

ANÁLISIS DEL MÉTODO DE REDUCCIÓN DE ESCALA POR MAPEO DE CUANTILES EMPLEANDO EL MODELO MIROC PARA LA CUENCA GUADALQUIVIR, BOLIVIA.

ASSESSMENT OF A DOWNSCALING USING QUANTILES MAPPING WITH MIROC MODEL IN GUADALQUIVIR BASIN, BOLIVIA.

Sr. Jhonatan Ureña¹ y Sr. Oliver Saavedra¹

RESUMEN

En este estudio se evaluaron productos de precipitación histórica y producto combinado GS versus escenarios de cambio climático en la cuenca Guadalquivir. El propósito de este estudio fue evaluar el proceso de reducción de escala “downscaling” utilizando la metodología de mapeo por cuantiles (QDM). Este esquema está basado en un análisis estadístico donde se ajustan los productos de precipitación y temperatura con las observaciones. Adicionalmente se han comparado caudales simulados con ambos productos usando la herramienta HYDROBID. Se ha identificado una subestimación del producto combinado GS tanto en precipitación como en caudal. Se han utilizado tres escenarios del modelo regional MIROC CORDEX: RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5. El análisis de precipitación y temperatura se realizaron a paso diario. Los resultados de la aplicación QDM mostraron mayor eficiencia con el escenario RCP 8.5 y la precipitación combinada GS para las 230 subcuencas. Sobre la modelación hidrológica empleando las variables climáticas de CORDEX, se ha observado las series perturbadas de cambio climático usando producto combinado GS menores en magnitud que con las estaciones pluviométricas. Es decir, se ha subestimada tanto la precipitación como en caudal. La temperatura perturbada mostro el mejor desempeño en todos los casos. Por último, se integraron las series de caudales en volúmenes, donde se nota un posible descenso en la disponibilidad de agua en la cuenca tanto para futuro cercano como futuro lejano. Se recomienda usar los escenarios perturbados con el producto combinado producto puesto que es el más crítico y considera la distribución espacial con 230 estaciones sintéticas.

Palabras clave: QDM, downscaling regional, cambio climático, modelación hidrológica, MIROC

ABSTRACT

In this study historical and combined GS precipitation products were assessed versus climate change scenarios at Guadalquivir basin. The purpose of this study was to evaluate the downscaling procedure using Quantiles Downscaling Mapping (QDM). This scheme is based in statistical analysis where precipitation and temperature are adjusted using observed datasets. Moreover, simulated river discharge was obtained using HYDROBID tool. It was identified underestimation of combined GS precipitation product as well as simulated river discharge. Three climate change scenarios from MIROC CORDEX were used namely: RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. The precipitation and temperature analyses were performed at daily time step. The results of QDM application showed more efficiency with RCP 8.5 and combined product GS for the 230 subbasins. About hydrological modeling using CORDEX variables, it was observed perturbed climate change using combined product GS with lower values against rain gauges. In this sense, precipitation and discharge were underestimated. Temperature showed the best performance at all cases. Finally, discharge series were integrated into volumes, where a decrease in water availability at the basins was noted as for near and far future. It is recommended to use perturbed scenarios with combined precipitation product since it is the most critical and takes into account the spatial variability with 230 syntactical rain gauges.

Keywords: QDM, regional downscaling, climate change, hydrological modeling, MIROC

¹Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Privada Boliviana. Av. Capitán Ustariz km 6.5, Cochabamba, Bolivia

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es definido como la modificación climática que altera la composición de la atmósfera, provocando la variación de la precipitación y temperatura a través del tiempo (Pérez-Campomanes y Iannacone, 2020). El efecto principal de esta variación es el alza de temperaturas que provocan impactos sobre el planeta: deshielo de glaciares, aumentos del nivel del mar, sequías que amenazan fuentes de agua dulce, formación de tormentas en regiones marítimas que provocan inundaciones, entre otros. Dicho aumento de temperatura ha sido registrado desde años previos a la revolución industrial, provocando un incremento de 1°C hasta el periodo de 2010. No obstante, la creciente industria y demanda de varios productos ha ido aumentando la expedición de gases, provocando un aumento drástico de las temperaturas con estimaciones de llegar a aumentar 5°C hasta finales del presente siglo (Paterson, 2017).

Ante esta situación climática, los actuales proyectos de índole hidrológica requieren un apartado para el análisis de la variable de cambio climático y sus respectivos efectos en la medida. Para ello, la necesidad de manejar información de cambio climático requiere la implementación de diferentes modelos desarrollados por los asociados por el "Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático" (IPCC en inglés). Dichos modelos representan simulaciones futuras del efecto del aumento de temperatura, en base a escenarios establecidos al tratamiento de este fenómeno (Bernstein et al. 2008). Como resultado de la generación de dichos escenarios por varias organizaciones, estos se agruparon en los denominados "Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados" (CMIP en inglés), que se van actualizando en base a las necesidades actuales (Stouffer et al., 2017).

Ante la posibilidad de manejo de datos simulados a efectos del cambio climático, se presentan dos opciones para su implementación. Por un lado, se cuenta con los Modelos de Circulación Globales (GCM en inglés), los cuales presentan la modelación de datos futuros a nivel global, con un tamaño de grilla bastante amplio y un sistema de coordenadas geográficas (Fajardo et al., 2020). Estos modelos presentan variaciones en base a la versión de CMIP que se esté vigente. Por otro lado, se realiza el manejo de los Modelos de Circulación Regional (RCM en inglés) que, a diferencia de los GCM, estos presentan sus datos

en regiones orientadas a los continentes, con un tamaño de grilla de menor tamaño y presentada en sistema de coordenadas polares (Villazón y Aldunate, 2022). Estos modelos emplean como datos de entrada los CMIP para su generación, y para su diferenciación son almacenados bajo el denominativo "Experimento coordinado regional de reducción de escala" (CORDEX en inglés). Ante la disposición de diferentes modelos GCM y RCM para una misma región, estos no pueden ser descargados y empleados directamente. La implementación de estos datos requiere de un proceso de reducción de escala (Downscaling en inglés). Dicho proceso se basa en la implementación de metodologías y ecuaciones (estadísticas o estocásticas) que permita la relación de datos observados y datos simulados con efectos de cambio climático, para determinar factores en base a los datos simulados que permitan a los datos observados generar nueva información con relación a los patrones simulados (Araya-Osses et al., 2020). En base a ello, la implementación del método por mapeo de cuantiles (QDM en inglés), marca un precedente en su implementación en Bolivia debido a sus resultados positivos para las cuencas de Rurrenabaque y San Josecito (Villazón y Aldunate, 2022).

