

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA UTILIZACIÓN DE DISTINTAS VENTANAS DE
CORRECCIÓN EN EL PROCESO DE DOWNSCALING ESTADÍSTICO DE
MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

HERNÁN MORALES JAMETT¹
CAMILA DONOSO YAÑEZ²
IGNACIO TORO MENA³
CRISTIÁN CHADWICK IRARRÁZAVAL⁴

RESUMEN

La selección de la ventana de referencia al realizar corrección de sesgo en modelos de cambio climático es una de las mayores dificultades a la hora de analizar proyecciones futuras, dado que, dependiendo del periodo histórico utilizado, las magnitudes proyectadas pueden presentar grandes diferencias. Se evalúan tres ventanas históricas distintas utilizadas para la corrección de sesgo en la cuenca Aconcagua en Chacabuquito en Chile Central. Cada una de las ventanas consta de 30 años de largo y la última se ve fuertemente afectada debido a la mega sequía. Del análisis, se concluye que no hay grandes diferencias en términos de proyecciones relativas (porcentaje de precipitación y deltas de temperatura) al utilizar distintos periodos, incluso bajo condiciones proyectadas por los modelos, lo cual tiene la ventaja de incorporar información más reciente y favorecer el empalme entre datos observados y simulados. Sin embargo, las magnitudes absolutas presentan variaciones relevantes, especialmente según se incluya o no la mega sequía en el periodo de referencia utilizado. Esto evidencia la importancia de una elección cuidadosa del tramo base, ya que puede influir considerablemente en los resultados del escalamiento estadístico, el cual debe evaluarse según el objetivo del análisis y el tipo de impacto evaluado.

¹Hidrólogo, Mine Water, WSP Chile – hernan.morales@wsp.com, hernan.amj@gmail.com

²Hidróloga, Mine Water, WSP Chile – camila.donoso@wsp.com, camila.ale.donos@gmail.com

³Hidrólogo esp. en cambio climático, Mine Water, WSP Chile – ignacio.toro@wsp.com, toromena@hotmail.com

⁴Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez – cristian.chadwick@uai.cl

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el efecto del cambio climático aumenta cada vez más, dados los efectos en disponibilidad hídrica, eventos extremos y otros. Por ello se realizan estudios de cambio climático, con la finalidad de tomar decisiones informadas y llevar soluciones resilientes ante un futuro incierto. Estos análisis se llevan a cabo con modelos globales climáticos (Global Climate Models, GCMs por su sigla en inglés) (IPCC, 2021), los cuales nos entregan señales futuras bajo distintos escenarios de emisiones de gases de tipo efecto invernadero.

Dado que los GCMs buscan representar las condiciones futuras a nivel global, además de contar con una resolución espacial gruesa (entre 50 y 500 km aproximadamente), estos no representarán necesariamente las condiciones de un sector o zona en particular. Debido a la baja representación de condiciones locales, es que los GCM parametrizan diversos fenómenos físicos a escala local y es necesario realizar un escalamiento estadístico y corregir el sesgo inherente con el que cuentan.

La selección del periodo de referencia con el cual se lleva a cabo el proceso de escalamiento o incluso aquel al que se le aplican proyecciones futuras, impacta directamente en los valores obtenidos. Esto se vuelve especialmente evidente cuando se utilizan periodos con información anómala, lo que puede llevar a una subestimación o sobreestimación de la variable analizada, como se indica en Fadhel et al. (2017).

Uno de los procesos interesantes a analizar del último periodo corresponde a la mega sequía en Chile Central (Garreaud et al. 2020), la cual afectó la zona centro-norte del país, en donde el recurso hídrico se vio mermado fuertemente durante un periodo de tiempo prolongado de más de 10 años, entre los años 2010 y 2021, condiciones que son consideradas anómalas dado que no tiene precedentes conocidos en registros de los últimos 100 años. Estas condiciones anómalas podrían estar teniendo un impacto considerable en las proyecciones si se incluyen dentro del período de referencia al momento de realizar la corrección de sesgo.

En Chile, no se ha analizado en profundidad el efecto que tiene la selección del período histórico al realizar proyecciones de cambio climático. En particular, se desconoce cómo las condiciones anómalas asociadas a la mega sequía podrían influir en los resultados obtenidos, especialmente en el ámbito de las proyecciones hidrológicas. Esta falta de análisis representa una brecha relevante, dado el rol que juega el período histórico de referencia en los procesos de corrección estadística de modelos climáticos.

