

# **SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

## **XXI CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

### **EVALUACIÓN DE IMPACTOS HIDROLÓGICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO E INCERTIDUMBRE ASOCIADA EN DOS CUENCAS ANDINAS**

**TOMÁS GÓMEZ Z. <sup>1</sup>**  
**BRUNO MORALES U. <sup>1</sup>**  
**XIMENA VARGAS M. <sup>2</sup>**

#### **RESUMEN**

Se analiza la evolución temporal tanto del caudal medio anual como del centro de gravedad del hidrograma anual y de las variables meteorológicas de precipitación y temperatura bajo diferentes escenarios de cambio climático en cuencas de la IV y la VI región de Chile.

Para estos efectos se calibran modelos hidrológicos a escala diaria en las cuencas de los ríos Cogotí y Pangal a base de información histórica.

Utilizando proyecciones futuras entregadas por el modelo de circulación global MK3.6 para el período 2011-2070 bajo los Escenarios de Patrones de Evolución de Concentración de CO<sub>2</sub> (citados como RCP 2.6, 4.5 y 8.5) se obtienen valores para las variables meteorológicas en estudio en los sitios de interés. Estas predicciones son utilizadas como información de entrada en los modelos hidrológicos, generando proyecciones de caudales bajo diferentes contextos. La incertidumbre asociada a estas proyecciones se determina, para cada escenario en base a diez conjuntos de series alternativas que genera el modelo de circulación global.

Para los tres escenarios, usando las medias móviles de 20 años se aprecia, en ambas cuencas, una tendencia al aumento de las temperaturas junto a una disminución de las precipitaciones. Además, se proyectan una inclinación hacia la disminución de los valores de caudal medio anual, aunque la diferenciación entre los escenarios no resulta tan clara debido a los márgenes de incertidumbre asociados. El centro de gravedad del hidrograma anual muestra tendencias a ocurrir en fechas más tempranas, en especial en la cuenca del río Pangal debido a su régimen nival.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, U. de Chile - mail: tgomez@ing.uchile.cl

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, U. de Chile - mail: xvargas@ing.uchile.cl

## 1. INTRODUCCION

Los estudios del cambio climático realizados en la primera década del siglo 21 a base de distintos modelos de circulación global de la atmósfera y recopilados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, IPCC, en general proyectaban aumentos en la temperatura media en Chile central así como una disminución en la precipitación anual durante el presente siglo, resultados que también se obtienen a mayor resolución con modelos regionales (DGF, 2006) que se basan en los anteriores. Los escenarios futuros considerados se basaban en las emisiones de gases de efecto invernadero que se producirían para diferentes proyecciones de variaciones tanto de la población como de las actividades económicas durante el siglo 21 (IPCC, 2007). En general, estas proyecciones de variación de precipitaciones futuras son más robustas en algunas regiones que en otras y se ha demostrado (Bates et al., 2008) que las proyecciones son menos consistentes entre los diversos modelos de circulación general de la atmósfera a medida que la escala espacial disminuye.

Además, durante este siglo se proyecta (Barnett et al, 2005) una disminución del agua almacenada en glaciares y mantos nivales, esperándose cambios importantes en el largo plazo en las cuencas de régimen nival. La disminución esperada de las precipitaciones tiende a cambiar el volumen de escorrentía anual y junto con el aumento de temperatura afecta principalmente el volumen de nieve acumulada debido a la ocurrencia de precipitación líquida a menores altitudes. Esto conduciría a derretimientos tempranos en verano o primavera.

En cuencas chilenas los cambios detectados (Cortes et al., 2011) son consistentes sólo con tendencias en la precipitación ya que la escorrentía en cuencas que muestran alta correlación con la temperatura no muestran tendencia. Lo anterior sugiere que las cuencas en la región tienen una respuesta diferente a los cambios en temperatura si se las compara con cuencas de régimen similar del hemisferio norte concluyéndose que la cantidad de precipitación y el instante en que éstas ocurren son la fuente de la mayor parte de la variabilidad de la escorrentía tanto en cuencas de régimen pluvial como nival.

Estudios de cambio climático realizados en Chile para el análisis del impacto en la disponibilidad de recursos hídricos (DIC, 2010; Vicuña et al, 2011; Lagos, 2009) consideran como entrada de los modelos hidrológicos las series de variables meteorológicas que provienen de modelos de circulación global de la atmósfera, GCMs, previamente escaladas para la región usando ya sea modelos atmosféricos regionales o procedimientos estadísticos.

Como se ha indicado, los GCMs suponen variaciones temporales de las concentraciones de los gases componentes de la atmósfera determinadas por el IPCC, a base de escenarios de rangos de variaciones tanto de la población como de las actividades económicas proyectadas para el siglo 21; sin embargo, recientemente en el marco del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) se han desarrollado nuevos escenarios que se basan en la evolución de las forzantes radiativas en el curso del presente siglo. Estos nuevos escenarios denominados RCP están siendo abordados a través de nuevas versiones de los modelos de circulación global; en particular aquí se utilizan los resultados del

modelo MK 3.6 desarrollado por la Organización de la Comunidad Científica y de Investigación Industrial (CSIRO). Este GCM difiere de su antecesor, MK 3.0, al incluir esquemas modificados para el tratamiento de los aerosoles, radiación y capa límite. Además, al considerar distintas condiciones iniciales y las mismas condiciones de forzantes radiativas entrega diez conjuntos de proyecciones futuras que permiten tener en cuenta la incertidumbre de las entradas meteorológicas en el modelo hidrológico (Collier et al, 2010).

Al considerar las observaciones de Christensen et al. (2007), el cual señala que las predicciones de clima sobre Sudamérica están a una lata incerteza debido a las dificultades de los modelos en reproducir la alta variabilidad interanual y decadal (El Niño/La Niña, Oscilación Decadal del Pacífico), el efecto orográfico y la gruesa resolución espacial respecto al territorio de la costa del Pacífico. Adicionalmente, las bandas de incerteza del forzante se hacen más amplias a medida que avanza el siglo (Christensen et al., 2007).

La utilización de los diez conjuntos distintos en cada escenario pretende realizar entonces una análisis de sensibilidad de los resultados, en especial considerando los antecedentes anteriores, que permitan reflejar el efecto de todos estos factores, exógenos al proceso de modelación hidrológica.

