

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

**RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR Y LA  
PRECIPITACIÓN EXTREMA EN CHILE CONTINENTAL: UNA MIRADA A LA  
TELECONEXIÓN ENSO DURANTE LA MEGASEQUÍA**

**RUI WANG.<sup>1</sup>**  
**PABLO MENDOZA.<sup>2,3</sup>**  
**FELIPE GATEÑO.<sup>4</sup>**  
**MIGUEL LAGOS-ZÚÑIGA.<sup>3,5</sup>**  
**ELIZABETH RAMÍREZ.<sup>6</sup>**

**RESUMEN**

Los fenómenos de gran escala modulan varios de los fenómenos climáticos a nivel planetario, afectando en Chile patrones espaciales de precipitación y temperatura en distintas regiones y épocas del año. En este trabajo, se analiza la teleconexión entre ENSO y la frecuencia de eventos extremos de precipitación durante los periodos: 1980-2009 (sin megasequía) y 1980-2019 (con megasequía). Para ello, se realizó un análisis de máxima covarianza utilizando anomalías de temperatura superficial del mar y la frecuencia relativa de eventos de precipitación por debajo del percentil 10, y sobre el percentil 90. Los resultados revelan que, durante el periodo 1980-2009, el patrón dominante de covariabilidad para las temporadas analizadas está altamente correlacionado con el índice Niño 3.4 ( $\rho > 0,8$ ), relación que se mantiene en verano para el periodo 1980-2019, pero disminuye en invierno. Al comparar los periodos 1980-2009 y 1980-2019, se observa una disminución en la influencia de ENSO para este último, la cual sugiere la posibilidad de que otros fenómenos podrían estar influyendo más sobre la frecuencia de eventos extremos de precipitación. Estos resultados tienen implicancias relevantes para la gestión futura del recurso hídrico y el diseño o actualización de infraestructura bajo condiciones no estacionarias.

---

<sup>1</sup> Estudiante de pregrado, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: rui.wang.w@ug.uchile.cl

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: pamendoz@uchile.cl

<sup>3</sup> Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center (AMTC)

<sup>4</sup> Amphos 21. – email: felipe.gateno@amphos21.com

<sup>5</sup> Profesor Asistente, Depto. de Obras Civiles, U. Técnica Federico Santa María – email: miguel.lagos@usm.cl

<sup>6</sup> Estudiante de doctorado en Ingeniería Civil, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: elizabeth.ramirez.z@ug.uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es el principal modo de variabilidad climática interanual en el océano Pacífico tropical, con impactos detectables a escala global (McPhaden et al., 2006). El ENSO consiste en anomalías en la temperatura superficial del mar (SST por sus siglas en inglés) en el Pacífico ecuatorial, estrechamente relacionadas con los patrones de circulación atmosférica de Walker y Hadley (Grimm y Tedeschi, 2009).

Las fases cálida (El Niño) y fría (La Niña) del ENSO ocurren con una periodicidad de entre dos y siete años (McPhaden et al., 2006), y se caracterizan por anomalías positivas o negativas en la SST del Pacífico ecuatorial oriental u occidental, respectivamente. Además, estudios previos en todo el mundo, indican que las fases del ENSO se asocian, según la ubicación, a un aumento o una disminución tanto en la frecuencia de días con precipitación como en la magnitud de los eventos (Aceituno, 1988; Cayan et al., 1999; Grimm et al., 2000).

En Chile, los efectos del fenómeno El Niño varían según la latitud. En el norte del país, específicamente en la zona del Altiplano (15–22°S), El Niño se asocia a una disminución de las precipitaciones durante el verano austral (diciembre-febrero). En la zona centro (30°–35°S), suele generar un aumento de las precipitaciones invernales (junio-agosto); en la zona centro-sur (35°S-38°S), se observa un incremento durante la primavera tardía (septiembre-noviembre); mientras que en la zona sur (38°-45°S) predominan condiciones más secas en verano. Al sur de 45°S, la influencia del ENSO tiende a disminuir, a medida que cobra mayor relevancia el Modo Anular del Sur (SAM, por sus siglas en inglés) (Arias et al., 2021). En términos generales, la fase fría del ENSO (La Niña) produce efectos opuestos a los descritos (Aceituno, 1988; Montecinos y Aceituno, 2003; Aceituno et al., 2021; Arias et al., 2021; Gateño et al., 2024).

Diversos estudios han mostrado que el ENSO ejerce una mayor influencia sobre la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación, en comparación con las anomalías en la precipitación acumulada mensual o estacional (Grimm y Tedeschi, 2009; Grimm, 2011). Sin embargo, Garreaud et al. (2020) estudiaron la influencia del ENSO sobre el déficit de precipitaciones en la zona central de Chile durante la megasequía, en donde observaron una limitada influencia de ENSO, puesto que la mayoría de los años presentaron condiciones neutras, e incluso un evento El Niño fuerte en 2015 que no revirtió el déficit de precipitaciones. Esto sugiere que aún persisten brechas de conocimiento sobre cómo el reciente periodo seco podría haber afectado la relación ENSO-precipitación extrema.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es analizar la relación entre la SST y la frecuencia de eventos extremos de precipitación en Chile continental durante el periodo de megasequía, mediante un Análisis de Máxima Covarianza (MCA/SVD, por sus siglas en inglés). Este método permite identificar patrones espaciotemporales conjuntos entre dos campos de variables (McCabe y Wolock, 2014; Sagarika et al., 2015) y hasta donde sabemos, no ha sido aplicado en Chile.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de precipitación diaria promediada a la escala de cuenca en Chile continental fueron obtenidos desde la base de datos CAMELS-CL (Alvarez-Garretón et al., 2018), estas corresponden a estimaciones del producto meteorológico grillado CR2MET v2.5 (Boisier, 2023) con resolución de 0,05 grados de latitud-longitud para el periodo 1979-2019 en las 516 cuencas disponibles en la plataforma (Figura 1). Por su parte, las anomalías mensuales de temperatura superficial del mar para el mismo periodo provienen del producto Kaplan Extended SST V2 – que utiliza la metodología de Kaplan et al. (1998) – proporcionado por NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL), Boulder, Colorado, USA, disponible en <https://psl.noaa.gov>.