La cuenca del Guadalquivir se encuentra ubicada en el departamento de Tarija, al sur de Bolivia. Es considerada una cuenca priorizada debido a que alberga dentro a la ciudad capital del departamento del mismo nombre. En 2016, se realizó los estudios de balance hídrico en esta cuenca, teniendo como método de reducción de escala a K-NN, que fue orientado para el escenario RCP8.5 de los modelos globales. (MMayA y Espejo Rospigliossi, 2016). Todavía, a la fecha, no se ha utilizado un modelo regional RCM. Por tanto, el presente estudio tiene por objetivo la evaluación del proceso de reducción de escala por mapeo de cuantiles para la cuenca Guadalquivir, empleando los escenarios del modelo regional MIROC-MIROC5 y el producto diario de precipitación combinada.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Guadalquivir, ubicada en el departamento de Tarija (sur de Bolivia), presenta una superficie de aproximadamente 3.350 km², equivalente al 9% del área correspondiente al departamento. La cuenca tiene una población aproximada de 294.000 habitantes, que abarca un 51% de la población departamental. La elevación de la cuenca varía entre 1600 y 4600 m.s.n.m., como se puede observar en la Figura 1.

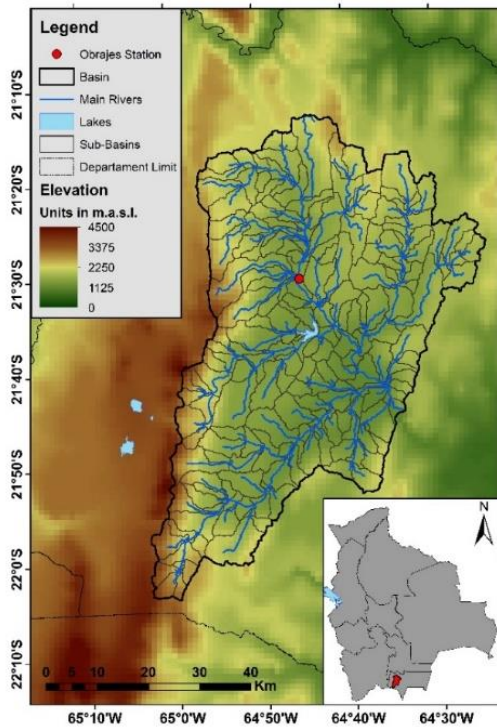


Figura 1. Mapa de elevación de la cuenca del río Guadalquivir. Fuente: Saavedra et al., 2023.

En la zona de estudio se cuenta con un total de 22 estaciones pluviométricas, también la subdivisión de 230 subcuencas se muestra en la Figura 2.

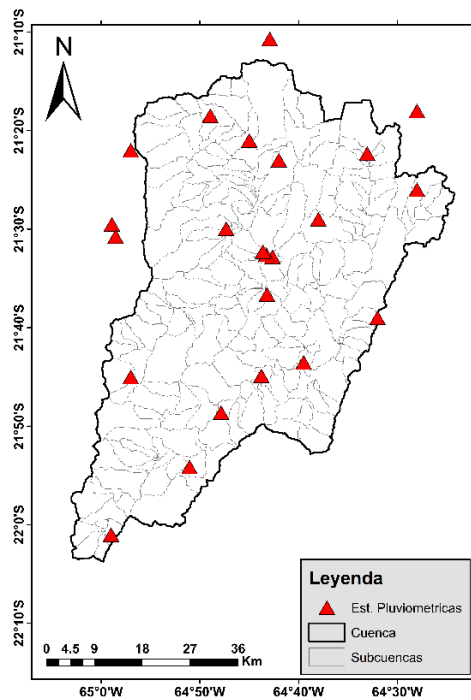


Figura 2. Mapa de subdivisión de cuencas y ubicación de estaciones pluviométricas disponibles. Fuente: Elaboración propia.

En términos climatológicos, la cuenca presenta precipitaciones entre 580 y 840 mm/año, ocurriendo los valores más altos al sur de la cuenca. Las temperaturas promedio varían entre 9°C y 19°C, con los valores más altos en la parte central de la cuenca (MMAyA, 2018).

METODOLOGÍA

DATOS DE PRECIPITACIÓN

El manejo de la variable de precipitación se basa en el análisis de las diferentes fuentes disponibles. El manejo de datos de precipitación pluviométricas considerada como la fuente más fiable de información. No obstante, las estaciones pluviométricas son mediciones puntuales y su mantenimiento puede ser costoso. Una alternativa a este método son datos de precipitación de fuentes satelitales que, a través de sensores a bordo de satélites, permiten realizar una estimación de la cantidad de agua precipitable reflejando una distribución espacial. Debido al sesgo en la estimación que pueden presentar estos productos de estimación indirecta, es necesario realizar ajustes o correcciones. Para el caso de la cuenca Guadalquivir, se cuenta con dos bases de datos de precipitación: pluviómetros empleados en el Balance Hídrico Superficial de Bolivia 1980-2016, y el producto combinado GS (Saavedra et al., 2023).

En la Figura 3a, se observa la precipitación de estaciones pluviométricas interpolada con Kriging Ordinario. En ella, la mayor intensidad de precipitación se halla ubicada en la zona sur de la cuenca con valores iguales a 3 mm/día. En el panel b que corresponde al producto combinado GS, la precipitación promedio es muy similar a la expuesta por la interpolación de pluviómetros, tanto en la localización de la precipitación, como los valores de precipitación. Por otro lado, el producto GS denota las unidades hidrológicas empleadas en su generación.