## **2. METODOLOGIA**

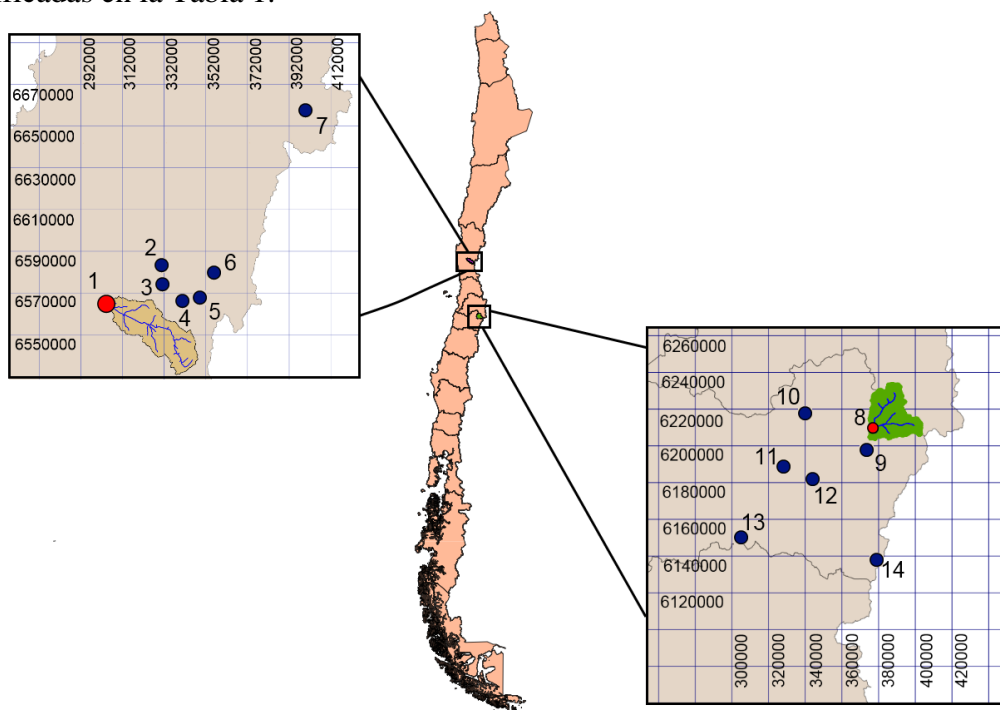
### **2.1 ZONAS DE ESTUDIO**

Las zonas de estudio están ubicadas en la IV Región de Coquimbo, en la sub-cuenca del valle del río Cogotí perteneciente a la cuenca del río Limarí y en la VI región del Libertador Bernardo O'Higgins, en la sub-cuenca del valle del río Pangal, perteneciente a la cuenca del río Cachapoal. Las cuencas fluviométricas en estudio quedan definidas por las estaciones fluviométricas administradas por la Dirección General de Aguas especificadas en la Tabla-1. Ambas estaciones presentan registros de regímenes hidrológicos prácticamente inalteradas debido a la ausencia de actividades que presenten usos de los recursos hídricos aguas arriba de su ubicación, por lo cual se considera que se encuentran en régimen natural. Su ubicación se puede ver en la Figura 1.

El clima predominante en la cuenca del río Cogotí es un semiárido, variando entre templado y frío en función de la altura, con presencia de lluvias invernales, el cual no está influenciado por el océano, cuyas precipitaciones en invierno que permiten independizarse del clima desértico y presencia de nieves permanentes que constituyen un aporte significativo de agua en el período estival (DGA, 2004). Por otro lado, para el río Pangal se tiene un clima templado con estación seca corta, de 3 a 4 meses, donde por sobre los 800 m, el ascenso del relieve provoca grandes variaciones en el clima, ya que las temperaturas medias en el invierno se aproximan a 0° y las precipitaciones invernales se hacen sólidas (DMC, 2012).

Ambas cuencas son separadas en bandas de elevación que permiten la utilización de distribuciones logarítmicas mensuales planteadas para las precipitaciones y temperaturas en función de la altitud, con el fin de hacer representativas esta información meteorológica al interior de la cuenca. El planteamiento de las distribuciones se realiza mensualmente y la

información utilizada se obtiene desde las estaciones de registro meteorológicos especificadas en la Tabla 1.



**Figura 1.** Ubicación general de las cuencas

**Tabla 1.** Estaciones meteorológicas utilizadas como fuentes de información.

	Estación	Cuenca <sup>3</sup>	Tipo	UTM E [m]	UTM N [m]	Altura [m.s.n.m.]	Inicio registro	Fin de registro
1	Cogotí en Fragueta	Cogotí	Q	320235	6556413	1065	ene-71	-
2	Carén	Cogotí	Pp / T	330475	6584800	740	may-43	-
3	Tulahuén	Cogotí	Pp	331216	6572909	1020	ene-83	-
4	Tascadero	Cogotí	Pp	340158	6567410	1230	ene-64	-
5	Las Ramadas	Cogotí	Pp / T	348580	6567121	1380	ene-61	-
6	Cerro Vega Negra	Cogotí	T	354943	6579789	3600	may-49	-
7	Laguna Embalse	Cogotí	Pp / T	399735	6658116	3160	may-43	-
8	Pangal en Pangal	Pangal	Pp/Q	377703	6209636	1500	nov-01/ dic-85	-
9	Cachapoal 5 km bajo Cortaderal	Pangal	Pp	373401	6198518	1127	mar-99	-
10	Rancagua dcp	Pangal	Pp	338660	6215240	520	ene-80	-
11	Rengo	Pangal	T	328455	6189449	310	may-80	mar-05
12	Central Las Nieves	Pangal	Pp	343037	6181879	700	jun-74	may-06
13	Convento Viejo	Pangal	T	304772	6150426	250	abr-80	mar-05
14	Termas del Flaco	Pangal	T	378490	6138164	2650	ago-99	mar-06

En el caso de la cuenca definida por la estación Cogotí en Fragueta se definen bandas que presentan áreas semejantes, dejando como variable el intervalo de altura que las define. Por

<sup>3</sup> Referencia a la cuenca en que la información fue utilizada. Dicha estación no se encuentra necesariamente al interior de la cuenca especificada.

otro lado, en el caso del río Pangal, se definen bandas en función de intervalos regulares de altura, dejando el área como una variable dependiente definida por la hipsografía de la cuenca.

