

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

VALOR AGREGADO DE MODELOS REGIONALES PARA PROYECCIONES DE CAMBIO HIDROLÓGICO

PAULA OJEDA CARREÑO.¹
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA.^{1,2}
SANTIAGO MONTSERRAT.¹

RESUMEN

En el marco de un mundo en un clima constante cambio, ha tomado gran relevancia la obtención de forzantes meteorológicas proyectadas que nos permitan evaluar la disponibilidad hídrica futura, en una resolución horizontal adecuada para estudios locales. Los modelos climáticos globales (GCMs) han sido ampliamente utilizados para la obtención de forzantes, pero cuentan con limitantes, como por ejemplo su baja resolución espacial, lo que no siempre les permite reproducir condiciones climáticas características de regiones de menor escala. La utilización de modelos climáticos regionales (RCMs) es una opción que busca subsanar dichas limitaciones, incorporando la resolución explícita de procesos superficiales y de la atmósfera en resoluciones considerablemente más bajas que los GCMs. En la presente investigación se evalúa el valor agregado de considerar seis RCMs de la iniciativa CORDEX: RegCM4.7 y REMO2015 en comparación con sus respectivos modelos globales para la obtención de forzantes meteorológicas que permitan evaluar proyecciones de cambio hidrológico en tres cuencas con regímenes diferentes en Chile. Además, se compararán las proyecciones de cambio hidrológico obtenidas de aplicar dos distintos métodos de escalamiento estadístico a las forzantes: Quantile Delta Mapping (QDM) y Multivariate Bias Correction (MBCn). Se obtiene que, en general, la temperatura es la forzante que presenta mayor valor agregado (VA) en los RCMs y que la única cuenca que muestra VA en precipitación es la de régimen pluvial. Además, se obtuvo que los modelos regionales RegCM4-7 presentan mayor VA respecto a REMO2015. Todos los modelos proyectan aumentos en la temperatura para las cuencas en estudio y existen discrepancias de acuerdo con la señal de cambio de la precipitación. Existe VA al utilizar los RCMs escalados con MBCn para la simulación del caudal medio mensual de la temporada de deshielo en la cuenca de alta montaña. Los RCMs escalados con la metodología MBCn son los que logran reproducir de mejor forma la hidrología de la cuenca nival, mientras que para la pluvial no existen diferencias significativas entre las metodologías de escalamiento.

¹ Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Av. Tupper 2007, Santiago, Chile. Mail: paula.ojeda@amtc.uchile.cl

² Center for Climate and Resilience Research (CR)², Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Av. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile.

1. INTRODUCCIÓN

El contexto actual de un mundo en constante transformación trae consigo un gran desafío, el cambio climático. La generación de proyecciones de variables meteorológicas ha pasado a ser un tópico de gran relevancia en hidrología, ya que permiten forzar modelos hidrológicos y así obtener simulaciones en períodos futuros. Esto es fundamental para poder planificar y realizar una buena gestión del recurso hídrico en los años venideros y evaluar el impacto que pudiese significar para la población, las industrias y los ecosistemas.

Los Modelos de Circulación General (GCMs, por sus siglas en inglés) han sido ampliamente utilizados para la obtención de proyecciones climáticas. Estos corresponden a grillas tridimensionales que son calculadas a escala global, cuya resolución horizontal se encuentra entorno a los 150 a 250 [km] por lo que tienen la desventaja de poseer una baja resolución espacial. Por lo anterior, los modelos no dan cuenta de fenómenos característicos de zonas particulares. Debido a esto, surgen iniciativas para la obtención de proyecciones grilladas de menores escalas. Los Modelos Climáticos Regionales (RCMs por sus siglas en inglés) se caracterizan por poseer una resolución espacial mayor que los GCMs (~20-22 [km]), ya que son generados a partir de escalamientos dinámicos que usan un RCM anidado dentro de un GCMs (Giorgi and Mearns, 1991; Xu et al., 2019) por lo que debieran mejorar la caracterización climática de zonas particulares.

Para estudios realizados a nivel de cuenca es indispensable la implementación de escalamientos espaciales independiente si se trabaja con GCMs o RCMs. Además, para corregir el sesgo que pudiesen tener los modelos respecto de las observaciones existen diversas metodologías. Entre ellos se encuentran los métodos estadísticos que se basan en relaciones estadísticas y por ende requieren menor tiempo de cómputo, a diferencia de los dinámicos que tienen una base física y por lo tanto son altamente demandantes de capacidad computacional (Chen et al., 2012). Entre los modelos estadísticos, se pueden encontrar del tipo univariados como Quantile Delta Mapping (Cannon et al., 2015) y multivariados como Multivariate Bias Correction (Cannon, 2018). Los multivariados se caracterizan por realizar el escalamiento en conjunto entre las variables se encuentran correlacionadas, como por ejemplo la precipitación y la temperatura, mientras que el univariado las escala de manera independiente.