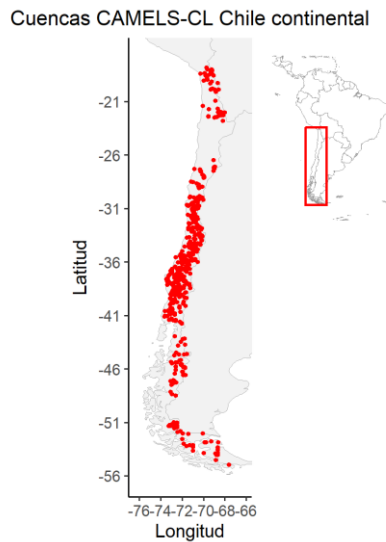


Figura 1. Exutorio de las 516 cuencas de estudio de CAMELS-CL en Chile continental.

Para suavizar las fluctuaciones diarias de los umbrales P10 y P90, se aplicó un filtro Gaussiano de 31 días, también centrado en cada día del año, con el objetivo de evitar variabilidades intranuales tan abruptas entre umbrales. Como resultado, se obtuvo una serie diaria de percentiles para P10 y P90 suavizados para los 365 días del año de cada cuenca.

Luego, se construyeron series diarias binarias en cada cuenca comparando la serie diaria de precipitación, incluyendo los días sin lluvia, con los valores diarios de los percentiles P10 y P90. A cada día se le asignó un valor de 1 si la precipitación fue inferior al P10 o superior al P90, y un valor de 0 en caso contrario.

Posteriormente, para cada cuenca se calcularon frecuencias relativas para cada extremo como la razón entre el número de días que están por debajo de P10 o sobre P90 y la cantidad total de días durante la temporada de interés, permitiendo obtener una medida comparable entre estaciones y años.

A continuación, se realizó un análisis de máxima covarianza (Ecuación 1) para los periodos 1980-2009 (sin megasequía) y 1980-2019 (con megasequía), entre las anomalías promedio de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) y las frecuencias relativas

Siguiendo la metodología propuesta por Cayan et al. (1999), se calcularon los percentiles P10 y P90 de precipitación diaria para cada día del año de cada cuenca, utilizando la función “quantile” de R (R Core Team, 2025) con los valores 0.1 y 0.9, respectivamente, considerando únicamente los días con precipitación distinta de cero. Para ello, se empleó una ventana móvil de 15 días centrada en el día de interés, abarcando todos los años disponibles. Esta estrategia permite aumentar el tamaño de la muestra, y preservar la estacionalidad del régimen de precipitaciones. Para

Para suavizar las fluctuaciones diarias de los umbrales P10 y P90, se aplicó un filtro Gaussiano de 31 días, también centrado en cada día del año, con el objetivo de evitar variabilidades intranuales tan abruptas entre umbrales. Como resultado, se obtuvo una serie diaria de percentiles para P10 y P90 suavizados para los 365 días del año de cada cuenca.

Luego, se construyeron series diarias binarias en cada cuenca comparando la serie diaria de precipitación, incluyendo los días sin lluvia, con los valores diarios de los percentiles P10 y P90. A cada día se le asignó un valor de 1 si la precipitación fue inferior al P10 o superior al P90, y un valor de 0 en caso contrario.

Posteriormente, para cada cuenca se calcularon frecuencias relativas para cada extremo como la razón entre el número de días que están por debajo de P10 o sobre P90 y la cantidad total de días durante la temporada de interés, permitiendo obtener una medida comparable entre estaciones y años.

A continuación, se realizó un análisis de máxima covarianza (Ecuación 1) para los periodos 1980-2009 (sin megasequía) y 1980-2019 (con megasequía), entre las anomalías promedio de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) y las frecuencias relativas

– para la misma temporada – i.e., diciembre-febrero (DEF) y junio-agosto (JJA). Esta decisión se basa en evidencia previa que indica una alta correlación (entre 0,6 y 0,7) entre las anomalías de SST en la región del Pacífico tropical (índice Niño 3.4) y la precipitación en Chile central (Montecinos y Aceituno, 2003; Aceituno et al., 2021). La aplicación de MCA permite identificar patrones espaciales conjuntos entre dos series de datos multivariados, mediante transformaciones lineales que maximizan su covarianza cruzada. De este modo, es posible evaluar cómo varían la fracción de covarianza explicada (a través del espectro de valores singulares, Ecuación 2) y las correlaciones con la SST y la frecuencia de eventos por debajo de P10 y sobre P90, al comparar periodos con y sin la presencia de la megasequía.

$$[S_{x,y}] = [L][\Omega][R]^T \quad (1)$$

$$\frac{\omega_i^2}{\sum \omega_i^2} \quad (2)$$

Luego, se compararon los espectros de valores singulares obtenidos para cada periodo (1980-2009 y 1980-2019) en donde se observaron las variaciones en la fracción de covarianza explicada por cada modo principal. Además, con el fin de encontrar una interpretación física de estos, se analizó la correlación entre los coeficientes temporales asociados a la SST y el índice del ENSO Niño 3.4 (Trenberth, 1997), y se generaron mapas de correlación heterogéneos (e.g., Sagarika et al., 2015) para los dos periodos de interés (1980-2009 y 1980-2019).