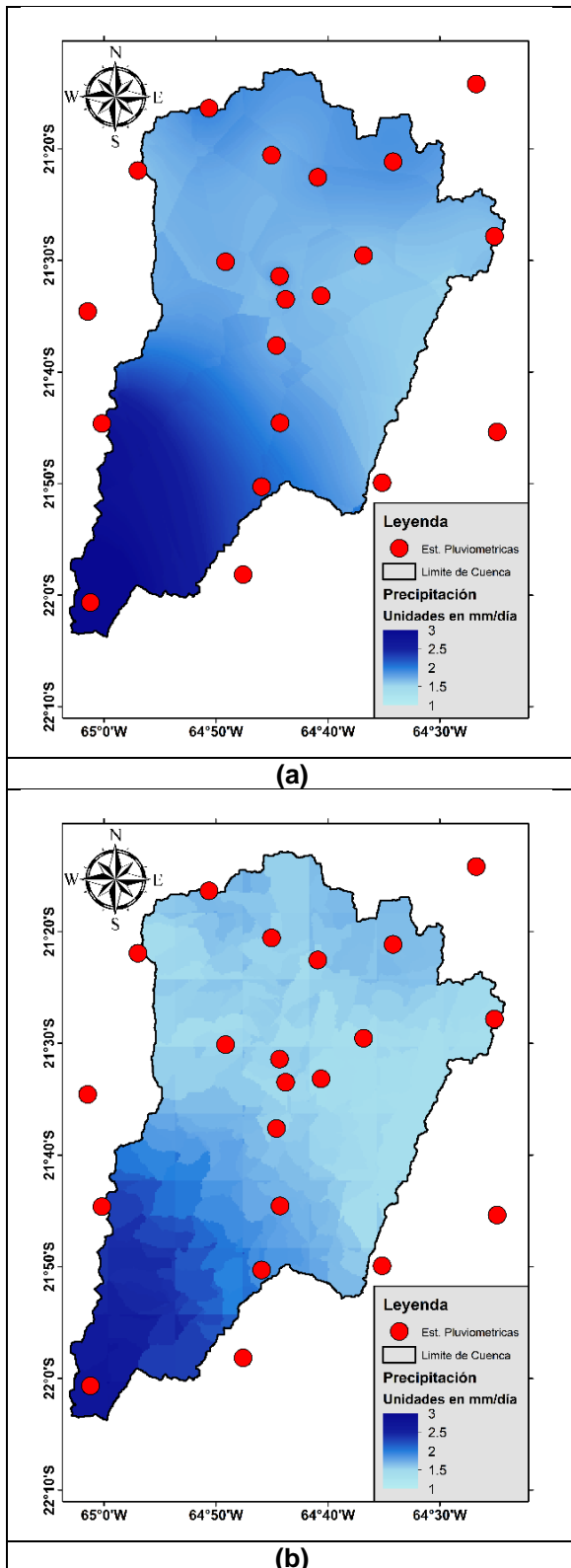


Figura 3. Mapas de precipitación promedio diario del periodo 2001-2015 para: a) Pluviómetros y b) Producto Combinado GS. Fuente: Elaboración propia.

MODELO HIDROLÓGICO HYDROBID

El modelo hidrológico HydroBID es una herramienta desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo, con el fin de brindar apoyo a países en vías de desarrollo en el manejo de recursos hídricos. Una de las ventajas del producto es que se cuenta con una base de datos intrínseca para Latinoamérica. (Moreda et al., 2014).

HydroBID emplea el modelo estándar “Factor de Carga de Cauces Generalizados” (GWLF su sigla en inglés) para el análisis de la relación agua-suelo. Por otro lado, el método del Número de Curva (CN en inglés) es empleado para el manejo e introducción de las características y uso de los suelos de la cuenca. Adicionalmente, HydroBID cuenta con un mapa de unidades hidrológicas en el cual se desarrolló la base de datos previamente mencionada. Debido a ello, las únicas variables requeridas para el funcionamiento del modelo que se deben trabajar son la precipitación y la temperatura. En el caso del caudal observado, es requerido para los procesos de calibración y validación de datos (Moreda et al., 2014). Para estos procesos, HydroBID presenta cuatro parámetros ajustables: Factor de CN, Factor de Contenido Disponible de Agua (AWC), Coeficiente de Recesión (r) y Coeficiente de Percolación (s).

La cuenca Guadalquivir ha sido dividida en 230 unidades hidrológicas de acuerdo con la base de datos de HydroBID. Adicionalmente, los parámetros de calibración y modelación para la cuenca son: Factor CN = 0,8, AWC = 1, $r = 0,008$ y $s = 0,05$ (Saavedra et al., 2023).

Con los datos de precipitación preparados se han realizado corridas con el modelo HYDROBID. Los resultados de caudales simulados a la salida de la cuenca se observan en la Figura 4. La precipitación (Panel a), presenta una congruencia con los caudales simulados (Panel b). La subestimación de los picos se hace más drástica debido a la diferencia que presentada en la precipitación.

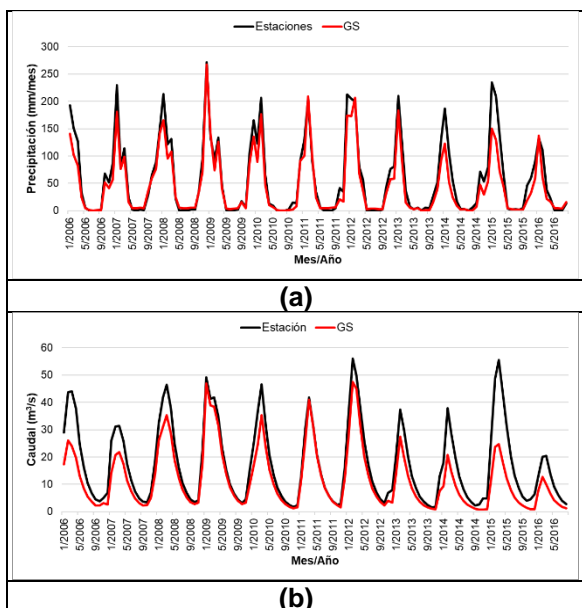


Figura 4. Series de tiempo de: a) Precipitación, y b) Caudales. Fuente: Elaboración propia.

