



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Relación entre olas de calor y variación de caudal en cuencas cordilleranas debido al derretimiento de hielo y nieve

Por

JAVIERA BELÉN RAMÍREZ DELGADO

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la
Universidad de Concepción para optar al grado título profesional de
Geofísica

Profesor Guía: Dr. Martín Jacques-Coper

**Comisión evaluadora: Dra. Camila Álvarez-Garretón,
Dra. Flavia Burger Acevedo**

2021

Concepción, Chile

© 2021, Javiera Ramírez Delgado

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo a mi familia: Gisela, José Miguel, Javier, Carolina, Isabel y Tomás. Por su apoyo incondicional, su gigantesco cariño, amor y sobretodo paciencia durante todos estos años. También les agradezco por ayudarme y motivarme a lograr mis metas y sueños.

Agradezco a mis amigas y amigos de la vida y a los que he hecho en este camino, por la compañía, consejos, momentos buenos, alegres y no tan alegres que viví en esta etapa.

Agradezco a mis profesores de Geofísica por el conocimiento aprendido, su apoyo y consejos. Le doy las gracias especialmente a mi profesor guía Martín Jacques-Coper por su disponibilidad, preocupación, apoyo y principalmente por asesorarme y enseñarme nuevos conocimientos durante este proceso. También agradezco al Centro del Clima y la Resiliencia (CR2) por financiar esta investigación en el marco del proyecto FONDAP 15110009.

Hago un agradecimiento especial a mis mascotas, Janis, Julieta y Almendra por la compañía durante largos periodos de estudio.

Resumen

La Cordillera de los Andes da lugar a una extensa área cubierta por glaciares. En efecto, el 79 % de la superficie glacial sudamericana se ubica en Chile, donde ocurren variaciones de los glaciares, parcialmente en su relación con procesos atmosféricos de escala local, regional y atmosférica. El aumento de la temperatura del aire desde finales de la década de 1970 y la disminución de las precipitaciones observadas en Chile en los últimos 10 años, han sido parcialmente asociados con las fluctuaciones de los glaciares, que han estado sufriendo grandes retrocesos en los últimos años (2002-2018). Estudios previos han encontrado relación entre olas de calor (OC) de verano en Europa y grandes crecidas de caudales originados de fusión de nieve. Sin embargo, para las cuencas andinas (CA), es escasa la información de cómo las OC impactan en los glaciares y en la cobertura de nieve, y por lo tanto en los caudales. Por consiguiente, este estudio se enfoca en la variabilidad climática de alta frecuencia (escala sinóptica a intraestacional, i.e. de días a semanas), tras descontar el ciclo anual y la variabilidad interanual del caudal. Específicamente en eventos de OC y en cómo estas producen un aumento de caudal en CA ubicadas en la zona centro, sur y austral de Chile, donde el incremento de caudal está fuertemente asociado al derretimiento de nieve. El área de estudio se limitó entre 32° – 56° S y 76° – 66° W. Los datos utilizados corresponden a información hidrológica obtenida de CAMELS-CL, observaciones meteorológicas DMC (Dirección Meteorológica de Chile) y variables atmosféricas del reanálisis ERA5 durante el periodo de verano extendido (noviembre-marzo) de 1980-2016. Se analizaron anomalías intraestacionales de temperatura máxima, caudal, evapotranspiración potencial y probabilidad de precipitación. Se examinó un total de 32 cuencas ubicadas en diferentes latitudes, de las cuales 14 mostraron señales promedio de aumento de caudal comparable a la desviación típica de alta frecuencia típica del verano. Por lo general, dicha respuesta de caudal a OC se

observa con un desfase de 2-3 días desde que comienza la OC, lo que induce un cambio de régimen de caudal. Un factor relevante en el aumento de caudal es el tamaño de cada CA. A mayor tamaño de cuenca, mayores son las anomalías positivas de caudal y su persistencia. Se confirma que características como la latitud, limitación de nieve o temperatura de cada CA definen la variación de caudal. Finalmente, estudios de caso indican que las OC presentan un patrón de circulación de ondas que se propaga por el Pacífico Sur, confirmando resultados previos que destacan el rol de teleconexiones en la génesis de estos eventos.

Keywords – Andes, olas de calor, cuenca, caudal, aumento

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Andes centrales: clima y variabilidad	1
1.1.2. Glaciares Andinos	3
1.2. Hipótesis y Objetivos	8
1.3. Organización de Tesis	8
2. Área de Estudio y Datos	10
2.1. Área de Estudio	10
2.2. Datos	11
2.2.1. Olas de Calor	11
2.2.2. CAMELS-CL	11
2.2.3. ERA 5	14
3. Metodología	15
3.1. Eventos de Olas de Calor	15
3.2. Variables analizadas	16
3.3. Anomalías y Z-Score	17
3.3.1. Normalización de series (Z-Score)	18
3.3.2. Spaghetti Plot	18
3.4. Parámetros y Test de Variación de Caudal	19
3.4.1. Parámetro 1	19
3.4.2. Parámetro 2	20
3.4.3. Test de Rodionov	20
3.5. Persistencia e Intensidad de Temperatura Máxima en Cuencas Cordilleranas	22
3.5.1. Persistencia	22
3.5.2. Intensidad	23
3.6. Scatterplot y Regresión Lineal	23
3.6.1. Coeficiente de Correlación Lineal de Pearson	23
3.6.2. Regresión Lineal	23

3.7. Precipitación Sólida	24
4. Resultados	26
4.1. Olas de Calor	26
4.2. Variación de Caudal	30
4.2.1. Disminución de Caudal	34
4.2.2. Aumento de Caudal	35
4.2.2.1. Parámetro I	37
4.2.2.2. Parámetro II	38
4.2.2.3. Test de Rodionov	39
4.2.3. Relación entre caudal, características de las cuencas y de las OC	43
4.2.3.1. Área de la cuenca	44
4.2.3.2. El Niño Oscilación del Sur (ENOS)	46
4.2.3.3. Nieve Invernal	48
4.2.3.4. Análisis de dos cuencas particulares	49
4.3. Estudios de caso	52
4.3.1. Río Maipo y Río Colorado	52
4.3.2. Río Serrano	55
4.3.3. Análisis de gran escala de la circulación atmosférica asociada a los eventos de caso	57
5. Discusión	62
5.1. Respuesta de caudal a intensidad y duración de olas de calor . . .	62
5.2. Diferente comportamiento de caudal entre cuencas	63
5.2.1. Factores relevantes en respuesta de caudal	68
5.2.2. Tiempo de respuesta	68
5.3. Análisis Sinóptico y de Gran Escala	69
6. Conclusión	70

Índice de cuadros

2.2.1.Estaciones DMC cuyos eventos de OC fueron empleados en este estudio.	12
2.2.2.Datos utilizados para el estudio. Columnas representan: 1) fuente de datos, 2) variable a utilizar, 3) frecuencia temporal de cada variable, 4) periodo original, 5) periodo a utilizar de cada variable.	14
4.2.1.Estadísticas de caudal por cuenca. Columnas representan: 1) Nombre cuenca, 2) extensión de registro de caudal disponible (año inicio-año final) y/o año faltante, 3) fracción disponibilidad del registro considerando 37 años, 4) Número de eventos totales de OC en estación DMC de referencia, 5) fracción de registros de eventos OC dentro del periodo disponible de datos de caudal, 6) caudal promedio absoluto, 7) desviación estándar de régimen absoluto, 8) caudal promedio de anomalías SY-IS, 9) desviación estándar de anomalías SY-IS de caudal. Las estadísticas fueron calculadas tomando el periodo 1980-2016 durante el verano extendido (noviembre a marzo).	36
4.2.2.Cuencas que muestran aumento de caudal según parámetro 1. Columnas representan: 1) Nombre cuenca, 2) Área de cuenca.	44
4.2.3.Cantidad de olas de calor que transcurren en la fase de El Niño, La Niña o neutro, para diferentes cuencas.	47
5.2.1.Cuantificación de los aumentos de caudal por OC en las cuencas identificadas. Las columnas representan: 1) nombre cuenca; 2) día de máximo aumento promedio (MAP) c/r OC (día 0); 3) MAP [z-score]; 4) MAP en señal SY-IS [m^3/s], usando ecuación (3.3.2); 5) caudal máximo absoluto, obtenido de caudal promedio absoluto más MAP en señal SY-IS (ver cuadro 4.2.1) ; 6) MAP en señal SY-IS como porcentaje del promedio de verano del caudal absoluto [%] (ver Cuadro 4.2.1); 7) MAP en señal SY-IS como porcentaje de la desviación estándar de verano del caudal absoluto [%] (ver Cuadro 4.2.1).	67

Índice de figuras

2.2.1. Mapa de las 30 cuencas seleccionadas (polígonos de colores) y estaciones meteorológicas DMC (ícono de localización). La leyenda de colores representa la asignación de cuencas a cada estación meteorológica.	13
4.1.1.a) Series de verano extendido de Río Maipo con datos de variable de caudal originales (valores absolutos). Línea negra representa la mediana climatológica, b) Histograma de datos de caudal originales, c) Series de verano extendido de Río Maipo de anomalías simples, obtenidas tras extraer la mediana climatológica, d) Histograma de anomalías simples de caudal de c), e) Series de verano extendido de Río Maipo de anomalías intraestacionales (SY-IS), f) Histograma de anomalías intraestacionales de caudal.	27
4.1.2. Series de caudal de verano extendido para los años 1982 y 2009, en ambas se comparan los datos de caudal originales (negro), anomalías sin la mediana climatológica (azul) y finalmente anomalías intraestacionales (rojo).	28
4.1.3.a) Intensidad promedio de anomalías de temperatura máxima de OC en cada cuenca (periodo 1980-2016), según estación DMC de referencia, b) Como en a), pero para persistencia de OC. Rombos azules representan las estaciones DMC ubicadas en las capitales regionales, círculos representan las cuencas cordilleranas.	29
4.1.4. Señal de anomalías SY-IS de temperatura máxima promedio (periodo 1980-2016) para la cuenca (rojo) y estación meteorológica DMC de referencia (negro) para 10 días antes y 10 días después de que comienza el evento de ola de calor, designado como día 0. . . .	30
4.2.1. Valores promedio de Z-Score de caudal de cada cuenca a lo largo de una secuencia centrada en el comienzo de una OC (día 0). Triángulos invertidos representan las cuencas que muestran una disminución de caudal los días de olas de calor. Triángulos con vértice hacia arriba representan las cuencas que muestran un aumento de caudal los días de olas de calor. Día 0 corresponde al primer día del evento, se muestra los días -4, -2, 0, +2, +4. El tamaño de los triángulos varía con el área de la cuenca.	31

4.2.2.Z-Score de caudal promedio (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) para grupos con variación de caudal mayor y menor a 0% utilizando parámetro 1 para identificar cuencas y su comportamiento los días posteriores que ocurre una ola de calor, líneas de colores representa la señal media de caudal en Z-score de cada cuenca, línea negra representa la media, línea segmentada la mediana de las líneas de colores (a,b). Para ambos grupos se encuentra su respectivo violinplot de caudal (c,d) y violinplot de PET (e,f). Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	32
4.2.3.a) Variación porcentual promedio de caudal con respecto a la intensidad media de ola de calor para cada cuenca. Se establecen 2 grupos según el signo de la variación de caudal (aumento o disminución, (porcentaje positivo o negativo), respectivamente), b) Variación SY-IS de caudal con respecto a la persistencia de ola de calor para cada cuenca. La variación de caudal se obtuvo utilizando el parámetro 1 de la señal media de cada cuenca. En cada gráfico de dispersión se observan con círculos cuencas cuya latitud se encuentra al norte de 39°S y en rombos cuencas al sur de 39°S. Las rectas de regresión lineal para cuencas que muestran aumento de caudal se muestran en líneas rojas sólidas y las que muestran disminución en líneas rojas segmentadas. r da el valor del coeficiente de correlación e y entrega el valor de tendencia lineal.	33
4.2.4.a) Señal z-score (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) de disminución de caudal tras el día 0 de una OC, identificada en un total de 16 cuencas y su respectivo nombre. El gradiente de color celeste a morado indica cuencas desde el norte hacia el sur respectivamente, la línea negra representa la media de señal de caudal y línea segmentada la mediana. b) Violinplot de disminución de caudal para las 16 cuencas. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	35
4.2.5.a) Señal z-score (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) de aumento de caudal promedio tras el día 0 de una OC, identificada en un total de 14 cuencas y su respectivo nombre. El gradiente de color celeste a morado indica cuencas desde el norte hacia el sur respectivamente, la línea negra representa la media de señal de caudal y línea segmentada la mediana. b) Violinplot de aumento de caudal para las 14 cuencas. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	37

4.2.6.a) Señal z-score (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) de aumento de caudal promedio (mayor o igual a 9%) tras el día 0 de una OC, identificada en un total de 12 cuencas y su respectivo nombre. El gradiente de color celeste a morado indica cuencas desde el norte hacia el sur respectivamente, la línea negra representa la media de señal de caudal y línea segmentada la mediana. b) Violinplot de aumento de caudal para las 12 cuencas. c) violinplot de PET para cada una de las 12 cuencas. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	39
4.2.7.a) Cuencas que presentan una señal de aumento de caudal z-score promedio (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) tipo cambio de régimen, según el test de Rodionov. Las cuencas se identifican con su nombre; el gradiente de color celeste a morado indica cuencas desde el norte hacia el sur. Línea negra representa la media y línea segmentada representa la mediana de las series de colores. b) similar al panel a), pero utilizando violinplot para graficar el aumento de caudal para las 10 cuencas. c) similar al panel b), pero para la variable PET. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	40
4.2.8. Señales z-score promedio (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) en las cuencas que exhiben aumento de caudal tras el día 0 de una OC, calculada a partir de los registros seleccionados empleando cada parámetro y test: Parámetro 1 > 0% (azul), Parámetro 2 > 9% (rojo), Test de Rodionov (amarillo). Las variables corresponden a) variación de caudal SY-IS en Z-Score, b) variación de evapotranspiración potencial PET SY-IS en Z-Score, c) variación de temperatura máxima SY-IS en Z-Score. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	41
4.2.9. Usando parámetro 1, se obtienen 14 cuencas con aumento de caudal z-score (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) asociados a eventos de olas de calor en las estaciones DMC de referencia. Las señales correspondientes de aumento de caudal se dividieron en 3 clusters según su intensidad: b) 0 – 10%, c) 10 – 20% y d) > 20%. Señal promedio se observa en negro para cada uno de los paneles. El gradiente de colores celestes a magenta muestra la transición de cuencas de norte a sur. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	42
4.2.10. Histograma de cada cuenca que muestra la frecuencia correspondiente al día donde ocurre un cambio en el caudal entre los días 0 y 5 desde que ocurre el evento de ola de calor utilizando Test de Rodionov.	43

4.2.11	Relación entre variación SY-IS promedio de caudal (utilizando parámetro 1) y el área de la cuenca. Cuencas ubicadas al norte de 39°S se representan con círculos y cuencas al sur de 39°S se representan con rombos. La escala de colores muestra la latitud a la que se encuentra cada cuenca. r da el valor del coeficiente de correlación e y entrega el valor de tendencia lineal.	45
4.2.12	Clusters de cuencas de acuerdo a su área (señal z-score, revisar tabla 4.2.1). a) menor a 1000 m^2 . b) entre 1000 m^2 y 2000 m^2 . c) mayor a 2000 m^2 . Línea negra representa la media de las series de las cuencas respectivas (media inter-cuenca), identificadas por leyenda de colores. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	46
4.2.13	Distintas cuencas y su señal media al ocurrir OC en periodo de El Niño (rojo), La Niña (azul), Neutro (rosado) y de caudal medio (negro) para cada cuenca.	47
4.2.14	Relación entre nieve acumulada en invierno previo al verano objetivo (marzo-agosto) con variabilidad SY-IS de caudal expresada en porcentaje para las OC registradas en cada cuenca (utilizando parámetro 2). Se indican mediante fecha los eventos de mayor aumento de caudal y mayor nieve acumulada en cada cuenca, respectivamente. Los meses de ocurrencia de cada OC se ven representados por los siguientes colores: noviembre: rojo, diciembre: verde, enero: calipso, febrero: azul, marzo: magenta.	49
4.2.15	Cuenca de Río Colorado antes junta Río Maipo, a) señal de variación de caudal en m^3/s ; se especifica el área de la cuenca, desviación estándar del caudal, persistencia e intensidad promedio de la OC. La línea negra representa la media y línea segmentada representa la mediana de las series de colores Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0, b) Variación porcentual de caudal con respecto al mes de verano que ocurre cada OC; se identifican años que presentaron gran aumento de caudal, c) Variación porcentual de caudal respecto a la intensidad de cada OC, d) Variación porcentual de caudal respecto a la persistencia de cada OC, e) Frecuencia de OC en que se registra un aumento de caudal mayor a 9%. Para la variación porcentual de caudal se utilizó el parámetro 2. Los diferentes colores de las secuencias representan los diferentes meses de ocurrencia de OC: noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo con color rojo, verde, celeste, azul y magenta respectivamente.	51

4.2.16. Cuenca de Río Serrano en Desembocadura, a) señal de variación de caudal en m^3/s ; se especifica el área de la cuenca, desviación estándar del caudal, persistencia e intensidad promedio de la OC. La línea negra representa la media y línea segmentada representa la mediana de las series de colores. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0, b) Variación porcentual de caudal con respecto al mes de verano que ocurre cada OC; se identifican años que presentaron gran aumento de caudal, c) Variación porcentual de caudal respecto a la intensidad de cada OC, d) Variación porcentual de caudal respecto a la persistencia de cada OC, e) Frecuencia de OC en que se registra un aumento de caudal mayor a 9 %. Para la variación porcentual de caudal se utilizó el parámetro 2. Los diferentes colores de las secuencias representan los diferentes meses de ocurrencia de OC: noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo con color rojo, verde, celeste, azul y magenta respectivamente.	52
4.3.1. Anomalías de caudal, temperatura máxima y PET, para las fechas de 1 de noviembre de 1988 (azul), 24 de enero de 1989 (rojo) y 17 de febrero de 1989 (amarillo) para las cuencas de Río Maipo y Río Colorado. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	54
4.3.2. Series de verano extendido de anomalías de temperatura máxima (en estación DMC de referencia y en la cuenca), caudal, PET y serie de precipitación, para las fechas de 1 de noviembre de 1988 (azul), 24 de enero de 1989 (rosado) y 17 de febrero de 1989 (amarillo) para las cuencas de Río Maipo y Río Colorado.	55
4.3.3. Secuencia de anomalías SY-IS de caudal, temperatura máxima y PET en torno a las OC de 21 de enero y 3 de febrero de 2015 para la cuenca de Río Serrano en Desembocadura. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	56
4.3.4. Series de verano extendido de anomalías de temperatura máxima (en estación DMC de referencia y en la cuenca), caudal, PET y serie de precipitación, para las fechas del 21 de enero (azul) y 3 de febrero de 2015 (amarillo) para la cuenca de Río Serrano en Desembocadura.	57
4.3.5. Compuestos de anomalías de altura geopotencial a 850hPa (sombreado) y 500 hPa (contornos) para la ola de calor del 21 de enero de 2015. El día 0 es el día en comienza el evento de ola de calor.	58
4.3.6. Diagrama de fases activas de MJO para los meses de enero (rojo), febrero (verde) y marzo (azul) de 2015.	59
4.3.7. Diagrama de fases activas de MJO para los meses de octubre (rojo), noviembre (verde) y diciembre (azul) de 1988.	60

4.3.8. Diagrama de fases activas de MJO para los meses de enero (rojo), febrero (verde) y marzo (azul) de 1989.	61
5.2.1.a) Señal promedio de probabilidad de precipitación para cuencas que aumentan su caudal durante los eventos de olas de calor. b) Señal de probabilidad de precipitación para cuencas que aumentan su caudal durante los eventos de olas de calor. Línea negra presenta la media, línea punteada representa la mediana de las series coloreadas. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	64
5.2.2. Panel superior: anomalías de temperatura máxima (en estación meteorológica DMC de referencia (negro segmentado) y en la cuenca estudiada (rojo), caudal (azul). Panel inferior: anomalías PET (rojo) y probabilidad de precipitación (azul) para cuencas del Río Maipo en San Alfonso, Río Tinguiririca bajo los Briones, Río Ñuble en la Punilla y Río Ventisquero en Carretera Austral. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	65
5.2.3. Panel superior: anomalías de temperatura máxima (en estación meteorológica DMC de referencia (negro segmentado) y en la cuenca estudiada (rojo)), caudal (azul). Panel inferior: anomalías PET (rojo) y probabilidad de precipitación (azul) para cuenca Río Serrano en Desembocadura. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.	66

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. Andes centrales: clima y variabilidad

Los Andes Centrales se caracterizan por un clima de tipo mediterráneo, veranos secos e inviernos húmedos son principalmente el resultado del desplazamiento norte-sur de la celda de alta presión en el Pacífico Sur Oriental, que generalmente inhibe la precipitación durante la estación cálida, pero permite el paso de los vientos del oeste y una mayor ocurrencia de precipitaciones frontales durante los meses más fríos (Rutllant y Fuenzalida, 1991). La precipitación anual total en sitios por encima de 2500 m.s.n.m varía desde menos de 500 mm en el norte (31°S) hasta 2.000 mm más al sur en torno a 36°S. En estas latitudes, la existencia de numerosas cimas que se extienden muy por encima de la elevación de la isoterma 0°C, permiten el desarrollo de importantes glaciarios (modelado del relieve que se deriva de la formación de glaciares debido al descenso de temperatura en una región) Rivera et al. (2000). En torno a los 50°S las precipitaciones totales anuales pueden superar los 7000-8000 mm en el campo de hielo de la Patagonia Meridional, pero disminuir a aproximadamente 200 mm en El Calafate, 70 km al

este del campo de hielo (Villalba et al., 2003).