## 2.2 SELECCION DE ESCENARIOS

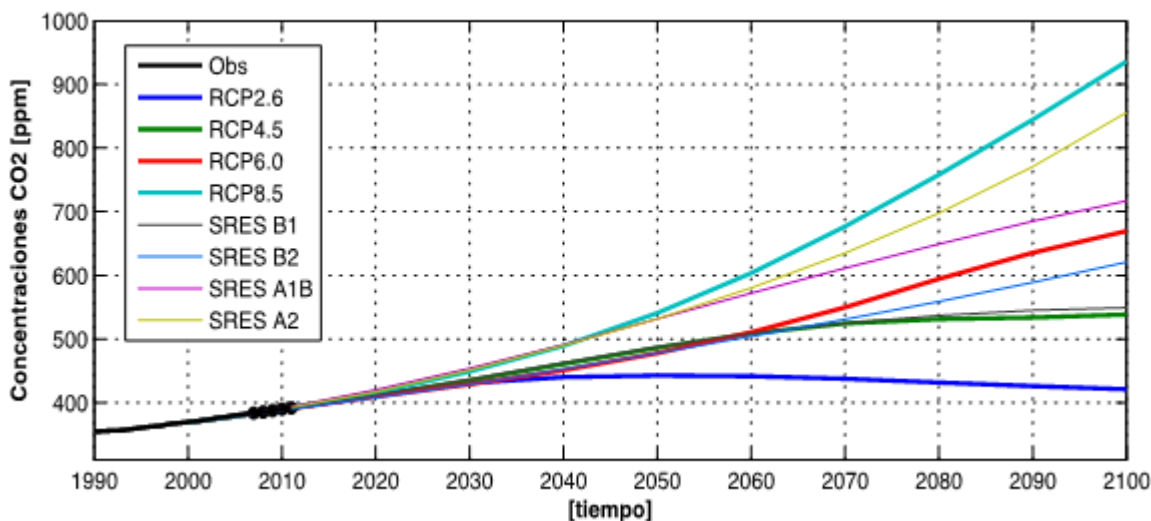
Recientemente, bajo la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) se han actualizado algunos modelos de circulación global de la atmósfera de manera de entregar en el corto plazo predicciones del cambio climático como parte de un sistema de pronóstico, mientras que en el largo plazo los modelos intentan proveer de proyecciones de respuestas del clima a cambios en las composición de la atmósfera y cobertura de suelo (Taylor et al., 2012). Las proyecciones de cambio climático del CMIP5 están gobernadas por escenarios de concentraciones o emisiones consistentes con los itinerarios representativos de concentración descritos por Moss et al. (2010). A base de estos itinerarios - comúnmente conocidos como RCP - en la quinta fase del proyecto CMIP5 se han escogido cuatro escenarios que proveen una estimación gruesa de las forzantes radiativas en el año 2100 en relación a las condiciones pre industriales. Los cuatro escenarios, que se resumen en la Tabla 2, suponen niveles de forzantes de radiación fijas (i.e. calentamiento neto) estimadas para el año 2100. Estos escenarios se centran en la radiación resultante y no en contextos socio-económicos, al reconocer que distintas condiciones de desarrollo pueden impulsar un mismo efecto a largo plazo.

**Tabla 2.** Itinerarios de Concentración Representativos del CMIP5

Nombre	Forzante de radiación [Wm <sup>-2</sup> ]	Concentración [ppm]	Itinerario
RCP 8.5	> 8.5 en 2100	> 1,370 CO <sub>2</sub> -equiv. en 2100	Creciente
RCP 6.0	~6 estabilizándose después de 2100	~850 CO <sub>2</sub> -equiv. (estabilizándose después de 2100)	Estabilización sin Overshoot
RCP 4.5	~4.5 estabilizándose después de 2100	~650 CO <sub>2</sub> -equiv. (estabilizándose después de 2100)	Estabilización sin Overshoot
RCP 2.6	Peak en ~3 antes de 2100 y luego declina	Peak en ~490 CO <sub>2</sub> -equiv. antes de 2100 y luego declina	Peak y declinación

Se tiene como referencia de forzante de radiación actual un valor cercano a los 2 [Wm<sup>2</sup>]. De estos escenarios, se han seleccionado para este estudio los correspondientes a los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5. Esta elección se basa en que estos tres escenarios representan la condición más favorable, una condición media y la condición más desfavorable respectivamente, además de ser los más extensamente desarrollados según las directrices definidas en el programa CMIP5 (CMIP5). En la Figura 2 se observan las concentraciones de dióxido de carbono equivalentes en la atmósfera que funcionan como condiciones forzantes para los modelos de circulación

global, tanto para los escenarios del CMIP5 como para los escenarios SRES definidos anteriormente (IPCC, 2007) ahora considerados obsoletos.



**Figura 2.** Concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico equivalente según diferentes escenarios.

En base a esta información se define un periodo de línea base entre los años 1970-2010, con el fin de tener un contexto de referencia para fines comparativos y dos periodos futuros de análisis para evaluar los efectos del cambio climático sobre las variables meteorológicas e hidrológicas. El primer periodo corresponde al 2011-2040, mientras que el segundo se define entre los años 2041-2070. Estos periodos se escogen en función de las emisiones mostradas en la Figura 2: durante el primer periodo los tres escenarios en evaluación presentan condiciones similares de aumento, mientras que en el segundo ya es posible observar una mayor diferenciación entre ellos y por tanto, un mayor efecto sobre las otras variables.

### 2.3 METODOLOGIA DE ESCALAMIENTO

Las proyecciones climáticas dadas por los GCM poseen una resolución espacial variada y en general gruesa. El modelo MK3.6 utiliza una grilla de 1.87°x1.87° de latitud/longitud, por lo que para poder utilizarlo es necesario realizar procesos de escalamiento que los transformen a una escala menor.

Dentro de la última década, se han desarrollado diversos métodos de escalamiento - *downscaling* - existiendo dos tipos: estadístico y dinámico. Los procesos de *downscaling* estadístico han sido ampliamente usados con fines hidrológicos por diversos autores (Li et al. 2010, Perkins, S. 2011, Terink et al. 2009, Wood et al. 2004 y Wood et al. 2002 entre otros). Por otro lado, para aplicar métodos de escalamiento dinámicos sería necesario tener un modelo climático regional RCM, como por ejemplo, el modelo PRECIS que en Chile ha sido forzado solo por el GCM HadCM3 (DGF, 2006) y por el GCM ECHAM5 (DGF, 2012). De ambos procesos se escoge el procedimiento estadístico por su simplicidad de aplicación. Sin embargo, todos estos estudios dejan sesgos no despreciables debido a la automatización de las mismas correcciones respecto a los datos observados.

Para eliminar los sesgos producidos en un proceso estadístico se subdivide el procedimiento (Lagos y Vargas, 2011) en una componente espacial y otra temporal.