Este trabajo busca precisamente abordar esta brecha. Para ello, se analiza el impacto que tiene el utilizar distintas ventanas de referencia en el proceso de corrección de sesgo estadístico, y cómo esto afecta las proyecciones climáticas hacia finales de siglo. Se selecciona una cuenca representativa de Chile Central, Río Aconcagua en Chacabuquito (Código DGA 5410002), ubicada en la Región de Valparaíso, donde es posible observar el efecto potencial de la mega sequía en el escalamiento. La ubicación y características de la cuenca se presentan en la Figura 1.

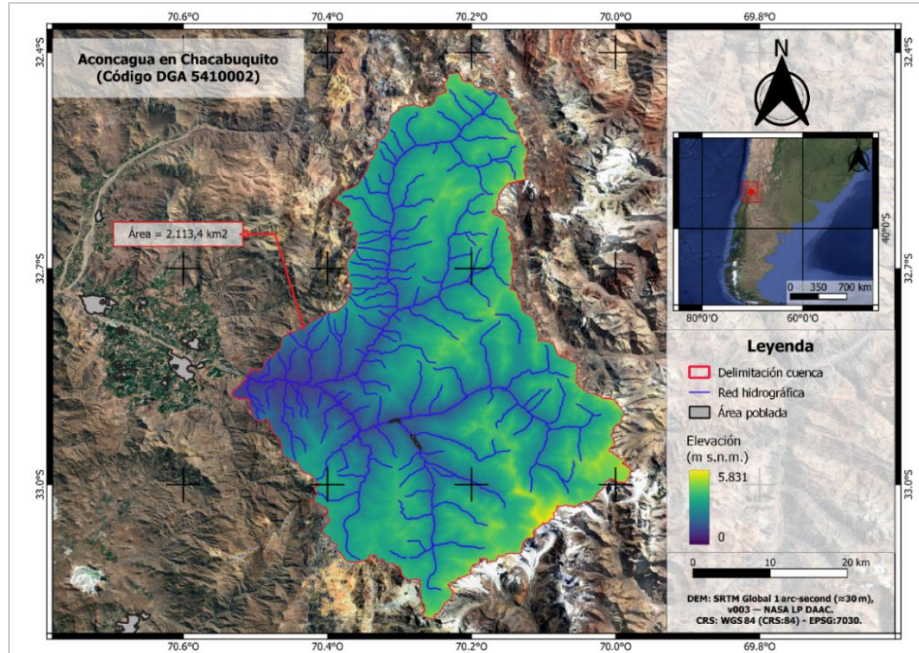


Figura 1. Ubicación general y puntos de interés – Chacabuco

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada se desarrolla en cuatro etapas, resumidas a continuación, siendo descritas en mayor detalle posteriormente. Primero se presenta una enumeración sintética de cada una y, a continuación, la descripción detallada correspondiente:

1. **Construcción de la serie histórica (1960-2021):** Se obtienen las series de tiempo a nivel diario de precipitación y temperaturas extremas para Río Aconcagua en Chacabuco a partir de los archivos NetCDF del CR2MET v2.5 (Boisier, 2023), considerados para efectos de este estudio como representativos del periodo histórico, agregándolos luego a series mensuales.
2. **Obtención y preparación de proyecciones CMIP6:** Se extraen las series de tiempo mensuales de precipitación y temperatura media de Río Aconcagua en Chacabuco, para los escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5, de 57 modelos de cambio climático en su sexta versión (IPCC, 2021).
3. **Downscaling de Modelos Globales Climáticos (GCMs):** Se aplica el método Quantile Delta Mapping (QDM; Cannon et al., (2015)) con tres ventanas temporales de referencia: 1978-2007, 1985-2014 y 1992-2021.
4. **Cálculo de ETP, SPEI y evaluación de resultados:** Se estima la evapotranspiración potencial (ETP) con el método de Hargreaves-Samani (1985) y se calcula el Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizado (SPEI, por sus siglas en inglés, WMO 2016), con el fin de analizar la sensibilidad de los resultados para la ventana futura de interés en el largo plazo (2071-2100), caracterizando la incertidumbre de las proyecciones para los percentiles 25, 50 y 75% de los GCMs.

Datos

Datos históricos

Para el escalamiento de las variables climáticas simuladas por los GCMs se requiere una estadística extensa y continua de datos observados. En este estudio se empleó el producto CR2MET v2.5, que entrega series de precipitaciones diarias, temperaturas máximas y mínimas en una cuadrícula regular de $0,05^\circ$ (~ 5 km) sobre Chile continental para el periodo 1960-2021. Cada campo proviene de un modelo estadístico calibrado con estaciones meteorológicas, utilizando como predictores variables del reanálisis ERA5, parámetros topográficos y temperatura de superficie MODIS (Boisier, 2023).

Estos ráster se recortaron del shape de la cuenca CAMELS-CL 5410002 (Aconcagua en Chacabucito) y, para cada día, se calculó el promedio de la cuenca: los píxeles íntegramente contenidos se ponderaron por su área y los que interceptaban el borde se ajustaron según la fracción contenida. La temperatura media diaria se estimó como el promedio entre las temperaturas diarias máximas y mínimas.

Con lo anterior, se obtienen series diarias continuas de precipitación y temperaturas en el periodo 1960-2021 para la cuenca Aconcagua en Chacabucito, en adelante denominados “datos históricos observados”, los que se agregaron a nivel mensual y anual para los análisis posteriores.

Datos climáticos simulados por GCM

Se trabajó con 57 modelos del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6; Riahi et al., (2017)) disponibles a escala mensual para el periodo 1850-2100, utilizados en el Sexto Reporte de Cambio Climático (AR6) del IPCC (2023). El tramo 1850-2014 corresponde a la simulación histórica, mientras que 2015-2100 responde a las trayectorias de emisiones. En este caso, se analizaron el Shared Socioeconomic Pathway 2-4.5 (SSP 2-4.5, escenario intermedio-moderado) y el SSP 5-8.5 (escenario alto o pesimista) (Tebaldi et al., 2021). Cada SSP combina una narrativa socioeconómica con la concentración proyectada de gases de efecto invernadero con escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP, de Representative Concentration Pathways). Para cada modelo se estimó el centroide de la cuenca y se extrajo la serie mensual del nodo más cercano, la cual se utilizó directamente como representación de la cuenca.

Downscaling de Modelos Globales Climáticos

Se realizó la corrección de sesgo a escala mensual de la precipitación y la temperatura media de los 57 GCM para los escenarios SSP 2-4.5 y SS P5-8.5 mediante Quantile Delta Mapping (QDM; Cannon et al., (2015)). Este método ajusta cada cuantil de la distribución simulada preservando la señal de cambio proyectada entre los periodos futuro e histórico. La corrección se efectuó con tres ventanas temporales de datos históricos observados, de 30 años, considerando así series pseudo-estacionarias, como se recomienda en Chadwick et al. (2023), y separadas por 7 años con la finalidad de analizar impactos alrededor del periodo de la mega sequía:

- **1978-2007:** ventana temporal de 30 años, previo a la mega sequía y anterior al corte del periodo histórico simulado por los GCMs (año 2014). Tiene por objetivo la inclusión de años previos más húmedos al análisis.
- **1985-2014:** ventana temporal de 30 años, considerando hasta el último año del periodo histórico simulado por los GCMs. Considera los primeros años del periodo de mega sequía.
- **1992-2021:** ventana temporal con los últimos 30 años de observaciones históricas disponibles (CR2MET v2,5), incorporando siete años adicionales respecto al corte histórico simulados por los GCMs. En general, la corrección de sesgo se aplica solo hasta el final del periodo histórico de simulación de los GCM (año 2014 en CMIP6), porque a partir de 2015 los modelos dejan de forzar con concentraciones observadas y pasan a utilizar trayectorias proyectadas de gases de efecto invernadero. En este periodo de análisis se incluyeron los años 2015-2021 bajo el supuesto de que las diferencias entre concentraciones proyectadas y observadas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) durante ese lapso no difieren en gran medida entre escenarios climáticos ni del periodo histórico simulado, lo que agrega información valiosa para el análisis. Periodo considera la mega sequía en su completitud.

Estimación de la ETP

La mayor parte de los modelos de cambio climático no simulan la evapotranspiración potencial (ETP), por lo que esta variable suele estimarse mediante métodos indirectos basados en otras variables meteorológicas, como la temperatura.

Algunos de estos métodos, como los Thornthwaite (1948), Turc (1961) y Oudin (2005), presentan ciertas limitaciones cuando la temperatura media mensual del área de estudio es negativa, ya que estiman una ETP nula. Para evitar este efecto, se adoptó el método de Hargreaves-Samani (1985), que fue aplicado directamente a la serie histórica y a las proyecciones corregidas de temperatura media, con la relación indicada a continuación se estimó la ETP en mm/día:

$$ETP = 0,0023 \cdot RA \cdot (T_{mean} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \quad (1)$$

donde RA es el equivalente en evaporación de la radiación solar en mm y las temperaturas media, máxima y mínima (mean, max y min, respectivamente) están en °C. En este caso, el término $(T_{mean} + 17,8)$ permanece positivo en todo el registro, asegurando valores físicamente consistentes. Aunque el método tiende a suavizar la variabilidad diaria e interanual, se considera adecuado para la escala climática de este estudio.

Estimación del SPEI

El Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizado (SPEI por sus siglas en inglés, WMO 2016) incluye la precipitación y una componente relacionada a la temperatura, dado que emplea la ETP.

Lo anterior permite que el SPEI considere el efecto de la temperatura en el desarrollo de una sequía, a través de un balance simplificado, dado que se estima mediante la diferencia entre la

precipitación y la ETP, lo que permite una medida sencilla del superávit o déficit hídrico en el largo plazo, tal y como lo señala Vicente-Serrano et al. (2010).

El SPEI mapea la cantidad de desviaciones estándar que se aleja de un periodo de referencia en específico (en este caso proyecciones futuras respecto a mi histórico observado), lo cual es útil a la hora de sensibilizar resultados y analizar el impacto de distintos periodos históricos observados en la caracterización de sequías en el futuro proyectado. Para este trabajo, se analizarán tres agregaciones temporales, 12, 24 y 48 meses para analizar el efecto a distintas escalas temporales para un futuro lejano (2071-2100), según lo indicado por la WMO (Organización Meteorológica Mundial, WMO por sus siglas en inglés, 2016) y la clasificación del índice especificada por la WMO (2012).

3. RESULTADOS

Caracterización Histórica

La climatología histórica observada, estimada con el producto CR2MET v2.5, revela que la precipitación anual promedio de la cuenca fue de 685 mm en el periodo más antiguo analizado de 1978-2007, valor que disminuye en la siguiente ventana a 598 mm en 1985-2014, y desciende aún más en la tercera ventana a 536 mm en 1992-2021 (Tabla 1). Estos datos confirman la sequía prolongada que afecta a Chile central desde finales de la década de 2000, lo que se puede apreciar de igual manera en la Figura 2, donde la segunda y tercera ventana de referencia consideran parte y la totalidad de esta anomalía climática respectivamente.

En paralelo, la temperatura media anual muestra un incremento suave: de 4,3 °C en el periodo 1978-2008 hasta llegar a los 4,6 °C en el periodo más reciente (1992-2021).

Tabla 1. Precipitaciones y temperaturas medias anuales por periodo – Aconcagua en Chacabuquito

Variables Anuales Históricas	1978-2007	1985-2014	1992-2021
Precipitación (mm)	685	598	536
Temperatura (°C)	4,3	4,4	4,6

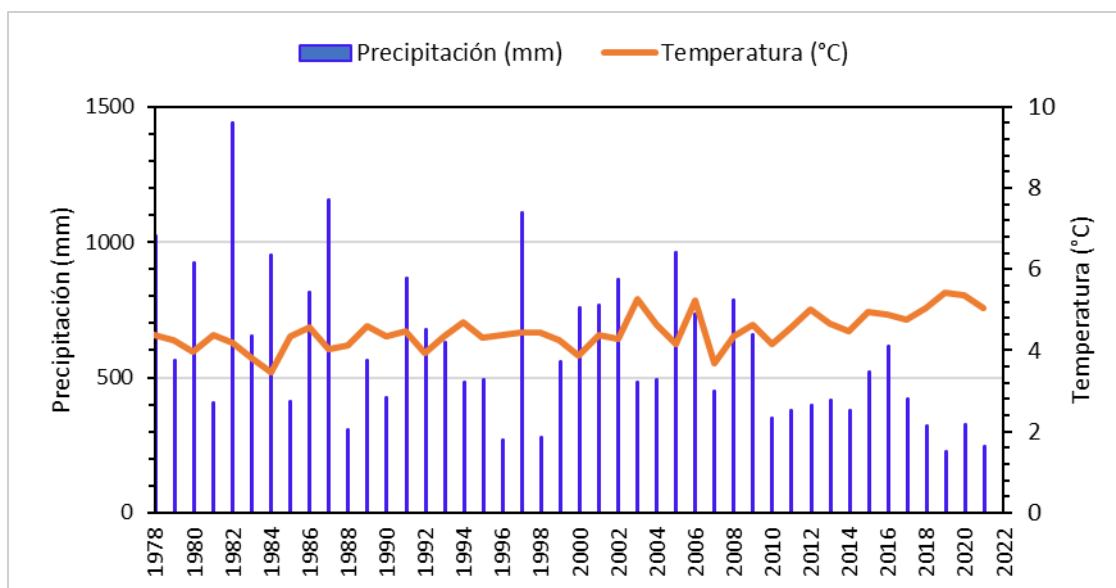


Figura 2. Precipitaciones y temperaturas medias anuales periodo 1978-2021 – Aconcagua en Chacabuco

Proyecciones Precipitaciones y Temperaturas Medias Mensuales.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las proyecciones periodo 2071-2100 en magnitudes de precipitación y temperatura media anual, según el periodo histórico observado de referencia y los percentiles 25, 50 y 75% de los GCM, corregidos con QDM, para cada escenario.

De la Tabla 2 se puede observar que existe una disminución importante de las magnitudes de precipitación en el largo plazo. En las proyecciones de los 3 casos analizados, las magnitudes concuerdan con su periodo histórico de referencia, esto es, a menor magnitud en el histórico observado, menor es su magnitud proyectada en el largo plazo. La temperatura por su parte muestra cambios parecidos en los 3 escenarios, siendo el periodo histórico semejante entre escenarios.

En la Tabla 3, a modo de contraste, se presentan las proyecciones a largo plazo (2071-2100) en términos de porcentaje (precipitación) y relativos $\Delta^{\circ}\text{C}$ (temperatura), según el periodo histórico de referencia.

Se observa una disminución importante en las magnitudes de precipitación proyectadas a largo plazo (Tabla 2), con variaciones significativas entre ventanas históricas de referencia, especialmente en el escenario SSP 5-8,5 (por ejemplo, el percentil 50% varía entre 596 mm y 475 mm, lo que corresponde a un cambio absoluto cercano al 20%). Sin embargo, al analizar estos cambios en términos relativos (Tabla 3), las diferencias porcentuales entre ventanas históricas son menores (a lo más un 4% en el percentil 50%). Esto indica que, si bien la tendencia de cambio se mantiene relativamente constante entre ventanas, la magnitud proyectada está fuertemente influenciada por el periodo histórico utilizado como referencia.

Tabla 2. Proyecciones futuras en magnitudes de precipitación (mm) y temperatura media (°C) para el periodo 2071-2100 en Aconcagua en Chacabucuito, según ventanas históricas de referencia, escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5

Proyecciones Anuales (2071-2100)	Escenario	Percentil (%)	1978-2007	1985-2014	1992-2021
Precipitación (mm)	Histórico	-	685	598	536
	SSP 2-4,5	25%	576	511	458
		50%	611	544	497
		75%	689	602	548
	SSP 5-8,5	25%	443	404	371
		50%	596	518	475
75%		657	591	547	
Temperatura (°C)	Histórico	-	4,3	4,4	4,6
	SSP 2-4,5	25%	6,2	6,2	6,2
		50%	6,8	6,7	6,8
		75%	7,3	7,2	7,1
	SSP 5-8,5	25%	7,9	7,8	7,8
		50%	8,6	8,6	8,7
75%		9,3	9,2	9,2	