### 3. RESULTADOS

En primer lugar, se presenta una comparación entre los espectros de valores singulares de los periodos 1980-2009 y 1980-2019 (Figura 2), asociados a cada combinación de temporada (DEF/JJA) y percentil (P10/P90). Para la temporada DEF y el percentil P10, los dos primeros modos explican un 69% y 15% de la covariabilidad en el periodo 1980–2009, mientras que para el periodo 1980-2019 la varianza explicada es de 71% y 15% para el primer y segundo modo, respectivamente. En la misma temporada, pero para el percentil P90, los primeros dos modos explican un 38% y 22% en el periodo sin megasequía, mientras que en el periodo que incluye la megasequía, el primer modo mantiene la misma fracción (38%) y el segundo aumenta a un 25%.

En la temporada JJA y percentil P10, los dos primeros modos explican un 57% y 20% en el periodo 1980–2009. Para el periodo 1980–2019, el primer modo disminuye a 55%, mientras que el segundo aumenta a 28%. Por último, en JJA y para el percentil P90, los modos principales explican un 43% y 21% en el primer periodo, aumentando a 60% y disminuyendo a 15%, respectivamente, en el segundo periodo.

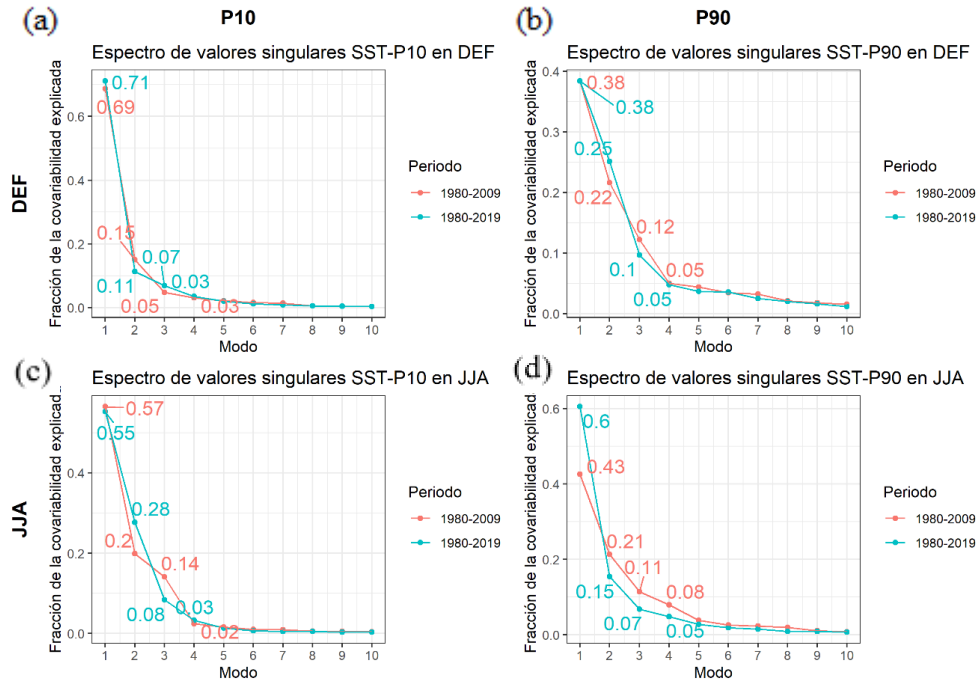


Figura 2. Espectro de valores singulares para las distintas combinaciones de temporada y percentil en cada periodo. (a) DEF-P10. (b) DEF-P90. (c) JJA-P10. (d) JJA-P90.

### 3.1. Relación entre la SST y P10 durante el verano austral (DEF)

Para describir la relación entre la SST y el percentil P10, el análisis se centra en el primer modo, el cual explica cerca del 70% de la covariabilidad en ambos periodos. En la Figura 3a, el patrón espacial identificado corresponde a la fase fría de ENSO (La Niña): cuando disminuye la SST en el Pacífico ecuatorial durante la temporada DEF, se observa una disminución en la frecuencia de eventos por debajo de P10, en el norte del país, así como también en algunas cuencas del sur, mientras que en la zona centro, la frecuencia de eventos extremos secos aumenta. La correlación de Spearman entre los coeficientes temporales de SST del modo 1 y el índice Niño 3.4 alcanza un valor de 0,94, siendo estadísticamente significativa, lo que confirma que este modo representa adecuadamente a ENSO.

En el periodo que incluye la megasequía (Figura 3b) se obtienen patrones espaciales similares, aunque algunas celdas oceánicas ganan significancia estadística y, en general, se da una leve disminución en la correlación con el modo 1; tanto en los píxeles de la SST como en las cuencas; además, se pierde la significancia estadística en una parte considerable de las cuencas de la zona centro. Sin embargo, la correlación entre los coeficientes temporales de la SST y el índice Niño 3.4 aumenta ligeramente a 0,95, manteniéndose estadísticamente significativa, lo cual sugiere que, los coeficientes temporales de la SST para el modo 1 continúan representando la señal de ENSO.