En base a estos se desarrollaron los indicadores estadísticos de la Tabla 1. En esta, se puede observar que la precipitación combinada GS presenta una correlación de 0,91, un RMSE de 1,67 y una eficiencia de 0,82. Por otro lado, el caudal muestra una mayor correlación en comparación a la precipitación (0,94). Sin embargo, existe una mayor variación individual de los valores con un RMSE de 7,87 y una reducción de la eficiencia de 0,72.

Indicadores	Precipitación	Caudal
Coefficiente de Determinación	0,83	0,88
Coefficiente de Correlación	0,91	0,94
Error Cuadrático Absoluto	0,75	5,42
Raíz del Error Cuadrático Medio	1,67	7,87
Eficiencia de Nash & Sutcliffe	0,82	0,72

Tabla 1. Indicadores estadísticos de la comparación de la modelación con datos de pluviómetros y el producto GS. Fuente: Elaboración propia

REDUCCIÓN DE ESCALA: MAPEO DE CUANTILES (QDM).

Dentro del proceso de reducción de escalas por cuantiles, es requerido un proceso de

preparación de escenarios para el desarrollo de este. Para ello, se procedió con la obtención de los datos de los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, del modelo MIROC-MIROC5 de CORDEX. Estos escenarios muestran las simulaciones de precipitación y temperatura al cambio climático considerando diferentes grados de medidas para control de emisiones de dióxido de carbono: altas medidas (RCP2.6), algunas medidas (RCP4.5) y sin medidas (RCP8.5).

En el caso del mapeo de cuantiles “QDM”, este método de reducción de escala corrige el sesgo sistemático de los cuantiles entre los datos observados y datos de escenarios, manteniendo los cambios relativos del cambios y perturbaciones de los cuantiles; lo que mantiene al valor afectado por encima de los valores observados. Esta metodología es derivada de otros métodos basados en cuantiles como la estándar (QM) y cuantiles sin tendencia (DQM) (Cannon et al., 2015). Dichas metodologías fueron empleadas como punto de análisis de escenarios de modelos globales en Sudáfrica (Mendoza Paz y Willems, 2022).

RESULTADOS

REDUCCIÓN DE ESCALA QDM.

Se aplicó el método QDM considerando tres pisos ecológicos caracterizados como áreas de control para agrupar las estaciones pluviométricas, como los datos de las subcuencas empleadas. Para este último, se calculó el promedio de la variable climática para cada subcuenca, ubicando su centroide para generar la estación sintética y representar los valores del producto GS.

En la Figura 5, se puede apreciar la distribución de las estaciones pluviométricas (triángulos rojos) y las estaciones sintéticas (puntos en azul) en tres pisos ecológicos: montañas, valles y llanos.

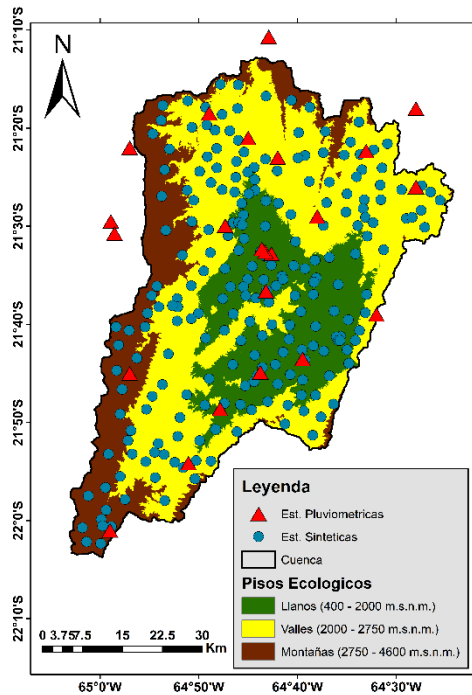


Figura 5. Mapa de Ubicación de estaciones pluviométricas (triángulos rojos) y sintéticas en

base al piso ecológico (puntos azules) Fuente: Elaboración propia.

La varianza de las series de datos originales (RCPX.X) y los escenarios de cambio climático perturbados (RCPX.X-P), con relación a los datos observados de precipitación por piso ecológico se pueden apreciar en la Figura 6.

En el caso de la precipitación, se puede observar que los datos originales de los escenarios de cambio climático presentan una sobrestimación para cada uno de los paneles. Los datos de estaciones pluviométricas (Paneles a, b y c) presentan una alteración de los valores afectados por cambio climático con mayor acercamiento a los observados en el rango de 0 y 25 mm/día. En cambio, para valores mayores a este último muestran una sobrestimación donde el ajuste es muy limitado. En el caso de las estaciones sintéticas (Paneles a, b y c), el proceso de reducción de escala presenta un mejor resultado con relación a la serie anterior. El escenario RCP8.5 (en línea en verde) es el que mejor se ajusta a los datos observados en los tres pisos ecológicos.