Tabla 3. Cambios relativos proyectados de precipitación (%) y temperatura media ($\Delta^{\circ}\text{C}$) para el periodo 2071-2100 en Aconcagua en Chacabucuito, según ventanas históricas de referencia, escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5

Tasas Anuales Proyectadas (2071-2100)	Escenario	Percentil (%)	1978-2007	1985-2014	1992-2021
Precipitación (%)	SSP 2-4,5	25%	-16%	-15%	-14%
		50%	-11%	-9%	-7%
		75%	0%	1%	2%
	SSP 5-8,5	25%	-35%	-32%	-31%
		50%	-13%	-14%	-11%
		75%	-4%	-1%	2%
Temperatura ($\Delta^{\circ}\text{C}$)	SSP 2-4,5	25%	1,9	1,7	1,6
		50%	2,5	2,3	2,2
		75%	2,9	2,7	2,5
	SSP 5-8,5	25%	3,5	3,4	3,2
		50%	4,2	4,1	4,1
		75%	4,9	4,7	4,5

En síntesis, se tienen los siguientes resultados:

- En cuanto a proyecciones futuras, en términos relativos (% y $\Delta^{\circ}\text{C}$), las 3 ventanas de tiempo de referencia no difieren en gran medida entre sí.
- En cuanto a proyecciones futuras, en términos absolutos (mm y $^{\circ}\text{C}$), los 3 escenarios difieren en gran medida en la magnitud de precipitación obtenida, según el periodo de referencia utilizado. Periodos con mayores magnitudes históricas proyectan mayores valores absolutos de precipitación futura, independiente si la proyección a la reducción era mayor, como ocurre en el caso del escenario SSP 5-8,5, por ejemplo. De hecho, se observa que las proyecciones

del percentil 50% del periodo de referencia 1978-2007, llega a magnitudes mayores que el periodo histórico observado del periodo 1992-2021. Con lo anterior, se tiene que el periodo de mega sequía corresponde a un escenario más seco que el periodo de reducción proyectado sin mega sequía.

- En cuanto más se incluye el periodo de mega sequía en cada periodo de referencia (promedios más secos), menores son las magnitudes a las que se llegan luego de la corrección, sucediendo lo contrario en el caso de considerar un periodo más húmedo.
- En cuanto a las temperaturas, al ser más estables, con periodos históricos parecidos y al seguir de buena manera las trayectorias de los GCMs en los últimos años, pareciera no entregar mayores diferencias entre sus magnitudes y cambios relativos.

Proyecciones de SPEI

En la Figura 3 se presentan las gráficas resúmenes del SPEI, para las agregaciones de 12, 24 y 48 meses, según su periodo histórico de referencia, proyecciones futuras (2071-2100) y clasificación del índice según la WMO (2012).

Se puede observar que en los tres históricos de los distintos periodos de referencia las clasificaciones son prácticamente equivalentes, lo que sucede ya que se utilizaron dichos periodos para la normalización de los datos. En cuanto a las proyecciones del SPEI, se puede observar que se llega a distribuciones en la clasificación que varían en gran medida, según el periodo de referencia utilizado.

A condiciones más secas en los periodos de referencia, menor es la clasificación de periodos secos en el largo plazo, en donde por ejemplo para 48 meses el caso con el periodo de referencia más seco (1992-2021), se llega a clasificaciones extremadamente secas en torno a un 40% del tiempo, mientras que para el periodo de referencia más húmedo (1978-2007) se llega a clasificaciones de hasta un 60% de condiciones extremadamente secas.

Lo anterior se debe a que, al utilizar un periodo más seco de referencia histórico, se están representando de mejor manera las sequías futuras, ya que es más comparable dicho periodo histórico muy seco con un futuro igual o incluso más seco.