A nivel continental, han existido diversas instancias para realizar modelos escalados dinámicamente, en particular la iniciativa CORDEX busca realizar RCMs de forma coordinada entre diversos modelos, y sus respectivas forzantes globales de los GCMs (Giorgi et al. 2009; Giorgi and Gutowski 2015). En Chile en particular, han sido utilizado modelos regionales en los primeros estudios de cambio climático, partiendo por el modelo PRECIS-Had (DGF, 2006), y más recientemente, el modelo RegCM4.5 (Bozkurt et al., 2019)

El objetivo de la investigación es evaluar el valor agregado de utilizar RCMs con respecto a los GCMs para la obtención de proyecciones climáticas que puedan ser empleadas para la evaluación de impactos en los recursos hídricos producidos por el cambio climático. Además, se contrastan las señales de cambio obtenidas al escalar mediante métodos estadísticos univariados y multivariados, y finalmente se evalúa el cambio hidrológico. Todo lo anterior

será evaluado en tres cuencas de Chile caracterizadas por encontrarse en diferentes latitudes y poseer distintos regímenes hidrológicos.

2. ZONA DE ESTUDIOS

La zona de estudio corresponde a tres cuencas ubicadas en diferentes latitudes del país (Figura 1), cuyas características, obtenidas desde CAMELS-CL (Alvarez-Garreton et al., 2018), se describen a continuación:

- i. Río Cochiguaz en El Peñón: Cuenca de alta montaña, cuya altura va desde los 1338 hasta los 5275 msnm. Se ubicada en la región de Coquimbo y se caracteriza por presentar régimen hidrológico nival. Su área es de 675,3 km², su precipitación media anual es de 189 mm y su índice de aridez 3,8
- ii. Estero El Arrayán en La Montosa: Cuenca ubicada en la Región Metropolitana que posee un área de 216,5 km², una precipitación anual media de 609 mm y su índice es de aridez 1,4.
- iii. Río Puyehue en Quitratue: Cuenca ubicada en la región de Los Lagos, cuyo régimen hidrológico es pluvial. Su área es de 153.5 km², su precipitación media es de 1870 mm y su índice de aridez es de 0,6.

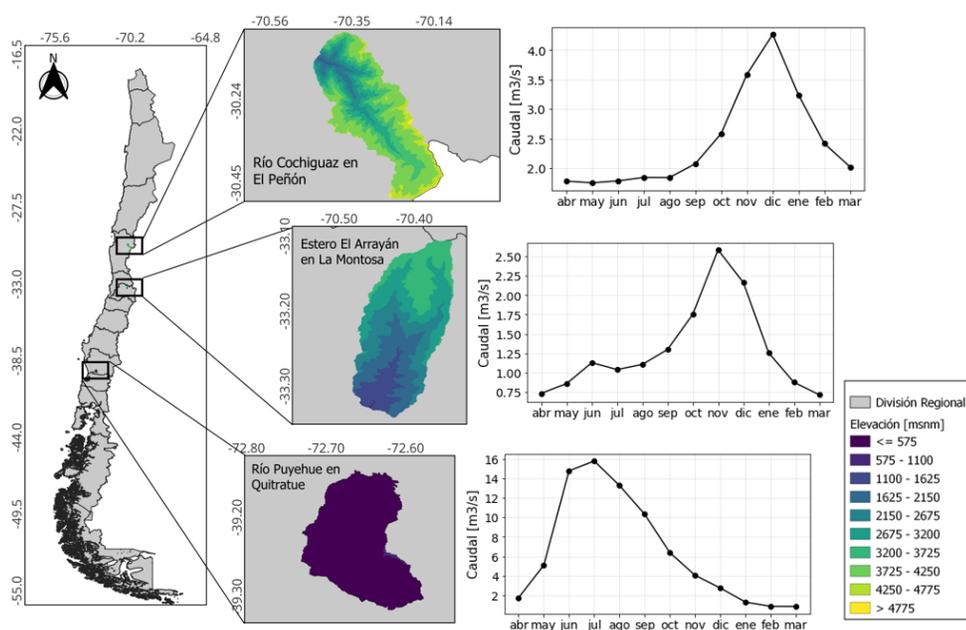


Figura 1: Mapa con las alturas de las cuencas consideradas en el estudio, además de caudales medios mensuales en el periodo (1990-2019)

3. METODOLOGÍA

3.1. Datos

Para el estudio se utilizan 4 GCM del proyecto CMIP5 correspondientes al escenario RCP 8.5 (IPCC, 2014), que es el más desfavorable con respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero (Tabla 1). Estos modelos fueron utilizados además por la iniciativa cordex para alimentar los modelos regionales REMO2015 y RegCM4-7 (Gutowski et al. 2016), forzados con los mismos GCMs (Tabla 2). Para el caso de los modelos regionales, la temperatura media fue obtenida como el promedio de la temperatura máxima y mínima, mientras que para los GCMs se trabajó directamente con la temperatura media.