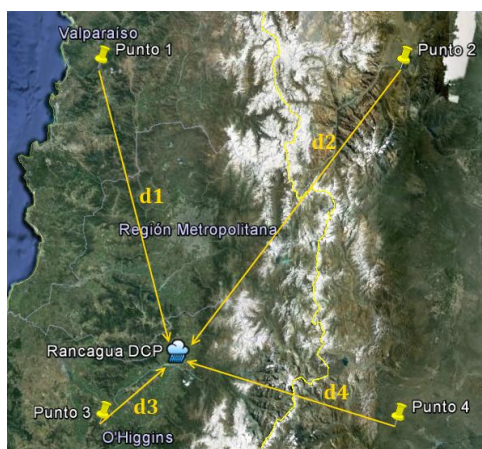
### Escalamiento Espacial

Este procedimiento es aplicado para escalar el GCM a una estación meteorológica local. Este consiste en multiplicar por el inverso de la distancia la información de cada uno de los cuatro nodos del modelo que envuelven la posición de dicha estación. Dicho procedimiento se muestra en la Figura 3.

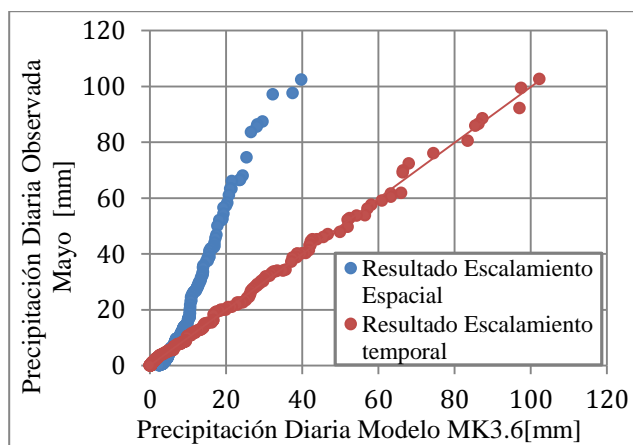
### Escalamiento Temporal

Una vez desagregado espacialmente el GCM a la escala de la estación en el período de observación, la serie meteorológica se ajusta a las observaciones locales mediante correlaciones estadísticas buscando hacer coincidir por probabilidad de excedencia tipo Weibull en una recta de pendiente uno entre ambas series.

Un ejemplo del resultado de este procedimiento para el mes de Mayo se muestra en la Figura 4 para la estación Rancagua DCP. El ajuste temporal obtenido en el período observado se aplica para cada escenario futuro en todo el período en estudio 2011-2070.



**Figura 3.** Localización de puntos del modelo MK3.6 respecto a la estación meteorológica Rancagua DCP.



**Figura 4.** Ejemplo de resultados de escalamiento espacial y temporal, en el mes de Mayo para el escenario RCP4.5 en las precipitaciones.

## 3. MODELOS HIDROLOGICOS

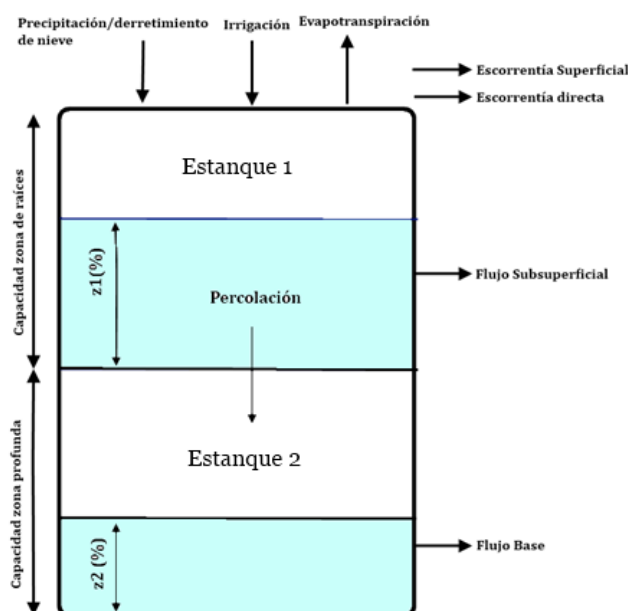
### 3.1 MODELO DE SIMULACION WEAP

Para simular los recursos hídricos disponibles en la cuenca se usa el modelo WEAP<sup>4</sup> que es una herramienta computacional para la evaluación y planificación del uso del agua desarrollado por el Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute. Este modelo ha sido usado exitosamente en estudios anteriores en Chile (Lagos y Vargas, 2009; DIC, 2010; Vicuña et al, 2011) relacionados con cambio climático. Su módulo hidrológico considera la cuenca configurada como un conjunto de elementos (subcuencas o bandas de

<sup>4</sup> [www.weap21.org](http://www.weap21.org)

elevación) que descargan a los cauces. Cada elemento es representado por dos estanques de capacidades  $Z_1$  y  $Z_2$  donde se desarrollan los procesos del ciclo de escorrentía (Figura 4). El primero modela la zona radicular y es el que recibe los aportes del riego y de la precipitación o deshielo, como entrada al sistema. Las salidas del primer estanque corresponden a la escorrentía superficial, la cual está asociada al nivel porcentual de llenado del estanque, y la escorrentía subsuperficial. Una vez que este estanque se satura existe escorrentía directa. Las otras salidas corresponden a la evapotranspiración y a la percolación, esta última pasa al segundo estanque del modelo. El segundo estanque modela el almacenamiento del suelo bajo la zona radicular y su salida corresponde al flujo base.

Las variables meteorológicas se determinan en cada elemento de acuerdo a distribuciones logarítmicas mensuales en el caso de precipitaciones y temperatura mientras que para el viento se utilizan los antecedentes entregados por el programa desarrollado por Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile conocido como Explorador Eólico<sup>5</sup> para derivar un valor promedio mensual en cada banda.



**Figura 5.** Esquema conceptual del planteamiento hidrológico del modelo WEAP.

En cuanto al índice de nubosidad se considera razonable suponer cielo cubierto en días con lluvia y un valor que varía aleatoriamente según una distribución normal, cuya media mensual y desviación estándar queda definida a base de antecedentes disponibles en alguna estación meteorológica, para el resto de los días. Para la humedad relativa puede también considerarse un perfil definido a base de mediciones disponibles. Sin embargo, dada la escasez de información, se propone utilizar la información obtenida de los modelos de circulación atmosférica global como el MK3.6.