En el lado occidental de la Patagonia, la interacción entre el flujo occidental del Océano Pacífico y el sur de los Andes conduce a un clima templado e hiper húmedo. La variabilidad interanual del verano conduce a fuertes temperaturas regionales de la climatología en el Sur de Sudamérica (SSA) (Jacques-Coper et al., 2015). La evolución temporal de los eventos de olas de calor de Chile central produce un patrón de propagación similar a un tren de ondas a lo largo del Pacífico Sur. Además, la Oscilación Madden-Julian (MJO) parece ser un componente clave de los eventos de olas de calor en el centro de Chile (Jacques-Coper et al., 2021).

Desde finales de la década de 1970 la temperatura media de la atmósfera inferior ha aumentado constantemente, un fenómeno que es en gran medida atribuible a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) (Hegerl et al., 2007). Asimismo, conclusiones recientes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021) indican que los registros meteorológicos instrumentales muestran un calentamiento general en todo el mundo, así como cambios en los regímenes de precipitación. Sin embargo, a nivel regional hay una diversidad de patrones asociados.

En Chile central se observa un calentamiento de $+0.25$ °C/década desde el Valle Central hasta los Andes occidentales (Falvey y Garreaud, 2007). Las tendencias significativas de calentamiento en las zonas del interior están muy extendidas en primavera, verano y otoño, pero hay pocas tendencias significativas identificadas en invierno. Este hallazgo, junto con la divergencia general de las temperaturas máximas y mínimas en el valle y los Andes se explica por la fuerza del Anticiclón del Pacífico Sudeste en las últimas dos décadas (Burger et al., 2018). En cuanto a la precipitación en Chile, la variabilidad interanual, se ha relacionado con fenómenos ENOS; específicamente se ha establecido una relación positiva durante invierno entre anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) entre 32° y 38° S. Sin

embargo, esta relación es negativa al sur de 38°S durante el verano siguiente (Montecinos y Aceituno, 2003). Esto se debe al cambio estacional del Anticiclón Subtropical, así como al refuerzo de su extremo sur, que bloquea los sistemas frontales occidentales, que son la principal fuente de precipitación en esta parte del país (Rutllant y Fuenzalida, 1991). Como resultado, durante la fase madura de los eventos de El Niño se tiende a observar una disminución en las precipitaciones de verano en el sur de Chile (Montecinos y Aceituno, 2003).

Las anomalías climáticas en Chile también están ligadas a la temperatura superficial del mar, relacionado con la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Esta oscilación repercute la variabilidad climática centrada a latitudes medias del Pacífico Norte, pero se extiende al Pacífico Sur (Montecinos et al., 2003). Durante la fase cálida de la PDO hay anomalías negativas de la temperatura costera y un fortalecimiento de la tensión del viento del oeste en el Pacífico Norte, que coinciden con anomalías positivas de temperatura superficial del mar a lo largo de las costas de América del Norte y Sur (Mantua y Hare, 2002). Por otro lado, la PDO puede desempeñar un papel importante en la determinación de las tendencias de precipitación de largo plazo, como la tendencia de sequía en el sudeste del Pacífico y zona central de Chile (Boisier et al., 2018).

1.1.2. Glaciares Andinos

La gran cadena de montaña correspondiente a la Cordillera de los Andes da lugar a fuertes contrastes climáticos de oeste a este (Schwerdtfeger, 1976). Las condiciones atmosféricas también muestran un gradiente latitudinal y altitudinal impuestos por la cordillera principal y por los procesos de circulación atmosférica resultantes de un Pacífico sudoriental frío, Atlántico sudoriental cálido y la cercanía al continente Antártico. La línea de nieve regional disminuye de norte a sur y de este a oeste (Nogami, 1972; Rabassa, 1981). Por otro lado, el grado de glaciación varía de acuerdo a la topografía y el clima local, lo que determina la existencia de una

variedad de cuerpos, desde pequeños glaciares o manchas de nieve en volcanes y montañas aisladas en el norte, hasta los extensos Campos de Hielo Norte y Sur (Aniya et al., 1997; Lliboutry, 1998; Rivera et al., 2007). Por ello, la Cordillera de los Andes se caracteriza por tener una extensa área cubierta por glaciares, esta región andina tiene el potencial de proporcionar información única sobre la naturaleza y los mecanismos de las variaciones de los glaciares presentes y su relación con los procesos atmosféricos a escala local, regional y global (Masiokas et al., 2009). Los glaciares andinos se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño, temperatura y forma, Azócar et al., (2019) sugiere las siguientes categorías:

- Glaciaretos: glaciares pequeños con superficies menores a 0.25 km^2 .
- Glaciares de montaña: ubicados en partes altas de una montaña; su evacuación se da por medio de una lengua glacial pequeña desde las zonas de acumulación.
- Glaciares efluentes: forman parte de un campo de hielo, su zona de acumulación se encuentra compuesta por una meseta en altura o plateau.

Se distinguen también tres categorías según su estado térmico:

- Glaciares fríos: poseen temperatura del hielo inferior a 0°C . En Chile existen principalmente en la zona norte del país.
- Glaciares temperados: poseen en toda su masa la temperatura de fusión de hielo. La temperatura del punto de fusión varía con la presión, que depende de forma directa del espesor de hielo, su densidad y aceleración de gravedad. La mayor parte de los glaciares chilenos tienen estas características y en la zona Austral (donde se ubica la Patagonia) se dan los más temperados del planeta; por ende, pequeños aumentos de presión podrían provocar la fusión del cuerpo de hielo.
- Glaciares politermales: son aquellos que contienen tanto hielo temperado

(que están a la temperatura de fusión, en excepción en las capas superficiales) como frío. Se ubican principalmente a altas latitudes y altas cotas.

Se pueden clasificar los glaciares por nivel de su cobertura detrítica y su estructura interna:

- Glaciares descubiertos: sus características principales son que el hielo es casi totalmente visible. Es decir, no poseen cobertura detrítica significativa menor al 10 % de su área de ablación y albergan una alta tasa de ablación debido a que están en contacto directo con la atmósfera.
- Glaciares cubiertos de detritos: son cuerpos glaciares con abundante cobertura detrítica, que ocupa desde un 10 % hasta el total de su zona de ablación. Debido a que están cubiertos, las zonas con espesores de detritos superiores a 2 cm poseen una tasa de fusión de hielo menor y por lo tanto menos aporte en la esorrentía de verano.
- Glaciares rocosos: Se describen como formas de acumulación rocosas con contenido de hielo variable o nulos producidos, depositado y deformado durante el holoceno y en tiempos históricos recientes. Generalmente están en terrenos de alta montaña y zonas polares. Este tipo de glaciares son reconocidos como la expresión geomorfológica de permafrost de montaña con alto contenido de hielo.

El calentamiento atmosférico y la disminución de las precipitaciones en Chile (Garreaud et al., 2020), ha provocado en los glaciares andinos una de las mayores pérdidas de masa específicas desde 1961 (Zemp et al., 2019). La drástica pérdida de glaciares en los últimos años coincide con las condiciones extremadamente secas desde 2010, que contribuyeron parcialmente a mitigar los efectos hidrológicos negativos de esta sequía grave y sostenida (Dussaillant et al., 2019).

Este mayor calentamiento parece estar correlacionado con cambios experimentados por el Océano Pacífico tropical después de 1976, cuando se detectó un cambio

en el sistema climático global, aumentando las temperaturas globales medias en $0,2^{\circ}\text{C}$ (Giese et al., 2002). Las interacciones glaciar-climáticas son bien conocidas hasta la fecha, donde la Altitud de la Línea Equilibrio (ELA, línea que se define en un glaciar al final del año hidrológico y que corresponde al límite entre la zona de acumulación y de ablación de un glaciar) está estrechamente relacionada con las precipitaciones y las temperaturas del aire, aumentando cuando el balance de masa anual de un glaciar es negativo y disminuyendo cuando este balance es positivo (Benn y Evans, 1998).

Chile es uno de los países que cuentan con una de las mayores superficies de glaciares a nivel mundial, y la mayor del hemisferio sur, excluyendo Antártica, que representa por sí sola 62 % de la superficie glaciar. A escala sudamericana, Chile lidera con un 79 % de la superficie glaciar.

El 88 % de los glaciares chilenos está concentrado en la zona austral de Chile, principalmente en las regiones de Aysén y Magallanes. Chile es un país montañoso en el que el 70 % de la población se abastece del agua proveniente de las zonas alto-andinas, donde abundan glaciares. El derretimiento de la nieve estacional y de estos glaciares es la principal fuente de agua en las cuencas andinas en Chile central durante la primavera y el verano, especialmente durante años secos (Azócar et al., 2019). La ausencia de precipitaciones importantes después de septiembre y el aumento de energía solar disponible durante primavera promueven el derretimiento del manto nival generando un máximo de caudales alrededor de fines de diciembre (Azócar et al., 2019). El derretimiento de nieve tiene el principal aporte al inicio de la temporada estival; siendo el hielo derretido el principal aportante a fines del periodo de ablación (Ayala et al. 2016; Burger et al. 2019). Dependiendo de la altura y ubicación de la cuenca, la fracción nival alcanza un mínimo entre mediados de diciembre y mediados de enero. Las variaciones rápidas de caudal en primavera/verano producidas por ablación, exhiben una amplitud comparable a las crecidas moderadas de invierno y podrían tener un impacto importante en las

actividades que se sustentan en estos caudales (Bravo y Garreaud, 2011).

Chile ha perdido 1.994,14 km^2 de superficie glaciar entre los años 2002 y 2018. En el centro del país, el 65,4 % de la superficie glaciar se encuentra a una altitud inferior a 4.000 (Segovia y Videla, 2017). Considerando dicha altitud, se estima que un día de primavera o verano que exhiba una temperatura de 30°C en el valle central (33°S), implicaría una anomalía positiva de temperatura de unos 10°, suficiente para derretir varios metros de hielo en un verano cálido. Si al calentamiento agregamos el efecto de condiciones cada vez más secas, de especial relevancia en el periodo comprendido desde 2010 hasta la actualidad debido a la megasequía (Garreaud et al., 2020), resulta en un escenario muy negativo para los glaciares y para la provisión de agua de la sociedad.

En efecto, en el caso de Europa, una ola de calor extrema fue registrada en el verano de 2003; ésta impactó los glaciares alpinos, generando sobresalientes anomalías negativas de masa, registros de descarga de agua por fusión de hielo (Koboltschnig et al., 2009). En el contexto de dicho evento, mientras las cuencas con alto porcentaje de glacerización (24-65 %) mostraron respuesta importante, las cuencas con porciones glaciares muy bajas (< 1 %) tuvieron menos del 60 % de la esorrentía estival media (Zappa y Kan, 2007). En Chile, se ha estudiado el retroceso glaciar y sus fluctuaciones decadales debido a las tendencias positivas de temperatura en la precordillera y cordillera (Petersen y Pellicciotti, 2011). Sin embargo, es nula la información acerca de cómo eventos sinópticos como las olas de calor pueden impactar en los glaciares y por lo tanto, en los caudales de los ríos chilenos. Por consiguiente, este estudio se enfoca en la variabilidad de alta frecuencia asociada a olas de calor.

1.2. Hipótesis y Objetivos

La hipótesis establece que *eventos sinópticos como las olas de calor de verano producen un aumento de caudal debido al derretimiento de cuerpos de hielo en cuencas cordilleranas ubicadas en centro, sur y austral de Chile.*

El objetivo general de la presente investigación es estudiar el impacto de olas de calor en la criósfera andina de Chile, específicamente en la zona centro, sur y austral del país, desde la Región Metropolitana hasta Magallanes (32°-56°S), durante el verano extendido (noviembre-marzo, NDEFM) en el periodo 1980-2016.

Se ha planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Clasificar los eventos de olas de calor de acuerdo a su intensidad y duración y explorar las respuestas de caudales de cuencas alimentadas por cuerpos de hielo.
2. Establecer posibles diferencias en el impacto de las olas de calor en los caudales mencionados, según las diferentes cuencas.
3. Estudiar una eventual relación de la señal de propagación de olas de calor ocurridas en cuencas cordilleranas con las ocurridas en depresión intermedia.
4. Describir en términos generales las características sinópticas y posibles teleconexiones asociadas a casos específicos de olas de calor.

1.3. Organización de Tesis

El presente estudio está organizado en 6 secciones. La introducción, hipótesis y objetivos de la investigación corresponden a la sección 1, que también incluye hipótesis y objetivos de la investigación. Luego, en la sección 2 se presenta el área

de estudio y los datos utilizados. La metodología empleada se encuentra en la sección 3. Los resultados obtenidos son presentados en la sección 4. Finalmente, las discusiones y conclusiones son presentados en las secciones 5 y 6.

Capítulo 2

Área de Estudio y Datos

2.1. Área de Estudio

El área considerada para este estudio es la zona centro, sur y austral de Chile, desde la Región Metropolitana hasta la Región de Magallanes. El área se extiende entre las latitudes 32° y 56°S y las longitudes 76° y 66°W , tomando mayor énfasis en las longitudes donde se encuentran las cuencas precordilleranas y cordilleranas que se caracterizan por contener cuerpos de hielo, aproximadamente, entre los $71\text{-}73^{\circ}\text{W}$. La zona de estudio abarca una diversidad de climas debido a la gran extensión latitudinal, que producen una gran variación en la precipitación, temperatura y cobertura de nieve en las distintas cuencas. De acuerdo a Sarricolea et al., (2017), se consideraron 3 macroregiones: zona central (desde región de Valparaíso hasta el Biobío, $32^{\circ}\text{-}39^{\circ}\text{S}$), zona sur (desde la región de la Araucanía hasta Los Lagos, $39^{\circ}\text{-}44^{\circ}\text{S}$) y zona austral (regiones de Aysén y Magallanes, $44^{\circ}\text{-}56^{\circ}\text{S}$).

2.2. Datos

2.2.1. Olas de Calor

Los eventos de olas de calor empleados en esta tesis fueron proporcionados vía comunicación personal por María Belén de la Torre, quien las computó en el marco de su Habilitación Profesional para optar al título de Meteorología en la U. de Concepción (en desarrollo), llamado *Olas de Calor en Chile: presente y futuro*. La fuente de datos para este trabajo fueron observaciones meteorológicas DMC (Dirección Meteorológica de Chile). Se identificaron eventos de olas de calor en 20 locaciones a nivel nacional, durante los veranos extendidos (noviembre a marzo) del periodo 1962-2019. Para ello, se aplicó un umbral diario calculado para el periodo climatológico 1981-2010, sobre los registros de temperatura máxima previamente homogeneizados por Ricardo Vásquez de la DMC. En la siguiente sección se detalla el criterio empleado para definir los eventos de olas de calor.

Para el estudio mencionado se escogieron 12 estaciones meteorológicas pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Las estaciones seleccionadas están ubicadas en la capital regional de cada zona. Los datos de temperatura máxima de estaciones DMC también se obtuvieron del trabajo citado (de la Torre, comunicación personal).

2.2.2. CAMELS-CL

Para el análisis de variables hidrológicas se utilizaron registros de 59 cuencas cordilleranas obtenidas de CAMELS-CL (Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies, Chile Dataset, <https://camels.cr2.cl/>, Alvarez-Garretón et al., 2018). Esta plataforma integra información física e hidro-meteorológica de cuencas de todo Chile. Para realizar el análisis de datos se utilizaron series de tiempo diarias de temperatura máxima, precipitación, caudal y evapotranspiración

Estación	Latitud [°S]	Longitud [°W]
Santiago	33.45	70.68
Curicó	34.97	71.22
Chillán	36.59	72.04
Concepción	36.78	73.06
Temuco	38.77	72.632
Valdivia	39.65	73.08
Osorno	40.60	73.06
Puerto Montt	41.43	73.098
Futaleufú	43.19	71.85
Coyhaique	45.59	72.10
Chile Chico	46.58	71.69
Punta Arenas	53.00	70.85

Cuadro 2.2.1: Estaciones DMC cuyos eventos de OC fueron empleados en este estudio.

potencial (PET). El periodo de tiempo coincide para cada una de las cuencas y corresponde al periodo 1 de enero de 1979 hasta 31 de diciembre de 2016. Se seleccionaron las cuencas que comprenden glaciares y también las que eran aledañas a un área glaciar, se comparó visualmente el mapa con las cuencas de CAMELS-CL y se comparó con la visualización de glaciares de <https://girhchoapa.cl/visualizador/>. Tras una inspección inicial, se seleccionaron finalmente las 30 que cumplen con la condición de disponer al menos con el 50 % de los datos válidos en el verano extendido (1980-2016) y cubrir al menos el 54 % de los eventos de olas de calor correspondientes al registro meteorológico asignado, como se explica a continuación.