Tabla 1: Lista de los GCMs utilizados en el estudio.

GCM	Institución	Resolución espacial [°]
HadGEM2-ES	MOUC, UK	2.8 x 2.8
MPI-ESM-LR	MPI, Alemania	1.9 x 1.9
MPI-ESM-MR	MPI, Alemania	1.9 x 1.9
NorESM1-M	NCC, Noruega	2.5 x 1.9

Tabla 2: Lista de los RCMs utilizados en el estudio.

RCM	GCM	Resolución espacial [°]
RegCM4-7	HadGEM2-ES	0.22 x 0.22
	MPI-ESM-LR	
	NorESM1-M	
REMO 2015	HadGEM2-ES	0.22 x 0.22
	MPI-ESM-MR	
	NorESM1-M	

Se utilizó el producto grillado CR2met como referencia observacional, este fue desarrollado para Chile continental por Boisier et al, (2018), en el marco del estudio DGA (2017). Su resolución espacial es de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ y los datos van desde 1979 hasta 2016. Su generación se basa en la regionalización estadística de datos de reanálisis atmosférico ERA-Interim.

3.2. Escalamiento estadístico

Previo al escalamiento, los GCMs y RCMs son llevados a la resolución espacial del producto observacional utilizando interpolación bilineal para cada píxel de las grillas tanto para el período histórico (1980-2005) como el proyectado (2030-2055). Para aquello se utiliza la función *Regridder* del paquete xESMF de Python (Zhuang, 2019).

Luego se aplican escalamientos estadísticos con el objetivo de eliminar el sesgo entre los modelos y las observaciones. Este proceso se realiza a escala mensual con el objetivo de

mantener la estacionalidad de las observaciones. Para el caso de las precipitaciones, se considera como valor umbral 0,1 [mm]. Es decir, se impone que para cualquier valor menor a este que no hubo precipitación. Se utilizan dos metodologías para escalar, las cuales se describen a continuación:

- i. *Quantile Delta Mapping* (QDM): Metodología univariada propuesta por Cannon (2015), que se caracteriza por mantener los cambios relativos en los cuantiles de los modelos proyectados, mientras que corrige los sesgos sistemáticos respecto a las observaciones. Al ser una metodología univariada, la precipitación y la temperatura se escalan de forma independiente.
- ii. *Multivariate Bias Correction* (MBC): Metodología multivariada que corresponde a una generalización de QDM, y que se caracteriza por escalar de manera simultánea variables que se encuentran correlacionadas entre sí. Esto permite que, al momento de escalar la temperatura se considere si en el día analizado hubo o no precipitación. El método consta de tres pasos, en primer lugar, se aplica una rotación ortogonal a los datos de referencia y a los que se quiere corregir. En segundo lugar, se utiliza “*quantile mapping*” para corregir las distribuciones marginales de los datos rotados y finalmente se aplica la rotación inversa. Estos pasos se repiten hasta lograr coincidir con la distribución multivariada de los datos de referencia (Cannon, 2018).

3.3. Valor agregado

Se calcula el valor agregado de utilizar los RCMs con respecto a los GCMs para las tres zonas en estudio según la ecuación (1) (Bozkurt et al., 2019; Di Luca et al. 2016)

$$AV = \frac{(X_{GCM} - X_{OBS})^2 - (X_{RCM} - X_{OBS})^2}{\text{Max}((X_{GCM} - X_{OBS})^2, (X_{RCM} - X_{OBS})^2)} \quad (1)$$

Donde X_{GCM} corresponde al valor de la variable obtenida directamente de los GCMs, X_{RCM} las variables obtenidas a partir de los RCMs forzados con los respectivos GCMs y X_{OBS} son las observaciones (CR2MET). Se obtiene el valor agregado por cada elemento de la grilla, es decir, se obtiene el VA para cada pixel que abarca la zona en la que se encuentran las cuencas, y se analizan según las temporadas y distribución espacial. Valores mayores a 0 indican que hay valor agregado al usar el RCM en comparación al GCM. Cabe señalar que el valor agregado es calculado a las grillas crudas una vez aplicada la interpolación bilineal, es decir, previo al escalamiento estadístico.

3.4. Modelación hidrológica

Los modelos hidrológicos para cada cuenca fueron desarrollados utilizando el software HBV-Light. HBV es un modelo semi-distribuido con un esquema de estanques que cuenta con una interfaz amigable, inicialmente desarrollado con fines educativos. HBV representa la cuenca en forma de unidades hidrográficas o zonas de elevación, y los datos meteorológicos necesarios para forzar el modelo son la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial. El modelo utiliza el método del grado-día para calcular la fusión y acumulación de nieve (Bergström, 1992).

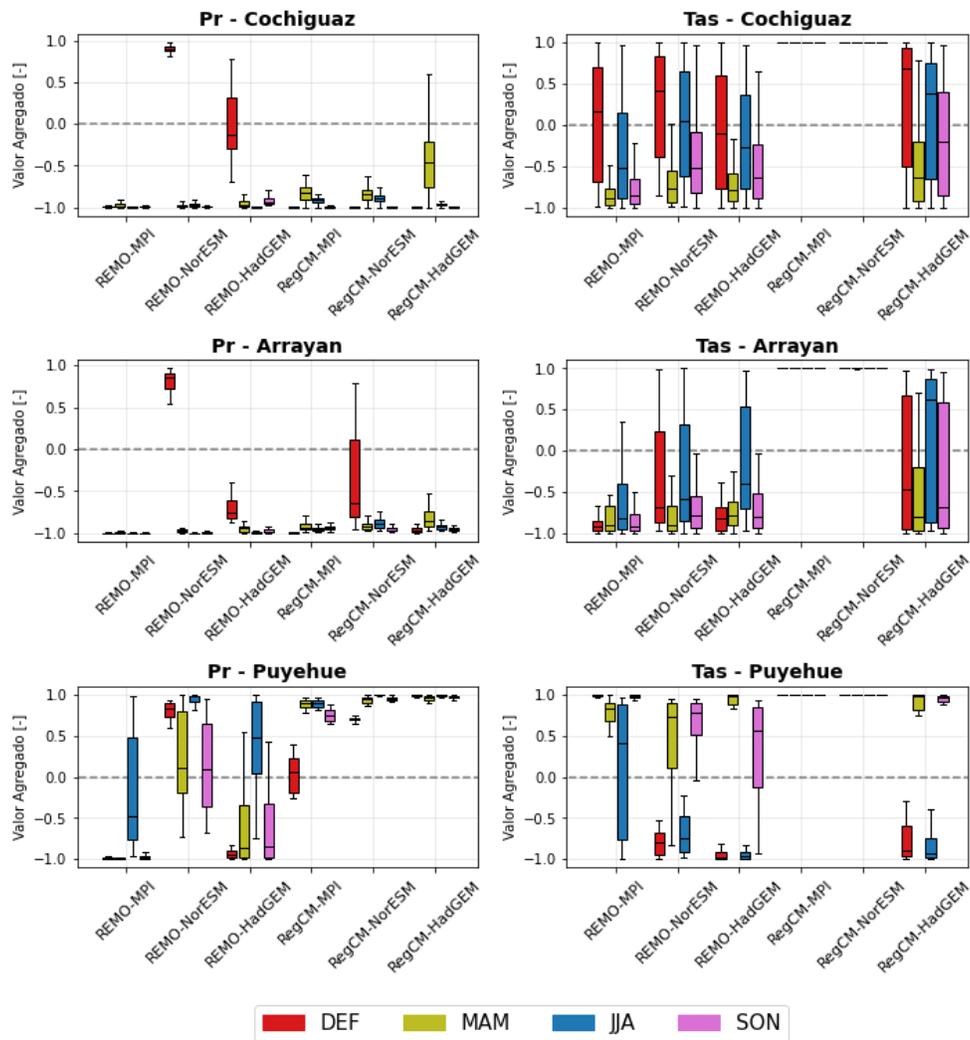


Figura 3: Boxplots del valor agregado promedio de los pixeles de cada zona para precipitación y temperatura según temporada del año para cada cuenca en análisis

Con el objetivo de analizar la distribución espacial del valor agregado, se generan mapas con el promedio de todos los modelos para las estaciones de primavera-verano y otoño-invierno (Figura 4). Se aprecia que no se observa valor agregado en la precipitación en las cuencas de Cochiguaz y Arrayán, independientemente de la cota. En cuanto a la temperatura, se observa que, en Arrayán, el valor agregado disminuye a medida que aumenta la altura de la cuenca.