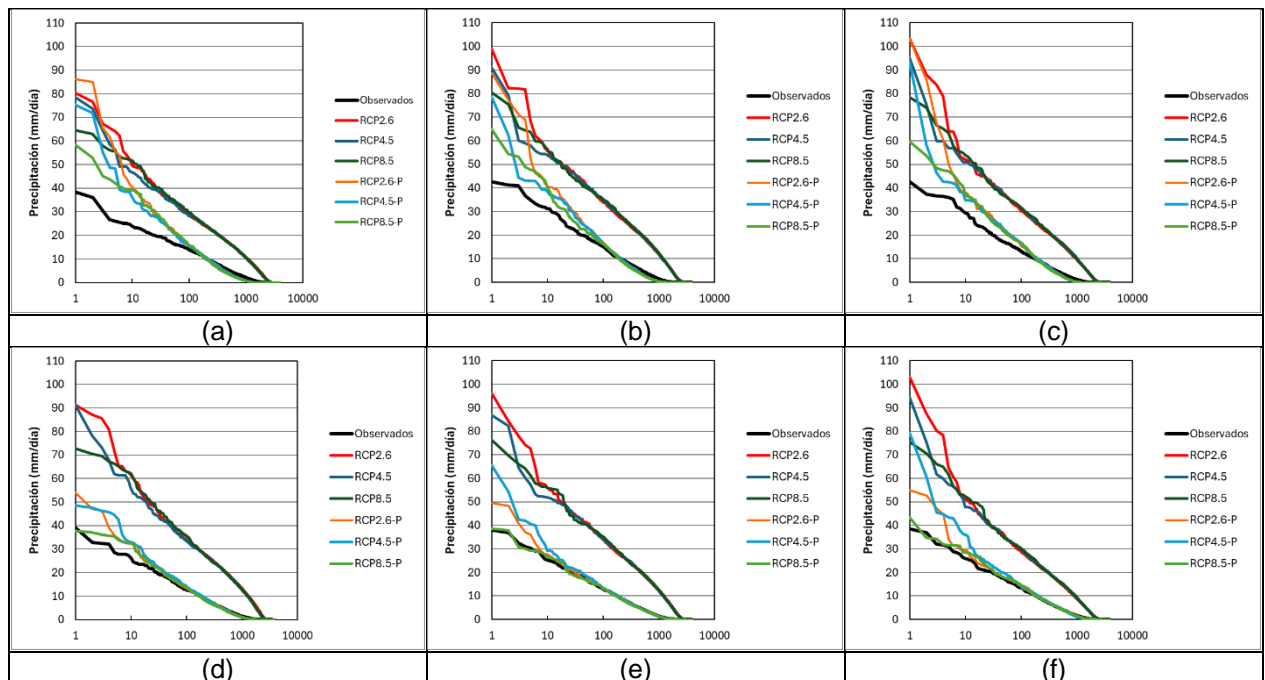


Figura 6. Series de datos de precipitación para estaciones: a) pluviométricas en montañas, b) pluviométricas en valles, c) pluviométricas en llanos, d) sintéticas en montañas, e) sintéticas en valles y f) sintéticas en llanos. Fuente: Elaboración propia.

Para la temperatura se empleó el producto distribuido GMET, del balance hídrico de Bolivia (MMAyA, 2018), donde se extrajo el valor promedio de la temperatura por subcuenca. Como resultado, se puede observar que los datos originales de MIROC-MIROC5 presentan una

subestimación a la temperatura observada en la Figura 7. Para el caso de las montañas (Panel a y d), las temperaturas registradas son las menores del conjunto, en el caso de las originales. En el caso de las observadas, los datos de montaña y valles (Panel b y e) se notan el efecto de QDM.

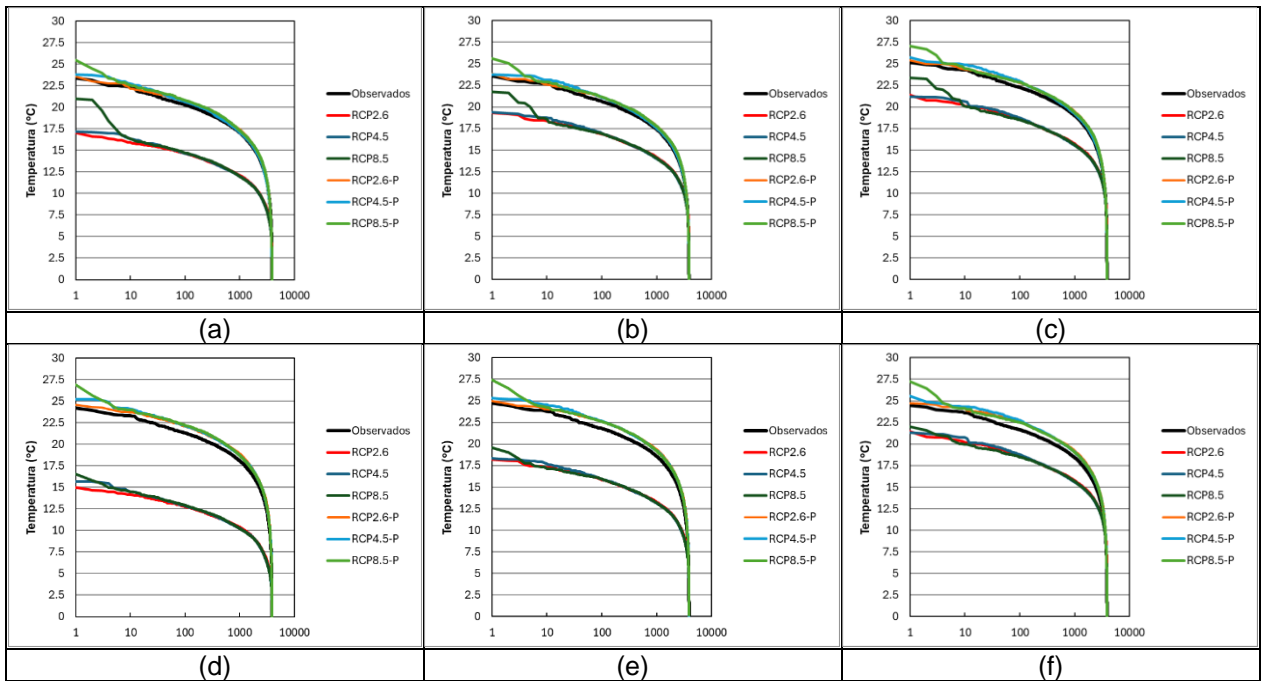


Figura 7. Series de datos de temperatura para estaciones: a) pluviométricas en montañas, b) pluviométricas en valles, c) pluviométricas en llanos, d) sintéticas en montañas, e) sintéticas en valles y f) sintéticas en llanos. Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE CAMBIO CLIMÁTICO

En base al proceso de reducción de escala para los diferentes escenarios de cambio climático de MIROC-MIROC5, empleando los dos productos de precipitación, se analizó la varianza anual de la precipitación y temperatura considerando un futuro cercano (2030-2060) y otro lejano (2060-2090).