La figura 2.2.1 muestra en leyenda de colores, las estaciones DMC cuyos registros de OC fueron empleados y las cuencas asociadas a cada estación. El criterio empleado para asociar cada cuenca a una determinada estación meteorológica consistió en minimizar distancia, observar que estación meteorológica estaba más cerca latitudinalmente y por ende que tuvieran climas similares.

Teniendo ya asociada una estación meteorológica a cada cuenca, se tomaron las fechas de los eventos de cada estación DMC y se calculó la probabilidad de cuando un evento tiene datos de caudal para esas fechas, luego de realizar un análisis de

sensibilidad de las señales de caudal se decidió trabajar con cuencas que cubrieran al menos 54 % de eventos de olas de calor para cada cuenca.



Figura 2.2.1: Mapa de las 30 cuencas seleccionadas (polígonos de colores) y estaciones meteorológicas DMC (ícono de localización). La leyenda de colores representa la asignación de cuencas a cada estación meteorológica.

2.2.3. ERA 5

Para observar características sinópticas y posibles teleconexiones asociadas a casos específicos de olas de calor, se utilizaron datos de reanálisis ERA5, para los veranos extendidos entre 1980-2016. Se tomó campo de datos diarios de altura geopotencial a 500 hPa y 850 hPa, en el área correspondiente al Pacífico Sur Oriental que abarca Oceanía hasta el Sur de Sudamérica.

La tabla 2.2.2 muestra a modo resumen, las variables utilizadas para el presente estudio, enseñando fuente de las variables, frecuencia temporal, periodo original y el que se utiliza para el análisis.

Fuente	Variable	Frecuencia temporal	Periodo original	Periodo utilizado
CAMELS-CL	Caudal	Diaria	1979-2016	1979-2016
	Temperatura máxima			
	Precipitación			
	Evapotranspiración potencial (PET)			
Estaciones meteorológicas DMC	Temperatura máxima	Diaria	1962-2019	1979-2016
Reanálisis ERA 5	Altura geopotencial 500 hPa y 850 hPa	Diaria	1979-2016	1979-2016

Cuadro 2.2.2: Datos utilizados para el estudio. Columnas representan: 1) fuente de datos, 2) variable a utilizar, 3) frecuencia temporal de cada variable, 4) periodo original, 5) periodo a utilizar de cada variable.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Eventos de Olas de Calor

Según de la Torre y Jacques-Coper (2019), *un evento de ola de calor ocurre cuando la temperatura máxima diaria es igual o mayor al umbral diario por tres o más días consecutivos durante el verano extendido, entre noviembre y marzo del año siguiente*. El criterio consiste en umbrales que representen adecuadamente la evolución de los veranos extendidos y se definen en una escala temporal diaria, es decir, para los 151 días (de verano extendido). La forma algebraica de definir dicho umbral diario es:

$$T90(j) = P90(X); \quad X = (T(y, d) | y_s \leq y \leq y_e, j - 7 \leq j \leq j + 7) \quad (3.1.1)$$

donde $T90(j)$ es el valor diario de ola de calor para el día j (que varía de 1 a 151), equivalente al percentil 90 ($P90(X)$), de temperatura máxima X , definida como la matriz $T(y, d)$ que contempla los valores de temperatura máxima, entre los años y_s e y_e que corresponde al año inicial y final del periodo climatológico (1981-2010) y entre los 7 días previos y posteriores al día j , es decir, una ventana móvil de 15 días (se toman también, los últimos 7 días de octubre y los primeros 7 días

de abril). A cada una de las series se hace un ajuste polinomial de 4to orden. Se trabajó con los datos de temperatura máxima para las estaciones DMC y para cada una de las 59 cuencas (CAMELS-CL), en otras palabras, se obtuvieron 59 series de tiempo. En este estudio se trabajó considerando la fecha del primer día del evento cálido, definido como día 0.

3.2. Variables analizadas

Las series de tiempo para el presente estudio se extraen del periodo general de verano extendido, que comprende los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo. Para las variables obtenidas de CAMELS-CL, serán desde los veranos de 1979-80 hasta 2015-16. Con un total de 151 días por año, el total de años son 37. Este mismo procedimiento se aplicó a los datos de reanálisis de ERA5 para las variables de 500hPa y 850hPa.

Para las series de CAMELS-CL, la variable de caudal, contiene valores atípicos (outliers), que son omitidos utilizando NaN. La precipitación obtenida de CAMELS-CL se analizó como probabilidad de precipitación. Para ello, primeramente, se asignó valor 1 a los días en que precipita más de 1 mm, 0 a los días sin precipitación. Luego, se realizó el promedio en el periodo 1980-2016. Para tener un análisis de alta frecuencia se toman las fechas de los eventos de olas de calor y los 10 días anteriores y posteriores al primer día del evento, obteniendo de esta manera un total de 21 días. El día que comienza la ola de calor es el día 0, los días anteriores tendrán valores negativos (hasta -10), y los días posteriores tendrán valores positivos (hasta +10). De este modo al promediar varias series de 21 días o de verano extendido, al tener varias series con valores de 0 y 1 que representa si existió precipitación en un determinado día, se obtiene un valor promedio entre 0 a 1 que expresa la probabilidad de precipitación en torno al día 0, es decir, determinar la probabilidad de que precipite un determinado día dentro del rango de días que ocurre una ola de calor. Para ver el comportamiento de los caudales, cuando se encuentra en sus

diferentes etapas: El Niño, La Niña o neutro. Se descargaron datos mensuales de https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_change.shtml correspondiente a las anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) en la región el Niño-3.4. Se definió como periodos de El Niño cuando las anomalías de TSM > +0,5°C, La Niña a anomalías TSM < -0,5°C, y periodos neutros entre -0,5°C y +0,5°C (Higgins et al., 2004).

De acuerdo a Jacques-Coper (2015), la circulación atmosférica puede producir eventos cálidos u olas de calor. En algunos casos puede relacionarse con las ondas de Rossby que alteran la circulación en el Pacífico Sur Oriental y, eventualmente, la oscilación de Madden-Julian (MJO). Por lo tanto se usa el diagrama de fases activas de la MJO (fuente <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>).

3.3. Anomalías y Z-Score

Con el objetivo de analizar compuestos de diferentes variables de acuerdo a las fechas de olas de calor DMC estudiadas, se realiza un análisis de anomalías intraestacional para variables de CAMELS-CL, basado en la investigación de Jacques-Coper et al., 2015. Dichas anomalías se calculan, para el verano extendido. El periodo climatológico corresponde a 1981-2010. En concreto:

$$\begin{aligned}
 SY - IS &= Anomalia_{sinoptica} - intraestacional_{d,y} \\
 &= variable_{diaria_{d,y}} - mediana_{climatologica_{diaria_d}} - \\
 &\quad (mediaestacional(NDEFM)_y - media_{est(NDEFM)}_{largo\ plazo})
 \end{aligned}$$

donde d es el día correspondiente ($d = 1, 2, \dots, 151$), y es el año. Por definición, los valores de anomalías quedan en torno a cero. Al usar la media para definir los valores de caudal se produce un gran sesgo en las anomalías intraestacionales debido a la media, también se concluyó que la señal climatológica era muy ruidosa

ya que tenía peaks que desviaban la señal media hacia estos peaks máximos o negativos creando un sesgo e influenciaban a las otras señales hacia dichos valores . Por lo tanto, se optó por definir el caudal climatológico como un ajuste polinomial de cuarto orden a mediana climatológica. La elección del polinomio de cuarto orden se tomó luego de realizar análisis de sensibilidad, probando con polinomios de primer a quinto orden y comparando cual se ajustaba mejor a la mediana climatológica. Finalmente, el polinomio que mejor se ajustó fue el de cuarto orden.

3.3.1. Normalización de series (Z-Score)

Con el fin de hacer intercomparable las anomalías SY-IS de caudal de las cuencas, se normalizó cada serie por su correspondiente desviación estándar (calculada para 1981-2010). Por consiguiente, se obtienen series de Z-Score adimensionales, que cuantifican los valores de anomalías SY-IS en unidades de desviaciones típicas respecto a la media.

$$Z_{d,y} = \frac{\text{Anomalia intraestacional}_{d,y}}{\sigma(\text{Anomalia intraestacional})} \quad (3.3.1)$$

3.3.2. Spaghetti Plot

Luego de tener las señales de anomalías y Z-Score, se trabajó con las fechas de las olas de calor. En cada cuenca y para cada una de ellas, se analizaron los 10 días anteriores y 10 días posteriores a cada evento, obteniendo series de 21 días, siendo el día 0 el primer día del evento de cada ola de calor, explicado anteriormente. El objetivo es visualizar a simple vista el comportamiento del caudal antes, durante y después de la ola de calor. Este trabajo se realizó para anomalías de SY-IS de caudal, temperatura máxima y PET.

3.4. Parámetros y Test de Variación de Caudal

Para estudiar el aumento o disminución de caudal como respuesta de caudales ante las olas de calor se toman las series de SY-IS de caudal de 21 días, ya sean todos los eventos de la cuenca, o la señal promedio de cada una. A partir de esta información, se calculan parámetros que cuantifican dicha variación y se aplican test o criterios para establecer casos de aumento de caudal. Ambos parámetros y Test de Rodionov se aplicó para cada una de las 30 cuencas.

3.4.1. Parámetro 1

Luego de realizar análisis de sensibilidad, se decidió calcular el parámetro 1 de variación de caudal por cada cuenca como la diferencia entre el promedio de los días +2, +3, +4 y los días -2, -3 - 4, que luego se normaliza (divide) por el régimen de caudal, el valor del régimen de caudal es la media de todos los valores originales de caudal que se tengan para cada cuenca durante el verano extendido para el periodo 1980-2016. El parámetro 1 representa una variación porcentual de caudal relativa del régimen del caudal de verano. Este parámetro tiene un resultado más suave en comparación al parámetro 2 (que se verá a continuación), ya que se utilizan los promedios de los días anteriores (-2,-3,-4) y posteriores (+2,+3,+4) de la OC.

$$Parametro1 = \frac{(media \ caudal_{dia+2,+3+4} - media \ caudal_{dia-2,-3-4})}{regimen \ caudal} \quad (3.4.1)$$

Debido a las diversas características de las diferentes cuencas, se espera que los valores de régimen de caudal varíen entre los diferentes caudales. El criterio aplicado para identificar aumentos de caudal usando el parámetro 1 corresponde a encontrar las cuencas que contaran con una señal de caudal promedio con un porcentaje mayor a 0 %. Es decir, se separaron las cuencas que tuvieran aumento

(disminución) con porcentaje mayor a 0 % (menor a %0), para comparar todas las cuencas se utilizó Z-Score de anomalías de caudal.

3.4.2. Parámetro 2

Adicionalmente, se calculó un segundo parámetro porcentual, calculando la diferencia entre el valor máximo que se obtiene entre el día +1 y +6 desde que empieza la OC (día 0), al cual se le resta el promedio del día -10 hasta el día 0; finalmente, la diferencia obtenida se divide por el régimen de caudal para cada cuenca, explicado anteriormente para el parámetro 1. A diferencia de *Parámetro 1*, se espera como resultado un porcentaje mayor ya que en este caso se toma el valor máximo de caudal después de que ocurre la OC y no un promedio como en el caso anterior.

$$Parametro2 = \frac{(max \quad caudal_{dia+1,+2,+3+4,+5,+6} - media \quad caudal_{dia0,-1,-2,...,-10})}{regimen \quad caudal} \quad (3.4.2)$$

El criterio aplicado para identificar aumentos de caudal, corresponde a encontrar un porcentaje que represente un aumento de caudal en la señal promedio de un grupo de cuencas. Por ello, se realizó un análisis de sensibilidad graficando la señal media de cada cuenca que tuviera un aumento porcentual mayor a 0 %. Finalmente, se determinó que a partir del 9 % se forma una señal evidente de aumento, por lo tanto, se escogió un criterio en torno a este valor porcentual.

3.4.3. Test de Rodionov

Para explorar posibles cambios abruptos o saltos en el régimen de caudal se utilizó un t-student secuencial de Rodionov (Rodionov, 2004). Rodionov realizó el test para ver la variación decadal o interdecadal, pero también puede ser aplicado para altas frecuencias (días). Por otro lado, dicho test se aplicó para determinar el día en torno a la ola de calor que muestra una respuesta en el régimen de caudal

utilizando las series de 21 días. El test consiste principalmente en determinar si la diferencia entre los valores medios de dos regímenes, uno "anterior" y uno "posterior", sería estadísticamente significativa según la prueba t-Student.

$$diff = t\sqrt{2\sigma_l^2/l} \quad (3.4.3)$$

Donde t es el valor de la distribución de t-Student con $2l - 2$ grados de libertad a un nivel de probabilidad dado p , l es la longitud de corte de los regímenes a determinar para la variable X . Se asume que las varianzas para ambos regímenes son iguales e iguales a la varianza promedio σ_l^2 para intervalos de l -valor en la serie temporal de la variable X . Se calcula la media $\bar{x}_{R1}$ de los valores l iniciales de la variable X como estimación para el régimen R1 y los niveles que deben alcanzarse en los siguientes l valores para calificar para un cambio al régimen R2:

$$\bar{x}'_{R2} = \bar{x}_{R1} \pm diff \quad (3.4.4)$$

Es decir, para considerar un cambio de régimen, este valor medio debe ser mayor al siguiente valor, que representaría un aumento, que es lo que se está buscando en el presente estudio. Si se cumple la ecuación anterior, el tiempo es marcado como un salto, se calcula un índice llamado RSI, para probar la persistencia del cambio de la media y, por ende, definir si se acepta o se rechaza la hipótesis. RSI representa la suma de anomalías normalizadas:

$$RSI_{i,j} = \sum_{i=j}^{j+m} \frac{x_{i*}}{l\sigma_l}, \quad m = 0, 1, \dots, l - 1 \quad (3.4.5)$$

donde $x_{i*} = x_i - \bar{x}'_{R2}$. Se rechaza la hipótesis nula de la existencia de un nuevo régimen, si algunos de los instantes cuando $m = l$ se vuelve negativo, en caso de ser positivo se confirma la existencia de un salto o cambio en el régimen. En el contexto del presente estudio, se han determinado los valores $p = 0,05$, es decir

95 % de confianza y $l = 4$ días.

3.5. Persistencia e Intensidad de Temperatura Máxima en Cuencas Cordilleranas

Se tomaron las series de 21 días de anomalías SY-IS de temperatura máxima, tanto para los datos de estaciones DMC y para los datos de cuenca CAMELS-CL y se calculó la señal media para cada una. Con el fin de poder comparar la señal de OC entre la cuenca y la estación DMC. Por otro lado, los input o fechas de olas de calor se utilizaron para realizar compuestos de temperatura máxima en las cuencas y así poder determinar la duración e intensidad de la ola de calor en la zona precordillerana y cordillerana.

3.5.1. Persistencia

La duración de cada OC en la cuenca se calculó tomando el valor de la anomalía SY-IS de temperatura máxima en el día 0 y estableciendo un "umbral propio" realizando un test de sensibilidad. El umbral se calcula estableciendo por cuántos días se mantiene entre 1.5 °C o más de acuerdo a la temperatura inicial, cuando baje de ese rango ya no se contará como día dentro de una OC. Por ejemplo, si hay una ola de calor con anomalías SY-IS de temperatura máxima, comenzando el día 0 con +3°C, entre el día +1 y +2 alcanza anomalías de +5°C, luego el día +3 baja a +1,8°C, este día se sigue considerando en la OC. Finalmente, el día +4 tiene una anomalía de temperatura máxima de +1,1°C, este día ya no se considera dentro de la OC, debido a que no cumple con el criterio tomado para la persistencia. Este procedimiento se realiza para cada OC de cada cuenca y luego se calcula el promedio que representa la duración media de una OC en dicha cuenca.

3.5.2. Intensidad

La intensidad de cada OC se calculó utilizando las series de 21 días de anomalías de temperatura máxima, tomando la media entre tres días, desde el día 0 hasta el día +2. De acuerdo a la definición de ola de calor empleada, la duración mínima de la ola de calor son 3 días, por este motivo se tomó dicho promedio. Finalmente se calculó la intensidad media de cada cuenca tomando la intensidad de cada OC de cada cuenca y sacando su promedio.

3.6. Scatterplot y Regresión Lineal

3.6.1. Coeficiente de Correlación Lineal de Pearson

El estimador más utilizado para evaluar la asociación lineal entre dos variables es el coeficiente de correlación de Person (r). Se caracteriza por medir si los puntos tienen tendencia a disponerse en una línea recta y toma valores de -1 y 1 . Por ende, el coeficiente de correlación de Pearson se define como la covarianza muestral entre ambas variables, dividida por el producto de las desviaciones de cada variable (Edwards, 1976).

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (3.6.1)$$

3.6.2. Regresión Lineal

Para encontrar una posible relación lineal entre las variables se requiere encontrar la recta de regresión (Edwards, 1976). El criterio para construir la función es el error o residuo, que se define como:

$$e = y - \hat{y} \quad (3.6.2)$$

El residuo debe ser pequeño, por lo que se busca la función $\hat{y} = f(x)$ que lo minimice. Por ende, la regresión lineal consiste en aproximar los valores de una variable a partir de otra, entonces α es la ordenada de origen y β la pendiente de la recta lineal:

$$\hat{y}_i = \alpha + \beta x_i \quad (3.6.3)$$

Para cada observación se puede definir el residuo como la distancia vertical entre el punto (x_i, y_i) y la recta, es por esto que se desea encontrar la recta que hace mínima la suma de cuadrados de las distancias verticales entre cada punto y la recta, para determinar la recta de regresión se utiliza el método de mínimos cuadrados. Las cantidades α y β que minimizan el error con coeficientes de regresión, finalmente:

$$\beta = \frac{S_{xy}}{S_x^2} \quad \alpha = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (3.6.4)$$

La metodología anteriormente señalada permite estudiar la relación entre diferentes variables, tales como: caudal con persistencia e intensidad de temperatura máxima, caudal con área de la cuenca. Estos pares de variables se estudian para buscar una posible respuesta a la variación de caudal cuando ocurre una OC y que variables puedan estar influyendo en esto.

3.7. Precipitación Sólida

El primer paso consistió en obtener datos de precipitación líquida acumulada mensual de CR2MET <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/> y datos mensuales proporcionados por Camila Álvarez (comunicación personal) sobre fracción de nieve (*snow fraction* en inglés, abreviada *sf*), nieve derretida (*snow melt* en inglés, abreviada *sm*) y precipitación. Para cada una de estas variables se calculó el acumulado de invierno entre los meses de marzo a agosto. Se trabajó un total de 38 años. En CAMELS, cada cuenca está caracterizada por una carpeta que contiene un archivo *shape*, se obtiene el área que abarca la cuenca en consideración.

Para este caso se seleccionaron las cuencas que mostraban un aumento de caudal respecto al parámetro 1 y el criterio a que fueran mayor a 0 %. La resolución horizontal de los campos grillados de polígono (shape) de CAMELS era mucho mayor a los campos grillados de CR2MET, por lo que se realizó un procedimiento para que el área de la cuenca y los datos de grilla de precipitación calzaran con sus respectivas coordenadas. De esta manera se calculó el promedio de invierno de precipitación total para cada una de las cuencas seleccionadas (información entregada por Camila Álvarez, a través de comunicación personal). Para calcular la precipitación sólida se utilizó la siguiente fórmula:

$$precipitacion\ solida = \frac{fraccion\ nieve}{precipitacion\ liquida \cdot precipitacion\ CR2MET} \quad (3.7.1)$$

Esta variable fue utilizada para comparar la variación de caudal con el acumulado de precipitación sólida acumulada durante el invierno interior a los eventos de olas de calor estudiados.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Olas de Calor

Como se explicita en la metodología, las anomalías SY-IS de las variables utilizadas fueron filtradas extrayéndoles el ciclo anual y luego la variabilidad interanual respecto a la media climatológica 1981-2010, excepto para la variable de caudal que se utilizó la mediana climatológica suavizada. La figura 4.1.1 es un ejemplo del cálculo de anomalías SY-IS para una cuenca utilizando la variable de caudal. En la primera fila se observan los datos originales (panel superior a y b) y en línea negra se muestra la climatología que corresponde al ciclo anual. Las anomalías respecto al ciclo anual se muestran en el panel medio (c y d). Finalmente se sustrae la variabilidad interanual para obtener las anomalías SY-IS (panel inferior, e y f). Se destaca que estos valores fluctúan en torno a cero. Por otro lado, en la figura 4.1.2) se observa la diferencia entre las anomalías con respecto al ciclo anual y las anomalías SY-IS, donde se sustrae la variabilidad interanual.

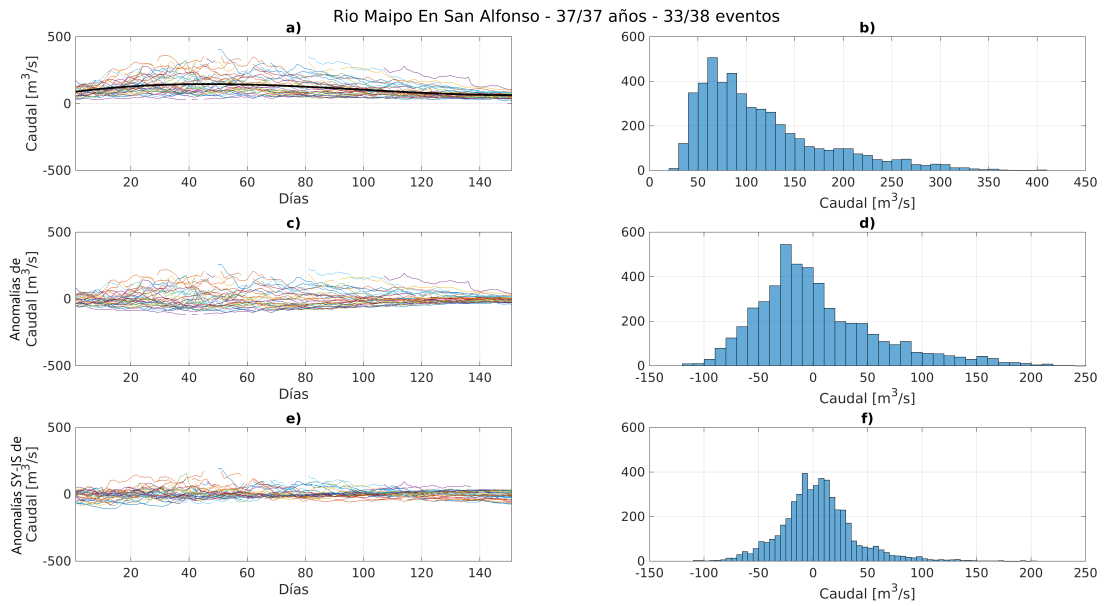


Figura 4.1.1: a) Series de verano extendido de Río Maipo con datos de variable de caudal originales (valores absolutos). Línea negra representa la mediana climatológica, b) Histograma de datos de caudal originales, c) Series de verano extendido de Río Maipo de anomalías simples, obtenidas tras extraer la mediana climatológica, d) Histograma de anomalías simples de caudal de c), e) Series de verano extendido de Río Maipo de anomalías intraestacionales (SY-IS), f) Histograma de anomalías intraestacionales de caudal.

Los histogramas de la figura 4.1.1 dan cuenta de cómo disminuye la dispersión de los datos tras calcular cada tipo de anomalía. Para explorar esto en mayor detalle, en la figura 4.1.2 se presentaron dos veranos con diferente caudal del Río Maipo en San Alfonso. El verano de 1982 muestra un caudal bastante uniforme en el tiempo durante todo el periodo; es notorio que, las anomalías intraestacionales exhiben una menor dispersión del caudal que los datos originales, y que fluctúan en torno a cero. En el verano de 2009 el Río Maipo es mucho más caudaloso durante los meses de noviembre, diciembre y enero, luego disminuye, hasta obtener valores parecidos a los de 1982. De acuerdo a la variabilidad interanual, se observa que el año 1982 no fue tan caudaloso, en comparación con el año 2009, donde al restar el valor de esta variabilidad para ese año, la serie quedó bajo los valores de la serie de anomalías simples (sin mediana climatológica).

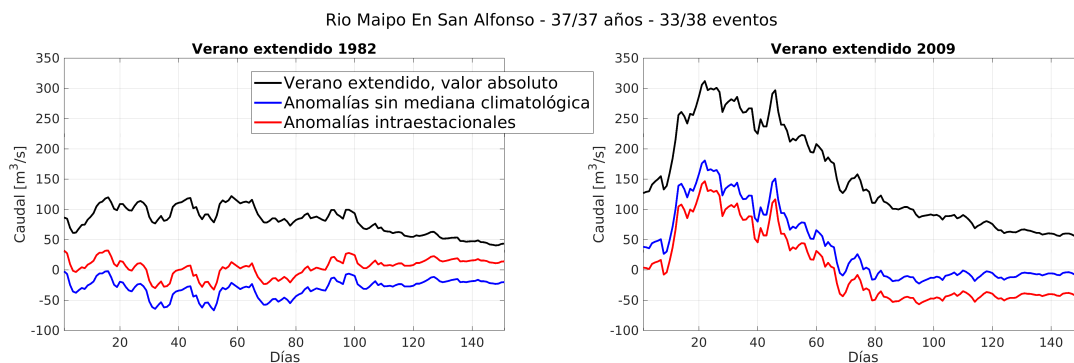


Figura 4.1.2: Series de caudal de verano extendido para los años 1982 y 2009, en ambas se comparan los datos de caudal originales (negro), anomalías sin la mediana climatológica (azul) y finalmente anomalías intraestacionales (rojo).

Para estudiar el comportamiento de las olas de calor cada estación DMC seleccionada (correspondientes a las capitales regionales, ver tabla 1) y su respuesta en las cuencas cordilleranas, se analizaron anomalías intraestacionales de temperatura máxima de estaciones DMC y CAMELS, realizando series de 21 días correspondientes a cada OC. De acuerdo a los resultados (Figura 4.1.3a), se observa que la intensidad promedio (1980-2016) de las OCs, cuantificada a través de la anomalía promedio de temperatura máxima entre los 33-38.5°S es de 4 a 6°C, mientras que desde los ~40°S hacia el Sur, la intensidad aumenta hasta alcanzar anomalías cercanas a 8°C a los 45°S. Finalmente entre los 48-57°S los valores de anomalías en las cuencas fluctúan entre los 5-6°C. La persistencia de la ola de calor en las cuencas precordilleranas y cordilleranas se observa en la Figura 4.1.3a. La mayor persistencia se da entre 33-37°S, donde tienen una duración promedio de más de 2 días. Por otro lado, se observa que la persistencia disminuye hacia latitudes más altas, sin embargo, en las cuencas australes entre 51-54°S la duración de los eventos de olas de calor vuelve a aumentar y alcanza ~2 días. Se aplicó el test de Rodionov a la señal promedio de 21 días de todas las cuencas y todas mostraron un cambio de régimen (aumento de temperatura) el día que ocurre una ola de calor.

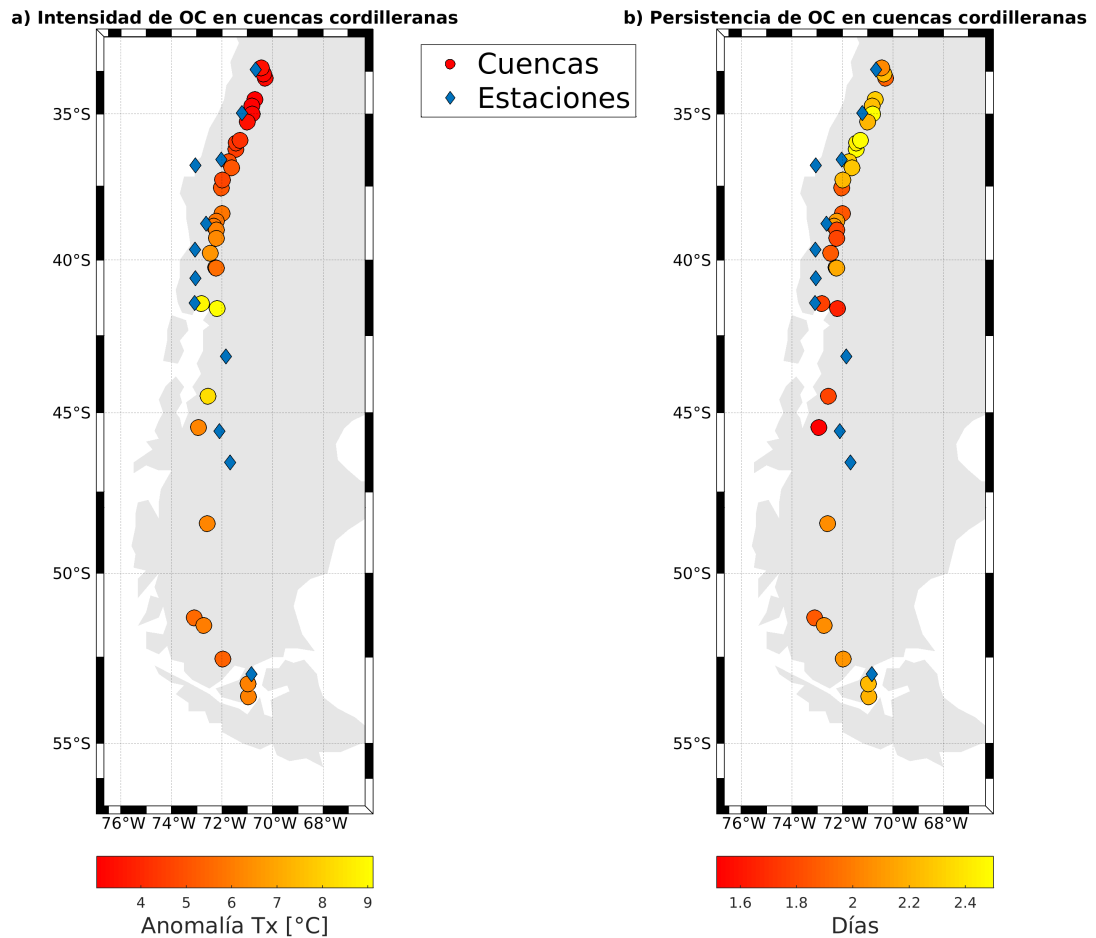


Figura 4.1.3: a) Intensidad promedio de anomalías de temperatura máxima de OC en cada cuenca (periodo 1980-2016), según estación DMC de referencia, b) Como en a), pero para persistencia de OC. Rombos azules representan las estaciones DMC ubicadas en las capitales regionales, círculos representan las cuencas cordilleranas.

La Figura 4.1.4 muestra la evolución promedio de OC registrada en la cuenca (rojo) y en la capital regional (negro). Al haber eventualmente un conjunto de cuencas que se analizan mediante el mismo conjunto de fechas de olas de calor, se seleccionó sólo una cuenca representativa en la figura, ya que el conjunto exhibe señales similares. Se observa que tanto la señal media de la estación DMC considerada como la de la cuenca representativa muestran un comportamiento similar, excepto las correspondiente a la estación de Temuco y la cuenca de Río

Biobío. Las estaciones que muestran menos diferencias con las temperaturas de las cuencas en los días que ocurre el evento son la estación ubicada en Chillán y la estación ubicada en Coyhaique. Tanto la estación DMC como la cuenca correspondiente a Coyhaique poseen la mayor intensidad promedio de ola de calor, entre las 6 comparaciones exploradas.

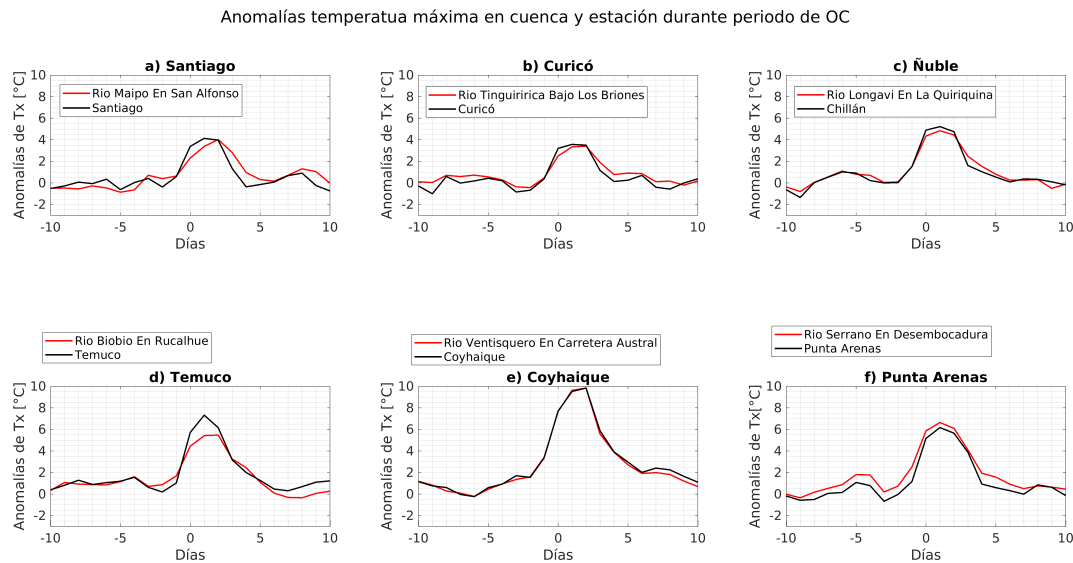


Figura 4.1.4: Señal de anomalías SY-IS de temperatura máxima promedio (periodo 1980-2016) para la cuenca (rojo) y estación meteorológica DMC de referencia (negro) para 10 días antes y 10 días después de que comienza el evento de ola de calor, designado como día 0.

4.2. Variación de Caudal

Según el parámetro 1 se seleccionaron bajo el criterio de porcentaje mayor a 0, cuencas que mostraban un aumento de caudal, y menor a 0 cuencas que mostraban una disminución. La Figura 4.2.1 muestra en triángulos con un vértice hacia arriba las cuencas que exhiben aumento de caudal (parámetro 1) cuando ocurren las olas de calor, mientras que los triángulos con un vértice apuntando hacia abajo simbolizan a las cuencas que disminuyen su régimen de caudal dichos días. El tamaño de los triángulos es proporcional al tamaño de la cuenca. Las cuencas que muestran aumento están ubicadas entre los 33-37°S y entre 47-53°S en la Patagonia

chilena. En rojo se observa el aumento y en azul la disminución del caudal. Por otro lado se registra aumento de caudal entre los días -4 y -2 en cuencas en que tras ocurrir el evento muestran disminución de caudal. Sucede algo similar con cuencas que muestran aumento tras el comienzo del evento, pues muestran disminución los días anteriores. Sin embargo, se contempla que los valores de disminución (azul) no son tan intensos como los valores de aumento de caudal (rojo).

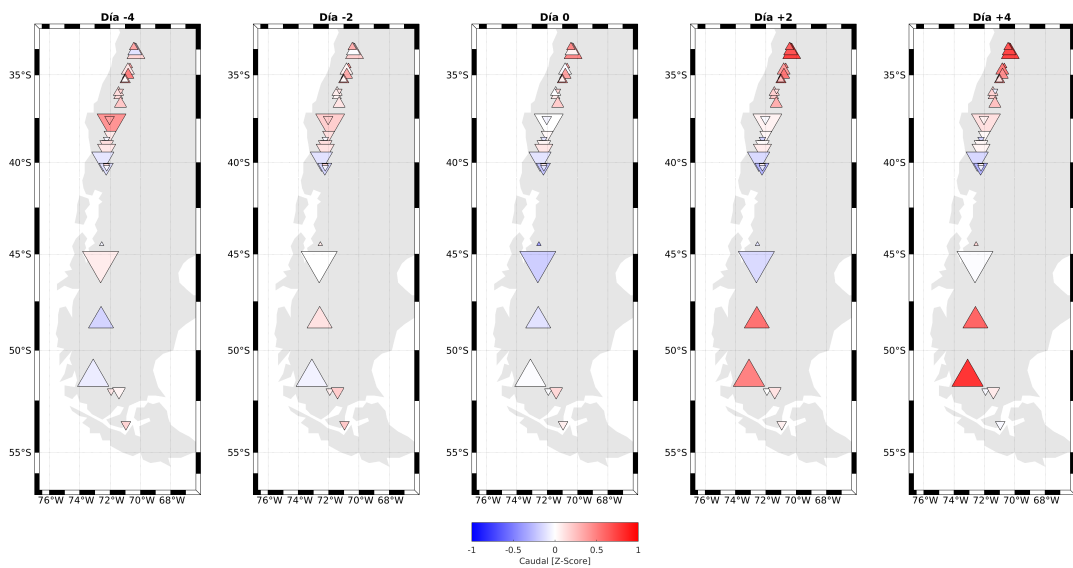


Figura 4.2.1: Valores promedio de Z-Score de caudal de cada cuenca a lo largo de una secuencia centrada en el comienzo de una OC (día 0). Triángulos invertidos representan las cuencas que muestran una disminución de caudal los días de olas de calor. Triángulos con vértice hacia arriba representan las cuencas que muestran un aumento de caudal los días de olas de calor. Día 0 corresponde al primer día del evento, se muestra los días -4, -2, 0, +2, +4. El tamaño de los triángulos varía con el área de la cuenca.

Observando los valores de las cuencas cuya señal de caudal promedio aumenta y disminuye en torno al día 0 de OC, se puede estudiar la respuesta del régimen (figura 4.2.2). Un análisis similar se realiza sobre PET, mediante el cálculo de la mediana y distribución de los valores. Los análisis detallados de las cuencas que exhiben un aumento de caudal se verán en la sección siguiente.

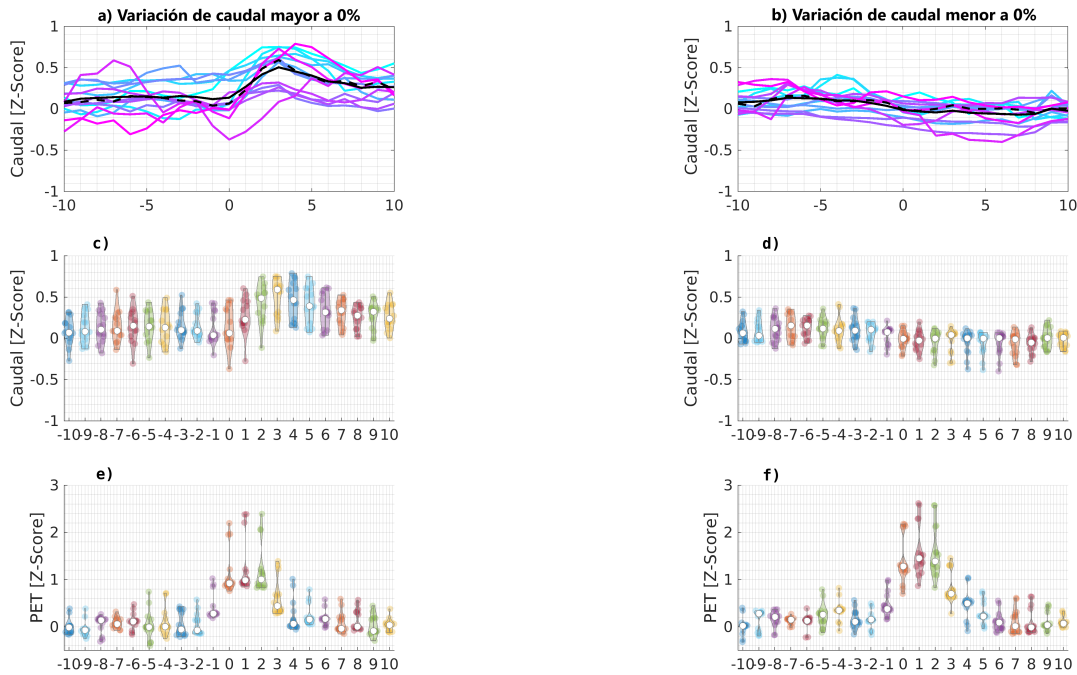


Figura 4.2.2: Z-Score de caudal promedio (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) para grupos con variación de caudal mayor y menor a 0% utilizando parámetro 1 para identificar cuencas y su comportamiento los días posteriores que ocurre una ola de calor, líneas de colores representa la señal media de caudal en Z-score de cada cuenca, línea negra representa la media, línea segmentada la mediana de las líneas de colores (a,b). Para ambos grupos se encuentra su respectivo violinplot de caudal (c,d) y violinplot de PET (e,f). Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

Se realizaron diagramas de dispersión y se calculó el coeficiente de correlación de Pearson y regresión lineal entre el caudal y la intensidad y persistencia de ola de calor (Figura 4.2.3). La latitud se visualiza en una escala de colores, donde los colores cálidos representan latitudes más bajas (rojo, naranja) y los tonos fríos latitudes más altas (verde, celeste, azul). La relación entre temperatura máxima (Z-Score) y porcentaje mayor a 0 es negativa, $r = -0,16$ (línea roja sólida), mientras que la relación entre temperatura máxima y disminución de caudal (porcentaje menor a 0) la tendencia es positiva y $r = 0,09$ (línea roja segmentada) figura 4.2.3a. En ambas figuras los círculos representan latitudes hasta los 39°S (centro) y diamantes desde los 39°S (sur y austral) hacia latitudes

más altas. Se observa una relación negativa con $r = -0,27$ (línea roja sólida) con las cuencas que muestran aumento de caudal tras el día 0 de OC y su persistencia. Una relación positiva se observa entre persistencia y disminución de caudal con correlación $r = 0,59$ (línea roja segmentada) figura 4.2.3b.

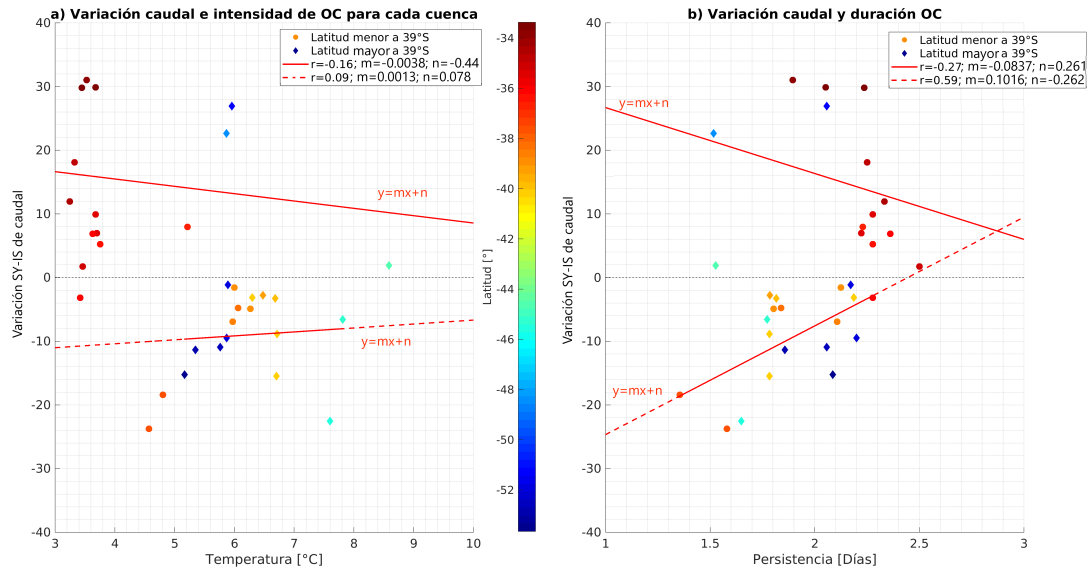


Figura 4.2.3: a) Variación porcentual promedio de caudal con respecto a la intensidad media de ola de calor para cada cuenca. Se establecen 2 grupos según el signo de la variación de caudal (aumento o disminución, (porcentaje positivo o negativo), respectivamente), b) Variación SY-IS de caudal con respecto a la persistencia de ola de calor para cada cuenca. La variación de caudal se obtuvo utilizando el parámetro 1 de la señal media de cada cuenca. En cada gráfico de dispersión se observan con círculos cuencas cuya latitud se encuentra al norte de 39°S y en rombos cuencas al sur de 39°S. Las rectas de regresión lineal para cuencas que muestran aumento de caudal se muestran en líneas rojas sólidas y las que muestran disminución en líneas rojas segmentadas. r da el valor del coeficiente de correlación e y entrega el valor de tendencia lineal.

A continuación, se analizan dos grupos de cuencas, según la respuesta de sus respectivos caudales tras el inicio de OC (día 0). Para ello se utiliza el parámetro 1 ya que al graficar por separado los grupos que muestran aumento (mayor o igual a 0%) y disminución de caudal (menor a 0%), se nota el cambio en la señal media de los caudales (spaghetti plot), figura 4.2.2. En cambio, si se utiliza el parámetro 2, los valores porcentuales serán mucho mayores y la señal de aumento comienza

desde el 9%, por lo tanto, el parámetro 1, es más simétrico con los valores de porcentaje entre ambos grupos.

4.2.1. Disminución de Caudal

La Figura 4.2.4 registra el régimen promedio de las cuencas cuya variación de caudal z-score es negativa (menor a 0%), se trabajó con Z-Score ya que todas las cuencas tenían diferente régimen y diferente desviación estándar y de esta manera se hacen intercomparables. Los caudales identificados en esta categoría corresponden a los ubicados entre los 37-57°S. Ciertas cuencas como del Río Ancoa y Río Duqueco muestran aumento entre los días -5 y -3, mientras que en las cuencas del Río Rubens y Río Penitente presentan aumento entre los días -10 y -7. La tendencia general es negativa o simplemente no muestra algún cambio cuando ocurre la ola de calor, ya que todos los valores de Z-Score se mantienen cercanos a cero. La mediana de la señal (líneas segmentadas) muestra un aumento en el día +3 ocurrido el evento de ola de calor (Figura 4.2.4 a, b).

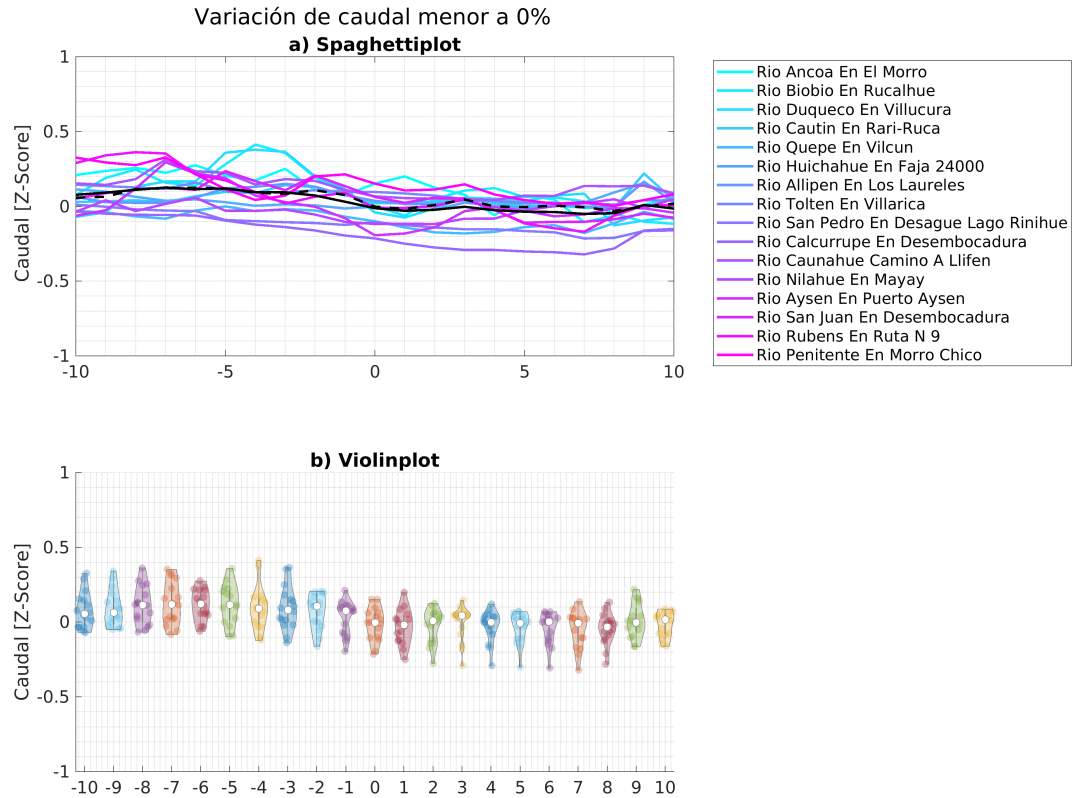


Figura 4.2.4: a) Señal z-score (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) de disminución de caudal tras el día 0 de una OC, identificada en un total de 16 cuencas y su respectivo nombre. El gradiente de color celeste a morado indica cuencas desde el norte hacia el sur respectivamente, la línea negra representa la media de señal de caudal y línea segmentada la mediana. b) Violinplot de disminución de caudal para las 16 cuencas. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

4.2.2. Aumento de Caudal

El cuadro 4.2.1 muestra las 14 cuencas que presentan un aumento de caudal z-score al ocurrir eventos de olas de calor, todas cumplen con la condición de tener al menos el 50 % de los datos de verano y el 54 % de eventos de olas de calor. Debido a que se analizan anomalías de caudal y Z-Score, no es posible saber cual es la magnitud de la desviación estándar a simple vista, por lo que realizó una tabla con los valores de media o régimen $\bar{X}$ y desviación estándar σ de valores de verano extendido de caudal original y anomalías SY-IS. La tabla también incluye

Nombre Cuenca	Registro caudal disponible (año inicio-año fin) (año faltante)	Fracción años (1980-2016)	N° OC	Fracción OC	$\bar{X}$ abs [m^3/s]	$\bar{X}$ anom [m^3/s]	σ abs [m^3/s]	σ anom [m^3/s]
Maipo En San Alfonso	1980-2016	1	38	0.87	111.4	-7.52	64.22	33.15
Colorado Antes Junta Río Maipo	1980-2016	1	38	0.92	47.19	-1.85	18.73	10.17
Mapocho En Los Almendros	1980-2016	1	38	0.97	7.02	-0.4	6.4	3.39
Claro En Hacienda Las Nieves	1980-2016 (1988)	0.97	36	0.97	8.93	-0.58	5.4	2.63
Tinguiririca Bajo Los Briones	1980-2014 (1983,84,87)	0.92	36	0.94	73.18	-3.13	34.4	16.43
Teno Despues De Junta Con Claro	1980-2016	1	36	1	58.82	-2.57	37.47	17.82
Colorado En Junta Con Palos	1980-2016	1	36	0.97	51.01	-0.94	34.23	16.23
Palos En Junta Con Colorado	1980-2016	1	36	0.97	30.05	-1.21	15.12	6.19
Longavi En La Quiriquina	1980-2016	1	48	0.92	22.93	0.23	12.94	8.18
Achibueno En La Recova	1987-2016	0.81	48	0.92	21.01	-0.15	17.93	9.19
Nuble En La Punilla	1980-2016	1	48	0.96	55.18	-3.21	45.69	20.88
Ventisquero En Carretera Austral	1992-2016 (2007,13)	0.62	57	0.6	44.06	0.44	18.12	16.26
Mayer En Desembocadura	1986-2016 (1991,92,93)	0.76	62	0.76	162.24	-4.02	57.46	41.03
Serrano En Desembocadura	1985-2016	0.59	35	0.71	602.07	4.72	210.27	152.67

Cuadro 4.2.1: Estadísticas de caudal por cuenca. Columnas representan: 1) Nombre cuenca, 2) extensión de registro de caudal disponible (año inicio-año final) y/o año faltante, 3) fracción disponibilidad del registro considerando 37 años, 4) Número de eventos totales de OC en estación DMC de referencia, 5) fracción de registros de eventos OC dentro del periodo disponible de datos de caudal, 6) caudal promedio absoluto, 7) desviación estándar de régimen absoluto, 8) caudal promedio de anomalías SY-IS, 9) desviación estándar de anomalías SY-IS de caudal. Las estadísticas fueron calculadas tomando el periodo 1980-2016 durante el verano extendido (noviembre a marzo).

la disponibilidad de datos en años y la cantidad de eventos de olas de calor que se consideran en cada una de las 14 cuencas.

De acuerdo a la tabla 4.2.1 las cuencas con mayor cantidad de datos corresponden a las de la zona central, mientras que las cuencas australes poseen menor información. En los lugares donde se registraron mayor número de olas de calor fue en las cuencas australes. Las cuencas que poseen caudal de mayor magnitud son las de Río Serrano en Desembocadura, Río Mayer en Desembocadura y Río Maipo en San Alfonso, mientras que las cuencas con menor caudal son las correspondientes a Río Mapocho en los Almendros y Río Claro. Las cuencas que muestran menor desviación estándar cuando ocurren olas de calor son las dos últimas mencionadas anteriormente, sumando las cuencas del Río los Palos y Río Longaví. Las cuencas en las que se observa mayor desviación estándar cuando ocurren OCs son las del Río Serrano y Río Mayer.

4.2.2.1. Parámetro I

Como ya se mencionó anteriormente este parámetro será el más usado para estudiar el aumento de caudal. Se obtuvieron 14 cuencas, donde la mayoría corresponde a la zona centro y 3 corresponden a la Patagonia (Río Mayer, Río Ventisquero y Río Serrano). Los valores mínimos de caudal se observan entre el día -1 y 0 (Figura 4.2.5).

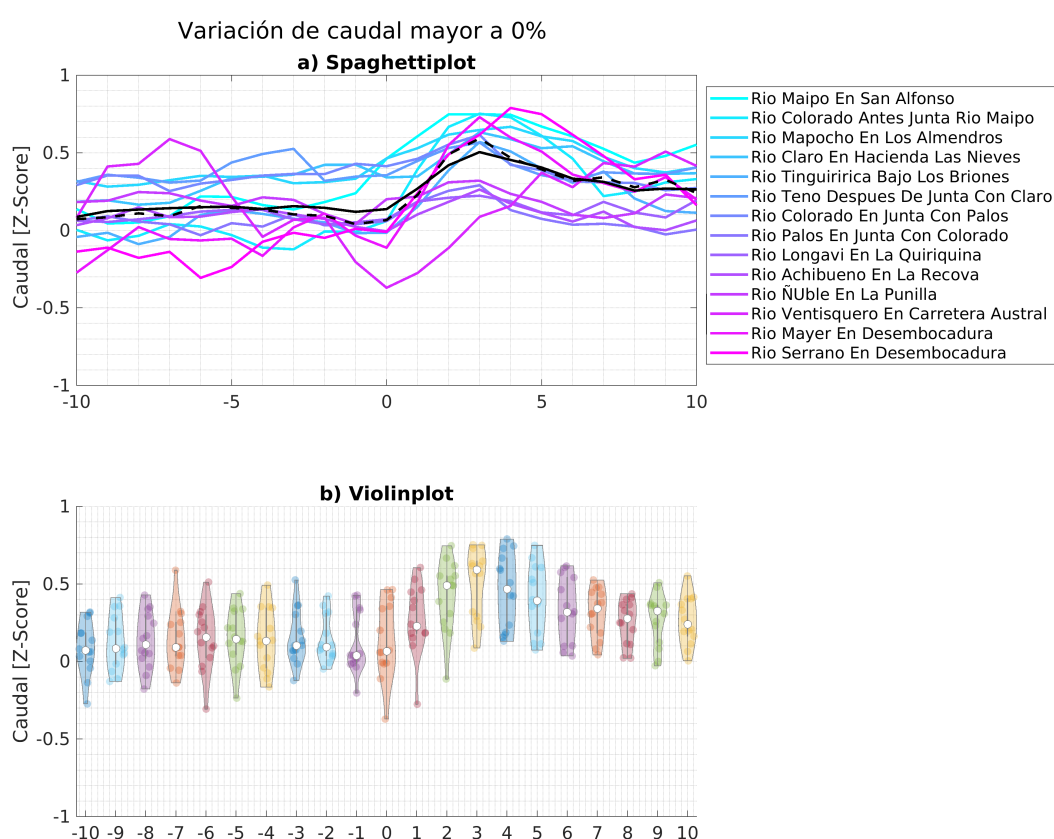


Figura 4.2.5: a) Señal z-score (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) de aumento de caudal promedio tras el día 0 de una OC, identificada en un total de 14 cuencas y su respectivo nombre. El gradiente de color celeste a morado indica cuencas desde el norte hacia el sur respectivamente, la línea negra representa la media de señal de caudal y línea segmentada la mediana. b) Violinplot de aumento de caudal para las 14 cuencas. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

4.2.2.2. Parámetro II

Los resultados para el parámetro 2 se realizaron con la señal media de caudal de cada cuenca. Se tomaron todas las cuencas que cumplieran con un porcentaje mayor a 0 %, sin embargo, la señal media que se formaba entre todas estas cuencas, no mostraba un aumento de caudal cuando ocurre una OC. Por dicha razón se operó un test de sensibilidad para encontrar desde qué “umbral” de porcentaje las cuencas comenzaban a mostrar una señal promedio de aumento de caudal. Se obtuvo que las cuencas muestran una clara señal de aumento cuando el umbral de la variación porcentual elegida como criterio de selección de cuencas es igual o superior a 9 % (Figura 4.2.6). Las cuencas que cumplen esta condición son 12, y 10 coinciden con las cuencas obtenidas a partir de un umbral de % aplicado al parámetro 1; es decir, todas, excepto las cuencas del Río Ventisquero y Río Longaví. Según la mediana calculada para el conjunto de señales, el valor máximo de caudal ocurre al día +3 y el valor máximo PET ocurre al segundo día tras el inicio de una ola de calor (día +1), pero se mantiene con valores similares desde el día 0 hasta el día +2.