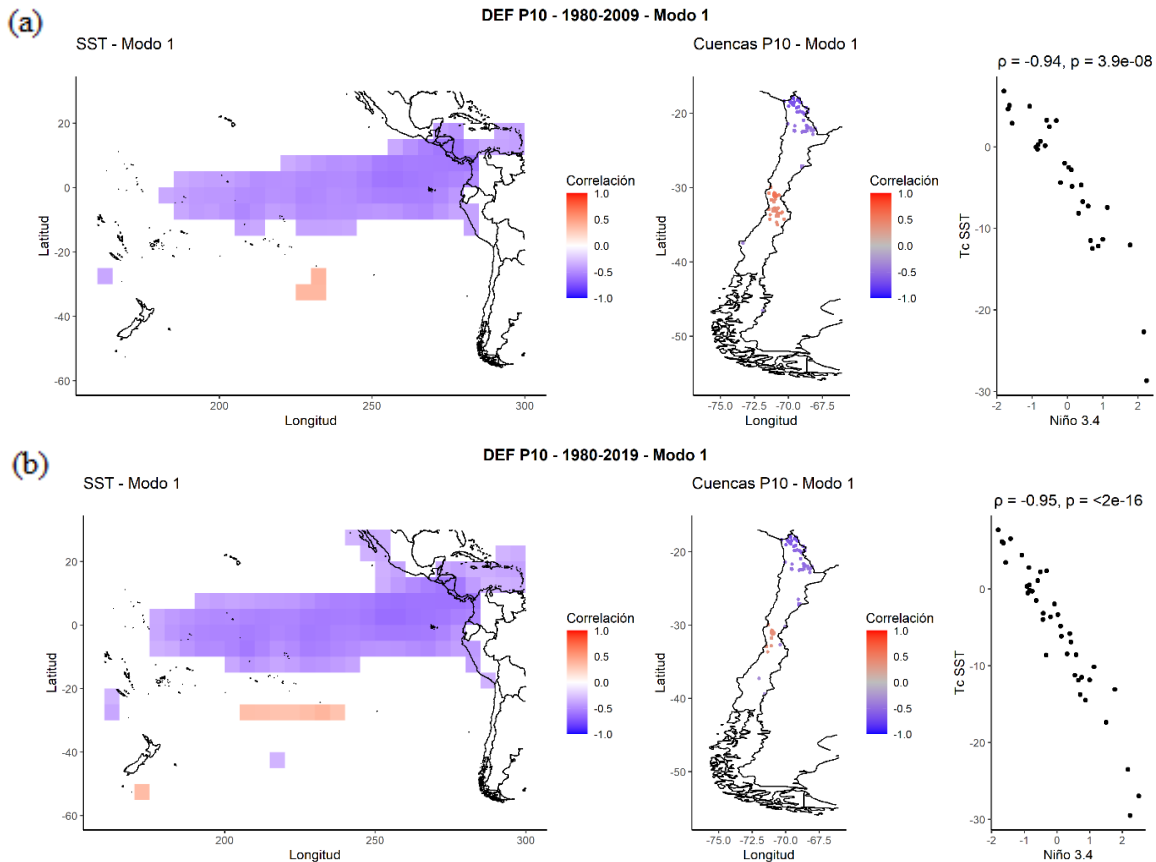


Figura 3. Mapas de correlación heterogéneos para el modo 1 entre las anomalías de la SST y la frecuencia de eventos de precipitación por debajo de P10 para el verano austral (DEF), junto con la correlación de Spearman entre los coeficientes temporales de la SST y el índice Niño 3.4 para DEF. Se filtran aquellas celdas oceánicas y cuencas que no presentan correlaciones estadísticamente significativas con un nivel de significancia de 0,05. (a) Periodo 1980–2009. (b) Periodo 1980–2019.

### 3.2. Relación entre la SST y P90 durante el verano austral (DEF)

Para el caso del percentil 90, el patrón identificado corresponde a la fase cálida de ENSO (El Niño), caracterizado por un aumento en la frecuencia de eventos extremos húmedos en la zona centro del país durante el verano, y una disminución en las zonas norte y sur durante dicha estación. Durante el periodo sin megasequía (1980-2009, Figura 4a), la correlación entre los coeficientes temporales de la SST del modo 1 y el índice Niño 3.4 es de 0,96, mientras que en el periodo con megasequía (1980-2019, Figura 4b) disminuye a 0,92. En ambos casos, la correlación es estadísticamente significativa, lo que permite afirmar que el modo 1 representa de manera robusta a ENSO.

Respecto a las diferencias entre ambos periodos, se observa que, al considerar los años de la megasequía, se pierde la significancia estadística en una parte considerable de las celdas oceánicas asociadas al patrón clásico de ENSO en la región Niño 3.4, además de una disminución en la magnitud de la correlación. Por otra parte, las pocas cuencas del norte que presentaban correlaciones estadísticamente significativas en el periodo sin megasequía las pierden, al igual que gran parte de las cuencas de la zona centro y en el extremo sur (al sur

de 45°S). Sin embargo, se identifica un grupo de cuencas entre 35°-45°S que ganan significancia estadística en el periodo con megasequía.

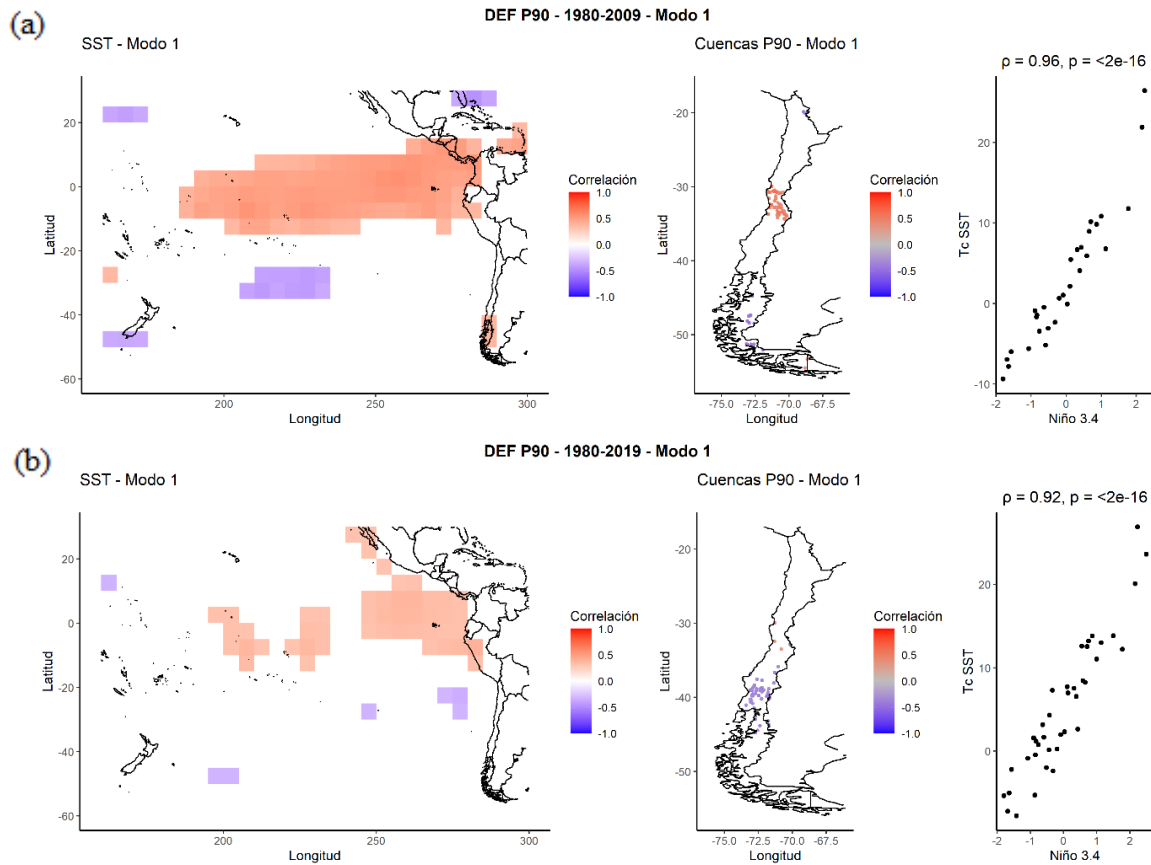


Figura 4. Mapas de correlación heterogéneos para el modo 1 entre las anomalías de la SST y la frecuencia de eventos de precipitación por sobre P90 para el verano austral (DEF), junto con la correlación de Spearman entre los coeficientes temporales de la SST y el índice Niño 3.4 para DEF. Se filtran aquellas celdas oceánicas y cuencas que no presentan correlaciones estadísticamente significativas con un nivel de significancia de 0,05. (a) Periodo 1980–2009. (b) Periodo 1980–2019.

### 3.3. Relación entre la SST y P10 durante el invierno austral (JJA)

En la Figura 5a, correspondiente al periodo sin megasequía (1980-2009), se identifica la fase El Niño, el cual se asocia a una disminución en la frecuencia de eventos por debajo de P10 entre aproximadamente 25° y 40°S, y a un aumento en algunas cuencas al sur de 40°S. En este periodo, la correlación entre los coeficientes temporales de la SST del modo 1 y el índice Niño 3.4 es de 0,84. En contraste, la Figura 5b, correspondiente al periodo con megasequía (1980-2019), identifica un patrón similar a la fase La Niña, obteniéndose un aumento en la frecuencia de eventos por debajo de P10 al sur de 25°S y al norte de 40°S, y una disminución al sur de 45°S.

Al incluir el periodo de megasequía, disminuye la magnitud de la correlación y la significancia estadística de gran parte de las celdas oceánicas asociadas al patrón clásico de ENSO. Un comportamiento similar se presenta en las cuencas, especialmente en aquellas ubicadas cerca de los límites espaciales identificados para el periodo sin megasequía (1980-

2009): al norte, en torno a 27°S (Caldera); al sur, en cuencas cordilleranas próximas a los 35°S (Linares); y en sectores costeros cercanos a los 40°S (Valdivia). Por otra parte, la correlación entre los coeficientes temporales de la SST del modo 1 y el índice Niño 3.4 disminuye a 0,42, con signo contrario, reflejando la fase opuesta, sin embargo, también existe la posibilidad de que esté representando otro patrón climático de gran escala. A pesar de que esta correlación sigue siendo estadísticamente significativa, se encuentra cerca del umbral del 0,5% de significancia.