En la Figura 8, se aprecia los valores promedio de las variables climáticas para el periodo de control, futuro cercano y lejano. La precipitación afectada por cambio climático para el caso de pluviómetros presenta una reducción de la precipitación en el futuro cercano, presentando un aumento de esta en el futuro lejano, acercándose al promedio observado 720 mm/año. El producto GS presentan un comportamiento similar a los datos de estaciones. No obstante, los valores se encuentran por debajo del promedio de datos observados, denotando valores más bajos al promedio.

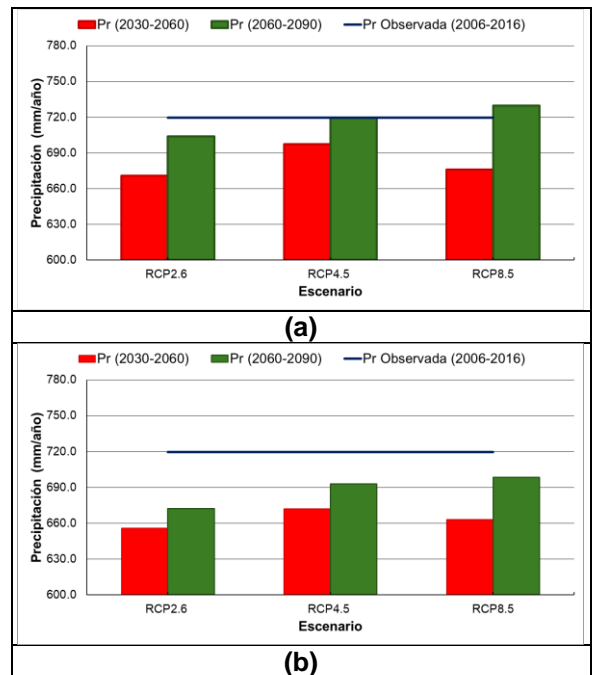


Figura 8. Comparativa de promedios de precipitación observada con relación a los valores generados para futuro cercano y futuro lejano, empleando: a) Estaciones pluviométricas y b) Producto Combinado GS. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9, se observa que los escenarios de MIROC-MIROC5 presentan el aumento de temperatura a lo largo del tiempo. Los escenarios RCP2.6 presentan un aumento de 1 y 1,5°C en los futuros cercanos y lejanos, respectivamente. En el caso del escenario RCP4.5, se observa un ligero aumento a los valores del anterior modelo; con aumentos de 1,2 y 1,7°C. En el último escenario (RCP8), se observa que los datos de futuro cercano presentan un aumento drástico al promedio observado, con un valor cercano a 3°C

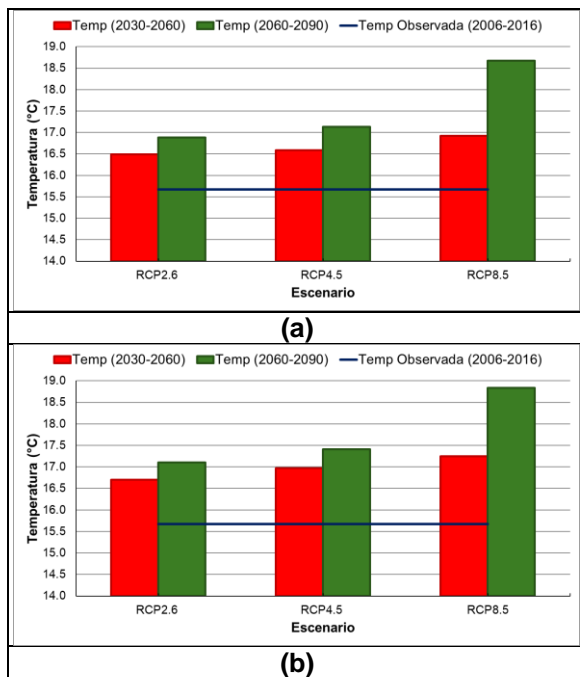


Figura 9. Comparativa de promedios de temperatura observada con relación a los valores generados para futuro cercano y futuro lejano, empleando: a) Pluviómetros y b) Producto Combinado GS. Fuente: Elaboración propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON CAMBIO CLIMÁTICO

Los resultados de la modelación hidrológica con CORDEX, para sus tres escenarios disponibles, muestran comportamientos similares a los vistos previamente.

En la Figura 10, se aprecia la variable de precipitación promedio por año con relación al promedio observado (2006-2016). Ambos productos, presentan un comportamiento similar en sus simulaciones, marcando periodos secos y menos durante el mismo periodo, pero con

diferentes valores. Por ejemplo, en los años 2042 y 2057 se observa años secos para el escenario de RCP8.5; siendo los datos de pluviómetros (Panel a) y GS (Panel b) los que presentan valores similares de 380 y 340 mm/año. Adicionalmente, en los años 2052 se observa el pico de precipitación más alta, siendo el caso de pluviómetros la que presenta un mayor valor (1200 mm/año aproximadamente). En el caso de GS, la precipitación apenas supera los 1.100 mm/año.

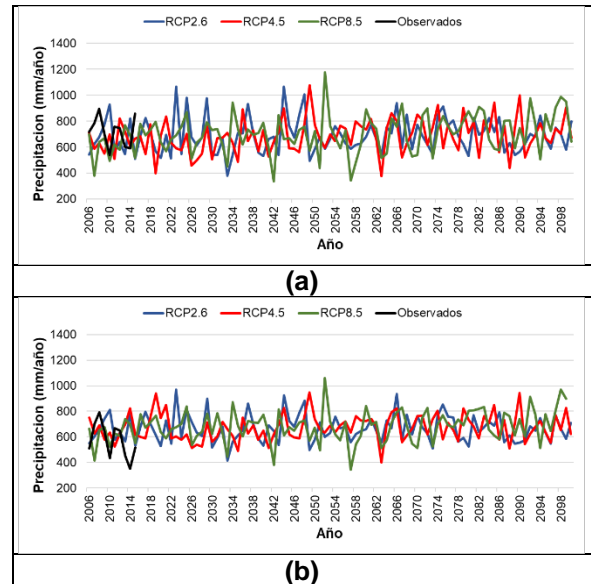


Figura 10. Series de tiempo de precipitación ordenados del periodo 2006-2100 para: a) Estaciones Pluviométrica y b) Producto Combinado GS. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las temperaturas simuladas, en la Figura 11 se observa que el comportamiento de ambos productos es similar, siguiendo la lógica de que cada escenario respeta sus definiciones: RCP2.6 (línea azul) representa un ligero aumento de temperatura y RCP8.5 (línea verde) un mayor aumento de la temperatura, siendo más drástico a partir de 2066 hasta 2100.

