

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA  
BALANCES DE AGUA ESTOCÁSTICOS DIARIOS**

**IGNACIO TORO MENA<sup>1</sup>**  
**HERNÁN MORALES JAMETT<sup>2</sup>**  
**CAMILA LOYOLA VIDAL<sup>3</sup>**  
**RICARDO GONZÁLEZ VALENZUELA<sup>4</sup>**  
**ENRIQUE BUSCHIAZZO<sup>5</sup>**

**RESUMEN**

Se presentan en forma resumida los resultados obtenidos de un análisis de cambio climático en el estado de Minas Gerais (Brasil), basado en las proyecciones de precipitación y temperatura utilizando modelos de cambio climático (GCMs) a escala mensual y diaria. Se analizan periodo histórico (1980-2021), futuro cercano (2031-2060) y lejano (2071-2100), considerando dos escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero, SSP 2-4,5 y 5-8,5. En particular, se presentan con más detalle los criterios utilizados para efectuar la selección de GCMs para su aplicación en balances de agua en operaciones mineras mediante la aplicación de diferentes pruebas estadísticas, que permiten reducir la incertidumbre, evaluando además el desempeño de los GCMs en la representación de las probabilidades de transición de las cadenas de Markov, con el objetivo específico de validar la generación de series estocásticas diarias que son utilizadas como entrada en los modelos de balance de agua. Finalmente, se complementa el proceso de selección asignando a cada GCM un nivel de riesgo asociado al déficit hídrico, aplicando el Índice de Aridez (IA).

---

<sup>1</sup>Hidrólogo esp. en cambio climático, Mine Water, WSP Chile – [ignacio.toro@wsp.com](mailto:ignacio.toro@wsp.com), [toromena@hotmail.com](mailto:toromena@hotmail.com)

<sup>2</sup>Hidrólogo, Mine Water, WSP Chile – [hernan.morales@wsp.com](mailto:hernan.morales@wsp.com)

<sup>3</sup>Hidróloga Mine Water, WSP Chile – [camila.loyola@wsp.com](mailto:camila.loyola@wsp.com)

<sup>4</sup>Hidrólogo Senior, Mine Water, WSP Chile – [ricardo.gonzalez@wsp.com](mailto:ricardo.gonzalez@wsp.com)

<sup>5</sup>Principal Hydrologist, Anglo American – [enrique.buschiazzo@angloamerican.com](mailto:enrique.buschiazzo@angloamerican.com)

# 1 INTRODUCCIÓN

Las proyecciones de los modelos de cambio climático (GCM por General Circulation Models) tienen un alto nivel de dispersión en sus resultados, lo que introduce una gran incertidumbre en el análisis de la disponibilidad de recursos hídricos bajo escenarios futuros. Si bien el proceso de escalamiento de los GCM permite reducir el nivel de incertidumbre, el alto número de modelos dificulta proveer recomendaciones que permitan un análisis práctico y robusto.

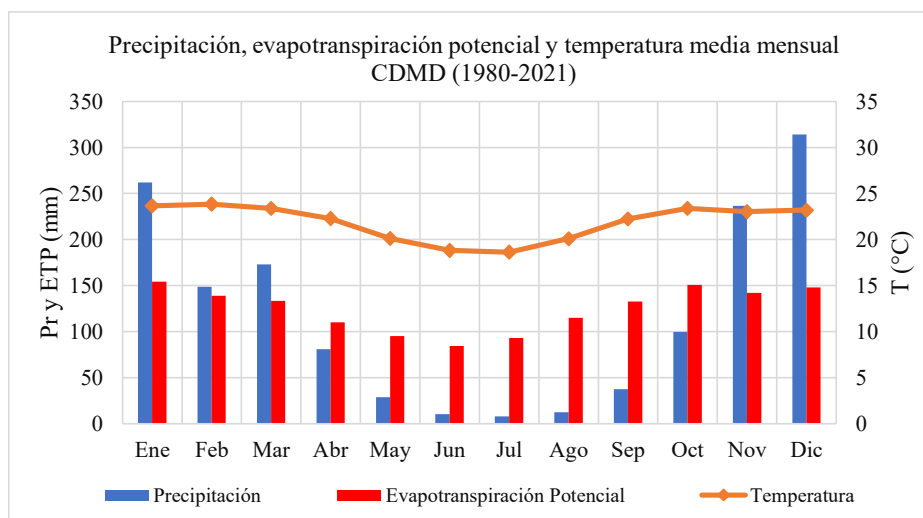
En este trabajo se aborda la problemática planteada, presentando algunos criterios establecidos para efectuar la selección de GCMs, que a su vez se encuentran en el marco de lo propuesto por IPCC (2001), como: antigüedad, resolución, validez y de representatividad. Dentro de este último criterio general, se propone asignar distintos niveles de riesgo hídrico a cada GCM utilizando el Índice de Aridez (IA), guiando el proceso de selección a través del nivel de riesgo a adoptar.

Los criterios señalados fueron aplicados a los registros de la estación meteorológica Conceicao do Mato Dentro (CDMD), ubicada en el estado de Minas Gerais (Brasil), la cual es controlada por el Instituto Nacional de Meteorología (INMET), considerando los períodos: histórico (1980-2021), futuro cercano (2031-2060) y futuro lejano (2071-2100), así como dos escenarios de cambio climático, SSP 2-4,5 y 5-8,5. La Tabla 1 presenta características generales de la estación meteorológica utilizada, mientras que en la Figura 1 se muestran las medias mensuales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP; Hargreaves y Samani (1985)) y temperatura.

**Tabla 1.** Características de la estación meteorológica Conceicao do Mato Dentro

Nombre	ID	Lat. (°)	Lon. (°)	Elevación (m s.n.m.)	DH (días)	Pr (mm)	T° (°C)	ETP (mm)
Conceicao do Mato Dentro (CDMD)	1943002	-19,02	-43,44	627	120,7	1.411	21,9	1.498

DH: Número de días húmedos anual promedio; Pr: Precipitación anual promedio; T°: Temperatura anual promedio; ETP: Evapotranspiración Potencial anual promedio (Hargreaves y Samani (1985))



**Figura 1.** Precipitación, evapotranspiración potencial y temperatura media mensual – CDMD

Cabe destacar que, la gran mayoría de los criterios evaluados son lo suficientemente generales como para guiar la selección de GCMs para otros fines, más allá de limitarse a balances de agua.

## 2 METODOLOGÍA

La metodología adoptada para el desarrollo del presente trabajo, en lo esencial, consiste en obtención y procesamiento de proyecciones de cambio climático y en el posterior análisis de criterios de selección de GCMs para su uso en modelos de balance de aguas. Los principales aspectos metodológicos se describen en forma resumida en el presente capítulo.

### 2.1 Obtención y procesamiento de proyecciones de modelos climáticos globales

Los GCM pretenden representar las condiciones climáticas globales en base a algoritmos matemáticos utilizados para caracterizar los procesos físicos e interacciones que ocurren en los océanos, la superficie del planeta, la criósfera y la atmósfera. Los GCM simulan condiciones climáticas pasadas y futuras (período 1850-2100) con una resolución de cuadrícula que generalmente oscila entre 100 y 500 km. Una de las dificultades que presentan los GCM actuales es la baja resolución espacial, lo que conduce a una representación deficiente de las condiciones locales, especialmente en áreas montañosas.