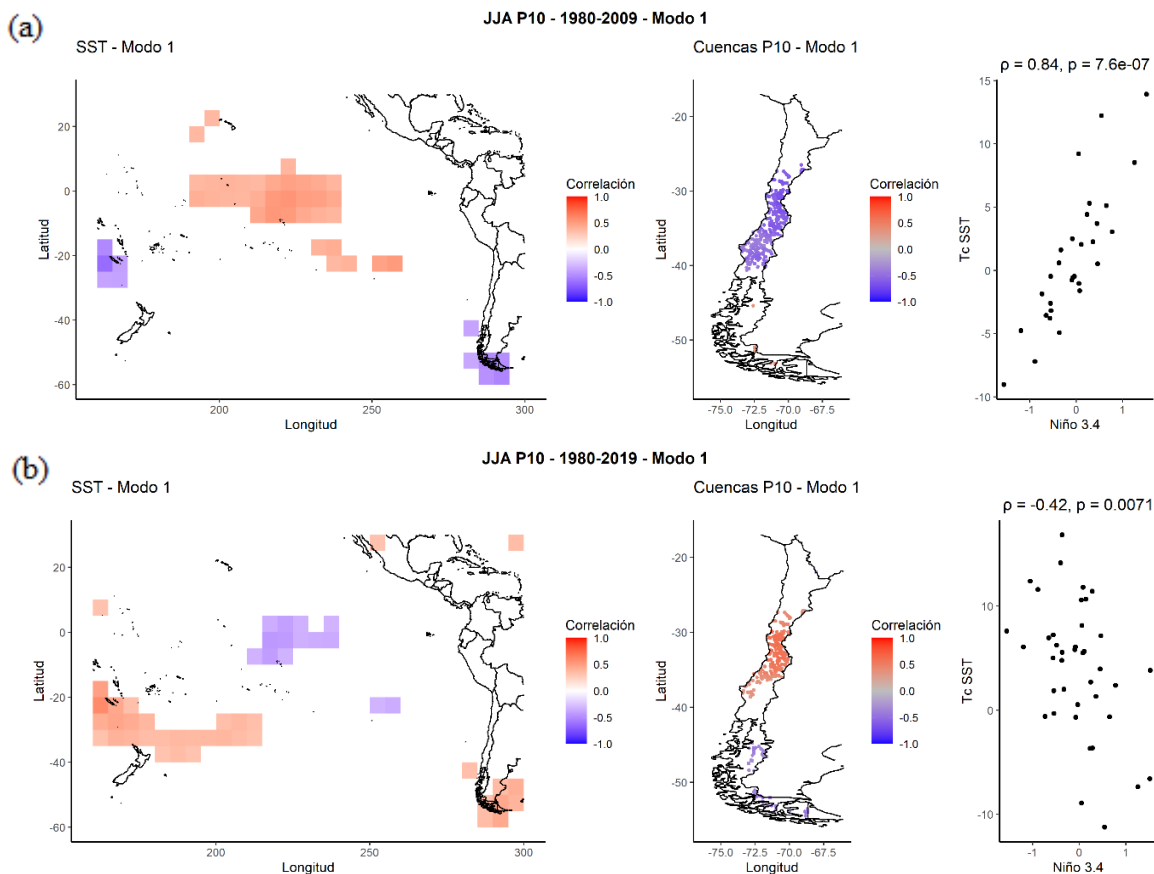


Figura 5. Mapas de correlación heterogéneos para el modo 1 entre las anomalías de la SST y la frecuencia de eventos de precipitación por debajo de P10 para el invierno austral (JJA), junto con la correlación de Spearman entre los coeficientes temporales de la SST y el índice Niño 3.4 para JJA. Se filtran aquellas celdas oceánicas y cuencas que no presentan correlaciones estadísticamente significativas con un nivel de significancia de 0,05. (a) Periodo 1980–2009. (b) Periodo 1980–2019.

### 3.4. Relación entre la SST y P90 durante el invierno austral (JJA)

Para el caso del percentil 90 en temporada JJA, la Figura 6a, correspondiente al periodo sin megasequía (1980-2009), se identifica un patrón asociado La Niña, el cual se caracteriza por una disminución en la frecuencia de eventos por sobre P90, principalmente en la zona centro del país, así como en algunas cuencas en la zona norte. Este último resultado puede atribuirse a que dichas cuencas se ubican más cerca de la costa que del Altiplano, donde el comportamiento podría diferir. La correlación entre los coeficientes temporales de la SST del modo 1 y el índice Niño 3.4 es de 0,81, siendo estadísticamente significativa.

Durante el periodo con megasequía (1980-2019, Figura 6b), se observa una disminución en la magnitud de las correlaciones y una pérdida de significancia estadística tanto en las celdas oceánicas asociadas al patrón clásico de ENSO como en las cuencas identificadas previamente en el norte. Sin embargo, se gana significancia estadística en cuencas ubicadas en torno a los  $\sim 38^{\circ}\text{S}$  y en algunas más al sur. En este periodo, la correlación entre los coeficientes temporales de la SST del modo 1 y el índice Niño 3.4 disminuye a 0,45, manteniéndose estadísticamente significativa, aunque con un p-valor cercano al umbral del 0,5%.

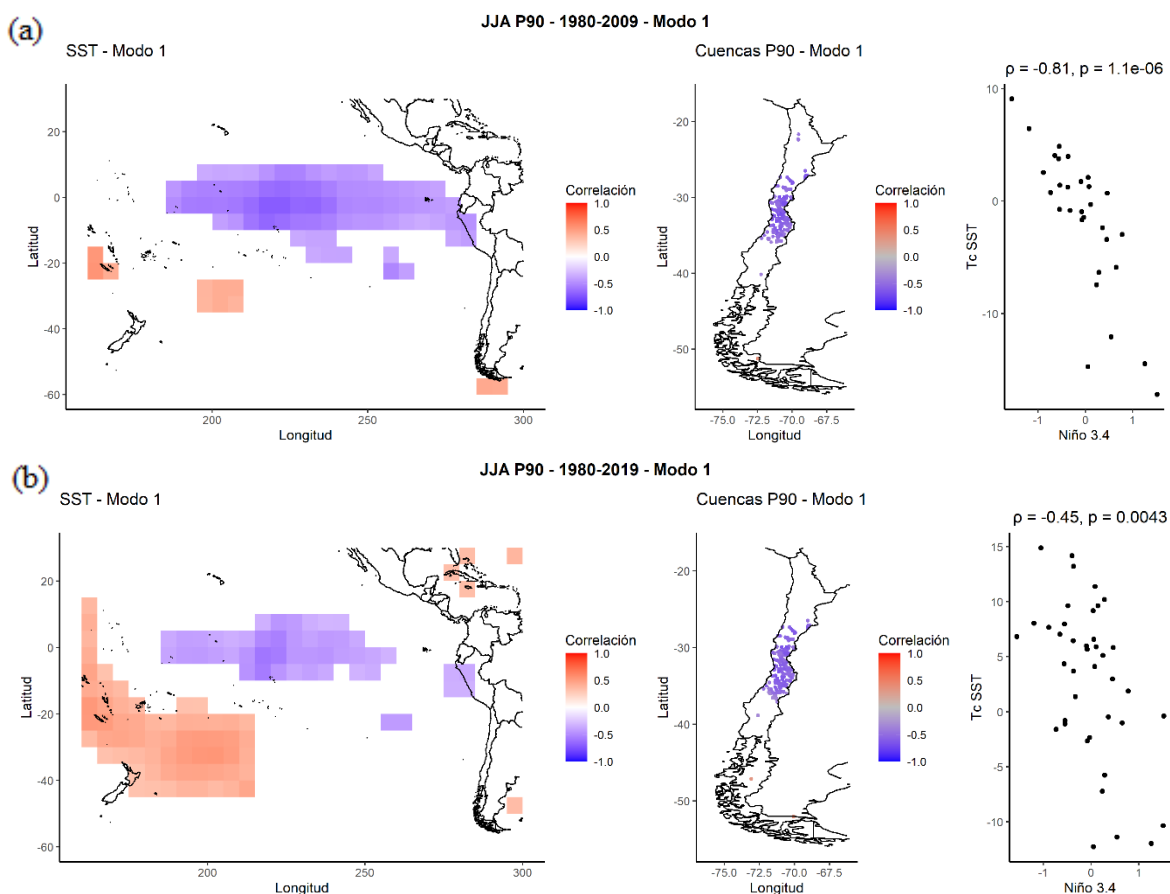


Figura 6. Mapas de correlación heterogéneos para el modo 1 entre las anomalías de la SST y la frecuencia de eventos de precipitación por sobre P90 para el invierno austral (JJA), junto con la correlación de Spearman entre los coeficientes temporales de la SST y el índice Niño 3.4 para JJA. Se filtran aquellas celdas oceánicas y cuencas que no presentan correlaciones estadísticamente significativas con un nivel de significancia de 0,05. (a) Periodo 1980–2009. (b) Periodo 1980–2019.