<sup>5</sup> <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>



### 3.2 CALIBRACION

Para la evaluación del proceso de calibración se utiliza un conjunto de indicadores de desempeño ya que, según su definición, distintos índices de evaluación de ajuste pueden entregar un buen resultado a pesar de presentar errores sistemáticamente o en algunos casos sobrevalorar algunos errores (Krause, 2005). Para evaluar el ajuste de los caudales simulados ( $P_i$ ) por el modelo WEAP con los datos registrados en la estación fluviométrica Pangal en Pangal ( $O_i$ ), así como la estación Cogotí en Fraguita, se utilizan los estadísticos usuales como son el coeficiente de determinación  $R^2$  y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe, IE, para la variable caudal y sus logaritmos. Este índice se expresa como:

$$IE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

donde O corresponde a la media de los valores observados.

Adicionalmente se analiza la distribución promedio de los caudales medios mensuales y el ajuste de las curvas de duración.

Utilizando la información meteorológica estimada para cada una de las bandas de elevación como información de entrada se desarrollan modelos hidrológicos a escala diaria para cada uno de los ríos en estudio. Los periodos de calibración y validación de cada uno se indican en la Tabla 3, mientras que los resultados de los distintos índices planteados para evaluar su desempeño se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 3.** Periodos de calibración y validación

	Cogotí	Pangal
Calibración	01/04/1999 a 31/03/2004	01/04/2000 a 31/03/2004
Validación <sup>6</sup>	01/04/2005 a 31/03/2008	01/04/1987 a 31/03/1991

Estos valores se consideran adecuados para considerar exitoso el proceso de calibración de los modelos (Moriassi et al, 2007) y se utilizan como sustento para realizar el supuesto de que las cuencas y sus regímenes hidrológicos quedan bien planteados por ellos, por lo cual se pueden utilizar los valores de simulaciones de periodos ya pasados como escenario de línea base.

**Tabla 4.** Desempeño de los modelos hidrológicos calibrados.

Modelo	Cogotí En Fraguita		Pangal en Pangal	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Indicador Hidrológico				
Coef. de Nash-Sutcliffe	0.70	0.61	0.7	0.75
Coef. logaritmico Nash-Sutcliffe	0.70	0.64	0.78	0.63
Coefficiente de correlación	0.69	0.69	0.86	0.87

<sup>6</sup> Se excluye de este periodo el año hidrológico 1988/89 para el modelo Pangal debido a las irregularidades que presenta el registro en este lapso de tiempo. En el periodo intermedio 1991 a 1999 no se realizó la simulación debido a irregularidades en el registro de temperaturas.

Resulta importante destacar que dada que la respuesta de una cuenca depende tanto de las forzantes climáticas como del uso del suelo al interior de esta. Dado el enfoque de este estudio, se asumirá que este último no sufre variaciones durante el periodo de estudio, y solo se tendrán alteraciones sobre el clima de las zonas. Esto es equivalente a suponer que los parámetros hidrológicos se mantienen invariantes desde el periodo de calibración al periodo de simulación proyectado (Li et al, 2012)

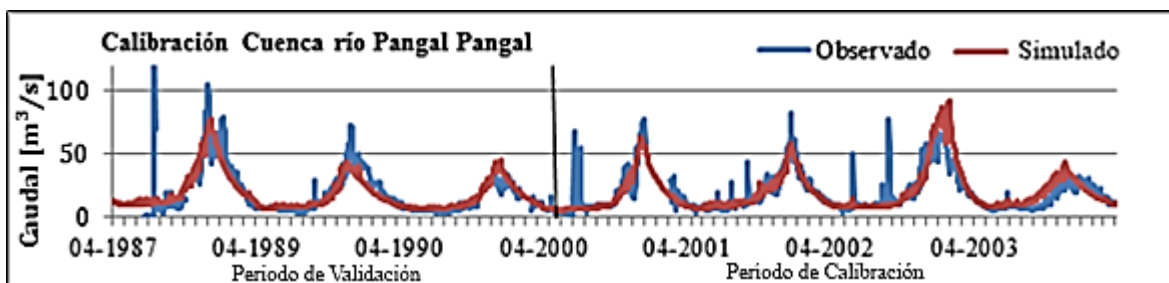


Figura 6.a Comparación de caudales observados y calibrados para el proceso de calibración en río Pangal en Pangal

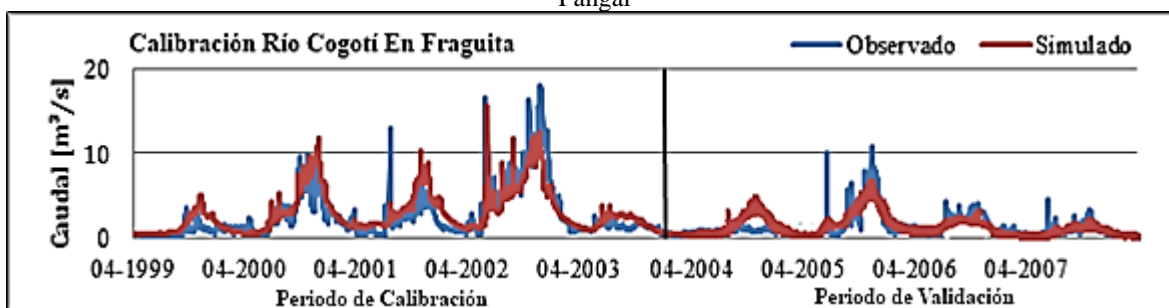


Figura 6.b Comparación de caudales observados y calibrados para el proceso de calibración en río Cogotí. En Fraguita

## 4. ANALISIS DE RESULTADOS

### 4.1 VARIABLES METEOROLOGICAS

Utilizando la información meteorológica obtenida el modelo de circulación MK3.6 ya escalada espacial y temporalmente, se desarrollan proyecciones de valores de temperaturas y precipitaciones para las cuencas, las cuales son posteriormente utilizadas como forzantes para obtener las proyecciones de caudales. Adicionalmente, se plantea que el escenario tomado como línea base sea obtenido por medio de la utilización de las series generadas en base lo simulado por el modelo MK3.6 en el periodo 1970-2010, utilizando los escalamientos temporales determinados. Además, al utilizar como información de entrada los diez conjuntos equiprobables de series que entrega el GCM es posible obtener un margen de incertidumbre de las proyecciones que se realizan.

Al estimar los valores de precipitación y temperaturas medios para las cuencas por medio de la utilización de las distribuciones logarítmicas para los periodos futuros de estudio se obtienen los resultados presentados en la Tabla 5. Se observa que no hay mayor diferencia en los pronósticos realizados de variación de temperaturas y precipitaciones entre los diferentes escenarios en ninguna de las dos cuencas para el primer periodo de proyección.