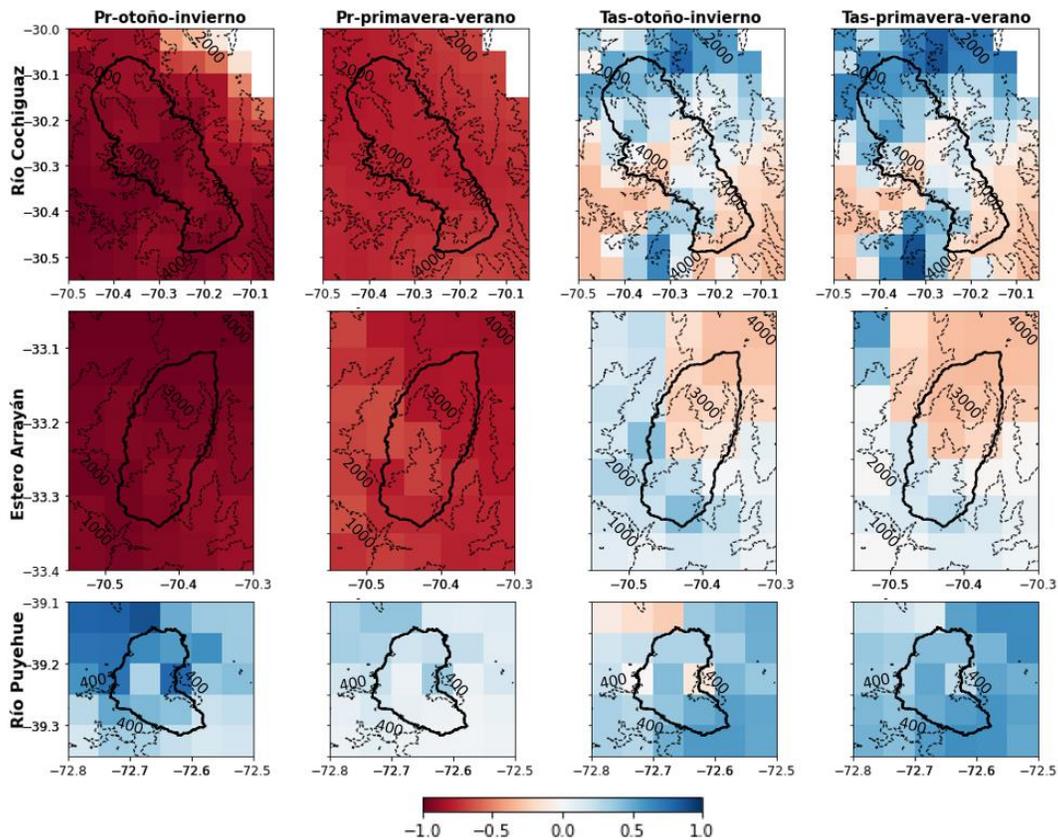


Figura 4: distribución espacial del valor agregado promedio de los modelos analizados en las tres cuencas para las temporadas otoño-invierno y primavera-verano para la precipitación y la temperatura. También se incluyen las curvas de nivel indicando su valor en msnm

También se evalúan las variaciones en las proyecciones de temperatura y precipitación. Dado que las variaciones son sumamente parecidas, se presentan a continuación los resultados asociados al escalamiento MBCn (Figura 5).

Todos los modelos, tanto RCMs como GCMs, proyectan aumentos en la temperatura, independientemente de la cuenca y la temporada. En general, los RCMs proyectan mayores incrementos de temperatura que los GCMs para Cochiguaz y Arrayán. En el caso de Puyehue, se espera un aumento de temperatura de alrededor de 1 °C durante las temporadas de invierno y primavera, mientras que, para las otras estaciones, algunos modelos proyectan aumentos superiores a los 2 °C. En las otras dos cuencas, se observa un rango más amplio de posibles variaciones, que van desde aumentos de 1 °C hasta incluso 3 °C. En promedio, se proyecta un aumento de 2,2 [°C] en Cochiguaz y de 1,8 [°C] en Arrayán.

En lo que respecta a la precipitación, no existe concordancia en cuanto a la señal de cambio en Cochiguaz; hay modelos que proyectan aumentos del 50%, mientras que otros prevén disminuciones superiores al 50%. En el caso de Arrayán, las proyecciones varían desde aumentos del 20% hasta disminuciones cercanas al 50%. Para Puyehue, hay concordancia entre los modelos, ya que la mayoría proyecta disminuciones que pueden alcanzar hasta un 35%.