En la Tabla 1 se observa que, en el periodo con megasequía (1980–2019), en tres de las cuatro combinaciones (DEF-P90, JJA-P10 y JJA-P90), la correlación entre los coeficientes temporales del modo 1 de la SST y el índice Niño 3.4 disminuye. En contraste, presentan un aumento en la magnitud de la correlación para el modo 2, ganando significancia estadística.

Tabla 1. Correlación de Spearman entre los coeficientes temporales de SST de los modos 1 y 2 con el índice Niño 3.4 de cada periodo, temporada y percentil.

Periodo	Temporada	Percentil	$\rho$ modo 1	p modo 1	$\rho$ modo 2	p modo 2
1980-2009	DEF	P10	-0,94	< 0,05	-0,54	< 0,05
		P90	0,96	< 0,05	0,19	0,32
	JJA	P10	0,84	< 0,05	-0,15	0,44
		P90	-0,81	< 0,05	0,1	0,59
1980-2019	DEF	P10	-0,95	< 0,05	-0,09	0,57
		P90	0,92	< 0,05	0,76	< 0,05
	JJA	P10	-0,42	< 0,05	-0,52	< 0,05
		P90	-0,45	< 0,05	-0,46	< 0,05

Las Tablas 2 y 3 presentan un resumen de los resultados obtenidos. En términos generales, la fase El Niño se asocia a un aumento en la frecuencia de eventos por sobre P90 en la zona central y a una disminución en el sur, mientras que ocurre lo contrario para los eventos por debajo de P10: disminuyen en la zona central y aumentan en el sur. En contraste, la fase La Niña genera efectos opuestos sobre la precipitación, además de una reducción en la frecuencia de eventos por debajo de P10 en el norte del país.

Al considerar el periodo que incluye la megasequía (1980–2019), las relaciones descritas entre las fases del ENSO y la frecuencia de eventos por debajo de P10 o sobre P90 se mantienen. No obstante, se observa una disminución en la magnitud de las correlaciones entre la SST de las celdas oceánicas y la frecuencia relativa de eventos de precipitación de las cuencas con el modo 1 en el periodo 1980-2019 en comparación al periodo sin megasequía (1980-2009). Cabe destacar que, para la temporada JJA y el percentil P10, se identifican fases opuestas entre ambos periodos, lo que se refleja en el cambio de signo de las correlaciones correspondientes.

Tabla 2. Resumen de resultados por periodo, temporada y percentil. Fase del ENSO identificada, y disminución o aumento en la frecuencia de eventos de precipitación por debajo de P10 o sobre P90 en cada zona.

Periodo	Temporada	Percentil	Fase ENSO	Norte	Centro	Sur
1980-2009	DEF	P10	Niña	Disminución	Aumento	-
		P90	Niño	-	Aumento	Disminución
	JJA	P10	Niño	-	Disminución	Aumento
		P90	Niña	-	Disminución	-
1980-2019	DEF	P10	Niña	Disminución	Aumento	-
		P90	Niño	-	Aumento	Disminución
	JJA	P10	Niña	-	Aumento	Disminución
		P90	Niña	-	Disminución	-

Tabla 3. Fracción de la covarianza explicada por los modos 1 y 2. Correlación máxima y mínima de la SST de las celdas oceánicas y de la frecuencia de eventos de precipitación por debajo de P10 y sobre P90 de las cuencas con el modo 1. De cada periodo, temporada y percentil.

Periodo	Temporada	Percentil	Modo 1	Modo 2	Máx. celdas	Min. celdas	Máx. cuencas	Min. cuencas
1980-2009	DEF	P10	0,69	0,15	0,51	-0,67	0,64	-0,72
		P90	0,38	0,22	0,58	-0,54	0,61	-0,47
	JJA	P10	0,57	0,20	0,55	-0,68	0,39	-0,71
		P90	0,43	0,21	0,66	-0,71	0,38	-0,71
1980-2019	DEF	P10	0,71	0,11	0,47	-0,63	0,41	-0,68
		P90	0,38	0,25	0,45	-0,45	0,41	-0,40
	JJA	P10	0,55	0,28	0,59	-0,44	0,63	-0,47
		P90	0,60	0,15	0,61	-0,59	0,41	-0,66

#### 4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos son coherentes con la literatura, en particular con la evidencia de los efectos de las fases del ENSO sobre la precipitación en Chile continental. La fase cálida (El Niño) se ha asociado históricamente a un aumento de las precipitaciones en la zona central del país durante el invierno austral, así como a una disminución en las precipitaciones en el norte y sur durante el verano austral. En contraste, la fase fría (La Niña) genera efectos opuestos (Aceituno et al., 2021; Arias et al., 2021).

Por otra parte, la disminución en la correlación entre los coeficientes temporales del modo 1 de la SST y el índice Niño 3.4, junto con el aumento de dicha correlación para el modo 2 en tres de las cuatro combinaciones analizadas (DEF-P90, JJA-P10 y JJA-P90), sugiere que el patrón asociado al ENSO podría estar desplazándose hacia el segundo modo, lo que podría implicar que el ENSO esté explicando una menor fracción de la covariabilidad de los datos al incluir el periodo de megasequía (1980-2019). Adicionalmente, para estas mismas combinaciones, la pérdida de significancia estadística en las cuencas del norte y el aumento en las del sur, refuerzan la idea de que el modo 1 – el cual explica la mayor fracción de la covariabilidad de los datos – podría estar empezando a capturar la influencia de otros modos de variabilidad climática, como el Modo Anular del Sur (SAM) (Gong y Wang, 1999).

Un hallazgo relevante se observa durante la temporada de verano austral (DEF), donde la correlación entre los coeficientes temporales del modo 1 de la SST y el índice Niño 3.4 se mantiene por sobre 0,9 para ambos percentiles al considerar el periodo de megasequía (1980–2019). Futuros trabajos podrían investigar las potenciales causas de este hallazgo y también explorar los resultados utilizando los umbrales P10 y P90 sin suavizar.

En este contexto, los resultados de este estudio indican que, si bien las distintas fases del ENSO describen los mismos comportamientos sobre la precipitación de Chile continental, la intensidad de su teleconexión ha disminuido durante el periodo que incluye la megasequía (1980–2019), lo que concuerda con los hallazgos de Garreaud et al. (2020).

## 5. CONCLUSIONES

La aplicación de Análisis de Máxima Covarianza (MCA) a series de anomalías de temperatura superficial del mar (SST) y frecuencia de eventos extremos de precipitación en Chile continental revela que el modo dominante de covariabilidad está asociado a las distintas fases de ENSO (La Niña/El Niño), lo cual es coherente con la literatura existente.

La comparación de resultados obtenidos en los periodos 1980–2009 y 1980–2019, revela una disminución de la influencia del ENSO sobre la frecuencia de eventos de precipitación por debajo de P10 y sobre P90, particularmente en los eventos por sobre P90 durante el verano austral (DEF) y en ambos tipos eventos durante el invierno austral (JJA) en el periodo que incluye la megasequía (1980-2019). Asimismo, los resultados sugieren que otros modos de variabilidad climática o el cambio climático antrópico podrían estar adquiriendo mayor relevancia sobre la frecuencia de eventos extremos de precipitación. Esta conclusión es altamente relevante desde la perspectiva de la gestión sustentable de los recursos hídricos y el diseño o actualización de infraestructura bajo condiciones no estacionarias.

Futuros análisis deberían explorar la relación con otros modos de variabilidad climática, como la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO) (Mantua et al., 1997) y el Modo Anular del Sur (SAM) (Gong y Wang, 1999), y los efectos del cambio climático de origen antrópico sobre la frecuencia e intensificación de los eventos extremos de precipitación.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece los comentarios del profesor Franco Ricchetti y de los compañeros Antonia Iturbe y Jesús Ugarte. Asimismo, al Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) por el uso de la plataforma CAMELS-CL, y a la NOAA Physical Sciences Laboratory por el producto Kaplan Extended SST V2.

## REFERENCIAS

- Aceituno, P. (1988). On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Monthly Weather Review*, 116(3), 505–524. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<0505:OTFOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<0505:OTFOTS>2.0.CO;2)
- Aceituno, P., Boisier, J. P., Garreaud, R., Rondanelli, R., & Rutllant, J. A. (2021). Climate and Weather in Chile. *World Water Resources*, 8, 7–29. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_2)
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/HESS-22-5817-2018>
- Arias, P. A., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J. C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L., & van Oevelen, P. J. (2021). Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate Variability and Sub-Continental Patterns. *Frontiers in Earth Science*, 8, 505467. <https://doi.org/10.3389/FEART.2020.505467/XML>
- Juan P. Boisier. (2023). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile. (v2.5) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682>

Cayan, D. R., Redmond, K. T., & Riddle, L. G. (1999). ENSO and Hydrologic Extremes in the Western United States. *Journal of Climate*, 12(9), 2881–2893. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2881:EAHEIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2881:EAHEIT>2.0.CO;2)

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/JOC.6219>

Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code genealogy. *Climatic Change* 2024 177:6, 177(6), 1–33. <https://doi.org/10.1007/S10584-024-03742-1>

Gong, D., & Wang, S. (1999). Definition of Antarctic oscillation index. *Geophysical Research Letters*, 26(4), 459–462. <https://doi.org/10.1029/1999GL900003:PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION>

Grimm, A. M. (2011). Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 537–554. <https://doi.org/10.1007/S00477-010-0420-1/FIGURES/14>

Grimm, A. M., Barros, V. R., & Doyle, M. E. (2000). Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*, 13(1), 35–58. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2)

Grimm, A. M., & Tedeschi, R. G. (2009). ENSO and Extreme Rainfall Events in South America. *Journal of Climate*, 22(7), 1589–1609. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2429.1>

Kaplan, A., Cane, M. A., Kushnir, Y., Clement, A. C., Blumenthal, M. B., & Rajagopalan, B. (1998). Analyses of global sea surface temperature 1856–1991. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C9), 18567–18589. <https://doi.org/10.1029/97JC01736>

Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production\*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069–1080. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)

McCabe, G. J., & Wolock, D. M. (2014). Variability Common to Global Sea Surface Temperatures and Runoff in the Conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 15(2), 714–725. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-097.1>

McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, 314(5806), 1740–1745. [https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1132588/ASSET/AICC82B0-76AD-4D25-B3CA-473203FB8602/ASSETS/GRAPHIC/314\\_1740\\_F3.JPEG](https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1132588/ASSET/AICC82B0-76AD-4D25-B3CA-473203FB8602/ASSETS/GRAPHIC/314_1740_F3.JPEG)

Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate*, 16(2), 281–296. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2)

R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.

Sagarika, S., Kalra, A., & Ahmad, S. (2015). Interconnections between oceanic–atmospheric indices and variability in the U.S. streamflow. *Journal of Hydrology*, 525, 724–736. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.04.020>

Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771–2778. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2)