Para este periodo se tienen incrementos cercanos a 0.7°C/0.8°C en las temperaturas y disminuciones cercanas a un 16% del valor de línea base en las precipitaciones. En el segundo periodo de análisis si se observan diferencias entre los escenarios, donde en el caso más severo se tienen aumentos de hasta 2°C y 1.6°C y disminuciones de hasta un 35% y un 27% de las precipitaciones con respecto a línea base para las cuencas del río Cogotí y Pangal. Las proyecciones del escenario (RCP2.6) menos severo presentan aumentos de temperaturas y disminuciones similares a las observadas en el primer periodo futuro de análisis, lo cual es consecuente con lo esperado según las emisiones de CO<sub>2</sub> atmosférico planteadas en la Tabla 2.

En la Figura 7 se grafican los promedios móviles en un rango de 20 años de los valores medios anuales de las variables de interés: precipitaciones, temperaturas, caudales y centros de gravedad del hidrograma. La elección de este filtro se realiza en función de un análisis de sensibilidad, de manera tal que se puedan observar el comportamiento general de manera gráfica sencilla.

La variación de las precipitaciones se puede ver en la primera fila de la Figura 7, donde se observan comportamientos similares entre ambas cuencas, aunque porcentualmente las diferencias resultan mayores en el caso de la cuenca del río Cogotí. Sin embargo, el alto margen de incertidumbre de las proyecciones hace difícil una diferenciación entre los distintos escenarios. Sin embargo, de los valores promedios se observa una tendencia a que en general el escenario más conservador presenta valores mayores en casi todo el periodo de proyección que los otros dos. En particular, los valores calculados con los periodos finales presentan ya una diferenciación más marcada.

Se presenta en la segunda fila de la Figura 7 el caso análogo para la variable de la temperatura, donde se puede ver como existen aumentos similares en todos los escenarios hasta los valores calculados con el periodo 2011-2030. A partir de ese momento se empiezan a hacer más clara las diferenciaciones entre los distintos escenarios, aun al considerar los márgenes de incertidumbre asociadas a esta variable que en este caso resultan menores y se puede ver una marcada divergencia efectiva entre las distintas proyecciones realizadas.

**Tabla 5.** Valores proyectados de temperaturas y precipitaciones medias para las cuencas en estudio.

	Temperatura [°C]			Precipitación [mm]		
<b>Modelo</b>	<b>Cuenca Río Cogotí</b>					
Periodo	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Línea Base	8.1 ± 0.1	8.1 ± 0.1	8.1 ± 0.1	642 ± 77	642 ± 77	642 ± 77
2011-2040	8.9 ± 0.1	8.9 ± 0.1	8.9 ± 0.1	537 ± 65	508 ± 58	510 ± 86
2041-2070	9.2 ± 0.1	9.7 ± 0	10.1 ± 0.1	515 ± 78	473 ± 55	414 ± 61
<b>Modelo</b>	<b>Cuenca Río Pangal</b>					
Periodo	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Línea Base	6.1 ± 0.1	6.1 ± 0.1	6.1 ± 0.1	1,482 ± 85	1,487 ± 80	1,480 ± 77
2011-2040	6.8 ± 0.1	6.8 ± 0.1	6.8 ± 0.1	1,318 ± 40	1,246 ± 67	1,284 ± 84
2041-2070	7.1 ± 0.1	7.4 ± 0.1	7.7 ± 0	1,275 ± 111	1,210 ± 75	1,086 ± 62

## 4.2 PROYECCIONES DE CAUDALES

Una vez que se tiene escalada la información meteorológica requerida por los modelos hidrológicos se generan las series de caudales proyectadas para los periodos futuros de las ventanas de tiempo 2011-2040 y 2041-2070. Estos valores se presentan en la Tabla 7. Se observa que existen disminuciones de los caudales medios anuales consecuentes con la disminución de precipitaciones proyectadas para los periodos futuros en todos los escenarios.

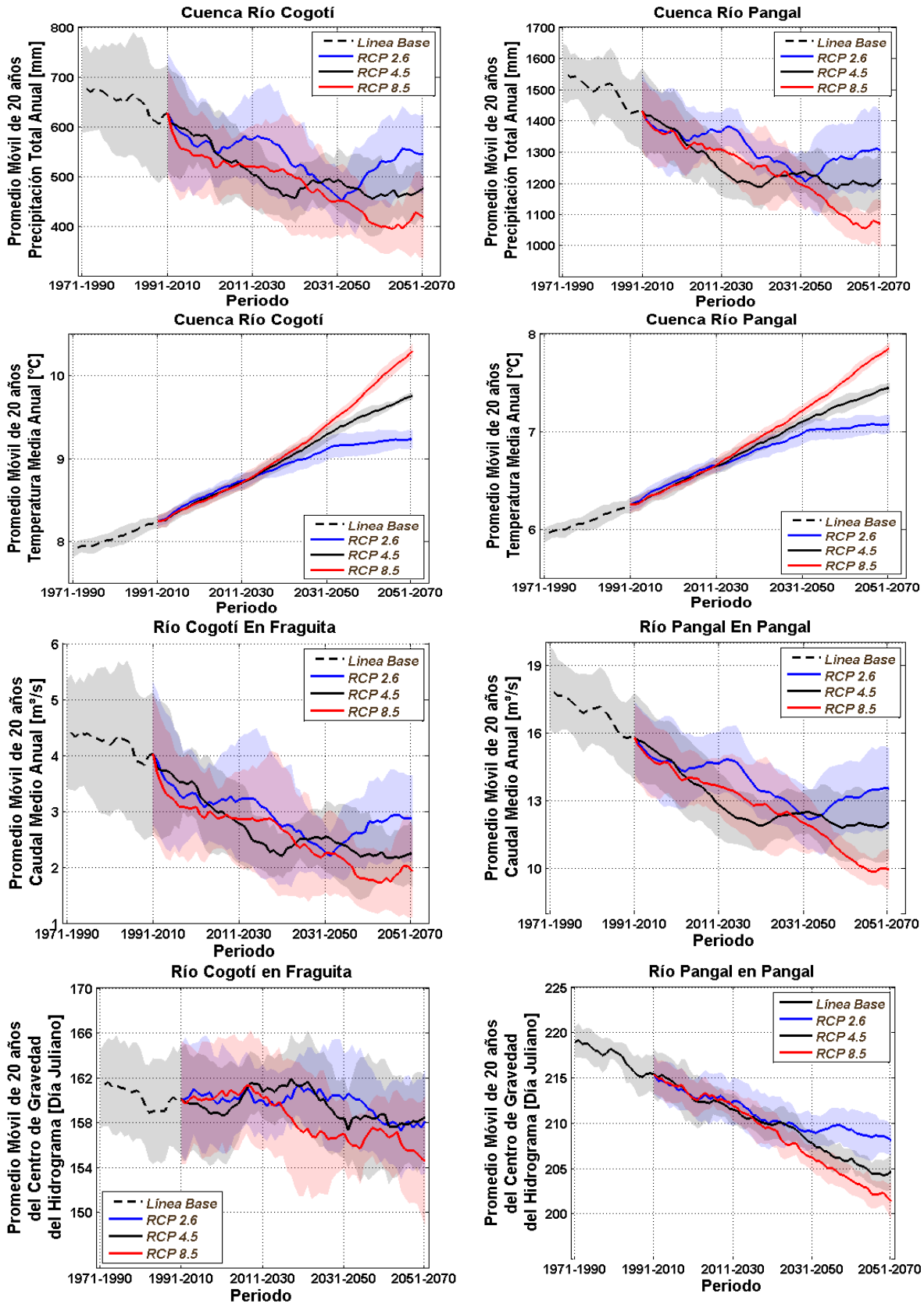
El porcentaje de variación de los caudales resulta más severo en el caso del río Cogotí, donde para el periodo 2011-2040 se esperan disminuciones de al menos 32% y que podrían llegar hasta 35%, dependiendo del escenario. En el periodo 2041-2070 las reducciones con respecto al periodo de línea base van desde un 35% hasta valores de un 53% en el caso del escenario RCP8.5, siendo esta última la variación más severa proyectada en todos los contextos y modelos en estudio.