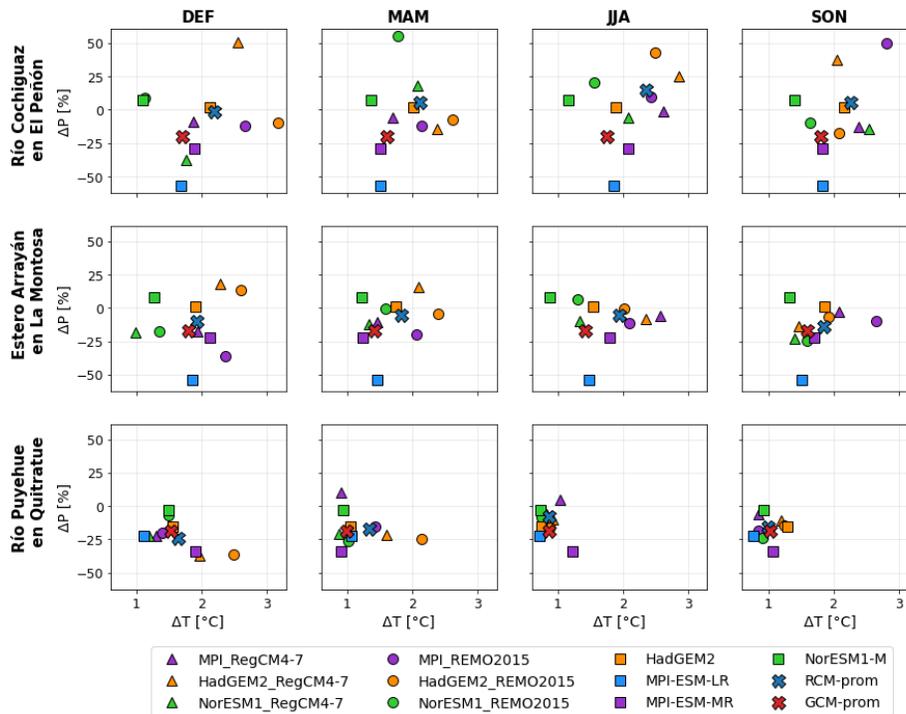


Figura 5: Señal de cambio de la precipitación vs de la temperatura para las tres cuencas agrupadas según estación

4.2. Hidrología

La Figura 6 muestra las curvas de variación estacional de las tres cuencas en estudio obtenidas en período histórico y futuro con GCMs y RCMs. Para el período histórico, es evidente que en el caso de Cochiguaz, el escalamiento MBCn logra reproducir de manera más precisa el caudal medio mensual del modelo calibrado, siendo el promedio de los RCMs el que más se acerca. Para Arrayán, nuevamente es el método multivariado el que mejor reproduce la curva, pero a diferencia de Cochiguaz, presenta una dispersión menor. Mientras que con QDM, tanto con RCM como GCM, la dispersión es mucho mayor. En el caso de Puyehue, el ajuste de los modelos con respecto al caudal medio mensual calibrado es indiferente a la metodología de escalamiento o al tipo de modelo empleado (Figura 6). Los resultados indican que el uso del método multivariado, que se considera la correlación entre las variables, es relevante para cuencas de alta montaña en que la temperatura es clave para realizar la partición de la precipitación. Esto es evidente para modelos como HBV que utiliza un valor umbral de temperatura para definir cuando la precipitación es líquida o sólida.

Se observan discrepancias considerables en el cambio porcentual de caudal proyectado promedio entre los GCMs y los RCMs (Figura 6) para las cuencas del Río Cochiguaz y el Estero Arrayán. En estas cuencas, los GCMs muestran una mayor disminución del caudal proyectado en comparación con el histórico. En el caso de Cochiguaz, en promedio los GCMs proyectan disminuciones en torno al 19%, mientras que los RCMs proyectan aumentos del 3% (QDM) y 2% (MBCn). A pesar de que en promedio los modelos proyectan aumentos ligeros en el caudal, los modelos con un mayor valor agregado en temperatura (RegCM4-7-MPI y RegCM4-7-NorESM1-M) proyectan disminuciones cercanas al 20%. Respecto a Arrayán, los GCMs proyectan disminuciones superiores al 30%, mientras que los RCMs

proyectan disminuciones de aproximadamente un 25%. En cuanto a Puyehue, tanto los GCMs como los RCMs proyectan disminuciones de alrededor del 16%, independientemente de la metodología de escalamiento utilizada.

