

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE LA AMENAZA METEOROLÓGICA DE SISTEMAS DE RELAVES
ANTE PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA¹
JERÓNIMO SOTA²
PAULA OJEDA³
SALVADOR QUEZADA⁴
NICOLÁS VÁSQUEZ⁵
RENÉ PEREZ⁶

RESUMEN

La normativa vigente para la infraestructura de tranques de relave en Chile requiere que posterior a la etapa de cierre de sus faenas, ésta sea resistente a la crecida máxima probable, En un contexto de variabilidad climática, la estimación de la amenaza meteorológica ante eventos extremos de precipitación requiere la cuantificación de los potenciales impactos del cambio climático en su determinación. En este trabajo, se presentan resultados del estudio de la amenaza meteorológica proyectada a los tranques andinos de la Corporación Nacional del Cobre. El enfoque considera la selección de modelos climáticos globales y el uso de modelos regionales (RCM). Para la estimación de la amenaza meteorológica, se calcula (i) la variación de la precipitación de distintos periodos de retorno y (ii) la precipitación máxima probable, estimada estadísticamente, considerando escenarios de alta emisión (RCP8.5 y SSP5-8.5) para los periodos futuros 2030-2059 y 2070-2099, considerando además los efectos de la corrección de sesgo de las simulaciones utilizando un método multivariado (MBCn). Los resultados muestran variación entre los modelos climáticos para diferentes latitudes y periodos de retorno, sin embargo, las proyecciones de aumento de PMP son consistentes, siendo los RCMs aquellos que sugieren un mayor incremento en esta amenaza. Si bien se presenta el estado del arte, respecto a la evaluación de modelos y corrección de sesgo, la gran varianza de los resultados plantea desafíos en cuanto a la adaptación de este tipo de infraestructura.

¹ Profesor Asistente, Depto. de Obras Civiles, U. Técnica Federico Santa María - email: miguel.lagos@usm.cl

² Investigador Asociado, AMTC, U. de Chile- email: jeronimosota@gmail.com

³ Investigadora Asociada, AMTC, U. de Chile- email: paula.ojeda@amtc.uchile.cl

⁴ Investigador Asociado, AMTC, U. de Chile- email: salvador.quezada@amtc.uchile.cl

⁵ Postdoctoral Associate, Schulich School of Engineering, U. of Calgary - email: nicolas.vasquez@ucalgary.ca

⁶ Gerencia Corporativa de Relaves de Codelco, CODELCO- email: RPERE002@codelco.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las obras hidráulicas son dimensionadas según la estimación de caudales asociados a diferentes periodos de retorno. Muchas de estas estimaciones se realizan mediante relaciones de precipitación-escorrentía, siendo la determinación de tormentas de diseño una de las prácticas más utilizadas para obras menores, y también en zonas sin información fluviométrica.

En Chile, la normativa de diseño de relaves (SERNAGEOMIN, 2007), contempla que, para el cierre de faenas, estos deben ser capaces de resistir la Crecida Máxima Probable (CMP), como respuesta a la Precipitación Máxima Probable (PMP). Del mismo modo, la Asociación Internacional de Grandes Embalse (ICOLD, 2010), establece que, para embalses grandes, las crecidas de diseño deben estar asociadas a la PMP o a eventos de 10.000 años de periodo de retorno. Todas estas consideraciones suponen un diseño lo suficientemente conservador para resistir las condiciones más desfavorables.

Estudios recientes han evidenciado una tendencia al aumento en la frecuencia y magnitud de eventos extremos de precipitación en diversas partes del mundo (e.g., Sun et al., 2021). En particular, en Chile, el estudio de Lagos-Zúñiga et al. (2024a) mostró tendencias de incremento de la precipitación máxima diaria en la zona austral del país y en algunos sectores del norte de Chile para temporadas cálidas. Del mismo modo, diversas proyecciones climáticas, tanto de modelos globales como regionales, sugieren una intensificación de estos eventos en el futuro (Gutiérrez et al., 2021; Lagos-Zúñiga et al., 2024b).

En consecuencia, la evidencia observacional, así como proyecciones climáticas, sugieren la necesidad de reconsiderar la amenaza meteorológica, como forzante principal de estimación de caudales de diseño de infraestructura hídrica en cuencas no controladas. En este estudio, se analizan las proyecciones de precipitaciones máximas diarias para distintos periodos de retorno, así como también la PMP obtenida mediante un enfoque estadístico, para los depósitos de relave de la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO), ubicados entre las regiones de Antofagasta y de O'Higgins.

2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio considera tranques de relave de CODELCO, los cuales se han separado en cuatro zonas geográficas (ver Figura 1). El primero se ubica en la región de Antofagasta (Talabre, Zona 1), seguido por Pampa Austral y Potrerillos I y II situados en la región de Atacama (Zona 2). La Zona 3 muestra los depósitos existentes entre las regiones de Valparaíso y Metropolitana (Ovejería, Los Leones y Piuquenes). Finalmente, en la Zona 4 se encuentran los depósitos de la Región de O'Higgins correspondientes a la división de El Teniente (Carén, Cauquenes y Colihues y Barahona I, II).