En el caso del río Pangal los valores de disminución en el primer periodo presentan una mayor diferenciación entre ellos que lo que sucede en la otra cuenca en estudio, y se observan reducciones con valores de 18% (RCP2.6), 25% (RCP4.5) y 21% (RCP8.5). Resulta interesante que en esta ventana temporal la reducción más importante la presente el escenario intermedio y no el más severo, lo cual se asocia a que presenta un disminución más fuerte de precipitaciones, con una menor variabilidad que los otros. Sin embargo, ya en el segundo periodo futuro de análisis, todas los decrementos aumentan en severidad llegando a valores de 22% (RCP2.6), 28% (RCP4.5) y 39% (RCP8.5). En este caso sí es posible notar como una mayor alteración de las variables meteorológicas (en aumento de las temperaturas y disminución de las precipitaciones) acorde a los distintos contextos, resulta en casos de una mayor alteración hidrológica de los valores de caudales medios anuales.

**Tabla 6.** Valores proyectados de caudales y centros de gravedad del hidrograma.

	Caudal Medio Anual [m <sup>3</sup> /s]			Centro de Gravedad Hidrograma [Día Juliano]		
<b>Modelo</b>	<b>Cuenca Río Cogotí en Fragueta</b>					
Periodo	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Línea Base	4.2 ± 1.0	4.1 ± 0.9	4.1 ± 0.9	160.5 ± 3.6	160.3 ± 3.7	160.3 ± 3.8
2011-2040	2.8 ± 0.8	2.7 ± 0.6	2.8 ± 0.9	160.5 ± 3.0	160.2 ± 2.8	158.8 ± 5.0
2041-2070	2.7 ± 0.7	2.4 ± 0.5	1.9 ± 0.7	158.2 ± 2.7	158.2 ± 2.8	155.7 ± 3.5
<b>Modelo</b>	<b>Cuenca Río Pangal en Pangal</b>					
Periodo	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Línea Base	16.9 ± 1.4	16.9 ± 1.4	16.9 ± 1.4	217.1 ± 1.5	217.2 ± 1.5	217.1 ± 1.5
2011-2040	13.8 ± 1.3	12.8 ± 1.1	13.3 ± 1.4	211.2 ± 1.8	210.7 ± 1.2	210.6 ± 1.3
2041-2070	13.2 ± 1.6	12.1 ± 1.4	10.4 ± 0.6	208.4 ± 1.3	205.3 ± 0.6	202.3 ± 1.5

Un análisis de las tendencias de los valores de los caudales medios anuales de ambas cuencas se presenta en la tercera fila de la Figura 7. En ellas se puede observar la tendencia a una disminución de los caudales similar en todos los escenarios, pero con una mayor



**Figura 7.** Valores de Promedio Móvil de Proyecciones de Precipitaciones, Temperaturas, Caudal y Centro de Gravedad del Hidrograma en las cuencas del río Cogotí (izquierda) y Pangal (derecha)

incertidumbre en el caso del río Cogotí, donde incluso a finales del periodo de estudio los rangos de incertidumbre acercan los valores del escenario RCP2.6 y RCP8.5, mientras que en el río Pangal se hace una clara diferenciación entre ellos aún al considerar los márgenes de error calculados.

Estos cambios en los valores y comportamientos de los caudales medios anuales deben ir asociado a potenciales cambios en los procesos hidrológicos al interior de las cuencas en estudio. Dada la definición conceptual del modelo WEAP, las únicas salidas posibles del modelo son a través de la evaporación o de escurrimiento. Al comparar las disminuciones de precipitación con las de los caudales se observa que la razón de esorrentía se ve reducida a mayor sea el plazo, lo cual implica entonces un aumento de la evaporación, asociado directamente al aumento de las temperaturas.

En la cuenca del río Pangal se observa que la mayor disminución en este indicador es en el caso más conservador (RCP2.6), presumiblemente por una mayor disponibilidad de humedad en el suelo, lo cual permite que este proceso ocurra con mayor intensidad. Los otros escenarios tendrían una restricción en los recursos a evaporar debido a la disminución de precipitaciones, por lo que este índice solo se reduciría en un 10% debido a esto.

Por otro lado, en el caso del río Pangal, la disminución de este coeficiente es pareja en todos los escenarios, reduciéndose en alrededor de un 10% con respecto a la situación de línea base.

Otro indicador es el centro de gravedad en estudio que se podría ver potencialmente afectado por el fenómeno del cambio climático es el día en que ocurre el centro del hidrograma de descarga de la cuenca. Alteraciones en este indicador dan muestras de cambios en la estacionalidad del régimen hidrológico observado de la cuenca. Observando los resultados promedios obtenidos para los periodos futuros en la cuenca del río Cogotí, se observan variaciones leves con respecto a los valores observados en línea base. Sin embargo, al considerar los márgenes de incertidumbre se podría concluir que no sería posible aseverar un cambio en el régimen hidrológico. Sin embargo, un análisis de tendencias por medio del promedio móvil de esta cuenca (gráfico inferior-izquierdo Figura 7) permite observar una tendencia a la disminución que no se representa adecuadamente en los resultados de los periodos futuros, principalmente por su larga extensión.