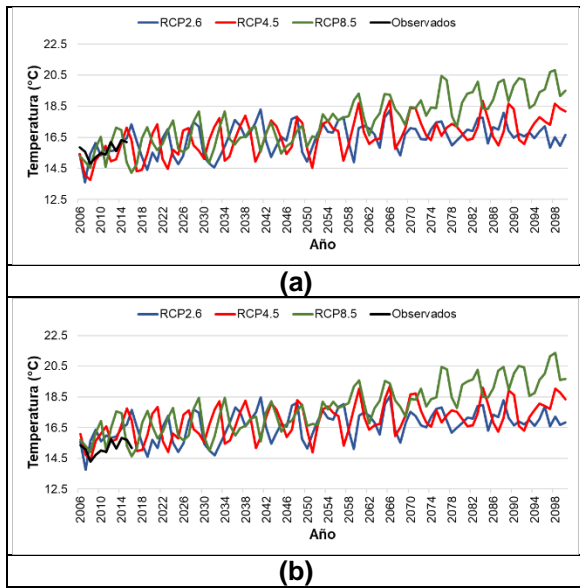


Figura 11. Series de tiempo de temperatura del periodo 2006-2100 para: a) Estaciones y b) Producto Combinado GS. Fuente: Elaboración propia.

Los caudales simulados que usan cambio climático muestran comportamiento y distribuciones similares con diferencias en los valores generados. En la Figura 12, se puede observar que los caudales con serie de pluviómetros (Panel a) presentan picos de por encima de los 30 m³/s, siendo los escenarios de RCP2.6 y RCP8.5 los que presenta los mayores picos a lo largo del periodo de modelación. Por otro lado, los caudales de GS presentan para el mismo periodo dichos picos; sin embargo, los valores de caudales se encuentran por debajo de los 30 m³/s.

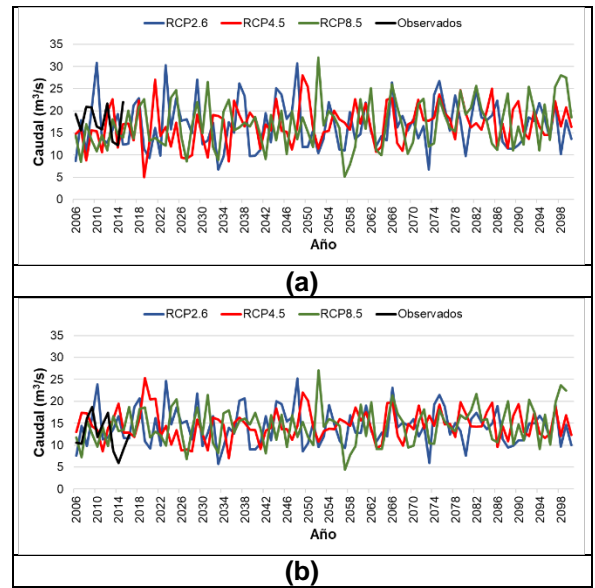
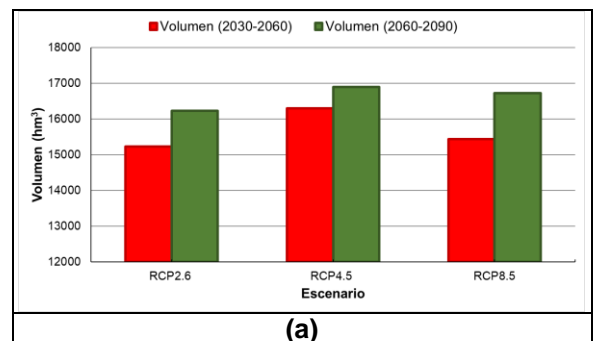


Figura 12. Series de tiempo de caudales del periodo 2006-2100 para: a) Pluviómetros y b) Producto Combinado GS. Fuente: Elaboración propia.

En base a los caudales simulados, se procedió a generar los volúmenes anuales. En la Figura 13, se puede observar que volúmenes generados para los periodos de futuro cercano presentan valores menores a los de futuro lejano. En el Panel a, el volumen mínimo simulado empleando estaciones se acerca a los 15.000 hm³; no obstante, el escenario RCP4.5 presenta los mayores volúmenes de 16.900 hm³ aproximadamente. Para el caso de los valores simulados con GS, el volumen mínimo registrado se acerca a los 13.200 hm³; compartiendo las mismas características que las simulaciones con estaciones, pero con una reducción de caudal entre los 2.000 y 4.000 hm³.



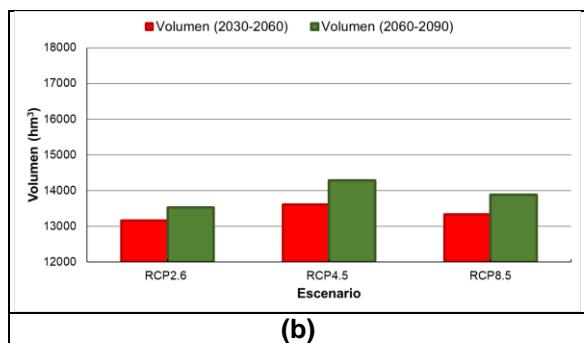


Figura 13. Comparativa de volúmenes empleando caudales simulados con: a) Estaciones Pluviométricas y b) Producto Combinado GS. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El análisis de efectos de cambio climático para la modelación hidrológica requiere un proceso de selección de la metodología de reducción a escala “downscaling”. En el presente trabajo, se desarrolló el análisis de la metodología de mapeo por cuantiles (QDM) los escenarios de MIROC-MIROC5 del modelo regional CORDEX. Se ha empleado la precipitación de estaciones y combinada con datos satelitales.

La aplicación del método QDM implica un análisis estadístico. No obstante, la parte operativa y el tiempo de manejo de dicho método dependerá de la cantidad de datos observados que se posean para determinar el número de repeticiones del proceso que se requerirán. La duración del proceso de generación dependerá de la cantidad de estaciones o centroides que se requieran afectar.

Como resultado de la perturbación de los escenarios de cambio climático, los datos de precipitación originales presentan sobrestimación con relación a los datos observados (estaciones y producto GS). La reducción de escala empleando el producto GS presenta una mejor correlación con los datos observados. Por otra parte, el proceso de reducción de escala con estaciones solo tiene efecto hasta los 25 mm/día; posterior a ello, los valores de precipitación aumentan, acercándose a los valores originales de los diferentes escenarios. Por el otro lado, las temperaturas presentan una subestimación en todos los pisos ecológicos.

Los resultados del análisis de temperatura afectados por escenarios al cambio climático, el escenario RCP2.6 presentó un aumento promedio

de temperatura de 1°C para el periodo 2030-2060 y de 1.5°C para el periodo 2060-2090; para el escenario RCP4.5 un aumento de 1.2°C y 1.7°C respectivamente, y para el escenario RCP8.5 un aumento de 1.5°C y 3°C.

Analizando la precipitación futura, se observa que, de manera general, el escenario RCP8.5 presentan valores mayores a 600 mm/año. En el rango de valores entre los 200 a 600 mm/años, los escenarios RCP2.6 y RCP4.5 presentan un mayor valor al escenario RCP8.5.

A partir de los caudales simulados, se generaron los volúmenes acumulados para los periodos 2030-2060 y 2060-2090 mostrando que el escenario RCP4.5 presenta el escenario con mayor volumen simulado, seguido por el escenario RCP8.5 y por último RCP2.6. Sin embargo, en este punto se llega a observar lo crítico del manejo de precipitaciones con picos elevados; las estaciones, que presentaron picos afectados por cambio climático de hasta 102 mm/día, generaron una diferencia de 3.000 hm³.

Las condiciones iniciales observadas de las variables climatológicas y sus resultados con la modelación HydroBID con el proceso de afectación al cambio climático empleando QDM, muestran un aumento de las características que presentaban originalmente. Los casos de subestimación en la precipitación de GS presentan un mismo rango al implementar cambio climático, pero los caudales resultantes de su manejo muestran un aumento de valores subestimados a los generados empleando datos de estaciones.

En el caso de escasez de datos de estaciones pluviométricas, se recomienda el uso de productos satelitales corregidos o combinados para su implementación en estudios de cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

ARAYA-OSSES, D., CASANUEVA, A., ROMÁN-FIGUEROA, C., URIBE, J.M. y PANEQUE, M. Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 2020, vol. 54, no. 9-10, pp. 1432-0894. DOI 10.1007/s00382-020-05231-4.

BERNSTEIN, L., BOSCH, P., CANZIANI, O., CHEN, Z., CHRIST, R. y RIAHI, K. IPCC, 2007:

Climate change 2007: Synthesis report. 2008. S.I.: IPCC.

CANNON, A.J., SOBIE, S.R. y MURDOCK, T.Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 2015, vol. 28, no. 17, pp. 0894-8755. DOI 10.1175/JCLI-D-14-00754.1.

FAJARDO, J., CORCORAN, D., ROEHRDANZ, P.R., HANNAH, L. y MARQUET, P.A. GCM COMPARE R: A web application to assess differences and assist in the selection of general circulation models for climate change research. En: KRITICOS, D. (ed.). *Methods in Ecology and Evolution*, 2020, vol. 11, no. 5, pp. 2041-210X. DOI 10.1111/2041-210X.13360.

MENDOZA PAZ, S. y WILLEMS, P. Uncovering the strengths and weaknesses of an ensemble of quantile mapping methods for downscaling precipitation change in Southern Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, vol. 41, p. 101104. DOI 10.1016/j.ejrh.2022.101104.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA (MMAYA) y ESPEJO ROSPIGLIOSSI, A. Balance hídrico integral para la cuenca del río Guadalquivir. 2016. S.I.: Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA (MMAYA). Balance hídrico superficial de Bolivia (1980-2016): Documento de difusión. La Paz, Bolivia: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018.

MOREDA, F., MIRALLES-WILHELM, F. y MUÑOZ, R. Hydro-BID: Un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Parte 2. 2014. Banco Interamericano de Desarrollo.

PATERSON, P. Calentamiento global y cambio climático en Sudamérica. *Revista Política y Estrategia*, 2017, no. 130, pp. 0719-8027. DOI 10.26797/rpye.v0i130.133.

PÉREZ-CAMPOMANES, G. y IANNACONE, J. Impacto del cambio climático en la disponibilidad de las aguas superficiales en Sudamérica. *Paideia XXI*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 2519-5700, 2221-7770. DOI 10.31381/paideia.v10i1.2981.

SAAVEDRA, O., UREÑA, J. y PERALES, M. Implementation of HydroBID model with satellite-based precipitation products in Guadalquivir Basin, Bolivia. *Water*, 2023, vol. 15, no. 18, pp. 2073-4441. DOI 10.3390/w15183250.

STOUFFER, R.J., EYRING, V., MEEHL, G.A., BONY, S., SENIOR, C., STEVENS, B. y TAYLOR, K.E. CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, vol. 98, no. 1, pp. 0003-0007, 1520-0477. DOI 10.1175/BAMS-D-15-00013.1.

VILLAZÓN, M.F. y ALDUNATE, C. Efectos del cambio climático sobre eventos extremos en dos cuencas interandinas representativas en Bolivia. En: XIX Congreso Internacional Región III de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS - XV Congreso Nacional ABIS. La Paz, Bolivia: s.n., 2022.