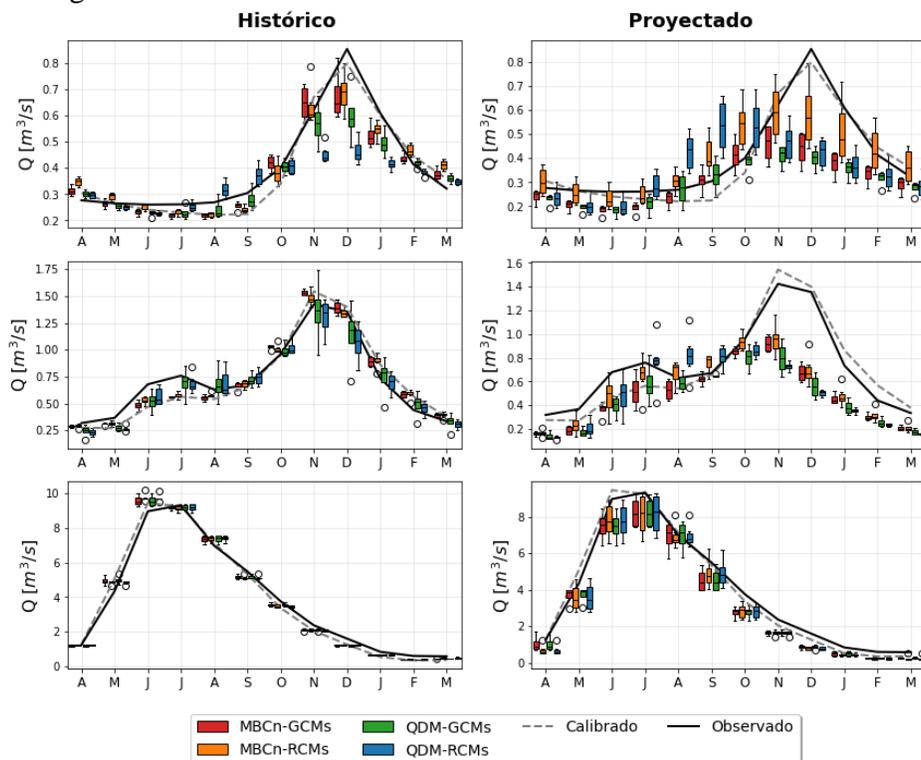


Figura 6: CVE generadas con el caudal simulado por los modelos forzados con los GCMs y RCMs escalados con QDM y MBCn para los periodos históricos y proyectados. También se incluyen las curvas del caudal observado y calibrado.

Tabla 3: Variación porcentual de caudal medio anual entre el período histórico y el proyectado

	GCMs - QDM	GCMs - MBCn	RCMs - QDM	RCMs - MBCn
Río Cochiguaz	-18.8	-19.7	3.1	1.9
Estero Arrayán	-32.7	-33.1	-24.2	-24.7
Río Puyehue	-16.4	-16.5	-16.4	-16.6

Finalmente se presenta el VA de utilizar los RCM para la obtención de los caudales mensuales simulados con respecto a su GCM correspondiente (Figura 7). Cochiguaz presenta VA cuando se escalan las forzantes con MBCn para el periodo de deshielo que corresponde al más relevante en su caso. Para Arrayán, existe valor agregado en los meses de julio y agosto con las dos metodologías de escalamiento. Mientras que para Puyehue los meses de abril, agosto, octubre y diciembre presentan VA positivo con ambas metodologías.

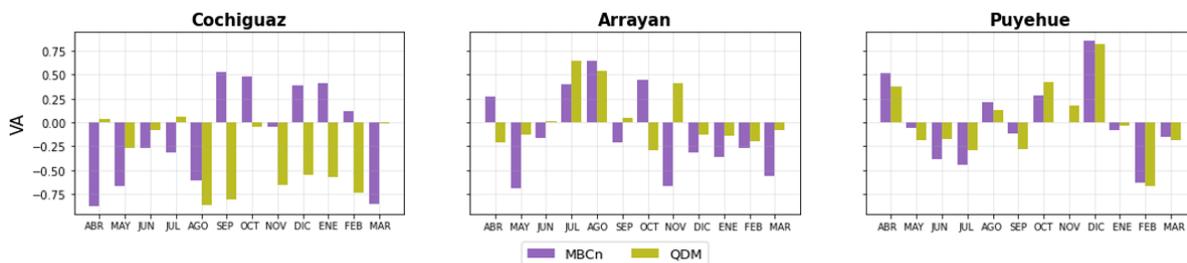


Figura 7: VA del caudal mensual simulado utilizando forzantes del RCM respecto a su correspondiente GCM

5. CONCLUSIONES

Tras el estudio realizado, se concluye que, en términos generales, la temperatura es la variable que presenta mayor valor agregado independiente del régimen hidrológico de la cuenca o de la estación del año. La cuenca del Río Puyehue que corresponde a la cuenca localizada en la zona sur es la única que presenta valor agregado en la precipitación, lo cual puede estar relacionado a que es la que presenta una precipitación anual considerablemente superior a las otras dos analizadas.