La nueva versión de los GCM (Coupled Model Intercomparison Project-Phase 6 o CMIP6), utilizada como información base para el informe AR6 (IPCC, 2021), define los escenarios futuros como resultado de combinar posibles desarrollos de la sociedad (SSP por Social Socioeconomic Pathways) y de concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP por Representative Concentration Pathways), explicado en detalle por O'Neill et al. (2014) y por Riahi et al. (2017). Una descripción general del nivel de adaptación y desafíos de mitigación asociados con las diferentes narrativas utilizadas en los escenarios de cambio climático se describe a continuación:

- **SSP1-1,9:** escenario que busca limitar el calentamiento por debajo de 1,5 °C para 2100 en relación con los niveles preindustriales.
- **SSP1-2,6:** escenario que busca limitar el calentamiento por debajo de 2,0 °C para 2100 en relación con los niveles preindustriales.
- **SSP2-4,5:** escenario que representa la parte media del rango de futuras trayectorias de forzamiento.
- **SSP3-7,0:** escenario que representa el nivel medio-alto del rango de futuras trayectorias de forzamiento radiativo.
- **SSP5-8,5:** escenario que representa el extremo superior del rango de futuras trayectorias de forzamiento radiativo.

Los escenarios de cambio climático analizados corresponden a SSP 2-4,5 y 5-8,5, los cuales se consideran representativos de condiciones moderadas y pesimistas (en términos de concentraciones de CO<sub>2</sub>). La elección del SSP 2-4,5 se sustenta en considerar que, si se cumplieran todos los compromisos actuales de reducción de gases de efecto invernadero, se seguiría un camino muy similar al descrito por este escenario, como se explica en (United Nations, 2021).

Los GCMs utilizados para el desarrollo del presente trabajo corresponden a los disponibles en el Sexto Reporte de Evaluación (AR6) del IPCC (2021) y los denominados modelos NEX-GDDP-CMIP6 que fueron procesados por la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Dichas bases de datos se describen en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características base de datos utilizadas, CMIP6

Base de datos	Resolución espacial	Nº GCMs	Escenarios
CMIP6 Monthly Database	0,7°x0,7° a 2,8°x2,8°	57 modelos	SSP 2-4,5 y 5-8,5
NEX-GDDP-CMIP6 <sup>(1)</sup>	0,25° x 0,25°	34 modelos	SSP 2-4,5 y 5-8,5

(1): NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections CMIP6

Las variables utilizadas en este trabajo corresponden a precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (ETP), la cual se estima en base a la temperatura y al método de Hargreaves y Samani (1985). Para el caso de las proyecciones de cambio climático, la ETP se estima a partir de las temperaturas corregidas. Para los modelos NEX-GDDP-CMIP6 se consideró sólo a los que poseían ambas variables, precipitación y temperatura, por lo que se evaluaron 31 GCM, 62 considerando que se estudian los escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5.

## 2.2 Proceso de escalamiento estadístico

Los GCM tienen sesgos inherentes debido a que fueron desarrollados para reproducir condiciones climáticas globales, mostrando normalmente un desempeño histórico errático en comparación con, por ejemplo, las estaciones meteorológicas, que recopilan información a nivel local. Lo anterior, se debe a que los modelos tienen baja resolución espacial, además de que parametrizan y simplifican los procesos físicos de cada celda. Estos sesgos son evidentes cuando se comparan períodos históricos simulados por los GCMs e información histórica registrada. Para fines de este trabajo, los datos originales se denominan datos “*crudos*” y los escalados se refieren como datos “*corregidos*”.

Los sesgos de cada modelo se pueden corregir utilizando diferentes técnicas estadísticas, en conjunto con registros locales. En el presente estudio, los sesgos de temperatura se corrigieron utilizando el método Quantile Delta Mapping (QDM) a escala mensual y diaria dependiendo de la base de datos considerada, siguiendo las recomendaciones de Cannon et al. (2015). Para precipitación también se utilizó QDM, con ciertas consideraciones para la corrección diaria, preservando los montos corregidos a nivel mensual, la máxima diaria, así como también el número de días húmedos, dado que usualmente los GCMs sobreestiman este parámetro, lo que es conocido como drizzle effect (Teutschbein y Seibert, 2012).

La cantidad de días húmedos se corrigió a través del método propuesto por Schmidli et al. (2006), conocido como Local Intensity Scaling of Precipitation, el cual calibra un valor mínimo de precipitación diaria para cada GCM en su periodo histórico simulado, propagando dicho umbral para las simulaciones futuras, con el fin de que cualquier monto menor a este sea considerado nulo, corrigiendo la cantidad de días húmedos para cada GCM, mas no la secuencia de los pulsos, pues no es un objetivo la conservación de las probabilidades de transición de las cadenas de Markov.

## 2.3 Criterios de selección de Modelos de Cambio Climático

A nivel nacional se cuenta con trabajos que exploran criterios de selección de GCM, tales como Gateño et al. (2021), Huichaquelén (2017) y Salazar (2017), los cuales se enmarcan principalmente en evaluar criterios de Validez, algunos de ellos incluidos dentro de los adoptados en el presente estudio, sin enfocarse en un propósito particular (eventos hidrológicos extremos, disponibilidad

hídrica, modelos de balance estocásticos, entre otros), mientras que en el presente trabajo se busca seleccionar en virtud de un propósito, incorporando el riesgo como una variable adicional.

La selección busca proponer 3 GCMs que alimenten un modelo de balance de aguas estocástico, razón por la cual los criterios son aplicados sobre la base de datos diaria NEX-GDDP-CMIP6, mientras que los GCM a resolución temporal mensual son utilizados para determinar límites razonables de tasas de cambio (Validación Contextual). A continuación, se presentan los criterios adoptados en base a las recomendaciones generales de IPCC (2001), con la finalidad de ayudar en la selección de GCMs, que se considerarán representativas del estudio:

1. **Antigüedad:** se asume que las simulaciones de modelos recientes son más confiables que las de una versión anterior. En el presente estudio se utiliza la versión más reciente de los modelos de cambio climático disponible (CMIP6).
2. **Resolución:** como criterio general, se presume que los modelos de mayor resolución espacial y/o temporal debiesen tener una mejor representatividad de las variables climáticas. No obstante lo anterior, una mayor resolución no garantiza un desempeño superior del GCM.
3. **Validez:** los datos simulados y observados se proyectan en la misma cuadrícula y se emplean métodos estadísticos para comparar, por ejemplo, valores medios, variabilidad y patrones climáticos. La selección de modelos por el criterio de validez fue aplicado a la precipitación y temperatura, considerando lo siguiente:
  - **Validación Contextual:** busca definir un rango aceptable de proyecciones, descartando los modelos que muestren cambios muy por sobre (o bajo) lo que muestra la mayoría de ellos. Se definió un rango aceptable con los percentiles 5 y 95% de las proyecciones mensuales con la base de datos CMIP6 (57 GCM), la cual se aplica como filtro a la base de datos NEX-GDDP-CMIP6 (resolución diaria). El cambio proyectado se estima en base a la comparación porcentual para precipitación y absoluta para temperatura, de los periodos futuros con respecto a su base histórica.
  - **Validación Estacional:** se compara la distribución media mensual de la precipitación y la temperatura del periodo histórico observado y el histórico simulado por los GCM. Se adimensionaliza la distribución media mensual de precipitación y se estima la anomalía mensual para la temperatura (precipitación: se divide el valor medio mensual por el medio anual, temperatura: se resta el valor medio anual a las medias mensuales). Esta validación se realiza tanto para los modelos crudos como para los corregidos, a través del coeficiente de desempeño de Nash-Sutcliffe (N-S). Se incluye el caso corregido con el fin de identificar si existe algún GCM que luego de la corrección no sea capaz de representar apropiadamente la estacionalidad.
  - **Validación de Tendencia:** se compara la tendencia anual de la serie histórica observada con la tendencia histórica simulada por los GCM de precipitación y temperatura (mm/año; °C/año), analizando si es estadísticamente significativa mediante el test de Mann-Kendall. Esta validación se realiza tanto para los modelos crudos como para los corregidos con el fin de identificar y potencialmente excluir GCMs que presenten un cambio en el signo de su tendencia o en caso de que se adopte alguna señal predominante en base a los registros.
  - **Validación del Coeficiente de Variación (CV):** el CV anual de la serie histórica observada se compara con el CV histórico simulado por los GCM (desv. estándar / media). Esto permite comparar qué tan bien se representa la variabilidad anual histórica en los modelos de cambio climático. Esta validación se realiza tanto para los modelos crudos

como para los corregidos con el fin de identificar y potencialmente excluir GCMs que presenten un CV que difiera sustancialmente del estimado en base a los registros.

- **Validación de Consistencia:** busca que los modelos seleccionados representen un cierto nivel de riesgo que sea consistente espacial y temporalmente. Este criterio no mide el desempeño de los modelos, solo busca guiar la elección de GCMs que representen consistentemente una condición de riesgo similar para las diferentes ventanas temporales o lugares de interés. Este test se aplica sólo sobre la precipitación para los modelos corregidos, evaluando si los GCM expresan la misma señal de cambio para las ventanas futuras de interés luego del downscaling estadístico.
  - **Validación de Fracción de Días Húmedos:** se compara la distribución mensual promedio de la fracción de días húmedos del período histórico observado y el período histórico del modelo, evaluando su desempeño a través del coeficiente de Nash-Sutcliffe (N-S). La distribución media mensual de días húmedos es adimensional (la media mensual se divide por la media anual de días húmedos para el periodo 1980-2021). Se incluye el caso corregido con el fin de identificar si existe algún GCM que luego de la corrección no sea capaz de representar apropiadamente la estacionalidad de días húmedos.
  - **Validación del Coeficiente de Frecuencia:** se comparan los coeficientes de frecuencia de las precipitaciones máximas diarias (desde una probabilidad de excedencia de 5 a 95%) del período histórico observado y el período histórico simulado por los GCMs, evaluando el desempeño de los GCM en la generación de eventos extremos, a través del coeficiente de Nash-Sutcliffe (N-S). Se incluye el caso corregido con el fin de identificar si existe algún GCM que luego de la corrección no sea capaz de representar apropiadamente los coeficientes de frecuencia de las precipitaciones máximas diarias.
  - **Validación según Probabilidades de Transición de las Cadenas de Markov:** la cadena de Markov responde a un proceso estocástico discreto en el que la probabilidad de que ocurra un evento depende solo del evento inmediatamente anterior. Las probabilidades de transición representan el cambio de un estado a otro. Para esta validación se comparan las probabilidades de transición de cada mes para el periodo histórico observado contra las históricas simuladas por cada GCM, evaluando su desempeño a través del coeficiente de Nash-Sutcliffe (N-S). Esta validación se realiza sólo para los GCMs corregidos, debido a que los modelos crudos no son capaces de reproducir las probabilidades de transición dada su sobreestimación de días húmedos (drizzle effect).
4. **Representatividad:** se propone considerar los GCM que representen distintos niveles de riesgo, en particular para este trabajo, de disponibilidad hídrica. Para su evaluación, se propone utilizar el Índice de Aridez (IA), ya que combina la información de precipitación y evapotranspiración (P/ETP), y por ende, permite evaluar el riesgo futuro que cada GCM representa para diferentes escenarios de disponibilidad hídrica.

El desempeño de la validación estacional, validación de consistencia, fracción de días húmedos, coeficiente de frecuencia y probabilidades de transición de la cadena de Markov es evaluado mediante el coeficiente de desempeño de Nash-Sutcliffe (N-S), decidiendo arbitrariamente el valor mínimo aceptable, de acuerdo con el test utilizado y resultados obtenidos, definiendo para este trabajo el valor umbral de 0,5, el cual podría ser más exigente, sin embargo, se debe considerar que al evaluar varios criterios, la probabilidad de obtener un conjunto vacío es alta, por lo cual se decidió ponderar los más relevantes de acuerdo a su propósito.

Los GCM considerados como candidatos a ser seleccionados para su uso en modelos de balance de agua son aquellos que cumplen con los criterios establecidos anteriormente. Se debe tener en cuenta que es posible que ningún modelo demuestre superioridad en todas las variables y métricas a la vez (Gateño et al., 2021).

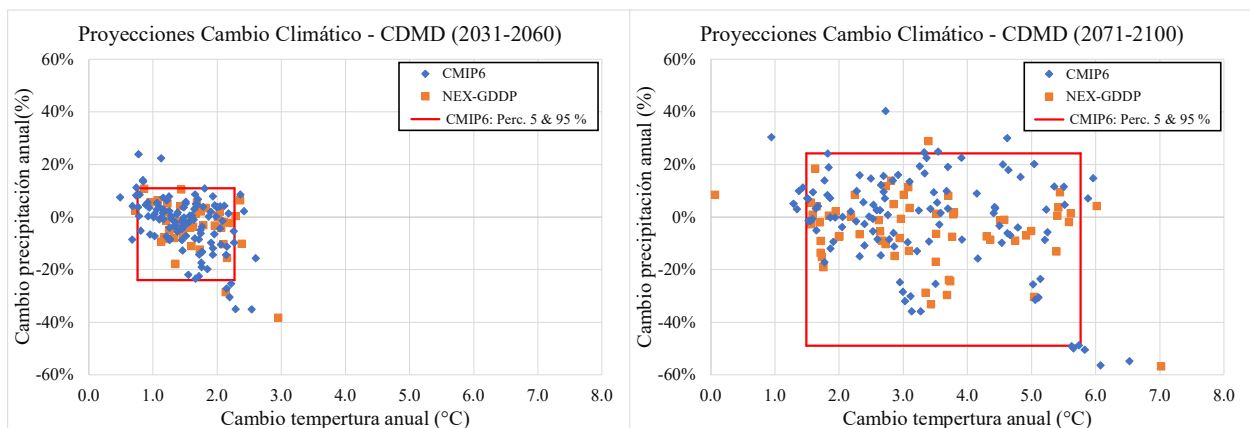
En ese sentido, el presente trabajo no busca presentar un ranking con los “*mejores*” GCM para el sitio, si no, acotar la cantidad de GCM a través de la aplicación de los criterios descritos para finalmente seleccionar modelos de acuerdo con diferentes niveles de riesgo hídrico, con los cuales se alimente un modelo de balance de agua estocástico, permitiendo al tomador de decisiones evaluar la necesidad de implementar diferentes medidas en pro de aumentar su resiliencia hídrica considerando los potenciales efectos del cambio climático.