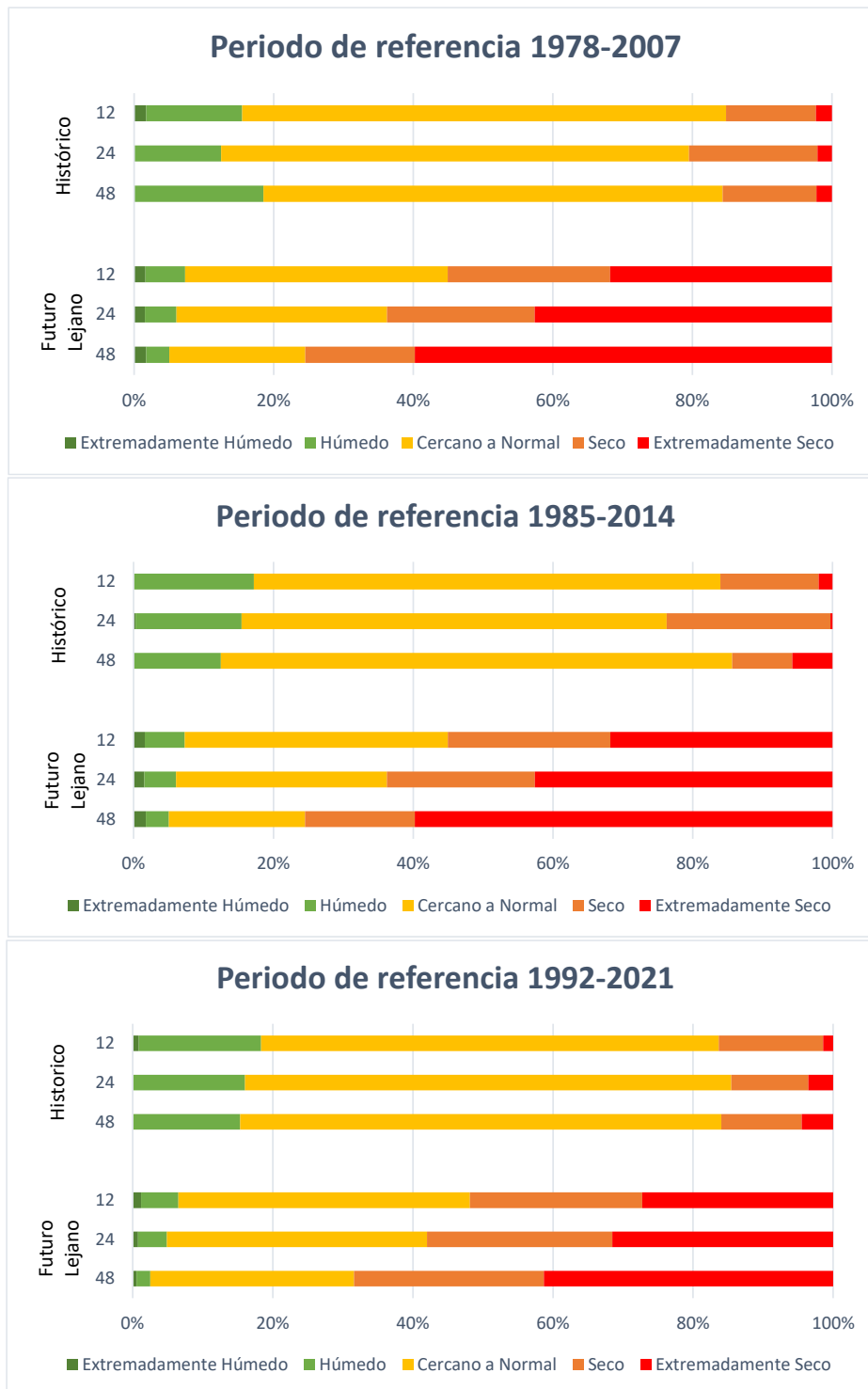


Figura 3. SPEI según periodo de referencia histórico – Escenario SSP 5-8,5 – Aconcagua en Chacabuquito

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos para el análisis con las tres ventanas de referencia en la corrección de sesgo estadística, se puede concluir que:

- La elección del periodo de referencia escogido influye en las magnitudes proyectadas de las variables climáticas. Esto se debe a que el método de escalamiento tiende a mantener una tasa de cambio relativamente constante, independiente del periodo de referencia utilizado. Sin embargo, si dicho periodo incluye alguna anomalía climática, la corrección de sesgo incorpora estadísticamente dicha condición en las magnitudes proyectadas.
- En el caso particular de la precipitación, por ejemplo, si el período de referencia incluye la mega sequía, el análisis de cambio climático incorpora la tasa de cambio de los GCM sobre una base más seca, generando futuros más secos.
- No se aprecia una dependencia significativa entre los cambios relativos proyectados a futuro y la ventana histórica utilizada. Esto sucede dado que, independiente del periodo de referencia seleccionado, el proceso de corrección tiende a preservar las tendencias futuras. Sin embargo, existen pequeñas desviaciones, las cuales podrían ser resultado de una distorsión introducidas por el método de corrección, generando así ligeros cambios, lo que puede ser efecto del ajuste probabilístico, tendencias del modelo climático u otros.
- En cuanto a la sensibilidad frente a sequías en escenarios futuros, utilizar un periodo histórico que ya presenta estas características puede ser una ventaja en ciertos casos, ya que permite realizar un ajuste con una base que no difiere sustancialmente de las condiciones proyectadas, lo que puede ser útil en escenarios donde se espera una intensificación de dichos efectos.
- Tal y como se ha analizado, al variar la ventana temporal de referencia, incluso extendiendo a años más recientes que el histórico simulado en regla por los modelos (hasta el 2014), no se observan cambios sustanciales en las tendencias proyectadas, pero sí en las magnitudes absolutas resultantes. Por ejemplo, en la tercera ventana de análisis (1992-2021), se obtienen tendencias similares a las otras ventanas utilizadas (a lo más un 4% de diferencia para el percentil 50%), mientras que las magnitudes difieren en mayor medida (en el percentil 50% del escenario SSP 5-8,5 hacia finales de siglo varía entre 596mm y 475mm, más de un 20% de diferencia).
- En este sentido, no habría inconveniente en extender el periodo histórico de referencia para incluir datos más recientes, siempre que se evalúe su coherencia con las condiciones climáticas de interés. De hecho, incorporar datos actualizados puede representar una ganancia significativa de información, especialmente en estudios donde los registros disponibles son escasos o recientes, y además puede facilitar un mejor empalme entre las series históricas y las simulaciones corregidas de los GCMs.
- Si bien incluir condiciones secas como las de la mega sequía podría ser considerado un enfoque conservador en ciertos contextos, por ejemplo, al evaluar disponibilidad hídrica, en otros como lo pueden ser la evaluación de impactos sobre balances de agua o manejo de aguas de

dewatering, adoptar un escenario más húmedo podría representar una alternativa conservadora. Por lo tanto, la elección del período de referencia debería alinearse con los objetivos específicos del análisis.

- De acuerdo con lo expuesto previamente, en el proceso de corrección de sesgo es fundamental la elección de la ventana histórica de referencia. Si bien los cambios relativos futuros suelen mantenerse en la corrección, utilizar un periodo de referencia puede llevar a una sobreestimación de condiciones secas o húmedas. Dado que el clima futuro es incierto, el principal desafío radica en discernir si dicho periodo debe interpretarse como una anomalía que no buscamos representar o bien una nueva condición climática ante un futuro cambiante.

REFERENCIAS

- Boisier, J. (2023). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile. (v2.5) [Data set]. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.7529682
- 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? *J. Climate*, 28, 6938–6959. doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- 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*. doi:10.1080/02626667.2023.2201450.
- DGA. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional de Chile. Santiago: Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas.
- Fadhel, S., Rico-Ramirez, M., Han, D. (2017). “Uncertainty of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves due to varied climate baseline periods”. *Journal of Hydrology*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.013>
- Garreaud RD, Boisier JP, Rondanelli R, Montecinos A, Sepúlveda HH, Veloso-Aguila D. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int J Climatol*. 2020; 40: 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2).
- 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 Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team: H. Lee & J. Romero (Eds.)]*. IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2-Towards a. *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 290-306.
- Riahi, K., Van Vuuren, D., Kriegler, E., Edmonds, J., O’Neill, B., Fujimori, S., et al. (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>.
- Tebaldi, C., Kevin, D., Veronika, E., Erich, F., John, F., Pierre, F., . . . Katarzyna, B. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (Scenario MIP) of CMIP6.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55–94. doi:10.2307/2107309.
- Turc, L. (1961). Evaluation de besoins en eau d’irrigation, ET potentielle. *Ann. Agron.*, 12, 13-49.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of climate*.
- WMO. (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide*. WMO-No. 1090.
- WMO. (2016). *Handbook of Drought Indicators and Indices*.