Todos los modelos estudiados proyectan que existirá un aumento en la temperatura en las cuencas estudiadas independiente de la estación del año. En general, los modelos regionales tienden a proyectar mayores aumentos en comparación con los GCMs. Con respecto a la precipitación, existe menos consenso entre los modelos. Cochiguaz es la que presenta el abanico más amplio de posibles variaciones de las precipitaciones desde aumento de un 50% hasta disminuciones mayores a un 50%. Para el caso de Arrayán las variaciones se encuentran en torno al aumento o disminución de un 25%. Para el caso de Puyehue, la mayoría de los modelos se encuentran entorno a las disminuciones entre 0 y 25%. En promedio, los GCMs proyectan menores aumentos de temperatura y mayores reducciones en la precipitación para las cuencas de Arrayán y Cochiguaz. Mientras que para Puyehue depende de la temporada, por ejemplo, los RCMs proyectan un mayor aumento de temperatura en verano y otoño, y una menor reducción de las precipitaciones en invierno con respecto a los GCMs.

La principal diferencia entre los métodos de escalamientos analizados radica en que MBCn considera la precipitación y temperatura como covariables, por lo que son escaladas de manera simultánea a diferencia del QDM. Este factor tiene implicancia directa en las simulaciones hidrológicas especialmente en cuencas de alta montaña, dada la relevancia de la temperatura en la partición de la precipitación entre lluvia y nieve. Al contrastar los caudales medios mensuales del período histórico, queda en evidencia que el escalamiento MBCn se logra ajustar de mejor manera a la curva de la serie calibrada en comparación a QDM para el caso de Cochiguaz, siendo el promedio los RCMs el más similar. A pesar de esto, de igual manera no logran reproducir el máximo de caudal alcanzado en la temporada de deshielo. Para el caso de Arrayán, el promedio de los modelos escalados con ambas metodologías tiende a coincidir con la curva calibrada, pero en el caso de los RCMs, la dispersión es considerablemente menor. Finalmente, para Puyehue, que corresponde a la cuenca pluvial, no existen diferencias considerables entre las metodologías de escalamientos. Al evaluar el VA queda en evidencia que la utilización de RCMs en cuencas de alta montaña como Cochiguaz mejora la representación histórica de los caudales mensuales en época de deshielo cuando las forzantes son escaladas con MBCn. Por lo que, a pesar de que no se tenga VA en precipitación, que si exista en la temperatura logra mejorar la temporalidad en particular en el periodo de deshielo.

REFERENCIAS

- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5817-5846.
- Bergström, S. (1992). The HBV Model: Its Structure and Applications, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Hydrology, Norrköping, 35.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Garreaud, R., Gallardo, L., 2019. Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest South America: present climate conditions and added value analysis. *Clim. Dyn.* 53, 6745–6767.
- Boisier, J.P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., Rondanelli, R., (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 20, 2018-19739.
- Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate dynamics*, 50, 31-49.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.
- DGF (Departamento de Geofísica, Universidad de Chile). 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe elaborado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para CONAMA, 71 pp.
- DGA (2017), Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Di Luca A, Argueso D, Evans JP, Laprise R. (2016). Quantifying the overall added value of dynamical downscaling and the contribution from different spatial scales. *J Geophys Res Atmos* 121:1575–1590
- Giorgi F, Mearns L O. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Rev Geophys*, 29: 191–216
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307-6327.
- Giorgi F, Gutowski WJ Jr (2015) Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annu Rev Environ Resour* 40:467–490.
- Giorgi F, Jones C, Arsar GR (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorol Organ (WMO) Bull* 58(3):175
- H. Chen, C. Xu, S. Guo. (2012). Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 434–435, 36-45.
- Gutowski WJ Jr, Giorgi F, Timbal B, Frigon A, Jacob D, Kang H-S, Raghavan K, Lee B, Lennard C, Nikulin G, O'Rourke E, Rixen M, Solman S, Stephenson T, Tangang F (2016) WCRP Coordinated regional downscaling experiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6. *Geosci Model Dev* 9:4087–4095.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- Lagos-Zúñiga, M., Balmaceda-Huarte, R., Regoto, P., Torrez, L., Olmo, M., Lyra, A., Pareja-Quispe, D & Bettolli, M. (2022). Extreme indices of temperature and precipitation in South America: trends and intercomparison of regional climate models. *Climate dynamics*.
- Seibert, J., (2005). HBV light. HBV Light version 2 User's Man.
- Xu, Z., Han, Y. & Yang, Z. (2019). Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations. *Sci. China Earth Sci.* 62, 365–375.
- Zhuang, J. (2019). xESMF Documentation.