Por otra parte, la cuenca del río Pangal presenta adelantamientos significativos ya desde el primer periodo futuro, de alrededor de 7 días. En el segundo periodo, este adelantamiento aumenta a 9 días en el caso más leve hasta 15 días en el más severo. Al observar el análisis de tendencia para este caso (gráfico inferior-derecho Figura 7) se observa una disminución mucho más sostenida y con una tasa constante de decrecimiento que solo varía prácticamente en los últimos valores en el caso más leve. Además, la incertidumbre asociada a las proyecciones es baja. Esta diferencia entre las dos cuencas en estudio se asocia al régimen hidrológico original de cada una de ellas. Dado que el río Pangal presenta un régimen exclusivamente nival, los aumentos en las temperaturas tienen un mayor efecto al adelantar los procesos de deshielos, lo cual provoca las fechas más tempranas. Por otro lado, el río Cogotí presenta un régimen nivo-pluvial, por lo cual un adelantamiento en los deshielos no resulta tan crítico en su régimen, dado que no es la única componente importante de su hidrograma.

## 5. CONCLUSIONES

Los escenarios analizados RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5 proyectan para el periodo 2011 a 2070 disminuciones de precipitación y aumentos de temperatura en las cuencas del río Cogotí y del río Pangal, que varían en intensidad y magnitud según sea el caso estudiado. Estas alteraciones en el sistema climático conducen a proyecciones de disponibilidad hídrica significativamente inferiores a las simuladas para el periodo de línea base (1970-2010). Estas disminuciones se hacen más importantes mientras más lejano sea el horizonte de proyección y solo en el escenario más conservador finaliza con una estabilización de los valores de caudales medios anuales mientras que en los otros se mantiene una tendencia a la baja. La utilización de diez conjuntos de series meteorológicas alternativas permite obtener un margen de incertidumbre de las proyecciones, la cual resulta mayor porcentualmente en el caso del río Cogotí, donde los distintos escenarios no logran representar adecuadamente una diferenciación marcada entre ellos al considerar este rango de error. Con respecto a la alteración que sufre el régimen hidrológico de las cuencas en estudio el río Cogotí no se ve mayormente afectado aunque se observa una tendencia leve a fechas más tempranas en el centro de gravedad del hidrograma en el caso del escenario más severo. En el caso del río Pangal, éste sí se ve afectado significativamente y se observa una tendencia fuerte al adelantamiento del centro de gravedad del hidrograma, con poco margen de incertidumbre, en todos los escenarios y con similar magnitud. Esta diferencia en las cuencas se asocia al tipo de régimen que rige a cada una, teniendo la primera una componente pluvial que influye mientras que la segunda al ser de carácter principalmente nival es más sensible a las variaciones de temperatura que influye en la generación de deshielo más temprano.

## REFERENCIAS

- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds. (2008) *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Barnett T. P., Adam J. C. and D. P. Lettenmaier (2005) Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* 438 (17), 303-309
- Collier M.A., Jeffrey S.J., Rotstayn L.D., Wong K.K-H., Dravitzki S. M. , Moeseneder C., Hamalainen C., Syktus J.I., Suppiah R., Antony J., El Zein A., Atif M. (2011), The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication, 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 December 2011, <http://mssanz.org.au/modsim>, 2011
- Cortes G., Vargas X. and J. McPhee (2011) Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *Journal of Hydrology* 405, 93–109
- Departamento de Geofísica, FCFM, U. de Chile. 2006. Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI, Santiago, Chile.
- Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, (2012). Simulaciones de Cambio Climático Regional para Chile obtenidos por el modelo PRECIS-ECHAM. [En línea] <<http://mirasol.dgf.uchile.cl/PRECIS-ECHAM.html>>
- DIC (2010). Análisis de vulnerabilidad de recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático para las cuencas Cautín, Aconcagua, Teno e Illapel. Estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile para CONAMA

Dirección General de Aguas, 2004, Diagnóstico y Clasificación de cursos y cuerpos de agua según Objetivos de Calidad, Cuenca del río Limarí. [En línea] <[http://www.sinia.cl/1292/articles-31018\\_Limari.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Limari.pdf)>

Dirección Meteorológica de Chile. Descripción Meteorológica, 2012: Región del Libertador Bernardo O'Higgins. [En línea] <[http://www.meteochile.cl/climas/climas\\_sexta\\_region.html](http://www.meteochile.cl/climas/climas_sexta_region.html)> [Consulta: 28 de Septiembre 2012].

IPCC (Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático), 2007, Cuarto informe de evaluación del Cambio Climático, <[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)>.

Krause P., 2005, Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97, 205

Lagos, M.A., Vargas, X. (2009). Vulnerabilidad de los recursos hídricos afluentes al Embalse El Yeso. XIX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Lagos M. y X. Vargas, 2011. Variación de eventos extremos de precipitación diaria proyectados a mediados del siglo XXI, resultados en regiones de Coquimbo y Maule. XX Congreso Chileno de Hidráulica.

Li C. Z., Zhang L., Wang H., Zhang, Y. Q., Yu F. L., Yan D. H., 2012, The transferability of hydrological models under non stationary climatic conditions. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 1239-1254.

Li, H., Sheffield, J., Wood, E. F., 2010. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *J. Geophys. Res.*, 115, D10101.

Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007, Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *Transactions of the ASABE*, 50 (3), 885-900.

Moss R.H., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T.R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G.A. Meehl, J.F.B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S.J. Smith, R.J. Stouffer, A.M.

Perkins, S. 2011. A Simple bias correction method for climate extremes estimated by the generalized extreme value distribution. Oral presentation at IUGG 2011 General Assembly, Melbourne, Australia, 28 de junio al 7 de julio 2011.

Terink, W., R.T.W.I. Hurkmans, P.J.J.F. Torfs y R. Uijlenhoet. 2009. Bias correction of temperature and precipitation data for regional climate model application to the Rhine basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 6, 5377-5413, 2009.

Thomson, J.P. Weyant and T.J. Wilbanks (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature* 463, 747-756

Vicuña S., Garreaud R., and McPhee J. (2011), "Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile," *Climatic Change*, Volume 105, Issue 3-4, 469-488

Wood, A., L.R. Leung, V. Sridhar y D. Lettenmaier. 2004. Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs. *J. Climatic Change*. Springer Netherlands, p 189-216. 2004

Wood, A., W. Maurer, E. P., Kumar, A., y Lettenmaier, D. 2002. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, *J. Geophysics. Res* 107(D20), 4429.