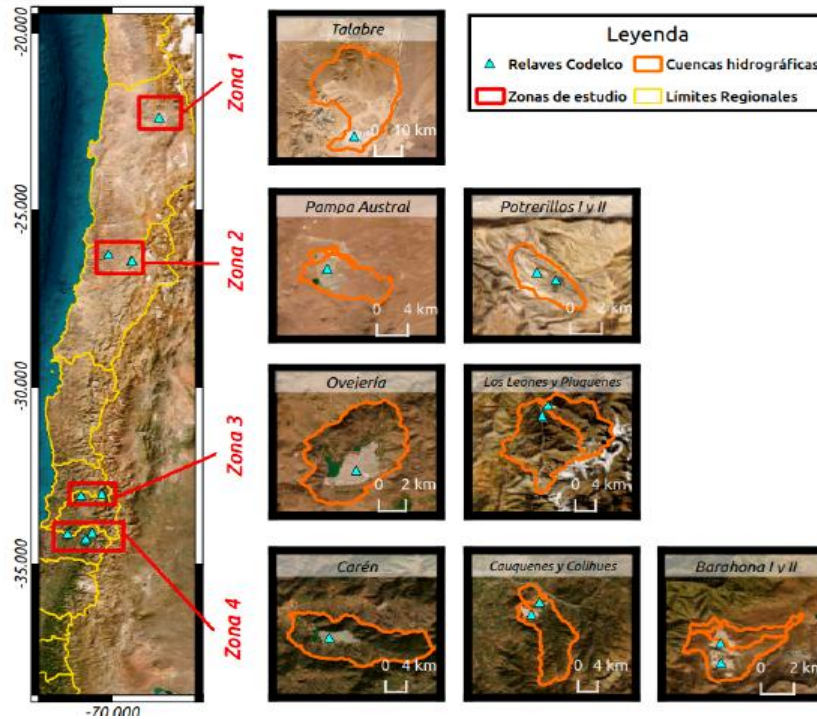


Figura 1. Ubicación de los tranques de relave (izquierda) y sus cuencas afluentes (derecha).

3. DATOS Y METODOLOGÍA

3.1. OBSERVACIONES DE REFERENCIA

Debido a la escasez de datos meteorológicos de registro continuo y extenso en las zonas aledañas a los tranques de relaves, se toma como referencia el producto CR2Metv2.5 (Boisier et al., 2018), el cual tiene una resolución temporal diaria, y una resolución horizontal de $0,05 \times 0,05^\circ$. El producto CR2Met, versión 2.5, considera como predictores variables del reanálisis climático ECMWF ERA5 (Hersbach et al., 2020), parámetros topográficos y estimaciones de temperatura de la superficie terrestre del sensor satelital de radiómetro de imagen de resolución moderada (MODIS) para estimar montos diarios de precipitación observada en la red nacional, así como montos de temperaturas diarias extremas en una resolución horizontal de $0,05^\circ$ (~ 5 km). Para cada celda, se calcula la serie de precipitación máxima diaria para cada zona de estudio, y se determina mediante el test de Kolmogorov-Smirnov, la distribución de frecuencias que más se asemeja a la empírica de cada píxel (i.e., serie anual de precipitación máxima diaria).

3.2. MODELOS CLIMÁTICOS

Se consideran cuatro Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) pertenecientes al CMIP5, los cuales fueron seleccionados por DGA (2017), basados en

criterios de representación de teleconexiones ENSO⁷ y SAM⁸ con la precipitación y Chile central (Tabla 1). Adicionalmente, se incluyen modelos del CMIP6, los cuales se seleccionan según su capacidad de representar la climatología histórica (Gateño et al., 2024; AMTC 2022), según se muestra en la Tabla 1. Finalmente, se consideraron modelos climáticos regionales (RCMs, por sus siglas en inglés) disponibles para Chile, evaluados en AMTC (2022) y las simulaciones regionales Eta (Mesinger et al., 2012), todas ellas forzadas con modelos climáticos del CMIP5 (Tabla 2). Los escenarios climáticos consideran el RCP8.5, para los modelos del CMIP5 y RCMs, y el SSP5-8.5 para los GCMs del CMIP6. Las proyecciones futuras de precipitación se evalúan para los periodos proyectados 1 (2030-2059) y 2 (2070-2099).

Tabla 1: Modelos climáticos globales seleccionados para cada zona de estudio y su resolución horizontal nativa.

Proyecto	Modelo	Zona de aplicación	Resolución °Lat. x °Lon.
CMIP5	BNU-ESM	Todas	2,8 x 2,8
	GISS-E2-H		2,0 x 2,5
	GISS-E2-R		2,0 x 2,5
	CNRM-CM5		1,4 x 1,4
	CCSM4		0,9 x 1,3
	CSIRO-Mk36		1,9 x 1,9
	IPSL-CM5A-LR		1,9 x 3,8
	IPSLCM5B-LR		1,9 x 3,8
	MIROC-ESM		2,8 x 2,8
	MPI-EMS-LR		1,9 x 1,9
	NorESM1-M		1,9 x 2,5
	HadGEM2-Es		1,3 x 1,9
	FGOALS-g2		2,8 x 2,8
CMIP6	MPI-ESM1-2-LR	Zonas 1 y 2	1,9 x 1,9
	GFDL-CM4	Todas	2,5 x 2,0
	GFDL-ESM4	Todas	2,5 x 2,0
	INM-CM5-0	Zonas 1 y 2	2,0 x 1,5
	INM-CM4-8	Zonas 1 y 2	2,0 x 1,5
	MIROC6	Zonas 1 y 2	1,4 x 1,4
	NESM3	Todas	2,3 x 2,3
	CanESM5	Zonas 1 y 2	2,8 x 2,8
	EC-Earth3-CC	Zonas 1, 3 y 4	0,7 x 0,7
	TaiESM1	Zonas 1, 3 y 4	0,9 x 0,9
	MPI-ESM1-2-HR	Todas	0,9 x 0,9
	EC-Earth3	Todas	0,7 x 0,7
	MRI-ESM2-0	Todas	1,1 x 1,1
	EC-Earth3-Veg-LR	Zonas 2, 3 y 4	1,1 x 1,1
	EC-Earth3-Veg	Zonas 2, 3 y 4	0,7 x 0,7

⁷ El Niño Southern Oscillation.

⁸ Southern Anular Mode

Proyecto	Modelo	Zona de aplicación	Resolución °Lat. x °Lon.
	KIOST-ESM	Zonas 3 y 4	1,8 x 1,8
	CMCC-ESM2	Zonas 3 y 4	1,3 x 0,9
	NorESM2-MM	Zonas 3 y 4	1,3 x 0,9

Tabla 2: Modelos climáticos regionales y los GCMs utilizados como forzante, junto con la resolución horizontal de cada modelo. Los RCMs fueron considerados en todas las zonas de estudio.

Modelo Regional	Modelo forzante	GCM	Resolución °Lat. x °Lon.
RegCM4.5	MPI-ESM-M		0,1 x 0,1
RegCM4.7	MPI-ESM-MR		0,22 x 0,22
	NorESM1-M		
REMO2015	MPI-ESM-LR		
	NorESM1-M		
Eta	CanESM2		0,2 x 0,2
	HadGEM2		
	MIROC5		

3.3. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio considera la estimación de los cambios proyectados en (i) precipitaciones máximas diarias para distintos periodos de retorno (10, 50, 100, 250, 500, 1.000 y 10.000 años), y (ii) de la PMP – obtenida mediante el método de Hershfield (1965) para una duración de 24 horas. Las proyecciones de cambio se muestran considerando los modelos crudos interpolados mediante el método bilineal (Gribbon et al., 2003) y escalados estadísticamente mediante el método *Multivariate Bias Correction* (MBCn), propuesto por Cannon (2018), tomando como referencia el producto CR2Metv2.5, utilizando la precipitación diaria y temperatura media diaria como covariables. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada en el contexto nacional para diversos estudios de cambio climático como Vásquez et al., (2025), Dionizis et al. (2023) y DGA (2022), entre otros. Por limitaciones de espacio del presente artículo, las proyecciones asociadas a diferentes periodos de retorno se presentan con las series escaladas, mientras que las proyecciones de PMP, promediadas por zona de estudio, se presentan para modelos crudos (i.e., interpolados espacialmente) y escalados (con corrección de sesgo).

Debido a la presencia de sesgos en eventos extremos que el producto CR2Met pueda presentar, las proyecciones se muestran como variación porcentual (Ec. 1). En consecuencia, no se entregan magnitudes de PMP ni de precipitaciones extremas asociadas a distintos periodos de retorno.

$$\Delta P = \frac{P_F^e - P_H^e}{P_H^e} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde ΔP es el cambio de precipitación porcentual, P_F^e : es la precipitación extrema (PMP o asociada a algún periodo de retorno) del periodo futuro evaluado, mientras que P_H^e , representa la misma variable estudiada, pero en el periodo histórico. Se hace notar que, para los modelos del CMIP5 y RCMs, el periodo histórico corresponde al periodo 1976-2005, mientras que para los modelos del CMIP6 corresponde al periodo 1985-2014.

4. RESULTADOS

4.1. PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN

La Figura 2 muestra las curvas de duración simuladas por CR2Metv2.5, GCMs y RCMs en cada zona de estudio (los dos últimos corregidos estadísticamente mediante el método MBCn). Si bien este último método corrige sesgos en la climatología y en la estacionalidad (al ser aplicado mensualmente), es evidente que no logra representar adecuadamente las condiciones históricas de precipitación máxima diaria anual, a excepción de la zona 2, resultando en una sobreestimación respecto al producto de referencia; No obstante, dicha sobreestimación es menor luego de la corrección de sesgo respecto a los modelos crudos (no se muestra).

Las proyecciones de precipitación máxima diaria, de distintos periodos de retorno, en el periodo proyectado 1 (2030-2059; Figura 3), muestran que los RCMs proyectan incrementos de precipitación para prácticamente todos los periodos de retorno, particularmente en las zonas 1 y 2, con medianas cercanas al 50% para periodos de retorno superiores a 500 años. Por otro lado, los GCMs no muestran una señal clara en estas mismas regiones, con medianas de cambio cercanas a cero. Esta proyección se repite para los modelos del CMIP6 en la zona 3, mientras que los GMCs del CMIP5 y RCMs, presentan medianas de aumento cercanas al 10%. Por otro lado, en la zona 4, existe mayor acuerdo entre todos los modelos analizados, con medianas en torno al 50% para eventos de 10.000 años de periodo de retorno.

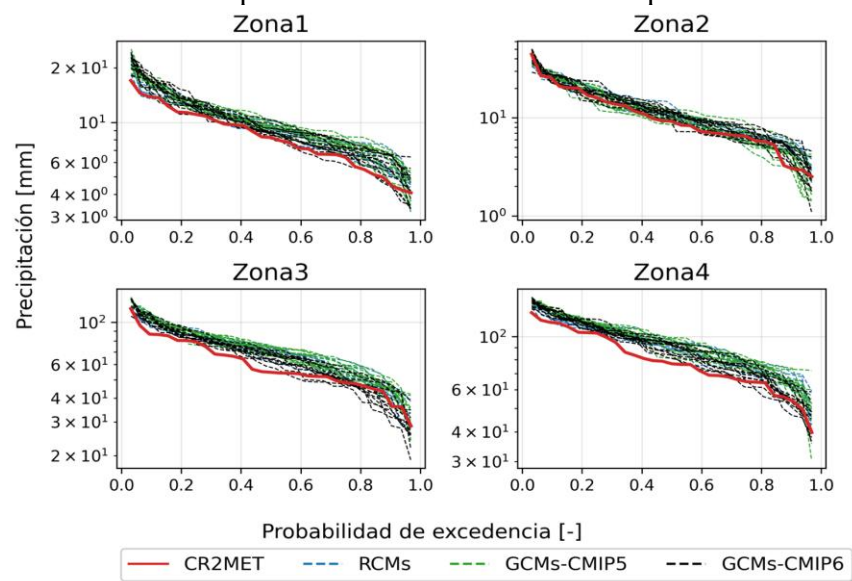


Figura 2. Cambio de precipitación para distintas probabilidades de excedencia en los modelos escalados estadísticamente, comparados con la serie de referencia CR2MET en el periodo histórico.

Para el caso de la PMP estadística, la zona 1 muestra una señal positiva, pero falta de acuerdo por parte de los RCMs, mientras que, en la misma zona, los GCMs tienden a mostrar mayor acuerdo en la señal de cambio, particularmente para el periodo proyectado dos, con incrementos cercanos al 50%, y hasta del 100% a finales de siglo (Figura 3). En la zona 4 se aprecia que el acuerdo climático es claro en los GCMs, mientras que la señal de cambio no lo es en los RCMs; de todos modos, el cambio esperado, dependiendo de la zona de estudio analizada, puede alcanzar magnitudes cercanas al 40%.

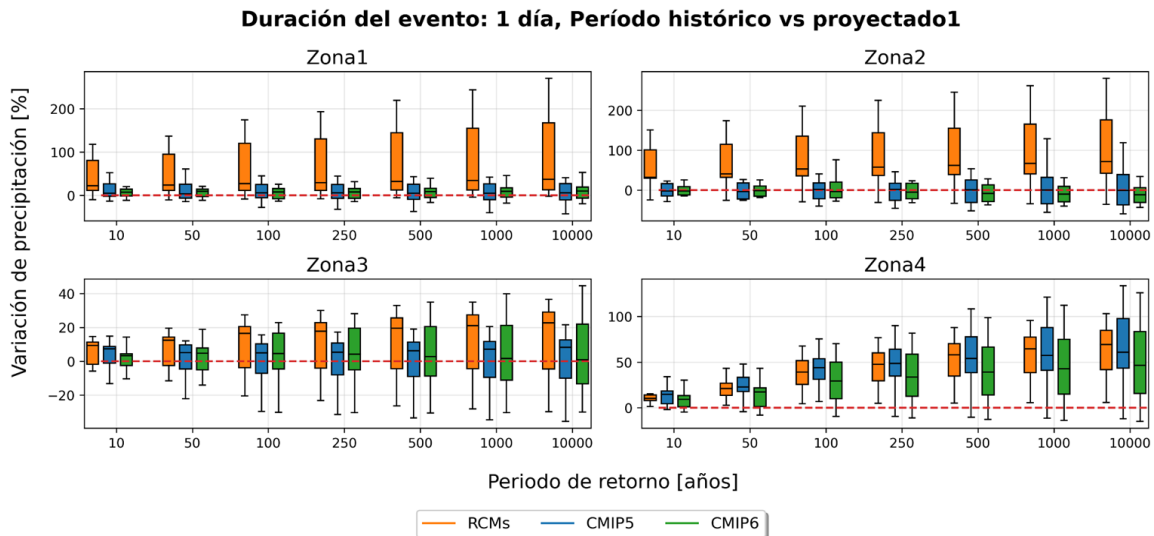


Figura 3. Cambio de precipitación proyectado para el periodo proyectado 1 (con respecto al periodo histórico) en las cuatro zonas de estudio.

4.2. PROYECCIONES DE PMP

En términos espaciales, las Figuras 4 y 5, muestran, a modo de ejemplo, las proyecciones de PMP para las zonas 1 y 4, respectivamente. Mostrando que, en general, el promedio de la señal es al aumento de la PMP, siendo este de mayor magnitud para el periodo proyectado 2, y según las proyecciones de los RCMs, particularmente en la Zona 1, donde se proyectan incrementos de 5 hasta veces el valor histórico, para el promedio de los siete RCMs analizados.

Los modelos climáticos crudos presentan, en general, mayor dispersión en las proyecciones de PMP crudas en las zonas 1 y 2, mientras que se observa un mayor acuerdo para el periodo proyectado dos (2070-2099) en las zonas 3 y 4 (Figura 6). Se aprecia que el rango intercuantil de las proyecciones, muestran una señal positiva para finales del siglo XXI, con medianas máximas cercanas al 40% en la zona 2 (CMIP6). Mientras que, los modelos del CMIP5 proyectan medianas en torno al cero.

El efecto del escalamiento estadístico en los modelos climáticos es considerable, particularmente en el caso de los RCMs, donde algunos modelos pueden proyectar incrementos de hasta un 300% en el periodo 2 de la zona 2 (Figura 7), mientras que el rango intercuantil de todos los modelos tiende a estabilizarse en las zonas 2 y 3 en todos los modelos climáticos, con proyecciones que, en mediana, se sitúan en torno al 30% en comparación al periodo histórico. En general, en las zonas de Chile central, existe bastante acuerdo entre los

modelos del CMIP5 y CMIP6, mientras que las mayores discrepancias se muestran en las zonas 1 y 2 analizadas.

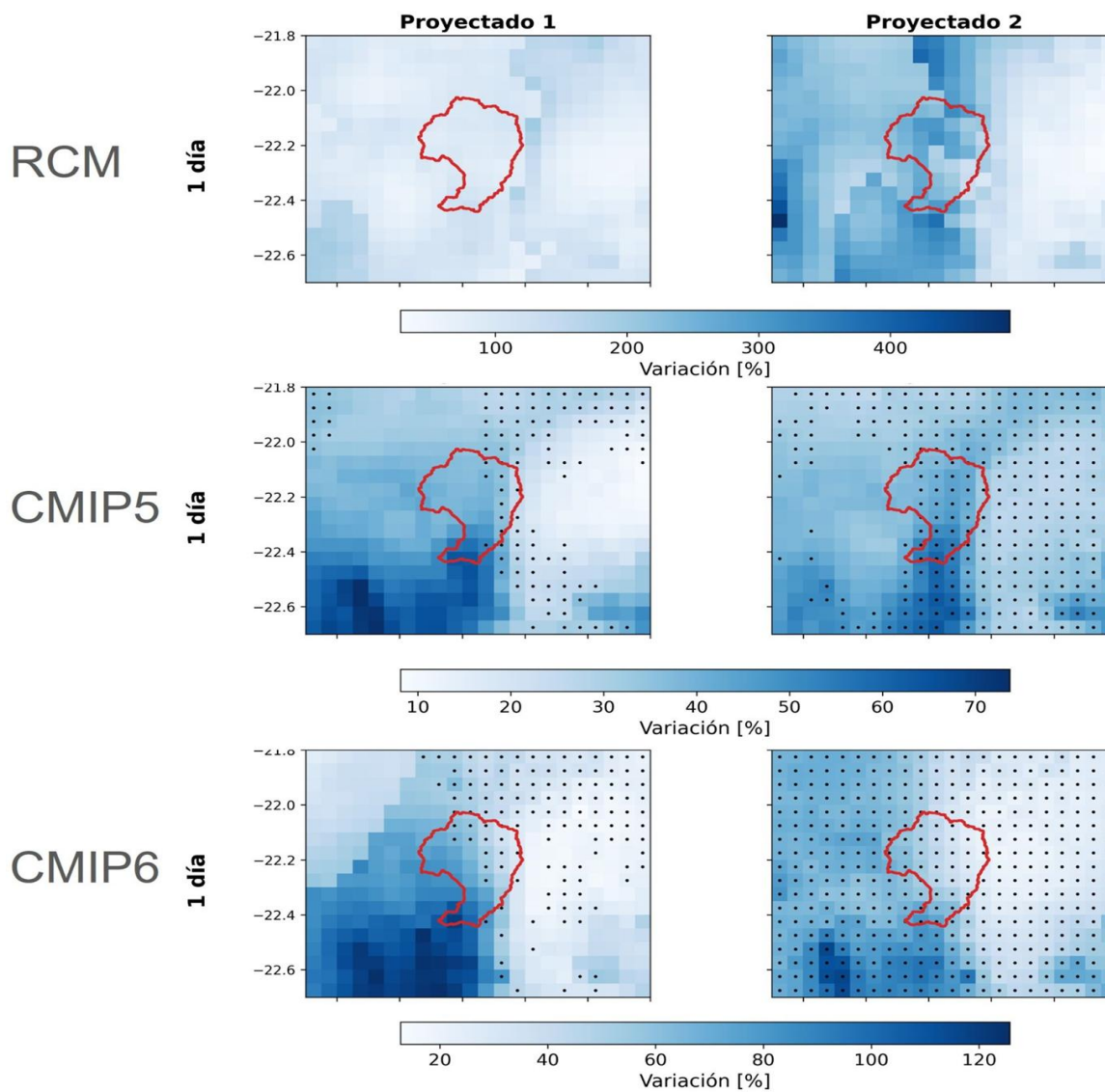


Figura 4. Proyecciones diarias promedio de la PMP para distintos modelos climáticos (filas) en la **zona 1**. Los puntos indican las zonas donde 2/3 de los modelos climáticos coinciden en la señal de cambio proyectada. Fuente: Adaptado de AMTC (2024).

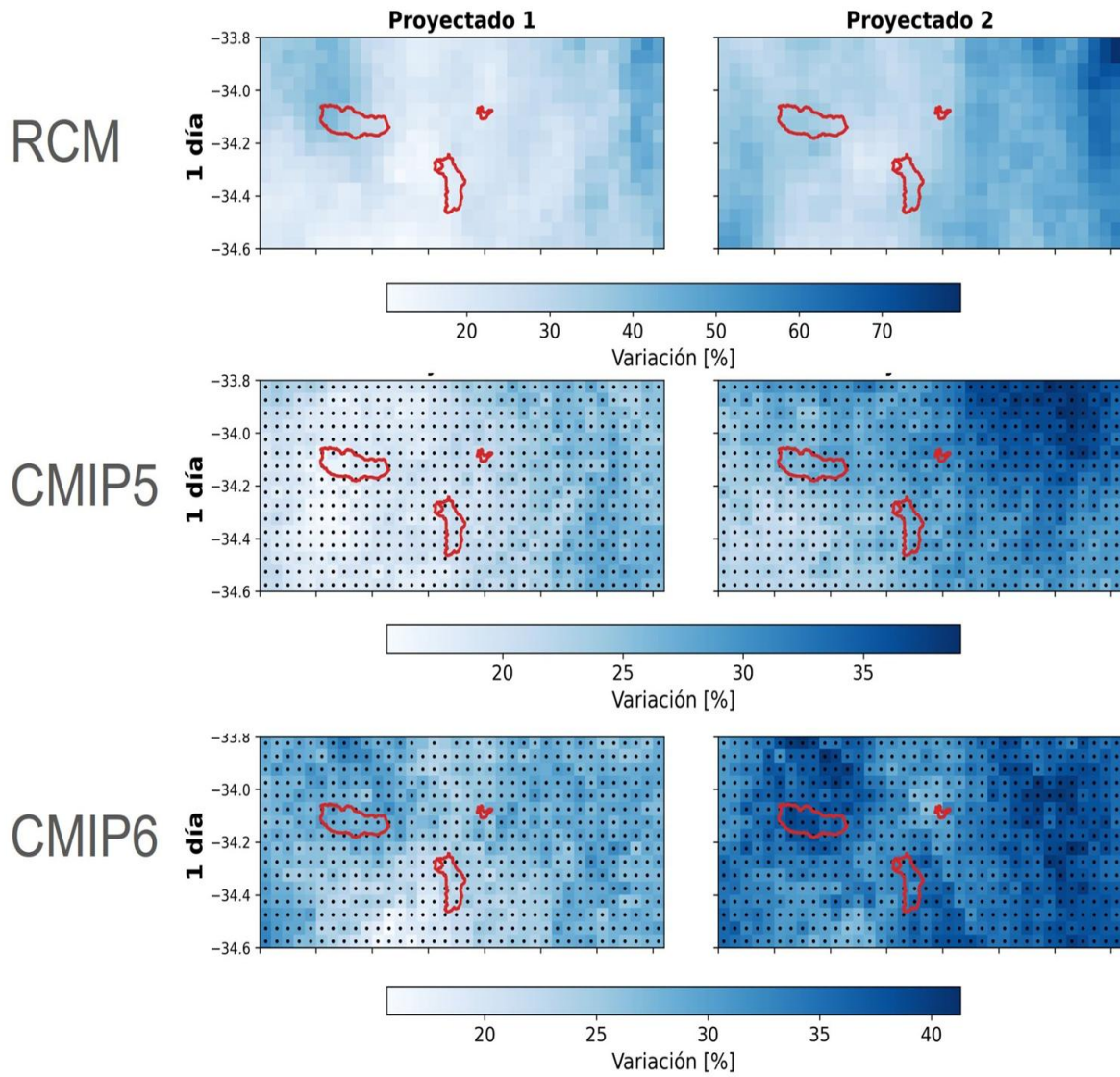


Figura 5. Proyecciones diarias promedio de la PMP para distintos modelos climáticos (filas) en la **zona 4**. Los puntos indican las zonas donde 2/3 de los modelos climáticos coinciden en la señal de cambio proyectada. Fuente: Adaptado de AMTC (2024)

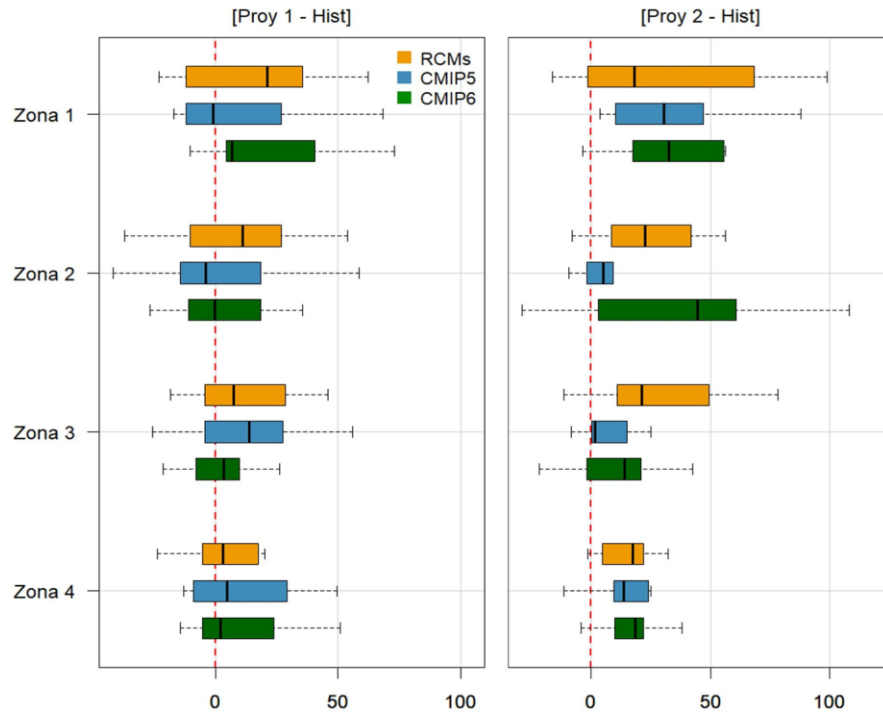


Figura 6. Proyecciones de PMP estadística por modelos climáticos crudos. Fuente: Adaptado de AMTC (2024)

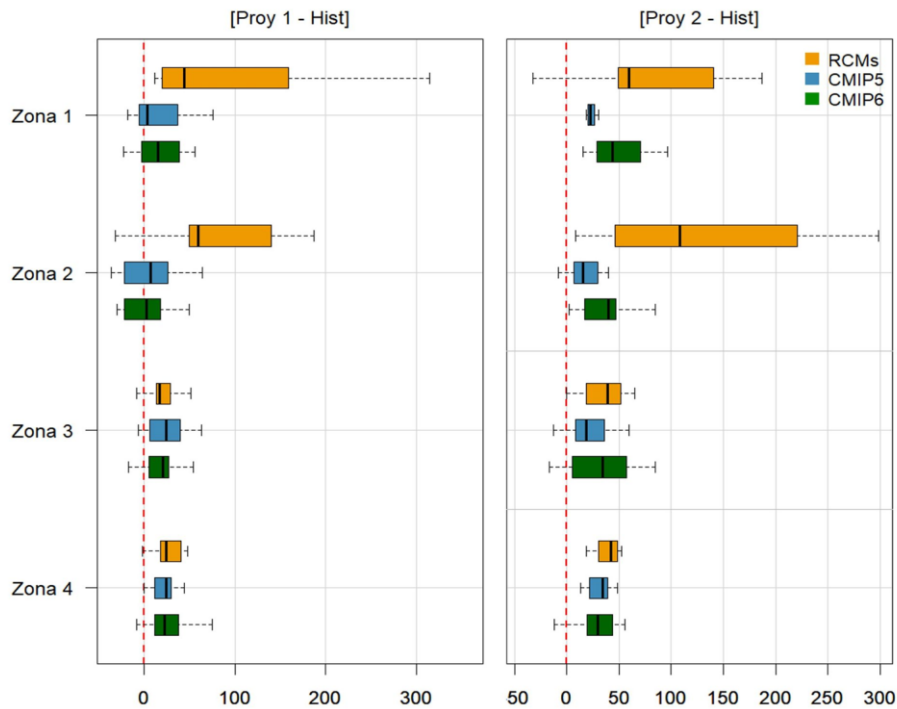


Figura 7. Proyecciones de PMP estadística por modelos climáticos escalados por el método MBCn. Fuente: Adaptado de AMTC (2024).

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las proyecciones de precipitación diaria para distintos períodos de retorno y PMP según los modelos CMIP6 presentan, en general, mayor acuerdo, en comparación al resto de modelos climáticos, al proyectar una señal positiva, lo que se traduce en un incremento en la amenaza meteorológica de los sistemas de relaves. Los modelos regionales, en particular, entregaron magnitudes de cambio superiores a los GCMs, lo que plantea un desafío al manejo de la incertidumbre, actualmente no considerado en la normativa del SEIA respecto a proyecciones de cambio climático.

La incertidumbre de las proyecciones, retratada en la dispersión de los modelos, es alta, pudiendo incluso presentar magnitudes de cambio hacia la disminución de la precipitación máxima diaria, hasta incrementos por encima del 100%. Si bien se trabajó con modelos climáticos previamente evaluados (Gateño et al., 2024; DGA, 2017; AMTC, 2022), esta preselección no reduce por completo la incertidumbre asociada a las proyecciones, por lo que deben definirse criterios de diseño para la adecuación de los tranques de relaves.

Respecto a los escenarios de cambio climático analizados (RCP8.5 y SSP5-8.5), que corresponden a emisiones extremas de gases de efecto invernadero, es importante señalar que no necesariamente constituyen el escenario más desfavorable en términos de precipitaciones de distintos períodos de retorno, PMP y CMP. Por lo que la evaluación de otros escenarios forma parte inherente de la cascada de incertidumbre en estudios de esta naturaleza, y debe ser considerada en estudios posteriores.

Los resultados aquí presentados, indican que las amenazas meteorológicas, de incremento de precipitación máxima promedio, particularmente para las zonas 3 y 4, se aprecian también para precipitaciones de períodos de retorno menores a 100 años, lo que puede suponer también una amenaza en criterios de diseño de obras hidráulicas menores, debiendo además estudiarse las proyecciones para eventos de duración menor a un día.

Finalmente, para estimaciones de cambio de amenaza de PMP, se hace necesario analizar el enfoque meteorológico en su estimación, pues, si bien existen proyecciones de incremento de humedad a nivel global producto del incremento de temperatura, para Chile central se espera una disminución de esta (Pfahl et al., 2017), dichas señales opuestas que deben ser debidamente consideradas para incluir mayor realismo físico en las proyecciones esperadas de PMP.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al “Estudio de la amenaza meteorológica de depósitos de relave ante proyecciones de cambio climático”, realizado por el *Advanced Mining Technology Center* de la Universidad de Chile, para la gerencia de Relaves de CODELCO, en el marco del convenio de desarrollo tecnológico celebrado entre ambas instituciones.

REFERENCIAS

- AMTC. (2022). Guía metodológica para evaluación de disponibilidad hídrica futura ante escenarios de cambio climático. Convenio de Desarrollo Tecnológico entre Corporación Nacional del Cobre y Universidad de Chile, Santiago, Chile. Realizado por: Advanced Mining Technology Center (AMTC), 102.
- AMTC (2024). Estudio de la amenaza meteorológica de depósitos de relave ante proyecciones de cambio climático. Convenio de Desarrollo Tecnológico entre Corporación Nacional del Cobre y Universidad de Chile, Santiago, Chile. Realizado por: Advanced Mining Technology Center (AMTC), CONTRATO N° 4600025675.
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018, April). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In *EGU general assembly conference abstracts* (p. 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(1), 31-49.
- 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.
- DGA (2022). "Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile". SIT N° 524. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Dionizis, D., Ojeda, P., Quezada, S., Lagos, M. y Montserrat, S. (2021). Implicancias de la elección del método de escalamiento estadístico de modelos de circulación general en proyecciones de cambio hidrológico. Enviado a XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Chile, Santiago.
- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., ... & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code genealogy. *Climatic Change*, 177(6), 87.
- Gibbon, K. T., Johnston, C. T., y Bailey, D. G. (2003). A real-time fpga implementation of a barrel distortion correction algorithm with bilinear interpolation.. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:19008930>
- Gutiérrez, J. M., Jones, R. G., Narisma, G. T., Alves, L. M., Amjad, M., & Gorodetskaya, I. V. (2021). *IPCC interactive Atlas. Climate change*.
- Hershfield, D. M. (1965). Method for estimating probable maximum precipitation, *J. Am. Waterworks Assoc.*, 57, 965-972.
- ICOLD (2010). Integrated flood risk management. Dams and floods committee. The International Committee of Large Dams. *ICOLD Bulletin*.
- Lagos-Zúñiga, M., Mendoza, P. A., Campos, D., & Rondanelli, R. (2024). Trends in seasonal precipitation extremes and associated temperatures along continental Chile. *Climate Dynamics*, 62(5), 4205-4222.
- Lagos-Zuniga, M., Balmaceda-Huarte, R., Regoto, P., Torrez, L., Olmo, M., Lyra, A., ... & Bettolli, M. L. (2024b). Extreme indices of temperature and precipitation in South America: Trends and intercomparison of regional climate models. *Climate Dynamics*, 62(6), 4541-4562.
- Mesinger, F., Chou, S. C., Gomes, J. L., Jovic, D., Bastos, P., Bustamante, J. F., ... & Veljovic, K. (2012). An upgraded version of the Eta model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 116(3), 63-79.
- Pfahl, S., A., P., & Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7(6), 423-427. <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>
- SEIA (2023). Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA (Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental). Descargado de https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/01/13/MET-Guia-Cambio-Climatico_2023.pdf
- SERNAGEOMIN (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. Servicio Nacional de Geología y Minería. Departamento de Seguridad Minera. Elaborado por Nelson A. Ramírez Morandé.
- Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F., Westra, S., & Alexander, L. V. (2021). A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. *Journal of Climate*, 34(1), 243-258.
- Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Lagos-Zúñiga, M., Scaff, L., Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2024). Robust spatial changes in climate classes: insights from bias-corrected CMIP6 models across Chile. *Environmental Research Letters*, 20(1), 014061.