Dado que la elección final de los GCM se realiza de acuerdo con el riesgo futuro que cada uno de ellos representa (lo que se evalúa a través del Índice de Aridez), para la aplicación de los distintos criterios, se opta por mezclar los SSP 2-4,5 y 5-8,5. En caso de estimarse conveniente, los test se pueden aplicar diferenciando entre escenarios de concentraciones, seleccionando GCMs para cada trayectoria socioeconómica compartida.

### 3 RESULTADOS

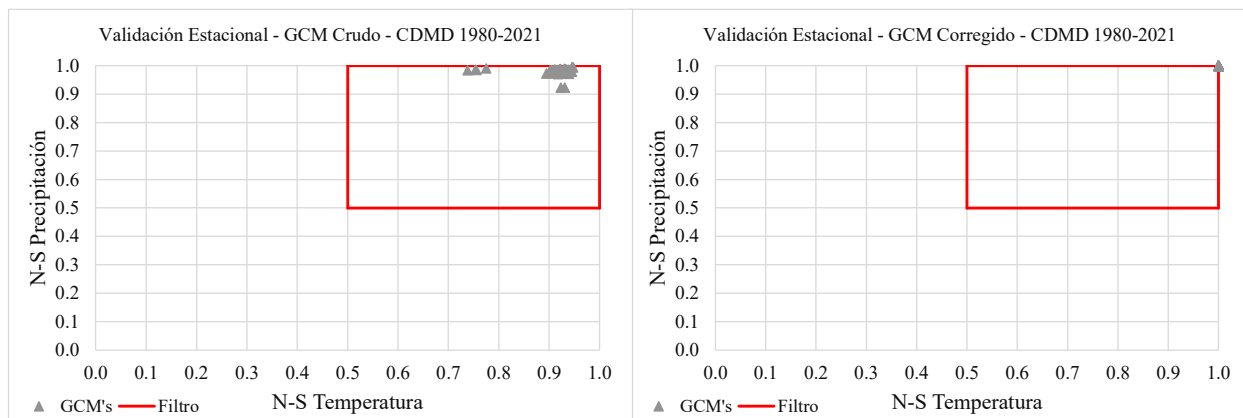
#### 3.1 Resultados de selección de modelos

En la Figura 2 se muestran los resultados de la validación contextual para la estación Conceição do Mato Dentro (CDMD), donde se descartan los GCM que en precipitación o en temperatura se encuentren fuera de los percentiles 5 y 95% dados por los cambios proyectados para precipitación y temperatura a partir de la base de GCM mensuales (CMIP6, 57 modelos, 114 series de tiempo dado que se consideran SSP 2-4,5 y 5-8,5). Cabe señalar que las proyecciones de los modelos mensuales CMIP6 y diarios NEX-GDDP-CMIP6 (62 GCM al tratarse de dos escenarios SSP) muestran un comportamiento similar en ambos períodos analizados y que para el periodo 2071-2100, como es esperable, se detecta una mayor incertidumbre en las proyecciones de precipitación y temperatura. Un total de 51 modelos NEX-GDDP-CMIP6 aprobaron este test.



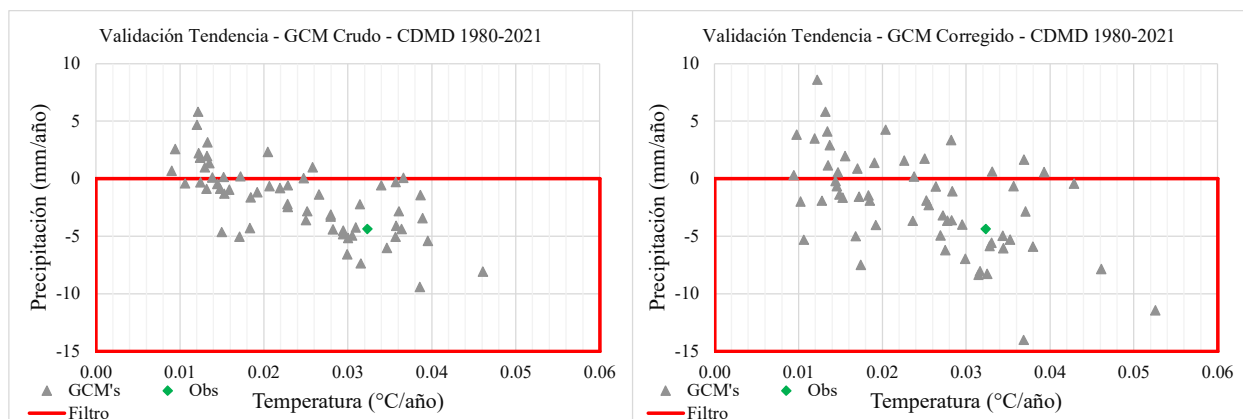
**Figura 2.** Resultados validación contextual para precipitación y temperatura – CDMD

Para la validación estacional, se consideran aprobados aquellos GCM cuyo coeficiente Nash-Sutcliffe (al comparar la estacionalidad adimensional entre los datos de los modelos y los registros históricos) sea mayor que 0,5, tanto para la precipitación como para la temperatura (Figura 3). Cabe señalar que este test carece de sentido, al ser aplicado sobre los GCM corregidos, dado que las medias mensuales son un objetivo de corrección, razón por la cual presentan un N-S igual a 1 y los resultados se presentan solo como referencia. En términos generales, todos los modelos NEX-GDDP-CMIP6 representan bien la estacionalidad, obteniéndose N-S mayores a 0,7.



**Figura 3.** Validación estacional para modelos GCM crudos y corregidos – CDMD

Por otra parte, la validación de tendencia (Figura 4) fue aplicada para las precipitaciones y temperaturas anuales, obteniendo que la tendencia histórica es estadísticamente significativa sólo para la temperatura (test de Mann-Kendall, significancia del 5%). Se debe notar que para la precipitación se estableció como condición que los GCM tuviesen tendencia negativa en su periodo histórico simulado, dado que las precipitaciones históricas registradas presentan esta señal en su tendencia (se debe tener en cuenta que, al no ser estadísticamente significativa para la precipitación, se podría relajar esta restricción), mientras que, para la temperatura se exige que la tendencia histórica simulada por los GCM sea positiva. Considerando lo anterior, 39 modelos NEX-GDDP-CMIP6 aprobaron este criterio.

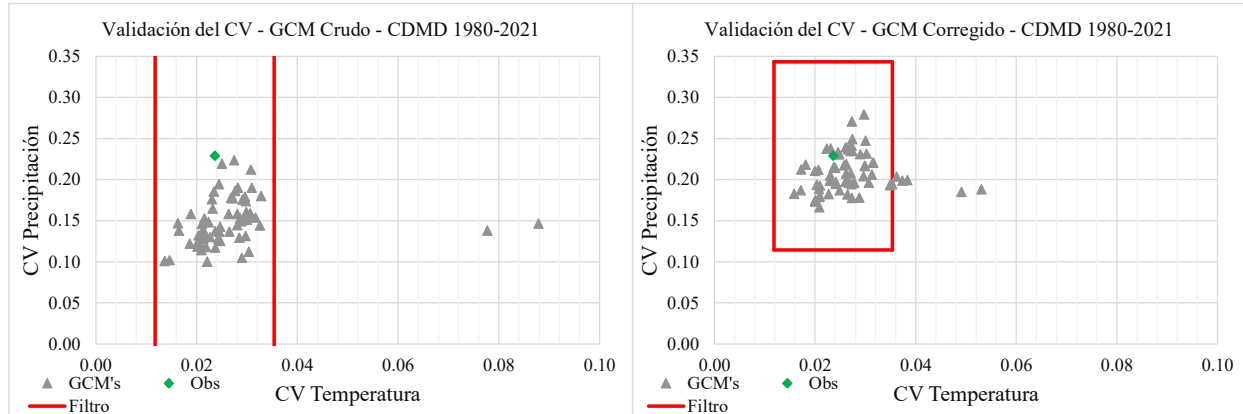


**Figura 4.** Validación de tendencia para la precipitación y temperatura – CDMD

Para la validación de los GCM a partir del coeficiente de variación (Figura 5), se descartó aquellos cuyo CV estuviese fuera del rango  $\pm 50\%$  respecto del valor histórico observado. El criterio se

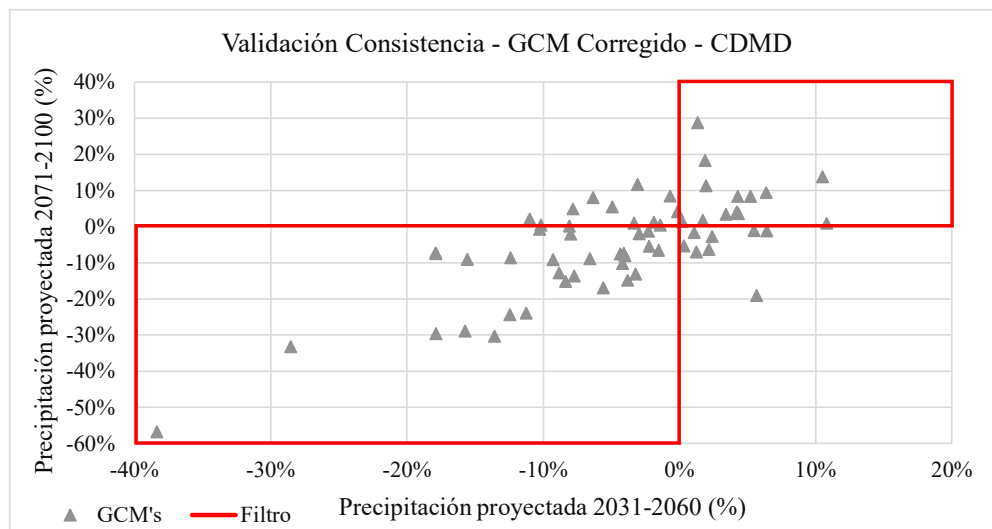


aplicó para las series crudas y corregidas de los GCM, exceptuando los GCM de precipitación sin corrección, pues la variación de la data observada resultó mayor a los coeficientes de variación de los modelos, lo que posteriormente se corrige a través del downscaling estadístico. La métrica utilizada es arbitraria, se podría por ejemplo considerar los “N” GCM’s más cercanos al par de CV de precipitación y temperatura observados, lo cual queda abierto y propuesto para quien realice la selección de modelos. Un total de 57 modelos NEX-GDDP-CMIP6 aprobaron este test.



**Figura 5.** Validación de Coeficiente de Variación para la precipitación y temperatura – CDMD

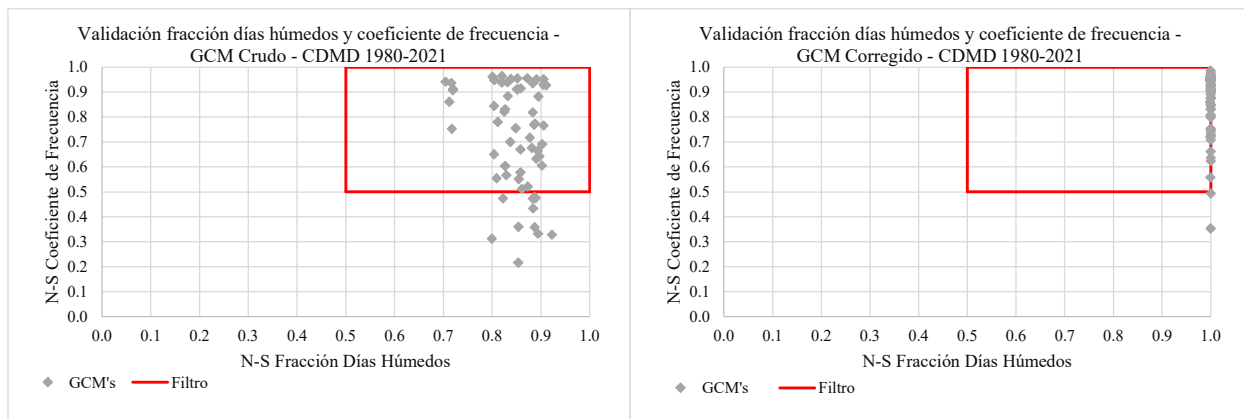
La Figura 6 muestra el criterio de validación por consistencia, con el que se busca evaluar que los GCM entreguen una misma señal de cambio (aumento o disminución) para los dos periodos analizados. Este criterio no mide el desempeño de los modelos, solo busca guiar la elección de GCMs que representen consistentemente una condición de riesgo similar para las diferentes ventanas temporales o lugares de interés, por lo que se escoge aplicarlo sólo a las series corregidas. Un total de 42 GCM aprobaron el criterio de consistencia.



**Figura 6.** Validación consistencia periodo 2031-2060 & 2071-2100 – CDMD

Para la validación de los GCM a partir de la fracción de días húmedos y de los coeficientes de frecuencia (Figura 7), se consideran aprobados aquellos GCM cuyo coeficiente Nash-Sutcliffe sea mayor a 0,5 (al comparar el periodo histórico simulado por los modelos contra las estimaciones a

partir de los registros históricos). El criterio más restrictivo de los considerados en esta etapa corresponde al de coeficiente de frecuencia, lo que se vincula a que el ajuste de probabilidad realizado para la corrección no necesariamente coincide con su distribución empírica. Ambos criterios se aplicaron para las series crudas y corregidas de los GCMs. Un total de 49 modelos NEX-GDDP-CMIP6 aprobaron este test.



**Figura 7.** Validación fracción de días húmedos y coeficiente de frecuencia – CDMD

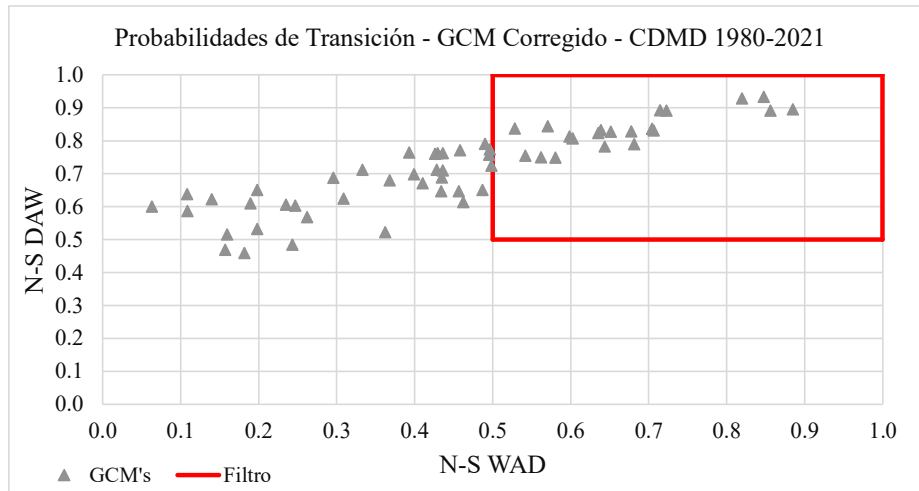
### 3.1.1 Probabilidades de Transición de las Cadenas de Markov

Debido a que el objetivo de la selección de GCMs es alimentar un modelo de balance de aguas y asegurar la adecuada generación de series estocásticas en el período futuro, se testeó el desempeño de los GCM, identificando los modelos que mejor representan las probabilidades de transición de las cadenas de Markov en relación con la estadística histórica.

La Figura 8 presenta los resultados obtenidos, donde los modelos cuyo coeficiente N-S sea mayor a 0,5 aprueban el test (criterio arbitrario adoptado en este estudio, podría ser más restrictivo). Se compara las probabilidades de transición de las cadenas de Markov para cada mes entre el GCM y el registro histórico para las condiciones WAD (húmedo después de seco, por sus siglas en inglés) y DAW (seco después de húmedo, por sus siglas en inglés).

La validación se realiza solo para los datos corregidos, ya que lo importante es analizar el comportamiento de los GCMs a utilizar en el balance de aguas, donde se debe tener en cuenta que la corrección de sesgo altera las probabilidades de transición al ser un objetivo de la corrección mantener la cantidad de días húmedos para el periodo histórico, mas el método de downscaling aplicado no es capaz de modificar la secuencia de eventos. Los GCM crudos tendrán un desempeño deficiente en la representación de las probabilidades de transición, al sobreestimar la cantidad de días húmedos (drizzle effect).

De lo anterior, se puede observar hay un mejor ajuste por parte de los GCM de la condición DAW que WAD, lo que puede estar relacionado con el efecto generado por el método de corrección de días húmedos. Este criterio corresponde al más restrictivo, siendo aprobado por 21 de los modelos NEX-GDDP-CMIP6.

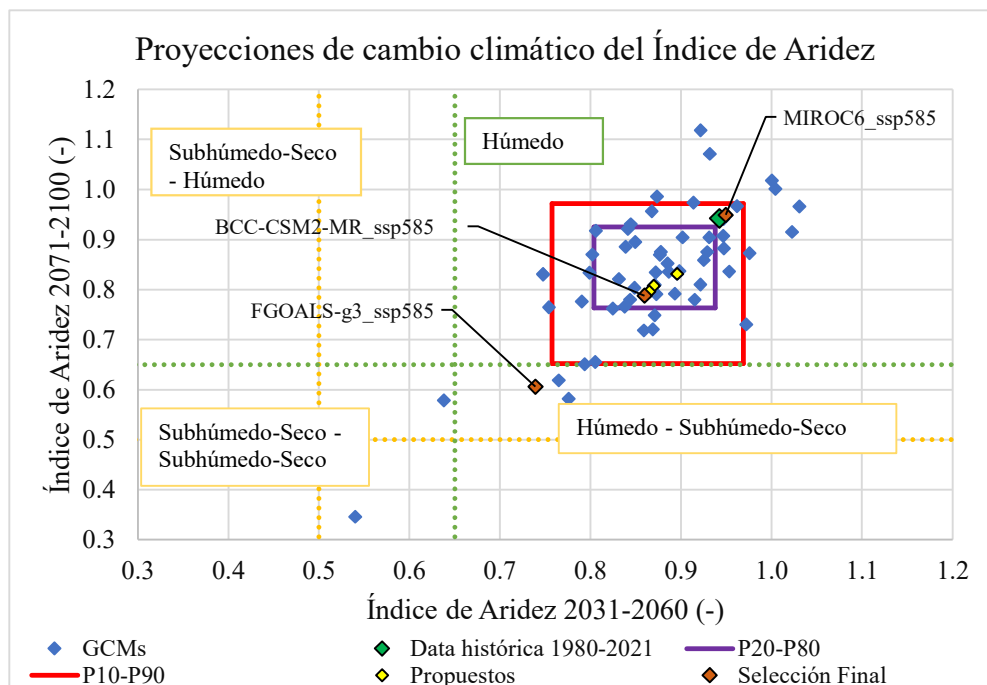


**Figura 8.** Validación de probabilidades de transición DAW & WAD – 1980-2021 – CDMD

### 3.2 Criterio para la recomendación del nivel de riesgo de disponibilidad hídrica

Dado que se busca seleccionar GCMs que representen distintas condiciones de riesgo de disponibilidad hídrica, se utiliza el criterio de representatividad, mediante el Índice de Aridez (IA), el cual sintetiza los cambios proyectados en precipitación y evapotranspiración potencial.

Para el proceso de selección final, se consideró la estimación del IA para el periodo 2031-2060 y 2071-2100, como se muestra en la Figura 9, que identifica el cambio proyectado sobre la disponibilidad hídrica representado por cada GCM para ambas ventanas temporales analizadas para los modelos propuestos, es decir, los que aprueban todos los criterios de validación aplicados en la sección anterior.



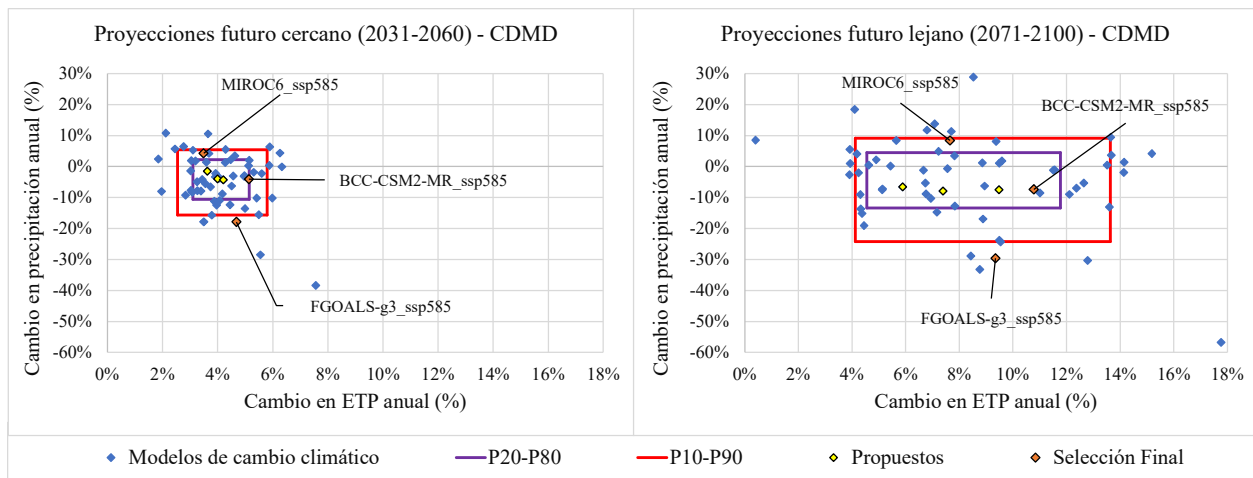
**Figura 9.** Proyecciones del Índice de Aridez - Periodo 2031-2060 & 2071-2100 – CDMD

Se debe tener en cuenta que es posible que ningún modelo demuestre superioridad en todas las variables y métricas a la vez (Gateño et al., 2021), por lo cual el presente trabajo no busca presentar un ranking con los “mejores” GCM para el sitio, si no, acotar la cantidad de modelos a través de la aplicación de los criterios descritos para finalmente seleccionar GCMs de acuerdo con diferentes niveles de riesgo a adoptar para un modelo de balance de aguas estocástico.

Finalmente, considerando los resultados del criterio de representatividad, se proponen 3 modelos de cambio climático que muestran distintas condiciones de disponibilidad hídrica, así como un amplio rango entre los GCMs que aprobaron la totalidad de los criterios aplicados:

1. Moderado: MIROC6\_ssp585 (↑Precipitación + ↑Evapotranspiración Potencial)
2. Severo: BCC-CSM2-MR\_ssp585 (↓Precipitación + ↑↑ Evapotranspiración Potencial)
3. Extremo: FGOALS-g3\_ssp585 (↓↓Precipitación + ↑↑ Evapotranspiración Potencial)

La Figura 10 presenta las proyecciones a nivel anual sobre precipitación y evapotranspiración potencial para el periodo 2031-2060 y 2071-2100, con respecto al periodo histórico (1980-2021), de los modelos de cambio climático propuestos y seleccionados. La Tabla 3 presenta para los 3 GCMs seleccionados los días húmedos anuales, precipitación, temperatura y ETP para los periodos 2031-2060 y 2071-2100.



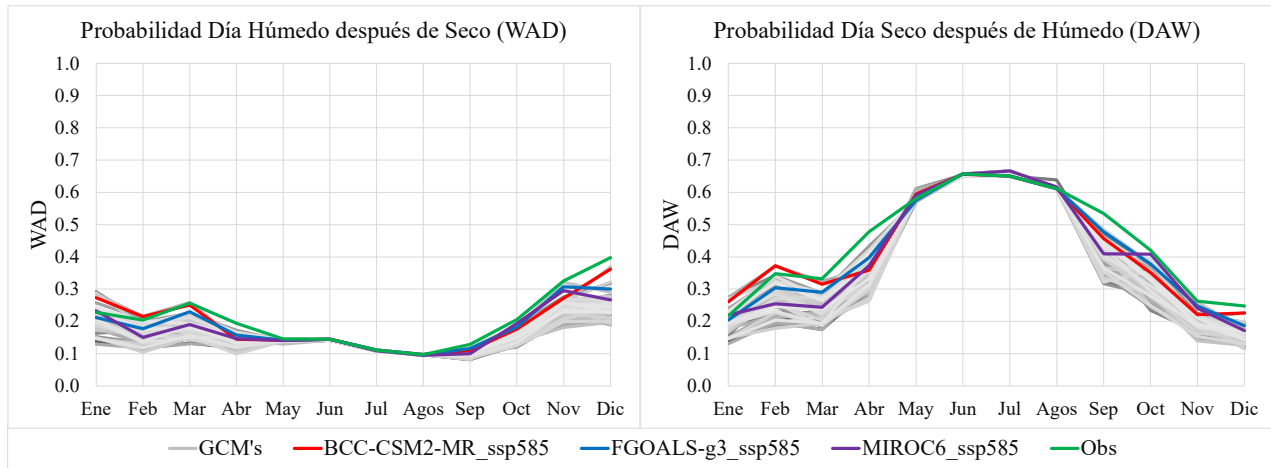
**Figura 10.** Cambio Proyectado en precipitación y evapotranspiración potencial anual - Modelos propuestos y seleccionados

**Tabla 3.** Resumen de Modelos Seleccionados – 2031-2060 & 2071-2100 - CDMD

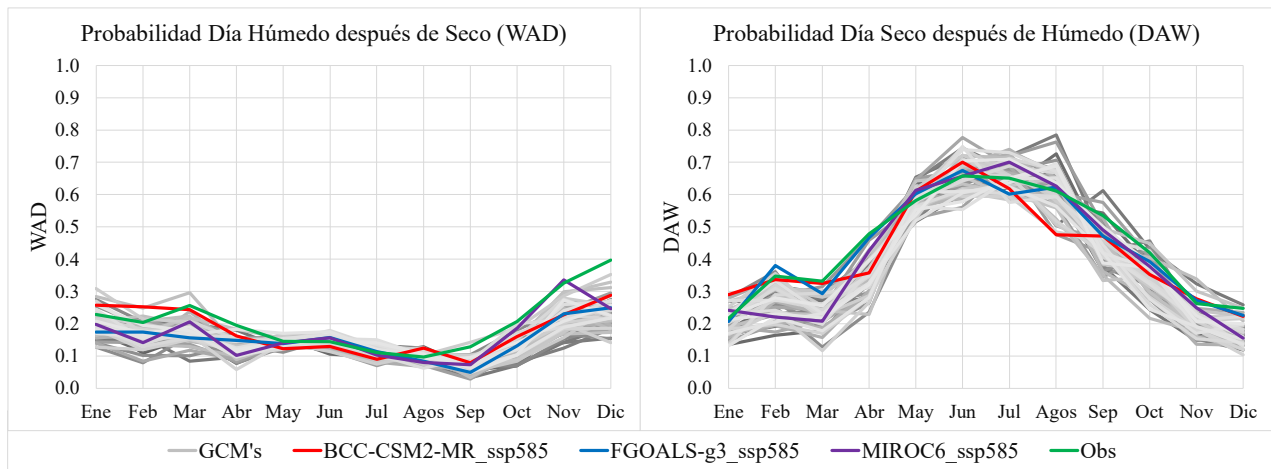
Modelo	Futuro cercano (2031-2060)				Futuro Lejano (2071-2100)			
	DH (días)	Pr (mm)	T° (°C)	ETP (mm)	DH (-)	Pr (mm)	T° (°C)	ETP (mm)
<b>Histórico (1980-2021)</b>	<b>120,7</b>	<b>1,411</b>	<b>21,9</b>	<b>1,498</b>	<b>120,7</b>	<b>1,411</b>	<b>21,9</b>	<b>1,498</b>
MIROC6_ssp585	115,8	1,478	23,2	1,550	118,3	1,537	24,9	1,612
BCC-CSM2-MR_ssp585	114,5	1,360	24,0	1,574	108,8	1,313	26,2	1,659
FGOALS-g3_ssp585	101,9	1,164	23,7	1,568	92,3	997	25,6	1,638

\*DH: Número de días húmedos anual promedio; Pr: Precipitación anual promedio; T°: Temperatura anual promedio; ETP: Evapotranspiración Potencial anual promedio (Hargreaves y Samani (1985))

Con respecto al análisis de las probabilidades de transición de las cadenas de Markov, la Figura 11 presenta las probabilidades WAD y DAW para cada mes comparando entre el periodo histórico observado y simulado por los GCMs (utilizado para validar), destacando los modelos seleccionados, mientras que la Figura 12 presenta la comparativa entre el periodo histórico y las proyecciones para 2031-2060. Es posible notar que los GCMs seleccionados permiten reproducir en forma adecuada distintos escenarios de disponibilidad hídrica (moderado, severo y extremo), el número de días húmedos y la probabilidad de ocurrencia de días húmedos y secos, siguiendo un comportamiento que a nivel estacional se estima razonable con respecto al histórico observado.



**Figura 11.** Validación de Probabilidades de Transición – WAD & DAW – 1980-2021 – CDMD



**Figura 12.** Proyecciones para WAD y DAW – 2031-2060 – CDMD

A modo de resumen, se destacan los siguientes puntos:

1. En el periodo histórico, los modelos corregidos tienen un comportamiento estacional similar, sin embargo la selección ayuda a filtrar los GCMs que mejor representan la información histórica registrada y el nivel de riesgo que se desea evaluar, lo que permite tener una mejor aproximación de los GCM en cuanto a generación de escorrentía. Aunque lo anterior no asegure que estos simulen de buena manera la condición futura, es una buena primera aproximación para este tipo de estudios.

2. El modelo MIROC6\_ssp585 presenta mayores precipitaciones anuales que el escenario actual, pero a su vez una menor cantidad de días húmedos, lo que implica que en promedio los días en que llueva serán con precipitaciones más intensas, lo que podría equivaler al caso más desfavorable en caso de seleccionar GCMs pensando en eventos de precipitación extrema.
3. Todos los modelos presentan mayor ETP, vinculado al aumento de la temperatura. El GCM seleccionado más desfavorable en cuanto a disponibilidad hídrica no es el que proyecta mayor ETP, dado el efecto conjunto con la precipitación, lo que se refleja adecuadamente en el IA.

#### 4 CONCLUSIONES

Dado que ningún modelo o escenario de cambio climático es completamente exacto/válido para todas las regiones o demuestre superioridad en todas las variables y métricas a la vez, la mejor práctica para las evaluaciones del cambio climático es utilizar tantos modelos y escenarios de concentraciones como sea posible. Sin embargo, dada la gran cantidad de GCMs disponibles, se hace necesario definir criterios que permitan filtrar o seleccionar algunos de ellos, con lo cual reducir la incertidumbre asociada a los análisis de cambio climático.

En general, las recomendaciones para selección de modelos de cambio climático pertenecen a alguno (o una combinación) de los cuatro criterios generales (antigüedad, resolución, validez y representatividad) definidos por IPCC (2001). Estos son criterios generales, los que se deben aplicar de acuerdo con el área de estudio, correspondiendo al criterio de representatividad la elección final de los modelos en base al nivel de riesgo que se quiera/necesite evaluar.

Evaluar el desempeño de los GCMs corregidos en la reproducción de las probabilidades de transición permite identificar los modelos capaces de simular de manera apropiada la secuencia de eventos húmedos, permitiendo escoger GCMs cuyo cambio proyectado se deba al efecto del cambio climático y no a una representación deficiente de las probabilidades de transición de las cadenas de Markov.

Los criterios de selección pueden ser flexibilizados/modificados en base a los resultados que se obtengan para cada una de las áreas de estudio y/o parámetros de interés. Los criterios aquí propuestos/adoptados son recomendaciones generales, cuya aplicación puede no ser estricta, sin embargo, se entregan variados criterios, permitiendo realizar un proceso de selección robusto, los cuales se pueden aplicar indistintamente en cualquier lugar del mundo. El presente trabajo no busca presentar un ranking con los “mejores” GCM para el sitio, si no, acotar la cantidad de GCM a través de la aplicación de los criterios descritos para finalmente seleccionar modelos de acuerdo con diferentes niveles de riesgo.

Dado que el objetivo de la corrección de sesgo diario no es la mantención de las probabilidades de transición de las cadenas de Markov (usualmente utilizadas en la generación estocástica de precipitaciones), no hay un ajuste perfecto respecto a la data registrada, lo anterior dado que no existe una metodología dentro de la bibliografía considerada, que modifique las probabilidades de transición de las cadenas de Markov como objetivo de corrección.

Como trabajo futuro se propone abordar distintos enfoques que corrijan la cantidad de días húmedos, incidiendo sobre la secuencia de los eventos de precipitación y por ende, en las probabilidades de transición de las cadenas de Markov.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al equipo de ingenieros del equipo de aguas WSP que han contribuido en el desarrollo de parte de la metodología de selección de GCMs aquí expuesta, aportando su experiencia en la evaluación de estos criterios, en particular Susana Robles, Arnaldo Santander y Carlos Jara.

## REFERENCIAS

Cannon, A., Sobie, S., & Murdock, T. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: ¿How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal Of Climate*.

Gateño, I., Vargas, X., Mendoza, P., Lagos, M. y Vásquez, N. ¿Cómo seleccionar modelos de circulación general para estudios regionales?. Tesis para optar al grado de magister e Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

Hargreaves, G. y Samani, Z. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2).

Huichaquelén, C. (2017). Variabilidad del caudal medio anual durante el periodo histórico 1600-2000 en la cuenca del Maule, Chile. Uso de información de experimento 3.6 del CMIP5. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge Univ. Press. In Press. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)].

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K., Hallegatte, S., Carter, T., . . . van Vuuren, D. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122, 387-400. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>

Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., & al., e. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Salazar, A. (2017). Determinación de una metodología para la predicción de forzantes meteorológicas a escala local en un clima no estacionario. Aplicación a cuencas de Chile Central. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Schmidli, J., Frei, C. y Vidale, P. (2006). Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, 26, 679–689. <https://doi.org/10.1002/joc.1287>.

Teutschbein, C., y Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 12-29.

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., y Nemani, R. (2021). NEX-GDDP-CMIP6. NASA Center for Climate Simulation, doi:10.7917/OFSG3345.

United Nations. (2021). National determined contributions under the Paris Agreement. Synthesis report by the secretariat. Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement. Third session. Glasgow.