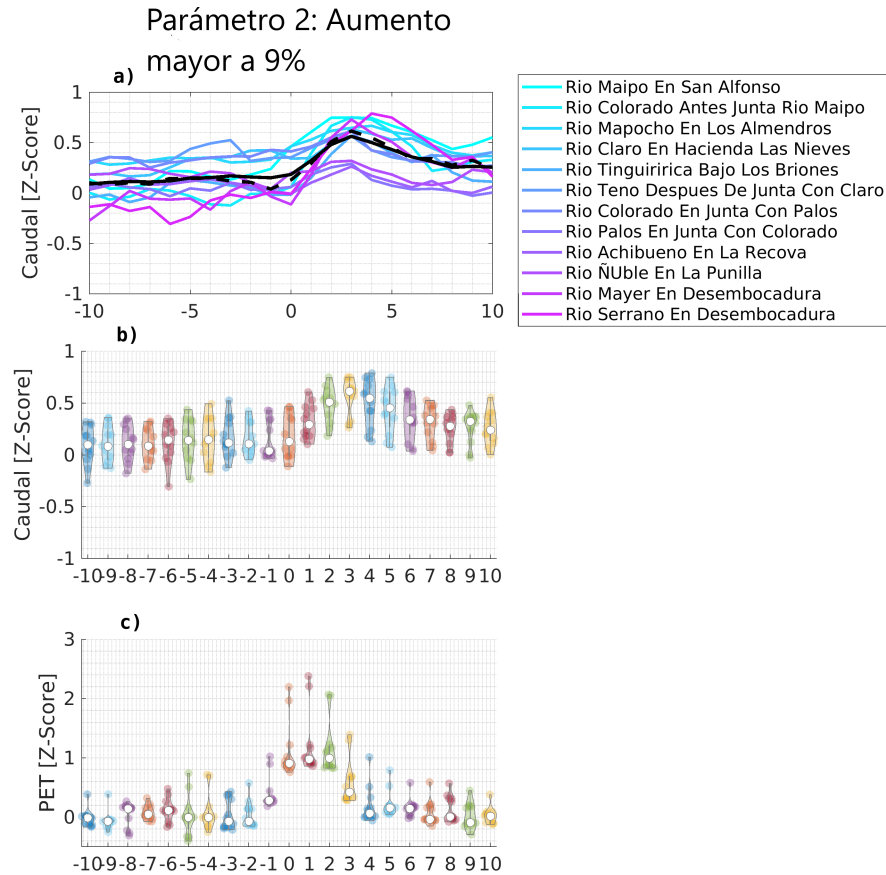


Figura 4.2.6: a) Señal z-score (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) de aumento de caudal promedio (mayor o igual a 9%) tras el día 0 de una OC, identificada en un total de 12 cuencas y su respectivo nombre. El gradiente de color celeste a morado indica cuencas desde el norte hacia el sur respectivamente, la línea negra representa la media de señal de caudal y línea segmentada la mediana. b) Violinplot de aumento de caudal para las 12 cuencas. c) violinplot de PET para cada una de las 12 cuencas. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

4.2.2.3. Test de Rodionov

El método utilizado para ver un cambio en el régimen de caudal (denominado "salto") fue el Test de Rodionov, se aplicó a la señal media de 21 días de caudal de cada cuenca. Se determinó que 10 cuencas exhiben un salto entre los días 0 y +5. Los resultados del test de Rodionov aplicado a caudal y PET son similares a los obtenidos mediante los criterios aplicados a los parámetros anteriores, ya que las cuencas que muestran un salto de caudal corresponden a las que responden a un

aumento de caudal utilizando el parámetro 1 y 2 (Figura 4.2.7).

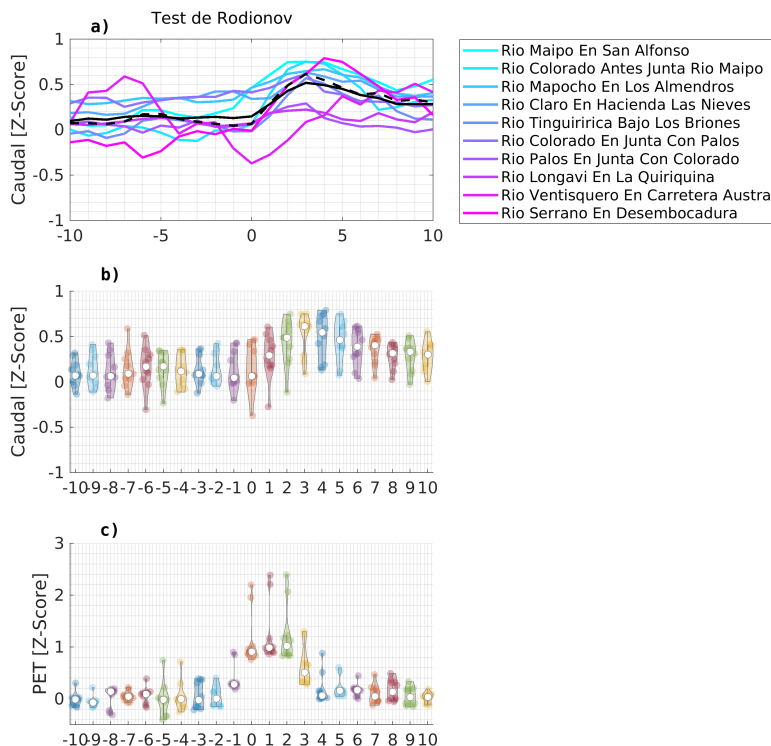


Figura 4.2.7: a) Cuencas que presentan una señal de aumento de caudal z-score promedio (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) tipo cambio de régimen, según el test de Rodionov. Las cuencas se identifican con su nombre; el gradiente de color celeste a morado indica cuencas desde el norte hacia el sur. Línea negra representa la media y línea segmentada representa la mediana de las series de colores. b) similar al panel a), pero utilizando violinplot para graficar el aumento de caudal para las 10 cuencas. c) similar al panel b), pero para la variable PET. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

La Figura 4.2.8 muestra la señal promedio calculada a partir de todas las cuencas seleccionadas a partir de cada test, para la variable de anomalías caudal, PET y Tx. Las señales obtenidas a partir de cada uno de los 3 test son bastante similares. Debido a ello se optó por seleccionar la señal de aumento de caudal de las cuencas obtenidas según el test aplicado al parámetro 1. Con este test se selecciona un mayor número de cuencas, lo que puede hacer que el análisis de régimen de caudal sea más representativo de las diversas características de las cuencas. Por lo tanto,

en los análisis siguientes, se utilizarán estas 14 cuencas.

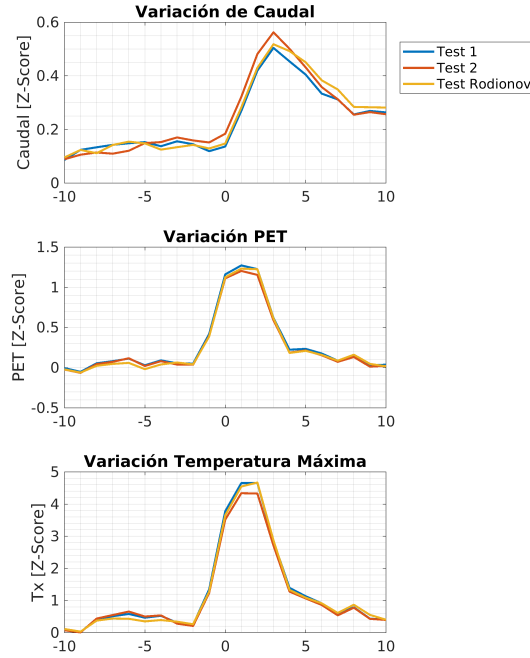


Figura 4.2.8: Señales z-score promedio (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) en las cuencas que exhiben aumento de caudal tras el día 0 de una OC, calculada a partir de los registros seleccionados empleando cada parámetro y test: Parámetro 1 $> 0\%$ (azul), Parámetro 2 $> 9\%$ (rojo), Test de Rodionov (amarillo). Las variables corresponden a) variación de caudal SY-IS en Z-Score, b) variación de evapotranspiración potencial PET SY-IS en Z-Score, c) variación de temperatura máxima SY-IS en Z-Score. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

Empleando el parámetro 1, es decir tomando cuencas que mostraran un aumento de caudal igual o mayor a 0% , se realizaron clusters de acuerdo distintos valores porcentuales. Los clusters se establecen para los rangos de porcentaje de aumento de caudal entre $0-10\%$, $10-20\%$ y $> 20\%$ (figura 4.2.9). La señal media de variación $0-10\%$ es más suave en comparación con las que tienen porcentajes más altos y el caudal máximo ocurre aproximadamente en el día +3 (figura 4.2.9 b). Dos cuencas exhiben aumentos del parámetro en el rango $10-20\%$ corresponden a la zona central del país y el caudal máximo de ambas cuencas ocurre al día +3 (figura 4.2.9 c). Finalmente las cuencas con variación de caudal mayor a 20% son

3 correspondientes a la Región Metropolitana, celeste: Río Maipo, Río Colorado y Río Mapocho, que tienen considerable aporte glaciar (Azócar et al., 2019) y dos cuencas de la zona Austral (magenta, Río Mayer y Río Serrano); tanto la señal promedio como las señales individuales presentan una mayor persistencia y mayor magnitud en el aumento de caudal, comparado con los casos anteriores (figura 4.2.9 d) y el caudal máximo ocurre aproximadamente al día +4.

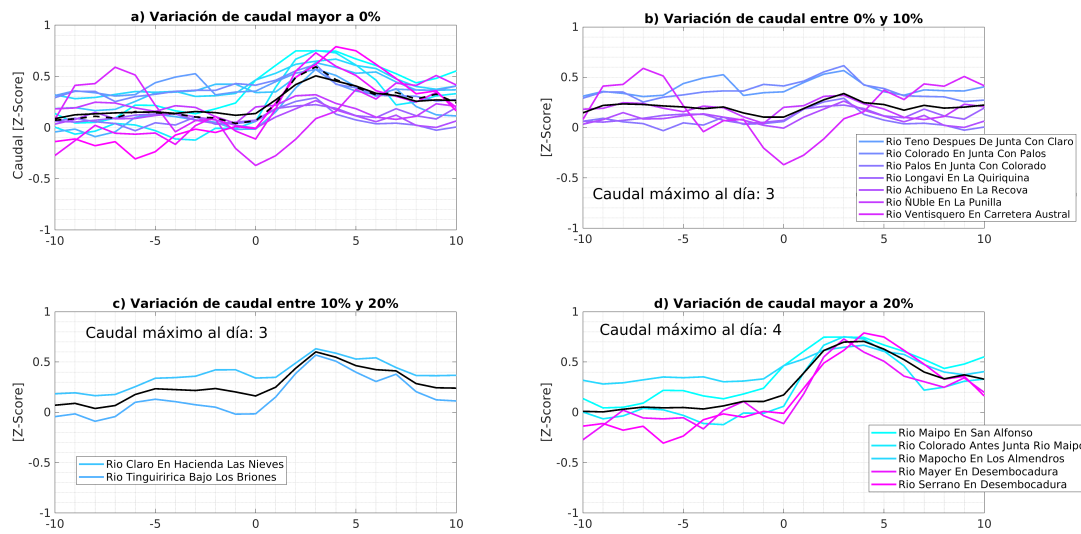


Figura 4.2.9: Usando parámetro 1, se obtienen 14 cuencas con aumento de caudal z-score (revisar sección 4.2.2, tabla 4.2.1) asociados a eventos de olas de calor en las estaciones DMC de referencia. Las señales correspondientes de aumento de caudal se dividieron en 3 clusters según su intensidad: b) 0 – 10 %, c) 10 – 20 % y d) > 20 %. Señal promedio se observa en negro para cada uno de los paneles. El gradiente de colores celestes a magenta muestra la transición de cuencas de norte a sur. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

Se aplicó el Test de Rodionov, de las señales de caudal de cada ola de calor de las 14 cuencas que muestran un cambio en el régimen. Para estudiar un cambio de régimen en olas de calor de cada cuenca, se observó si el salto positivo ocurría desde el día 0 hasta el día +5 (figura 4.2.10). Se puede observar en la figura 4.2.10 que el cambio de régimen ocurre mayormente entre el segundo y tercer día que ocurre la ola de calor. Algunas cuencas como del Río Maipo, Río Teno, Río Los

Palos y Río Ñuble muestran cambio en el régimen el primer día del evento. De acuerdo a la señal media de las 10 cuencas resultantes del Test de Rodionov, se observa que el cambio de régimen pasa mayormente en el segundo día del evento (día +2), le sigue en frecuencia el tercer día desde que ocurre la ola de calor.

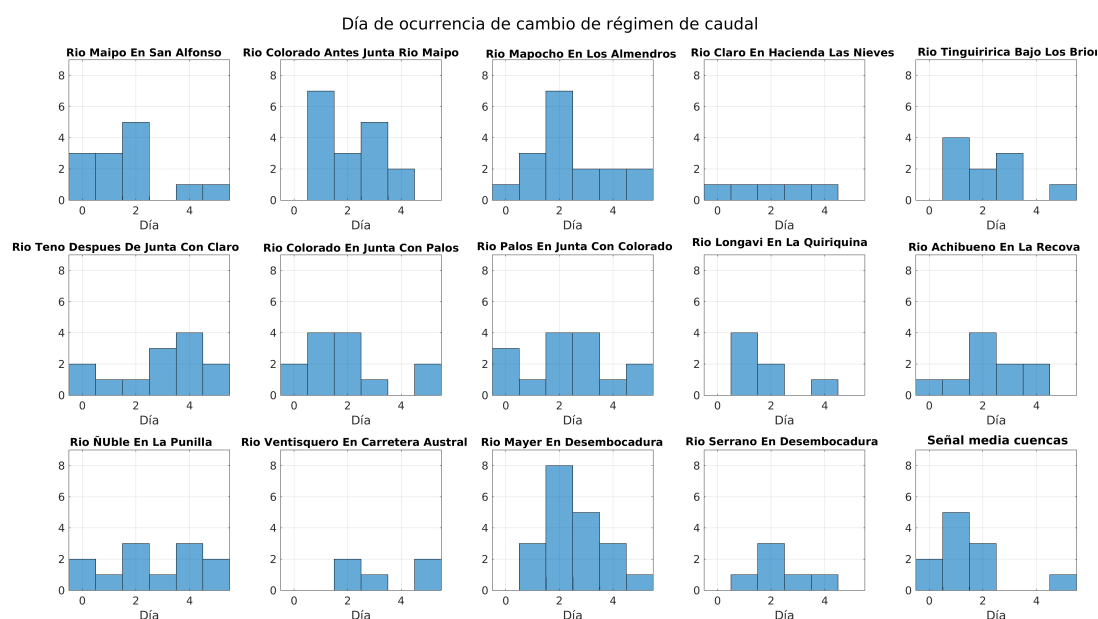


Figura 4.2.10: Histograma de cada cuenca que muestra la frecuencia correspondiente al día donde ocurre un cambio en el caudal entre los días 0 y 5 desde que ocurre el evento de ola de calor utilizando Test de Rodionov.

4.2.3. Relación entre caudal, características de las cuencas y de las OC

Diversos factores como características de la cuenca, debido a su área, cantidad de precipitación sólida acumulada el invierno anterior o fenómenos como El Niño, pueden además de las olas de calor, fomentar a una variación (aumento) de caudal durante las olas de calor que ocurren durante el verano extendido. Esta sección estudia una posible relación entre las variables explicadas anteriormente y la respuesta sobre el caudal en los días que ocurre una OC.

Nombre Cuenca	Área cuenca [m^2]
Maipo En San Alfonso	2787
Colorado Antes Junta Rio Maipo	1663
Mapocho En Los Almendros	638
Claro En Hacienda Las Nieves	245
Tinguiririca Bajo Los Briones	1438
Teno Despues De Junta Con Claro	1205
Colorado En Junta Con Palos	878
Palos En Junta Con Colorado	490
Longavi En La Quiriquina	669
Achibueno En La Recova	894
Ñuble En La Punilla	1254
Ventisquero En Carretera Austral	163
Mayer En Desembocadura	5327
Serrano En Desembocadura	8583

Cuadro 4.2.2: Cuencas que muestran aumento de caudal según parámetro 1. Columnas representan: 1) Nombre cuenca, 2) Área de cuenca.

4.2.3.1. Área de la cuenca

El área de la cuenca es un factor que directamente puede incidir en el caudal correspondiente (Emerson et al., 2005). Por dicha razón, se tomaron los valores de área correspondientes a cada una de las 14 cuencas seleccionadas en la sección anterior (tabla 4.2.3) y, se separaron en dos grupos: delimitados por el paralelo 39°S. Luego se calculó una regresión lineal y se calculó el coeficiente de correlación (r), entre porcentaje de variación de caudal (parámetro 1) y área de su respectiva cuenca, diferenciando ambos grupos de cuencas (superiores e inferiores a 39°S). La recta de regresión entre la variación de caudal y el área de las cuencas ubicadas al norte de 39°S (círculos) muestra una tendencia positiva (línea negra sólida) y $r = 0,56$. Mientras que la relación del tamaño de la cuenca y las 3 cuencas con latitud superior a 39°S también es positiva y $r = 0,98$ (línea negra segmentada). Los colores varían en torno a la latitud (Figura 4.2.11).

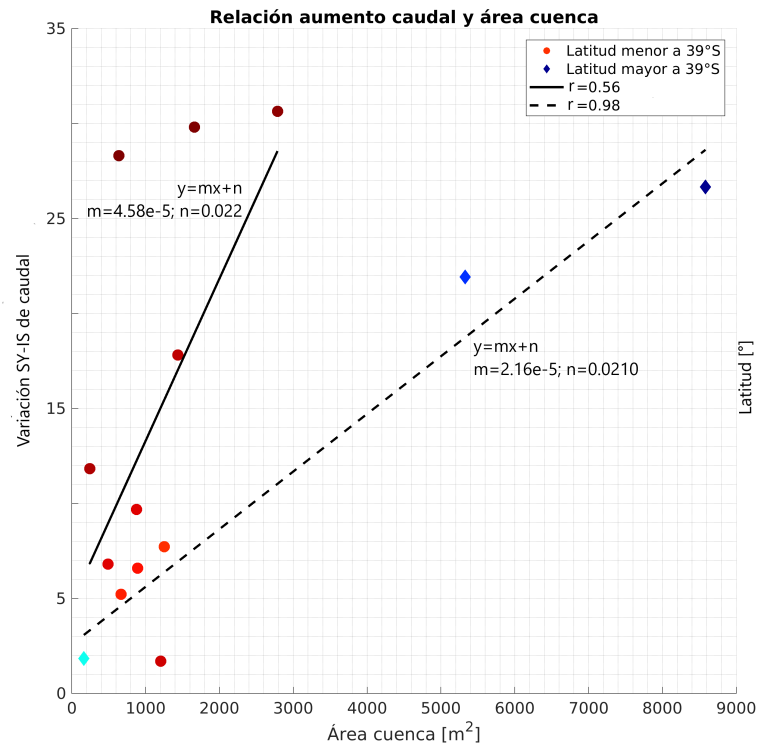


Figura 4.2.11: Relación entre variación SY-IS promedio de caudal (utilizando parámetro 1) y el área de la cuenca. Cuencas ubicadas al norte de 39°S se representan con círculos y cuencas al sur de 39°S se representan con rombos. La escala de colores muestra la latitud a la que se encuentra cada cuenca. r da el valor del coeficiente de correlación e y entrega el valor de tendencia lineal.

Adicionalmente, sin hacer distinción por latitud y complementario a lo anterior, se hicieron clusters de acuerdo al diferente tamaño de las cuencas: menor a 1000 m^2 , entre 1000 y 2000 m^2 y área mayor a 2000 m^2 (figura 4.2.12, tabla 4.2.3). De las 14 cuencas, 5 pertenecen al grupo menor a 1000 m^2 , dichas cuencas pertenecen a la zona centro del país, 5 cuencas corresponden al segundo grupo, el cual posee 3 cuencas del centro y 2 de la zona austral de Chile. Finalmente, de las 4 cuencas de mayor tamaño, 3 pertenecen a la zona centro del país y una corresponde a la Patagonia chilena. La señal media de caudal (línea negra) varía en cada cluster y aumenta en intensidad y persistencia a medida que aumenta el tamaño de la cuenca.

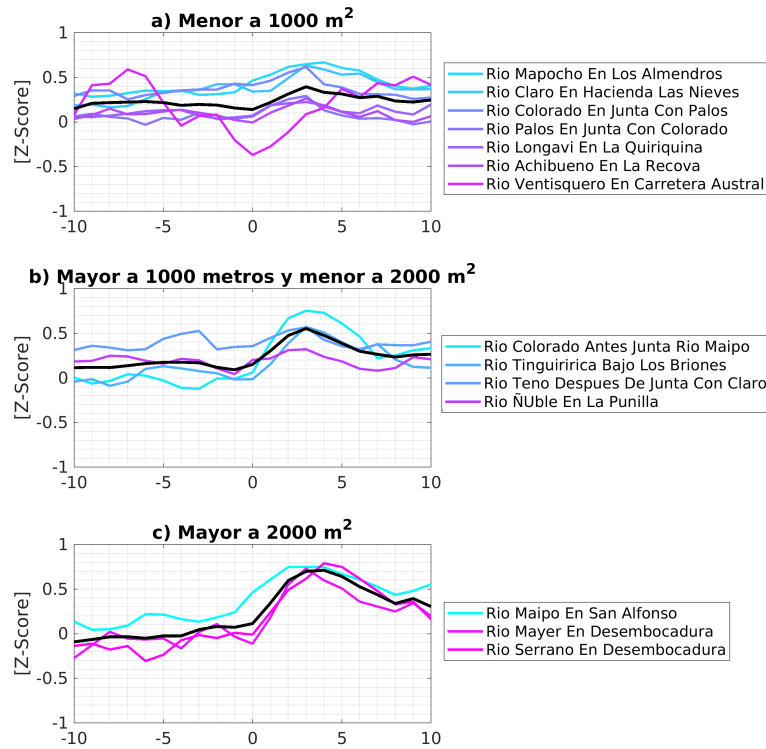


Figura 4.2.12: Clusters de cuencas de acuerdo a su área (señal z-score, revisar tabla 4.2.1). a) menor a 1000 m². b) entre 1000 m² y 2000 m². c) mayor a 2000 m². Línea negra representa la media de las series de las cuencas respectivas (media inter-cuenca), identificadas por leyenda de colores. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

4.2.3.2. El Niño Oscilación del Sur (ENOS)

Se analizaron diversas cuencas ubicadas a diferentes latitudes, para cada cuenca se seleccionaron los eventos que ocurrían bajo una de las 3 condiciones (El Niño, La Niña o neutro) y se calculó la señal media para cada una de las 3 clasificaciones para cada cuenca.

Nombre Cuenca	El Niño	La Niña	Neutro
Colorado Antes Junta Río Maipo	12	13	10
Tinguiririca Bajo Los Briones	9	15	10
Longavi En La Quiriquina	10	13	10
Ñuble En La Punilla	4	19	23
Ventisquero En Carretera Austral	12	14	8
Serrano En Desembocadura	6	12	7

Cuadro 4.2.3: Cantidad de olas de calor que transcurren en la fase de El Niño, La Niña o neutro, para diferentes cuencas.

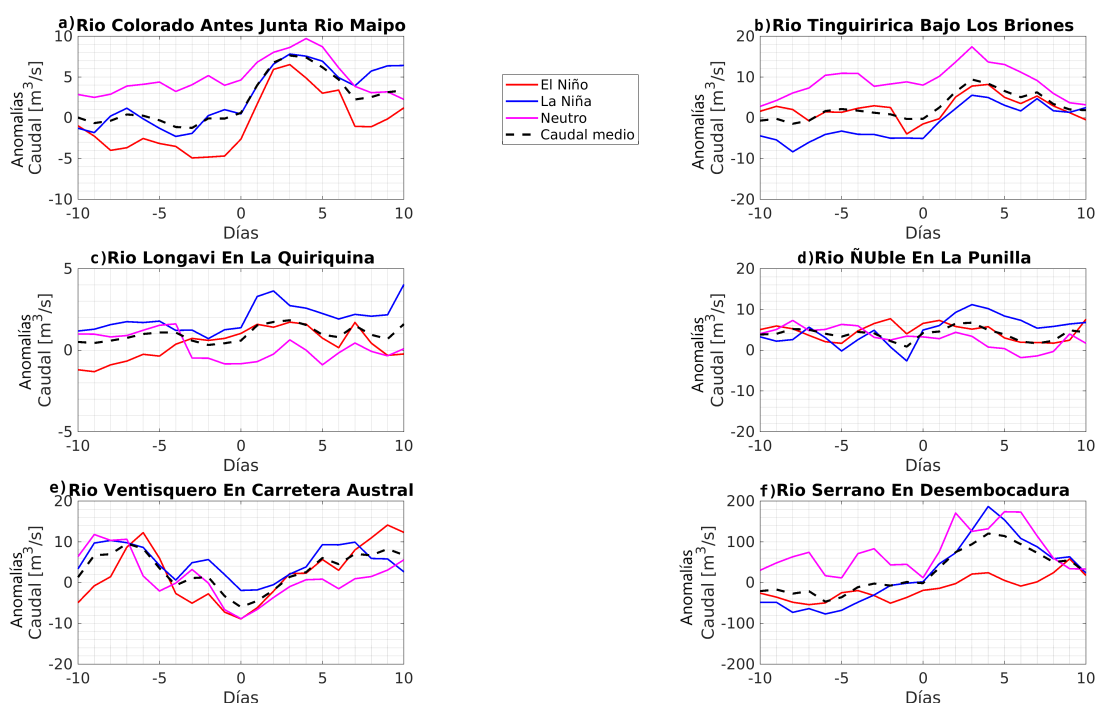


Figura 4.2.13: Distintas cuencas y su señal media al ocurrir OC en periodo de El Niño (rojo), La Niña (azul), Neutro (rosado) y de caudal medio (negro) para cada cuenca.

De acuerdo a la Figura 4.2.13 en todas las cuencas mostradas se observa que la señal respectiva a los eventos Neutros (magenta) muestra un aumento cuando ocurre una ola de calor a excepción de Río Ñuble. Sin embargo, en la cuenca de Río Longaví y Río Ventisquero, la señal es menor durante años neutros a la del caudal promedio. Los eventos de La Niña (azul) manifiestan un aumento de caudal, superior al caudal medio, siendo la cuenca del Río Tinguiririca la excepción. Finalmente,

los eventos de El Niño (rojo) muestran una señal de aumento similar o menor a la señal de caudal medio.

4.2.3.3. Nieve Invernal

La nieve acumulada en el invierno anterior (marzo-agosto) a cada verano analizado puede ser un factor fundamental como condición inicial para estimar una posible relación entre la nieve y la variación (aumento) de caudal en la temporada estival debido a olas de calor, es por ello que se estudió la relación entre la nieve acumulada en invierno anterior y el aumento porcentual de caudal tras OC durante verano (utilizando parámetro 2), haciendo la distinción según el mes de ocurrencia y las OCs. Se seleccionaron cuencas representativas de cada rango latitudinal.

De acuerdo a la figura 4.2.14, primero se describen los resultados para la cuenca del Río Maipo. El máximo aumento de caudal ocurre en diciembre de 1997 pero con una nieve acumulada previamente cercana a 500 mm, mientras que para el mayor registro de nieve no se muestra un aumento de caudal. En el caso de la cuenca del Río Tinguiririca el mayor aumento de caudal ocurre en noviembre de 1988 pero con una nieve acumulada cercana a 500 mm, que está bastante alejada a los valores para otros años. En 2005 fue donde más nieve se acumuló y muestra un aumento aproximado de 30 %. Más hacia el sur, en la cuenca del Río Ñuble, se observa que el mayor aumento de caudal ocurrió el 1 de noviembre de 1983, nuevamente para los años que se encuentra mayor nieve acumulada no se ve un aumento de caudal significativo, es en el mes de noviembre donde se presenta el mayor aumento de caudal en dicha cuenca. Siguiendo con el análisis, en el Río Ventisquero no se encuentra gran dispersión en la cantidad de nieve acumulada, se destaca que el evento más caudaloso ocurrió en febrero de 2015. Para los eventos ocurridos en la cuenca del Río Serrano, se observa que el mayor aumento de caudal ocurre en los meses de febrero y marzo. Para el evento específico de 3 de marzo de 2011 coincide que la nieve acumulada fue máxima ese año.

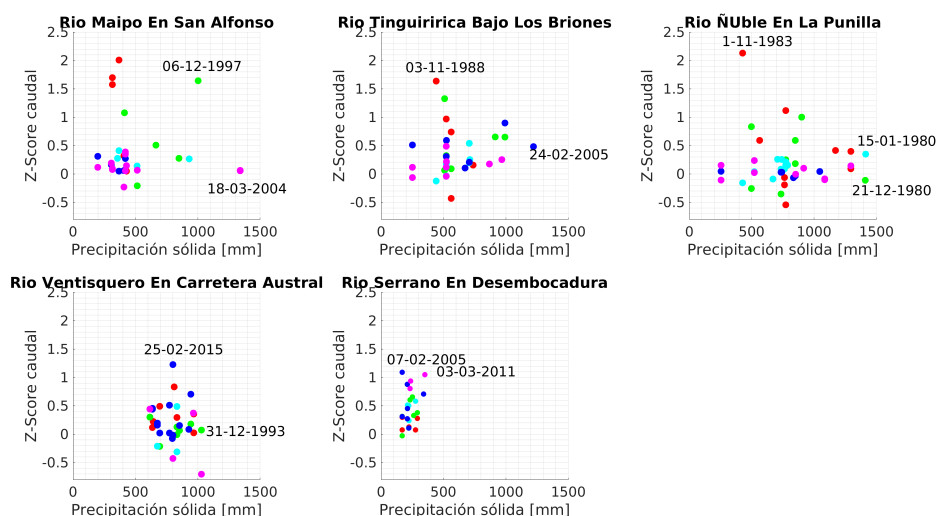


Figura 4.2.14: Relación entre nieve acumulada en invierno previo al verano objetivo (marzo-agosto) con variabilidad SY-IS de caudal expresada en porcentaje para las OC registradas en cada cuenca (utilizando parámetro 2). Se indican mediante fecha los eventos de mayor aumento de caudal y mayor nieve acumulada en cada cuenca, respectivamente. Los meses de ocurrencia de cada OC se ven representados por los siguientes colores: noviembre: rojo, diciembre: verde, enero: azul, febrero: magenta, marzo: magenta.

4.2.3.4. Análisis de dos cuencas particulares

Primeramente, se seleccionó la cuenca de Río Colorado antes Junta Río Maipo. Adicionalmente, se escogió una cuenca de la zona austral del país, correspondiente a la cuenca de Río Serrano en Desembocadura, la idea es comparar los resultados obtenidos con los de la cuenca del Río Colorado, debido a las distintas latitudes que están ubicadas y por tanto, a las diferencias climáticas existentes entre ambas, además de que ambas cuencas presentan un gran aumento de caudal al ocurrir olas de calor. Los valores de porcentaje de caudal, se calcularon utilizando parámetro 2 para ambas cuencas. Tomando los eventos que el aumento de caudal era mayor al 9% se obtuvo la frecuencia de los meses que ocurrieron OC (ejemplo figura 4.2.15 e).

La figura 4.2.15a muestra la señal promedio de anomalías SY-IS de caudal en un periodo que se extiende desde diez días antes hasta diez días después de la

ocurrencia de los eventos de ola de calor. Se seleccionaron los eventos que tuvieran al menos valores para 11 de los 21 días. El área de la cuenca tiene 1662.8 m^2 y la persistencia promedio OC en la cuenca tiene un promedio de persistencia de 1 día e intensidad media de 6.6°C . En los meses que más aumenta el caudal es en los meses de noviembre, después va disminuyendo (figura 4.2.15 b). De acuerdo a la figura 4.2.15c donde las anomalías son mayores en los meses de noviembre, febrero y marzo, se ve una fuerte relación entre aumento de caudal y de temperatura es en los meses de noviembre y diciembre. De acuerdo a la persistencia y duración de ola de calor en la cuenca (figura 4.2.15 d), no se aprecia una relación en algún mes de la temporada estival específico. En la figura 4.2.15e, se observa que la mayor cantidad de aumento de caudal se produce en diciembre y luego en enero, siendo menor en los meses siguientes.

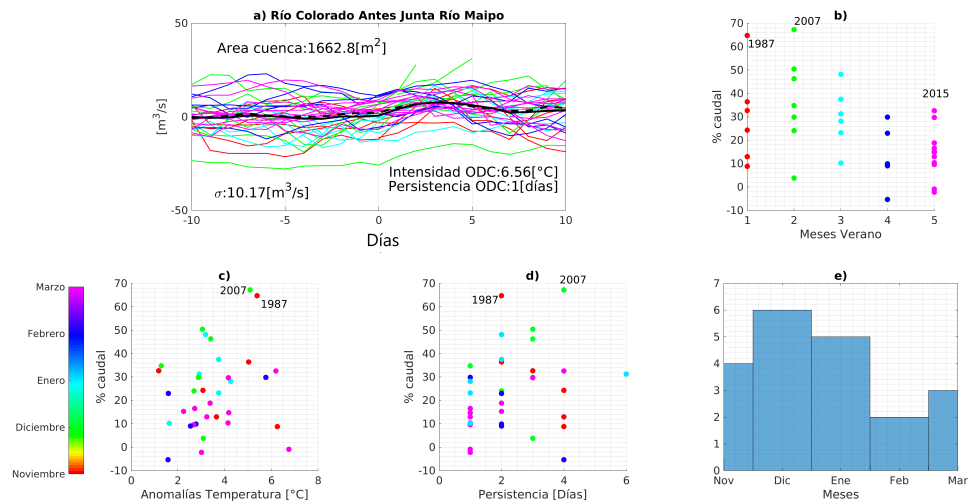


Figura 4.2.15: Cuenca de Río Colorado antes junta Río Maipo, a) señal de variación de caudal en m^3/s ; se especifica el área de la cuenca, desviación estándar del caudal, persistencia e intensidad promedio de la OC. La línea negra representa la media y línea segmentada representa la mediana de las series de colores Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0, b) Variación porcentual de caudal con respecto al mes de verano que ocurre cada OC; se identifican años que presentaron gran aumento de caudal, c) Variación porcentual de caudal respecto a la intensidad de cada OC, d) Variación porcentual de caudal respecto a la persistencia de cada OC, e) Frecuencia de OC en que se registra un aumento de caudal mayor a 9%. Para la variación porcentual de caudal se utilizó el parámetro 2. Los diferentes colores de las secuencias representan los diferentes meses de ocurrencia de OC: noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo con color rojo, verde, celeste, azul y magenta respectivamente.

Adicionalmente, los resultados obtenidos para el caudal de la cuenca de la Patagonia, que posee un área de $8583.3 m^2$, muestra mayor aumento de caudal entre los meses de febrero y marzo (figura 4.2.16 a,b). La relación entre caudal e intensidad de la ola de calor es mayor desde los meses de enero, febrero y marzo (figura 4.2.16 c) y donde se produce mayor aumento de caudal es en el mes de febrero (figura 4.2.16 e). Con respecto a la relación de caudal y duración de ola de calor (figura 4.2.16 d) no se encuentra una relación consistente, ya que cuando el evento dura 2 o 3 días, el aumento de caudal es variado, no se observa gran diferencia de porcentaje con las OC que tienen duración de un día.

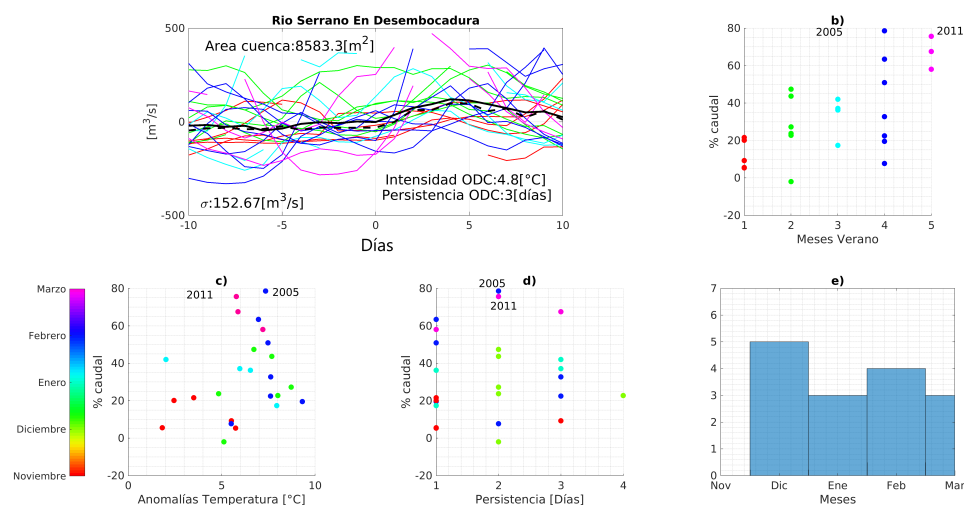


Figura 4.2.16: Cuenca de Río Serrano en Desembocadura, a) señal de variación de caudal en m^3/s ; se especifica el área de la cuenca, desviación estándar del caudal, persistencia e intensidad promedio de la OC. La línea negra representa la media y línea segmentada representa la mediana de las series de colores. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0, b) Variación porcentual de caudal con respecto al mes de verano que ocurre cada OC; se identifican años que presentaron gran aumento de caudal, c) Variación porcentual de caudal respecto a la intensidad de cada OC, d) Variación porcentual de caudal respecto a la persistencia de cada OC, e) Frecuencia de OC en que se registra un aumento de caudal mayor a 9%. Para la variación porcentual de caudal se utilizó el parámetro 2. Los diferentes colores de las secuencias representan los diferentes meses de ocurrencia de OC: noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo con color rojo, verde, celeste, azul y magenta respectivamente.

