP.