

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CORRECCIÓN ESTADÍSTICA DE PRODUCTOS
GRILLADOS SEGÚN APLICACIÓN Y ZONA DE INTERÉS**

FELIPE GATEÑO M.¹

RESUMEN

La necesidad de obtener series continuas y espacialmente distribuidas de forzantes meteorológicas a nivel nacional ha sido en parte solventada por el desarrollo del producto CR2MET, del cual recientemente se ha publicado la versión 2.5. Sin embargo, a pesar de que el producto considera registros in-situ en su concepción, puede presentar sesgos cuando su meteorología se compara con la observada en estaciones, por lo que han surgido métodos de corrección que, mediante la aplicación de técnicas estadísticas, permiten solventar esas falencias y mejorar el desempeño a escala local de estos productos. Con el objetivo de poder tomar decisiones más informadas en cuanto a la elección de la versión de CR2MET y/o del método de corrección, en el presente estudio se compara el desempeño de las extracciones crudas (i.e., sin corrección) de CR2METv2.0 y CR2METv2.5 con las resultantes de aplicar 6 métodos de corrección estadística distintos. El proceso de evaluación se lleva a cabo considerando 69 estaciones meteorológicas a lo largo del territorio nacional, verificando el desempeño de los distintos métodos a través del cálculo de 16 métricas que buscan cuantificar el rendimiento en la reproducción de tres aspectos cruciales en el estudio de los recursos hídricos: (i) reproducción de eventos extremos; (ii) climatología promedio; y (iii) coherencia intervariable. Los resultados indican que, a pesar de ser una versión más reciente y de presentar mejorías entre las regiones de Bío-Bío y Los Lagos, CR2METv2.5 no presenta una superioridad clara en el resto del territorio nacional. Adicionalmente, ningún método de corrección estadística es simultáneamente superior en los tres aspectos evaluados, sin embargo, el método Support Vector Machine (SVM) es el que aporta mayores mejorías en aspectos relacionados con extremos, mientras que los métodos multivariados y el método Quantile Delta Mapping (QDM) son aquellos que permiten una mejor reproducción de aspectos relacionados con la climatología promedio y la coherencia intervariable.

¹ ERIDANUS Ltda. felipeгатeno@eridanus.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los registros in-situ de variables meteorológicas son fundamentales en el estudio de procesos hidrológicos, adaptación al cambio climático y modelación hidrológica (DGA, 2022; Douville et al., 2023; Her & Chaubey, 2015), sin embargo, en el caso nacional son alrededor de 925 y 555 las estaciones públicas que registran precipitación y temperaturas, respectivamente, resultando en una densidad de estaciones que no cumple con la mínima recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2008). Una solución a esta problemática se puede encontrar en la utilización de reanálisis (Dee et al., 2011; Hersbach et al., 2020) o de productos que combinen los resultados de estos con información de estaciones in-situ, como lo son CR2MET (Boisier et al., 2018; DGA, 2022) y RF-MEP (Baez-Villanueva, 2020). Estos productos permiten obtener series de tiempo de variables meteorológicas continuas en el tiempo y distribuidas en el espacio. En este sentido, el producto grillado CR2MET ha sido ampliamente utilizado en estudios nacionales (DGA, 2017, 2022; Chadwick et al., 2023), el cual a la vez ha sido comparado con otros productos satelitales, demostrando ventajas en su utilización para la regionalización de parámetros hidrológicos en ciertas cuencas de Chile (Baez-Villanueva et al., 2021), como también oportunidades de mejora a la hora de representar características espaciotemporales de la precipitación (Baez-Villanueva et al., 2020).

En línea con lo anterior, existen diversas técnicas de corrección de estos productos, las cuales tienen como objetivo principal lograr una mejor representación de aspectos locales de la meteorología, comúnmente mediante la aplicación de técnicas estadísticas (Gutmann et al., 2012; Araya-Osses et al., 2020). De mano con las ventajas de la aplicación de estos métodos, al existir una gran diversidad de técnicas surge también la necesidad del usuario de decidir qué método utilizar, el cual dependerá de la aplicación y de las métricas objetivo de evaluación (Maraun et al., 2015). De esta forma, el presente estudio se enfoca en responder dos preguntas: (i) ¿cuáles son los métodos de escalamiento estadístico que presentan mejor desempeño a lo largo de Chile Continental?; y (ii) al ser una versión más reciente del producto ¿es CR2METv2.5 superior al compararlo con CR2METv2.0?

2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS

2.1. ZONA DE ESTUDIO

El dominio de estudio consiste en Chile Continental, dividido en 5 macrozonas basándose en el criterio de Alvarez-Garretón et al. (2018): (1) Norte Grande, desde la región de Arica y Parinacota hasta Antofagasta; (2) Norte Chico, desde Atacama hasta Coquimbo; (3) Zona Central, desde Valparaíso hasta el Maule; (4) Zona Sur, desde Bío-Bío hasta Los Lagos; y (5) Zona Austral, correspondientes a la regiones de Aysén y de Magallanes. Algunos atributos orográficos y climáticos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Características orográficas y climáticas por macrozona.

Macrozona	Elevación media (máxima) [m.s.n.m.]	Precipitación media anual [mm/año]	Temperatura media anual y extremas [°C]
Norte Grande	2531 (6118)	66	11,0 (2,9 - 19,1)
Norte Chico	2116 (5980)	117	10,2 (4,0 - 16,5)
Central	1070 (5575)	833	12,1 (5,8 - 18,3)
Sur	534 (3062)	2057	10,5 (4,9 - 16,1)

Macrozona	Elevación media (máxima) [m.s.n.m.]	Precipitación media anual [mm/año]	Temperatura media anual y extremas [°C]
Austral	524 (3154)	1844	5,0 (0,8 – 0,0)

2.2. DATOS

Se analizó el producto grillado CR2MET en sus dos versiones más recientes, 2.0 y 2.5 (ver Boisier et al., 2018 y DGA, 2022), las cuales se describen en la Tabla 2

Tabla 2: Descripción de los productos grillados evaluados.

Versión de CR2MET	Inicio del periodo	Término del periodo	Reanálisis utilizado
v2.0	Enero de 1979	Abril de 2020	ERA5-Interim (Dee et al., 2011)
v2.5	Enero de 1960	Diciembre de 2021	ERA5 (Hersbach et al., 2020)

El desempeño de estos productos grillados se evaluará considerando estaciones meteorológicas que registren simultáneamente precipitación (de ahora en adelante PRCP), temperatura mínima (TN) y temperatura máxima (TX) a nivel diario. Según la información publicada en el Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, <https://explorador.cr2.cl/>), base de datos que reúne los registros de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), se cuenta con 879 estaciones con registros de PRCP, de las cuales 386 registran también TN y TX. Algunas de estas estaciones poseen registros desde 1950, y al estar actualizada hasta marzo de 2020 no posee registros posteriores a esa fecha. Por lo tanto, y considerando los periodos de los productos CR2MET, el estudio se realizará para el periodo consistente entre enero de 1979 y marzo de 2020. Adicionalmente, con el objetivo de disminuir la incertidumbre en el estudio asociada a la calidad de los registros meteorológicos, se seleccionan solo aquellas estaciones que posean al menos un 75% de los registros de PRCP, TN y TX para ese periodo, seleccionando un total de 69 estaciones repartidas de la siguiente forma: 8 estaciones en la macrozona del Norte Grande; 14 en Norte Chico; 24 en la macrozona Central; 13 en la macrozona Sur; y 10 en la Austral (ver Figura 1a).

3. MÉTODOS

3.1. ESTRATEGIA DE EVALUACIÓN

La estrategia de evaluación consiste en 5 pasos, los cuales se explican a continuación y se representan en el diagrama de la Figura 1: (i) se seleccionan las estaciones por macrozona (Figura 1a); (ii) para cada estación, se extrae la serie simulada por CR2METv2.0 y CR2METv2.5 para la posterior aplicación de los métodos de corrección descritos a continuación en la sección 3.3. Para la posterior verificación del desempeño de estos y con el objetivo de evitar el sobreajuste en la aplicación (Ayar et al., 2015; Maraun, 2016), se define el periodo de calibración como 01/01/1979-31/03/2009 (sombreado azul en Figura 1b), y el periodo de validación como 01/04/2009-31/03/2020 (sombreado rojo). (iii) para todas las series en el periodo de validación (estación, CR2MET en sus dos versiones sin corregir y CR2MET en sus dos versiones corregido con 6 métodos distintos, i.e., un total de 13 series por estación) se calculan las 16 métricas de diagnóstico descritas en la próxima sección 3.3 (Figura 1c); (iv) para cada métrica se obtiene el índice de Eficiencia de Kling-Gupta (KGE, Gupta et al., 2009) calculado entre la serie observada en estación y la dada por CR2MET_i, donde “i” hace referencia al i-ésimo método, i.e., extracción simple o extracción corregida con alguno de los 6 métodos de escalamiento estadístico (Figura 1d). (v)

agrupando las métricas según aspecto de evaluación, se obtiene el KGE promedio para los extremos (métricas en rojo en paneles d y e), climatología promedio (métricas en azul) y de coherencia intervariable (métricas en verde).

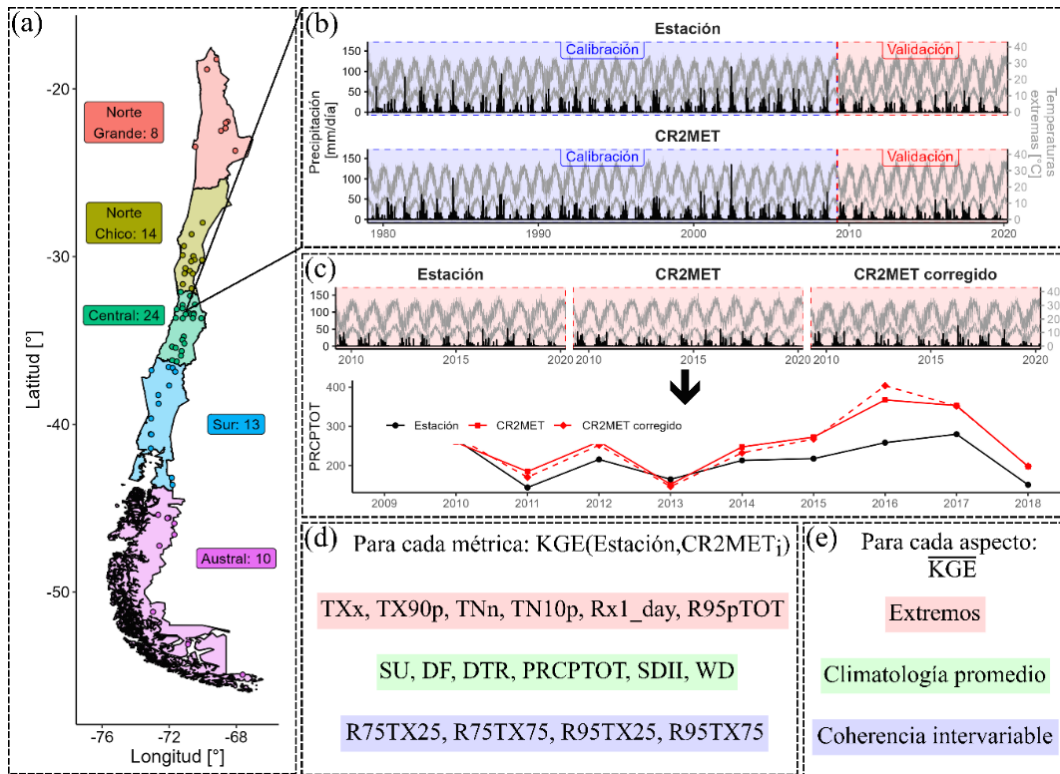


Figura 1: Esquema de la metodología aplicada.

3.2. MÉTODOS DE CORRECCIÓN

En la Tabla 3 se presentan los 6 métodos de corrección aplicados a las extracciones en estación tanto de CR2METv2.0 como a las de CR2METv2.5, los cuales se ordenan según su complejidad estadística. Estos métodos son aplicados dividiendo las series por estación del año: verano (meses de diciembre, enero y febrero); otoño (meses de marzo, abril y mayo); invierno (junio, julio y agosto); y primavera (septiembre, octubre y noviembre). Para la corrección de la probabilidad de ocurrencia de precipitación se aplicó el método Singularity Stochastic Removal (Vrac et al., 2016). Estos métodos serán siempre comparados con la extracción sin corregir de CR2MET, (la cual de ahora en adelante se denominará extracción cruda o “RAW”), para así poder cuantificar la mejoría que aportan al desempeño de los productos.

Tabla 3: Descripción de los métodos de escalamiento estadístico analizados, donde los tres primeros son univariados y los tres últimos multivariados. Para mayor detalle ver referencias asociadas.

Método	Descripción	Referencia(s)
Delta Change (DC)	Método usualmente utilizado como punto de comparación. Consiste en calcular el sesgo entre las medias de las series observadas y simuladas para luego corregir la serie simulada.	(Maraun, 2016)

Método	Descripción	Referencia(s)
Quantile Delta Mapping (QDM)	Construido para forzar la curva de probabilidad acumulada (CDF) de las series simuladas a la dada por la serie observada, preservando los cambios en los cuantiles de la CDF.	Cannon et al. (2015)
Support Vector Machine (SVM)	Técnica de aprendizaje supervisado de clasificación, cuya aplicación se ha extendido a la corrección de forzantes meteorológicas.	Chen et al. (2010) Hout et al. (2017) Pour et al. (2018)
Multivariate Bias Correction based on Pearson correlation (MBCp)	Generalización multivariada de QDM, construida para preservar la dependencia conjunta a partir del coeficiente de correlación de Pearson.	Cannon (2016)
Multivariate Bias Correction based on Spearman rank (MBCr)	Generalización multivariada de QDM, construida para preservar la dependencia conjunta a partir del ranking de Spearman.	Cannon (2016)
Multivariate Bias Correction based on N-pdf algorithm (MBCn)	Generalización multivariada de QDM, construido para transferir los aspectos de la serie multivariada observada a la simulada.	Cannon (2017)

3.3. MÉTRICAS DE DIAGNÓSTICO

Se calculan las métricas descritas en la Tabla 4 para evaluar el desempeño de las extracciones con y sin corrección. Estas se seleccionan desde el set de métricas propuestas por el Grupo de Trabajo de Detección de Cambio Climático (Peterson et al., 2001), las cuales se enfocan en cuantificar características asociadas a eventos extremos y a describir la climatología promedio. Adicional a ellas, se incorpora el cálculo de métricas que buscan analizar la reproducción de eventos que destacan la dependencia conjunta entre dos variables, las cuales se clasifican dentro del aspecto denominado coherencia intervariable (Beniston, 2009; Hao et al., 2013).

Tabla 4: Descripción de las métricas utilizadas para la evaluación y clasificación según aspecto de evaluación. pX hace referencia al percentil X.

Aspecto	Variable(s)	Identificador	Descripción
Extremos	TX	TXx	Valor máximo de TX.
		TX90p	Días con TX > p90.
	TN	TNn	Valor mínimo de TN.
		TN10p	Días con TN < p10.
	PRCP	Rx1_day	Precipitación máxima en 1 día.
		R95pTOT	Precipitación acumulada en días con PRCP > p95.
Climatología promedio	TX	SU	Días con TX superior a 25°C.
	TN	FD	Días con TN inferior a 0°C.
	TX Y TN	DTR	Promedio de la diferencia entre TX y TN.
	PRCP	PRCPTOT	Precipitación acumulada anual.
		WD	Días con lluvia.
		SDII	PRCPTOT dividida por WD.
Coherencia intervariable	TX y PRCP	R75TX25	Días con PRCP > p75 y TX < p25.
		R75TX75	Días con PRCP > p75 y TX > p75.
		R95TX25	Días con PRCP > p95 y TX < p25.
		R95TX75	Días con PRCP > p75 y TX > p75.

4. RESULTADOS

Los resultados se dividen en cuatro subsecciones: en 4.1 se presentan los resultados de las macrozonas Norte Grande y Norte Chico; en 4.2. los de la macrozona Central; en 4.3. los de las macrozonas Sur y Austral; y en 4.4. se resume el desempeño de los métodos agrupando por aspecto.

4.1. NORTE GRANDE Y NORTE CHICO

En la Figura 2 se presenta la evaluación de desempeños para las zonas de Norte Grande y Norte Chico, donde se aprecia que independiente de la versión de CR2MET o de la métrica, todos los métodos presentan un desempeño más bajo en Norte Grande. El aspecto más difícil de reproducir en el Norte Grande es la coherencia intervariable (Figura 2c), donde se observa que ningún método presenta valores de KGE mayores a 0,25, tanto si se aplican a las extracciones de CR2MET en su versión 2.0 o 2.5. La versión 2.5 presenta mayores dificultades para representar las métricas R75TX75 y R95TX75, indicando una deficiencia en la reproducción de eventos de precipitación moderados-intensos con temperaturas altas, mientras que la versión 2.0 presenta mejores desempeños al corregirse con QDM, MBCp o MBCr. Tanto para Norte Grande como para Norte Chico, la extracción cruda de la versión 2.0 presenta valores de KGE superiores a los reportados por la extracción cruda de CR2METv2.5 en métricas asociadas a la climatología promedio. Este comportamiento se observa también en el Norte Grande para TNn, donde CR2METv2.0 crudo presenta un mejor desempeño que la versión más actual. Por otro lado, para Norte Grande, se observa que el método SVM es el que presenta mejores desempeños en las métricas que se enfocan en evaluar las precipitaciones en los aspectos de extremos y de climatología promedio. Esta superioridad no se observa en el Norte Chico, ya que para métricas asociadas a extremos el método SVM presenta desempeños similares a los obtenidos por los tres métodos multivariados, mientras que para la climatología promedio estos últimos son superiores en la reproducción de los días húmedos (WD).

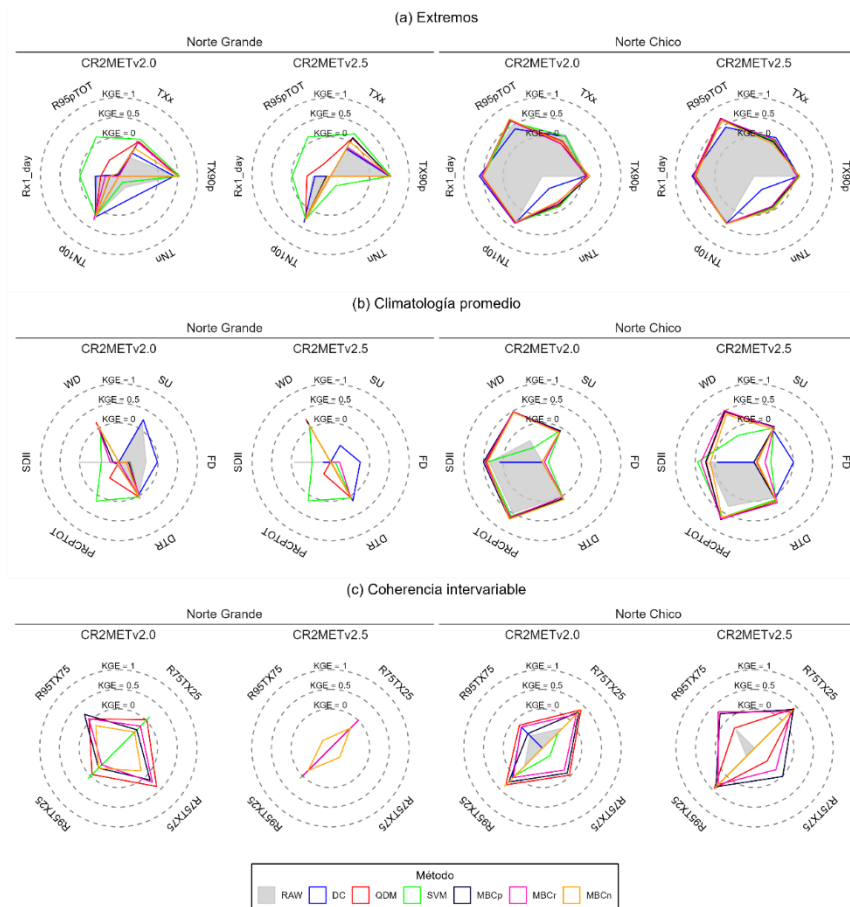


Figura 2: Resultados de la evaluación de las 16 métricas de diagnóstico: en el panel (a) se presentan las 6 métricas de extremos; en (b) las 6 de climatología promedio; y en (c) las 4 de coherencia intervariable. Los resultados se agrupan por columnas según la macrozona (Norte Grande en las 2 primeras y Norte Chico en las 2 últimas) y según la versión de CR2MET (v2.0 en primera y tercera y v2.5 en segunda y cuarta), donde el área gris indica el desempeño del respectivo producto sin corrección alguna, denominado como método “RAW”, mientras que los polígonos sin relleno representan cada uno de los 6 métodos de corrección.

4.2. CENTRAL

En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos para la macrozona Central, donde se observa que los desempeños de las extracciones crudas de CR2METv2.0 y CR2METv2.5 son similares, presentando diferencias exclusivamente en WD (donde la versión 2.0 supera a la 2.5) y R95TX75 (donde CR2METv2.5 supera a CR2METv2.0). Adicionalmente, ambas versiones presentan deficiencias en la reproducción de aspectos relacionados con las temperaturas extremas, donde tanto TNn (Figura 3a) como SU y FD (Figura 3b) presentan valores de KGE menores a 0, independiente que el producto esté corregido o no. Por otro lado, al evaluar métricas asociadas a extremos, se observa que el método SVM es el que reporta mejores resultados independiente de la versión del producto. Sin embargo, en las métricas asociadas a climatología promedio, este método es superado incluso por el método DC, siendo los métodos multivariados los que reportan los mejores resultados en este aspecto. En cuanto a la evaluación de la coherencia intervariable (Figura 3c), todos los métodos presentan dificultades en la reproducción de eventos de precipitación de

intensidad moderada y altas temperaturas (R75TX75), siendo el método MBCn el que presenta valores más bajos de KGE.

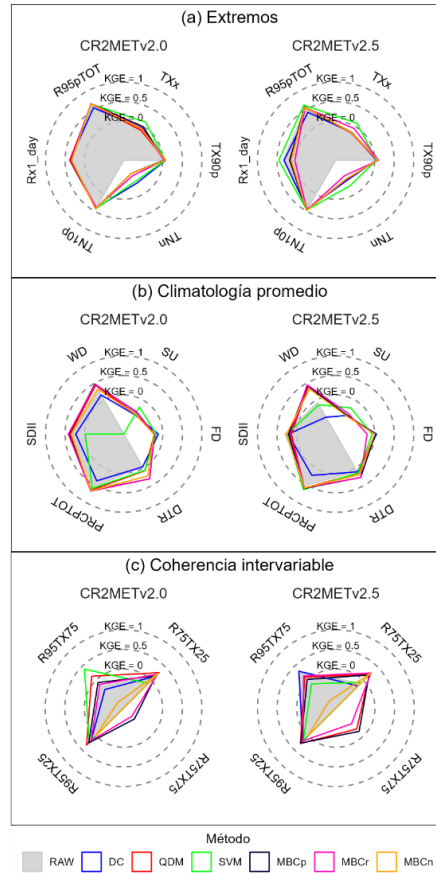


Figura 3: Evaluación de (a) extremos, (b) climatología promedio y (c) coherencia intervariable para la macrozona Central.

4.3. SUR Y AUSTRAL

En la Figura 4 se presentan los resultados de la evaluación aplicada en las macrozonas Sur y Austral. Independiente de la versión de CR2MET y de la métrica, se observa un mejor desempeño del producto en la macrozona Sur, especialmente al analizar TXx y TNn para el caso del aspecto de extremos (Figura 4a), SU para el aspecto de climatología promedio (Figura 4b), y R75TX75 para el aspecto de la coherencia intervariable (Figura 4c). En el caso de la macrozona Sur, CR2METv2.5 presenta igual o mejor desempeño que la versión 2.0 en todas las métricas, con leves mejorías en las métricas asociadas a las temperaturas extremas como TNn (Figura 4a), SU y FD (Figura 4b), y R95TX75 y R75TX75 (Figura 4c). Enfocándose en la evaluación de extremos, independiente de la macrozona todos los métodos presentan desempeños similares, sin embargo, el método SVM reporta una superioridad en la reproducción de las temperaturas máximas (TXx). Al contrario, al evaluar la climatología promedio en la macrozona Sur el método SVM presenta deficiencias en la reproducción de aspectos relacionados con la ocurrencia de precipitación (WD y SDII), siendo QDM y los métodos tres multivariados los que reportan mejores desempeños. En la macrozona Austral, en cambio, el método SVM presenta los mejores desempeños asociados a la climatología promedio cuando se aplica al producto CR2METv2.5, mostrando una clara superioridad con respecto a los demás métodos cuando se analiza la métrica SU. Finalmente, al

analizar la coherencia intervariable se observa que los métodos multivariados son los que reportan los mejores resultados, aportando una notoria mejoría a los productos crudos.

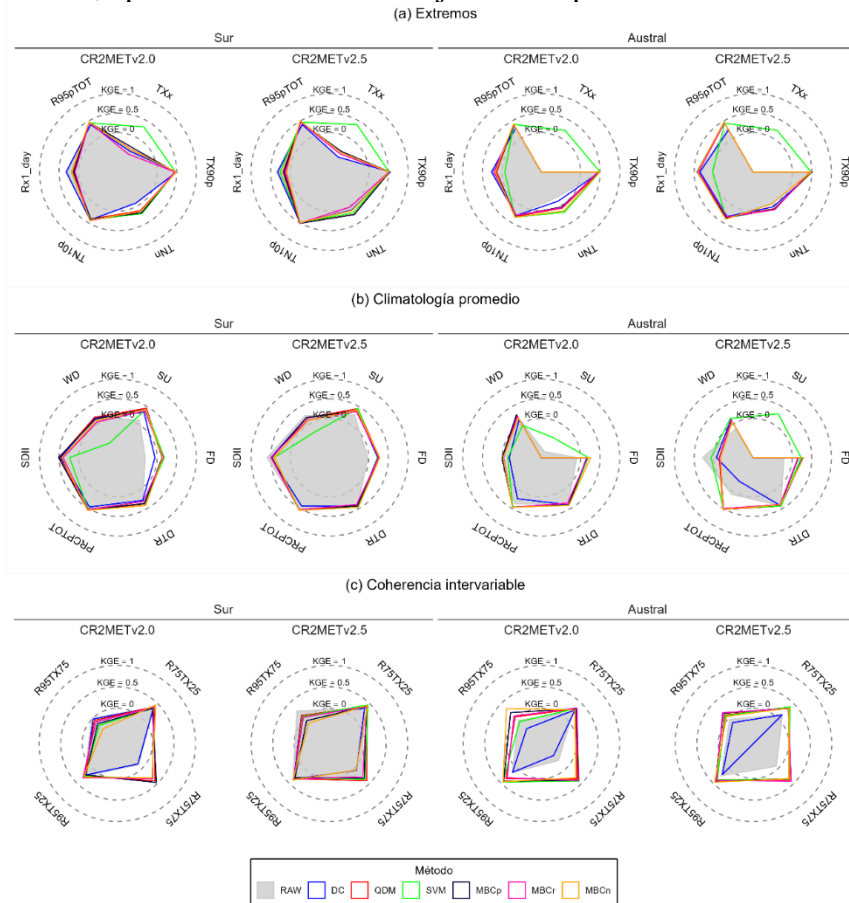


Figura 4: Resultados de la evaluación en las macrozonas Sur (primeras dos columnas) y Austral (últimas dos columnas).

4.4. RESUMEN POR ASPECTO Y MACROZONA

En la Figura 5 se presentan los promedios de los KGE para cada método y macrozona agrupando las métricas por aspecto. En cuanto a la reproducción de extremos, el método SVM es el que reporta sistemáticamente los mejores resultados para las 5 macrozonas, tanto si se aplica para CR2METv2.0 como para CR2METv2.5, siendo solamente superado por el método QDM aplicado a CR2METv2.5 en la macrozona del Norte Chico. Por otro lado, las extracciones crudas y las corregidas por el método DC son los métodos que reportan los peores desempeños a lo largo de las 5 macrozonas. Para el caso de la climatología promedio no se identifica un método superior: SVM es el método mejor evaluado en Norte Grande y en la macrozona Austral, sin embargo, es el peor evaluado al aplicarse a CR2METv2.0 en la macrozona Sur; MBCr es el método mejor evaluado en Norte Chico y en la macrozona Central, pero es el peor evaluado en la macrozona Austral; y QDM tiene el mejor desempeño en la macrozona Sur, pero presenta desempeños moderados en las macrozonas Central y Austral. Finalmente, en cuanto a la coherencia intervariable, tanto las extracciones crudas como las corregidas con el método DC son los métodos que presentan los peores desempeños independiente de la macrozona, mientras que la corrección con QDM es el método que presenta superioridad en el Norte Grande y en las macrozonas Central

y Sur. Para las demás macrozonas, los tres métodos multivariados presentan una superioridad ya sea se apliquen a la versión 2.0 o 2.5 de CR2MET.

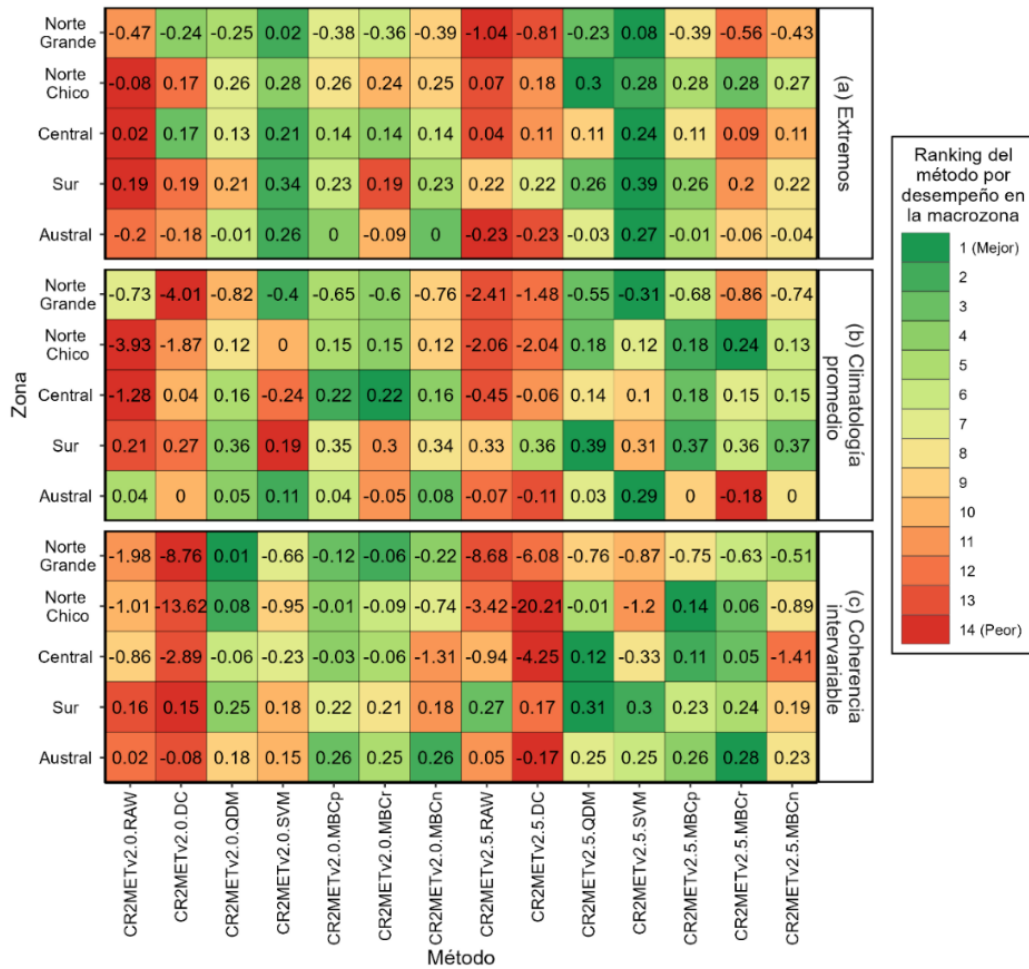


Figura 5: Resumen de los desempeños por macrozona (eje Y) y por método (eje X). El número dentro de cada casilla indica el KGE promedio obtenido de agrupar las métricas por aspecto: (a) para las métricas de extremos; (b) para las asociadas a la climatología promedio; y (c) para la coherencia intervariable. Colores rojos indican que el método presenta un mal desempeño.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio se enfocó en (i) evaluar el desempeño del producto grillado CR2MET a lo largo de Chile Continental, comparando las versiones 2.0 y 2.5 y (ii) cuantificar la ganancia de aplicar métodos de escalamiento estadístico a las extracciones crudas de dichos productos. De esta forma, la investigación se conduce dividiendo a Chile Continental en 5 macrozonas (Norte Grande, Norte Chico, Central, Sur y Austral), cuantificando el desempeño de los métodos a través de la evaluación de 16 métricas, las cuales se agrupan en tres clasificaciones dependiendo si se enfocan en evaluar aspectos relacionados con eventos extremos, a la climatología promedio o a la coherencia intervariable. Los resultados indican que, independiente de la versión del producto CR2MET, se obtienen mejores desempeños para las macrozonas Central y Sur, caracterizadas por poseer la mayor cantidad de estaciones de evaluación, junto con presentar la mayor cantidad de precipitaciones a lo largo del territorio nacional. Al contrario, en las macrozonas más áridas se obtienen desempeños moderados/insatisfactorios independiente de la complejidad del método de

corrección estadística, siendo la meteorología asociada a la macrozona Norte Grande la más difícil de representar, posiblemente debido a dos motivos: (i) a una mala representación de precipitaciones de origen convectivo por parte de los reanálisis ERA5 y ERA5-Interim; y (2) debido a que la baja cantidad de eventos de precipitación se traduce en la obtención de una pequeña muestra de calibración de los métodos de corrección estadística.

Por otro lado, a pesar de ser la versión más reciente, CR2METv2.5 no presenta una superioridad clara con respecto a la versión 2.0, presentando falencias en la reproducción de eventos de precipitación moderados-intensos con temperaturas altas en el Norte Grande, y presentando desempeños más bajos que CR2METv2.0 en ambas macrozonas del norte al evaluarse métricas asociadas a la climatología promedio. A pesar de ello, la versión más reciente presenta resultados prometedores en la macrozona Sur, donde iguala o supera el desempeño de CR2METv2.0 en todas las métricas calculadas.

Finalmente, producto de comparar las extracciones crudas con las procesadas a través de un método de corrección estadística, se concluye que no existe un método que presente una superioridad en los tres aspectos evaluados. Si bien el método SVM es el que presenta los mejores resultados al evaluar métricas asociadas a la ocurrencia de eventos extremos independiente de la macrozona, su superioridad no es clara al evaluarse métricas asociadas a la climatología promedio, donde el método MBCr surge como el mejor método al aplicarse a las extracciones de las macrozonas Norte Chico y Central, y donde el método QDM hace lo respectivo en la macrozona Sur. Finalmente, al evaluarse métricas asociadas a la coherencia intervariable, el método QDM es el que presenta los mejores desempeños en las macrozonas Norte Grande, Norte Chico y Central, mientras que los tres métodos multivariados (MBCp, MBCr y MBCn) son los que reportan las mejores evaluaciones en las macrozonas Sur y Austral.

REFERENCIAS

Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R. D., McPhee, J., & Ayala, Á. (2018). The CAMELS-CL Dataset: Catchment attributes and Meteorology for large sample studies – Chile Dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>

Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. S., & Paneque, M. (2020). Climate change Projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9-10), 4309-4330. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>

Ayar, P. V., Vrac, M., Bastin, S., Carreau, J., Déqué, M., & Gallardo, C. (2015). Intercomparison of statistical and dynamical downscaling models under the EURO- and MED-CORDEX Initiative Framework: Present Climate Evaluations. *Climate Dynamics*, 46(3-4), 1301-1329. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2647-5>

Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H. E., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., Giraldo-Osorio, J. D., & Thinh, N. X. (2020). RF-MEP: a novel random forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111606. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111606>

Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Mendoza, P. A., McNamara, I., Beck, H. E., Thurner, J., Nauditt, A., Ribbe, L., & Thinh, N. X. (2021). On the selection of precipitation products for the regionalisation of hydrological model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(11), 5805-5837. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5805-2021>

- Beniston, M. (2009). Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100. *Geophysical Research Letters*, 36(7), n/a. <https://doi.org/10.1029/2008gl037119>
- 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*.
- 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. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00754.1>
- Cannon, A. J. (2016). Multivariate bias correction of climate model output: matching marginal distributions and intervariable dependence structure. *Journal of Climate*, 29(19), 7045-7064. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0679.1>
- Cannon, A. J. (2017). Multivariate quantile Mapping bias correction: an n-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1-2), 31-49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., & Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal-journal Des Sciences Hydrologiques*, 68(8), 1184–1201. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>
- Chen, S. T., Yu, P. S., & Tang, Y. (2010). Statistical downscaling of daily precipitation using support vector machines and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, 385(1-4), 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.021>
- Dee, D., Uppala, S., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A., Van De Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A., . . . Vitart, F. (2011). The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- DGA, 2017. Actualización del balance hídrico nacional.
- DGA, 2022. Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile.
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. R., Arias, P. A., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T. Y., Gergis, J., Jiang, D., Khan, A., Pokam, W. M., Rosenfeld, D., Tierney, J. E., & Zolina, O. (2023). Weather and climate Extreme events in a changing climate. En *Cambridge University Press eBooks* (pp. 1513-1766). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- Faybishenko, B., Versteeg, R., Pastorello, G., Dwivedi, D., Varadharajan, C., & Agarwal, D. (2021). Challenging problems of quality assurance and quality control (QA/QC) of meteorological time series data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(4), 1049-1062. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02106-w>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003. ISSN 0022-1694
- Gutmann, E., Rasmussen, R., Liu, C., Ikeda, K., Gochis, D., Clark, M. P., Dudhia, J., & Thompson, G. B. (2012). A comparison of statistical and dynamical downscaling of winter precipitation over complex terrain. *Journal of Climate*, 25(1), 262-281. <https://doi.org/10.1175/2011jcli4109.1>
- Hao, Z., AghaKouchak, A., & Phillips, T. J. (2013). Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034014>

- Her, Y., & Chaubey, I. (2015). Impact of the numbers of observations and calibration parameters on equifinality, model performance, and output and parameter uncertainty. *Hydrological Processes*, 29(19), 4220-4237. <https://doi.org/10.1002/hyp.10487>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J. P., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A. J., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Thépaut, J. (2020). The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hou, Y., Chen, H., Xu, C., Chen, J., & Guo, S. (2017). Coupling a Markov chain and support vector machine for At-Site downscaling of daily precipitation. *Journal of Hydrometeorology*, 18(9), 2385-2406. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0130.1>
- Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J. M., Kotlarski, S., Chandler, R. E., Hertig, E., Wibig, J., Huth, R., & Wilcke, R. (2015). VALUE : A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*, 3(1), 1-14. <https://doi.org/10.1002/2014ef000259>
- Maraun, D. (2016). Bias Correcting Climate Change Simulations - A Critical review. *Current climate change reports*, 2(4), 211-220. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- Peterson, T.C., et al. 2001. Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001, WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland, 143pp
- Pour, S. H., Shahid, S., Chung, E., & Wang, X. J. (2018). Model output statistics downscaling using Support Vector machine for the projection of spatial and temporal changes in rainfall of Bangladesh. *Atmospheric Research*, 213, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.006>
- Vrac, M., Noel, T., & Vautard, R. (2016). Bias correction of precipitation through Singularity Stochastic Removal: Because occurrences matter. *JGR Atmospheres*, 121(10), 5237-5258. <https://doi.org/10.1002/2015jd024511>
- World Meteorological Organization (2008). The guide to hydrological practices (N° 168). Recuperado de: <http://www.whycos.org/hwrp/guide/index.php>