4.3. Estudios de caso

4.3.1. Río Maipo y Río Colorado

Para comprender de mejor forma ejemplos particulares de aumento de caudal en cuencas seleccionadas gatillados por OC específicas, se compararon los resultados de dos cuencas cercanas cuyos ríos son Río Maipo y Colorado. Para ambas cuencas, se toman como referencia las mismas OC de la estación de Santiago. Es relevante estudiar estas cuencas ya que ambos ríos son indispensables fuentes de agua para

la población. Ambas cuencas son de carácter nival. Por otro lado, al tener una ubicación tan cercana se quiere estudiar cómo responden ambas cuencas a las olas de calor y compararlas.

En primer lugar, se buscaron veranos en que ocurriera más de una OC. El verano que cumplió con estas condiciones fue el de 1989 con tres olas de calor. La primera comenzó el 1 de noviembre, la segunda el 24 de enero y la última fue el 17 de febrero. La figura 4.3.1 muestra la comparación de anomalías SY-IS de caudal, temperatura máxima y PET en ambas cuencas. Para ambos ríos se observa tras el primer evento una gran señal de aumento de caudal que es máxima en los días 4 y 5 desde que comienza la OC. Luego, para el evento del 24 de enero en ambas cuencas también se observa un aumento de caudal, pero no tan alto como el primer evento. Finalmente, para el tercer evento ocurrido el 17 de febrero no existe una señal de aumento de caudal como respuesta. Cabe destacar que en el primer evento las anomalías de temperatura fueron mucho mayores que en los otros eventos lo que puede impactar en la variación del caudal (figura 4.3.1). La señal de PET se comporta de manera similar que la variable de temperatura.

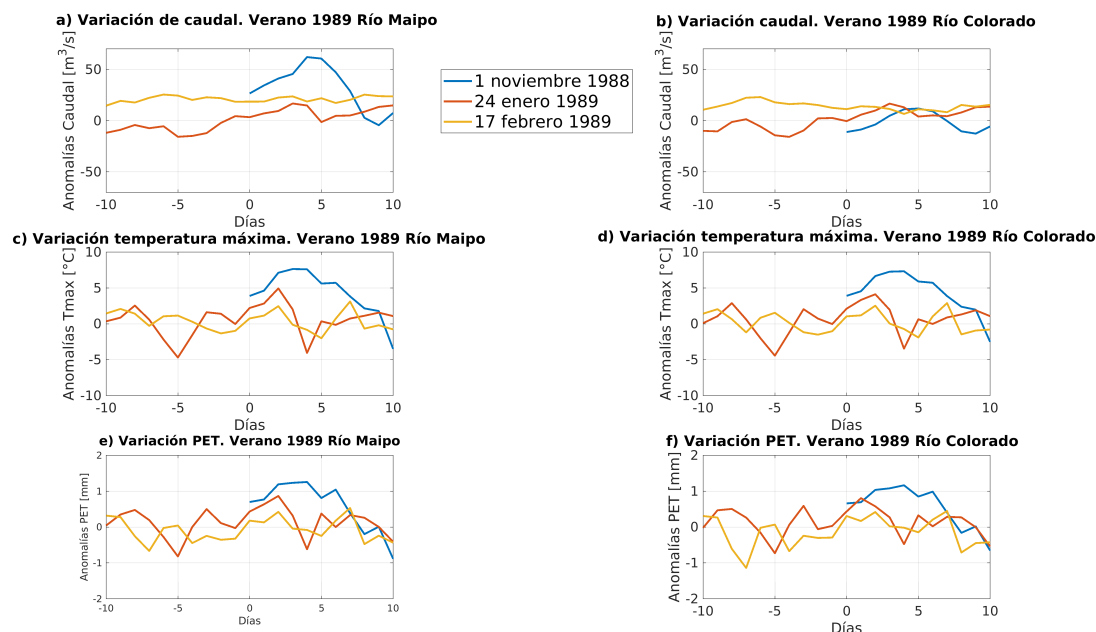


Figura 4.3.1: Anomalías de caudal, temperatura máxima y PET, para las fechas de 1 de noviembre de 1988 (azul), 24 de enero de 1989 (rojo) y 17 de febrero de 1989 (amarillo) para las cuencas de Río Maipo y Río Colorado. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

Las series de tiempo de caudal, temperatura máxima, PET y precipitación extraídas de CAMELS-CL y temperatura máxima extraída de la estación DMC para todo el verano extendido de 1989 se muestra en la figura 4.3.2 para cada cuenca. Se observa que durante cada OC no hay precipitación, por lo tanto, el aumento de caudal tras las dos primeras OC es consecuencia de otra causa. Para la cuenca del Río Maipo, en las tres OC se observa una relación directa entre temperatura y caudal, es decir, una tendencia positiva de temperatura se observa junto con una tendencia en las anomalías de caudal. Esto también se observa en el Río Colorado pero en menor magnitud. Las anomalías de caudal de ambas cuencas muestran un aumento en verano debido al evento de ola de valor, luego se mantienen bajas y comienzan a aumentar desde el segundo evento de olas de calor cerca del 20 de enero y se mantienen con una tendencia positiva. Esto se debe a que ambos ríos son de régimen nival, por lo que su caudal máximo es en

verano debido al derretimiento de hielo y nieve, ya que el aporte a comienzos del verano es principalmente nival, en el transcurso del verano comienza a derretirse el hielo ya descubierto de nieve. Las señales de anomalías de PET también muestran relación con la temperatura y por lo tanto con el caudal.

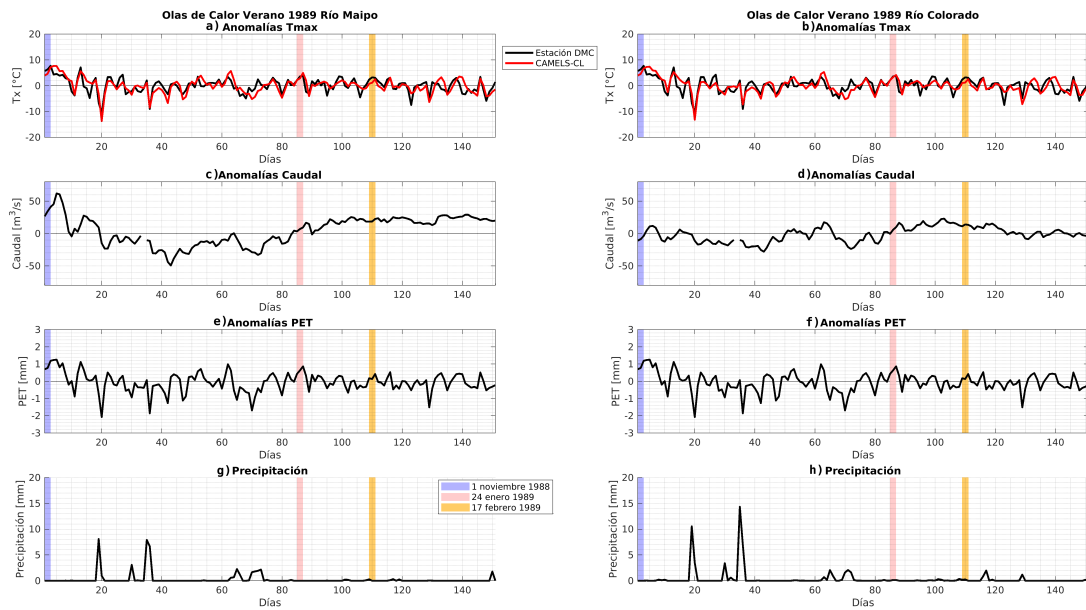


Figura 4.3.2: Series de verano extendido de anomalías de temperatura máxima (en estación DMC de referencia y en la cuenca), caudal, PET y serie de precipitación, para las fechas de 1 de noviembre de 1988 (azul), 24 de enero de 1989 (rosado) y 17 de febrero de 1989 (amarillo) para las cuencas de Río Maipo y Río Colorado.

4.3.2. Río Serrano

El Río Serrano es un río de carácter pluvio-glacio-nival ubicado en la Patagonia chilena. Debido a su ubicación cuenta con características climatológicas completamente diferentes a las estudiadas en el caso anterior. Se estudió el verano extendido de 2015 para la cuenca del Río Serrano en Desembocadura para los eventos del 21 de enero y 3 de febrero (figura 4.3.3). En torno a ambos eventos la temperatura tiene un comportamiento similar, anomalías que superan los 6°C, anomalías positivas de PET también se observan cuando ocurren las olas de calor. Las anomalías de caudal para la primera OC (21 enero de 2015, color azul)

tienen un aumento desde el día 0 y crecen hasta llegar a su máximo el día 3, manteniéndose hasta el día 4, para luego disminuir desde el día 5 a anomalías negativas. Para la OC que comienza el 3 de febrero (color rojo), el caudal comienza a aumentar desde el día -4 y toma valores positivos desde el día -2, y alcanza su máximo el día 0, manteniendo valores positivos hasta el día 2.

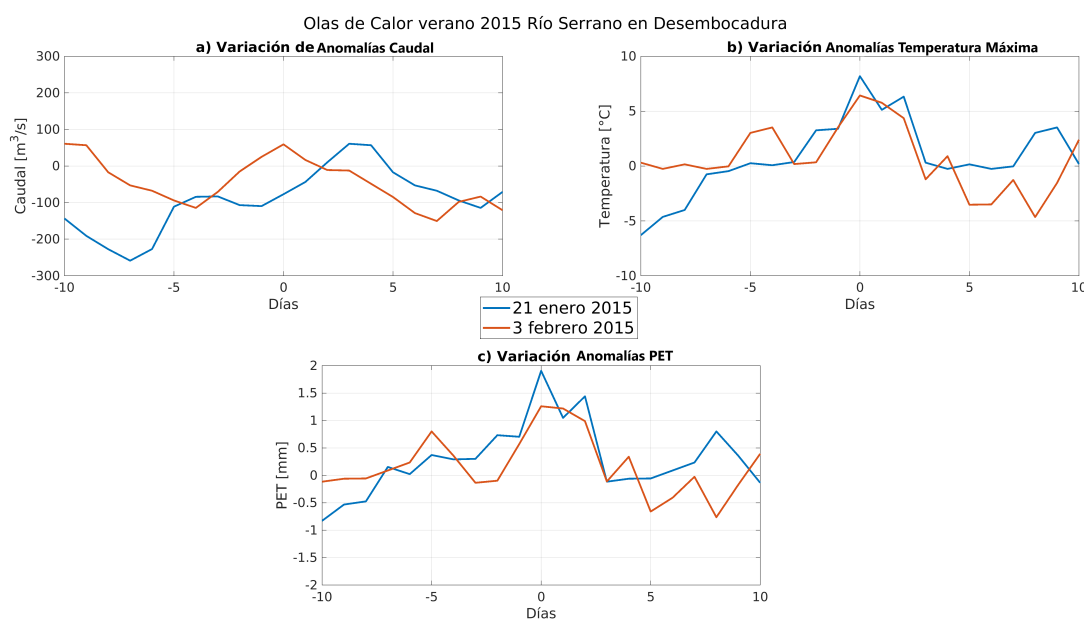


Figura 4.3.3: Secuencia de anomalías SY-IS de caudal, temperatura máxima y PET en torno a las OC de 21 de enero y 3 de febrero de 2015 para la cuenca de Río Serrano en Desembocadura. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

Comparando ambos eventos se observa un desfase en el caudal, donde el segundo evento muestra una respuesta adelantada a dos días de que comience el evento, esto puede deberse a que en el día -5 en adelante también se ve un aumento en la temperatura máxima, que hizo que el caudal comenzara a aumentar desde antes del evento.

De acuerdo a la figura 4.3.4 la señal de temperatura máxima y PET aumentan considerablemente para ambos eventos de ola de calor, pero no muestra una clara señal de aumento de caudal. Desde fines de febrero y todo marzo se observan varios días calurosos en la cuenca del Río Serrano que, sin embargo, según la

metodología empleada no fueron considerados olas de calor. Al observar estos días calurosos también se observa un aumento considerable de caudal.

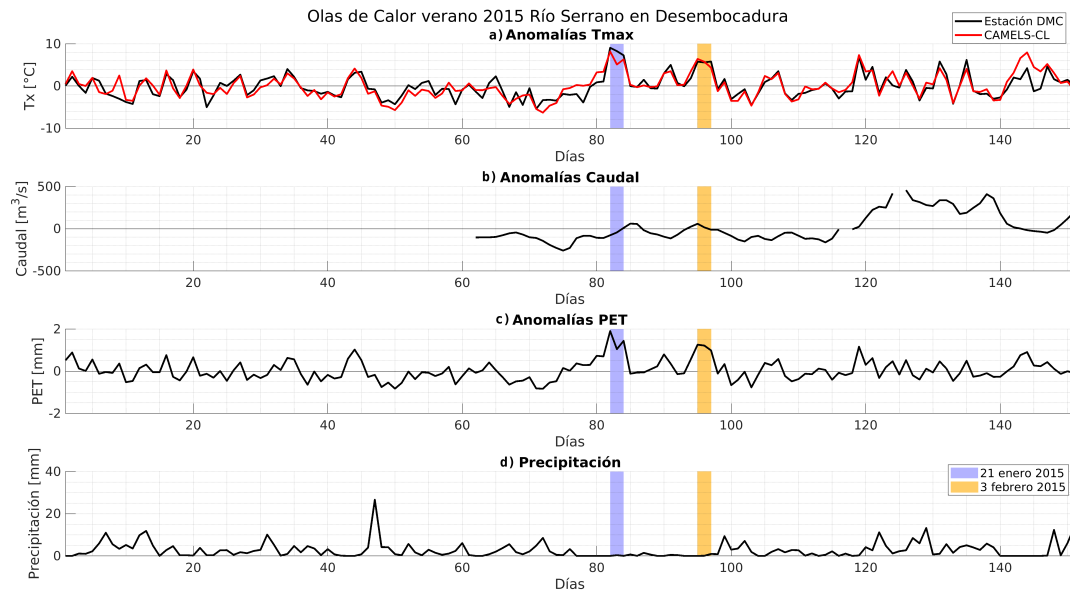


Figura 4.3.4: Series de verano extendido de anomalías de temperatura máxima (en estación DMC de referencia y en la cuenca), caudal, PET y serie de precipitación, para las fechas del 21 de enero (azul) y 3 de febrero de 2015 (amarillo) para la cuenca de Río Serrano en Desembocadura.

Al ser el río Serrano de carácter nival, muestra mayor aumento a finales de la temporada estival, ya que se encuentra limitado por temperatura. Observando la temperatura los días de ola de calor, se observa un aumento de caudal, que es de menor magnitud en comparación con el caudal de los últimos meses de verano donde ocurren varios eventos calurosos (de anomalías positivas de temperatura).

4.3.3. Análisis de gran escala de la circulación atmosférica asociada a los eventos de caso

Se realizaron compuestos de anomalías de altura geopotencial a 850hPa y 500hPa para la ola de calor del 21 de enero de 2015 manifestada en el Río Serrano. El objetivo consiste en identificar posibles patrones de circulación atmosférica precedentes a las OCs estudiadas, con particular atención a la propagación de

ondas en la atmósfera. En la figura 4.3.5 se pueden observar los días anteriores a que comience el evento un patrón de ondas provenientes de Oceanía que avanza por el Pacífico Sur Oriental.

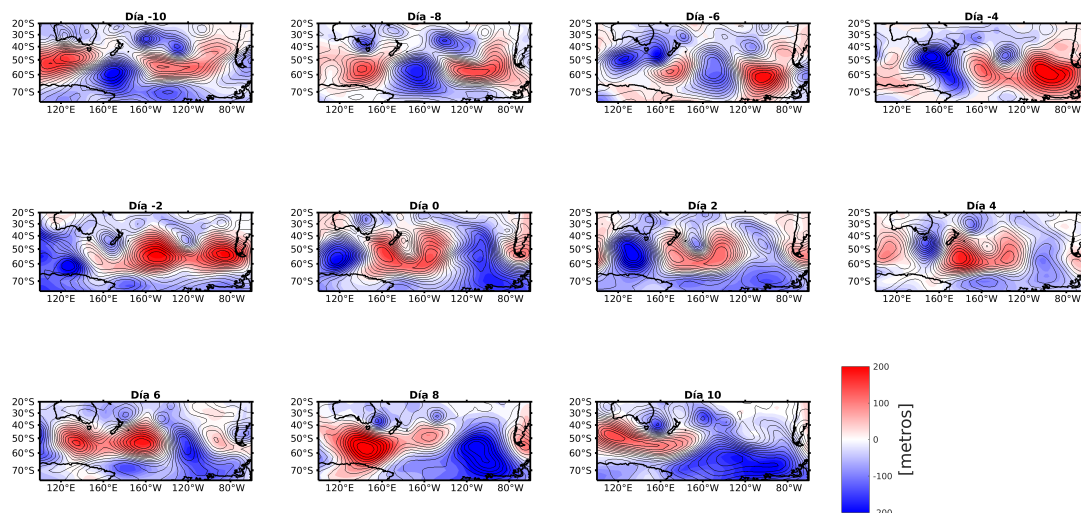


Figura 4.3.5: Compuestos de anomalías de altura geopotencial a 850hPa (sombreado) y 500 hPa (contornos) para la ola de calor del 21 de enero de 2015. El día 0 es el día en comienza el evento de ola de calor.

Los días anteriores a que ocurran los eventos de olas de calor (día -10) no se observan anomalías positivas de la altura geopotencial, hasta el día -8 las anomalías en esta zona son negativas. Pocos días antes de comenzar la OC (día -4) observa una leve anomalía positiva la cual al día 2 aumenta en magnitud y también se expande por gran parte del sur de Sudamérica (entre los 20-45°S), al día 4 aún se observa una leve anomalía positiva sobre la zona donde ocurrieron las olas de calor, que sigue disminuyendo en los días posteriores (anomalía negativa en el día +6). Hasta el día 8 que se vuelve a ver un aumento robusto de anomalías positivas (figura 4.3.5).

Se quiso analizar en qué fase activa de MJO se encuentran los eventos de la cuenca del Río Serrano en Desembocadura que tienen fecha el 21 de enero y 3 de febrero de 2015. De acuerdo a la figura 4.3.6 el primer evento ocurre en la fase 7 activa al igual que el segundo evento.

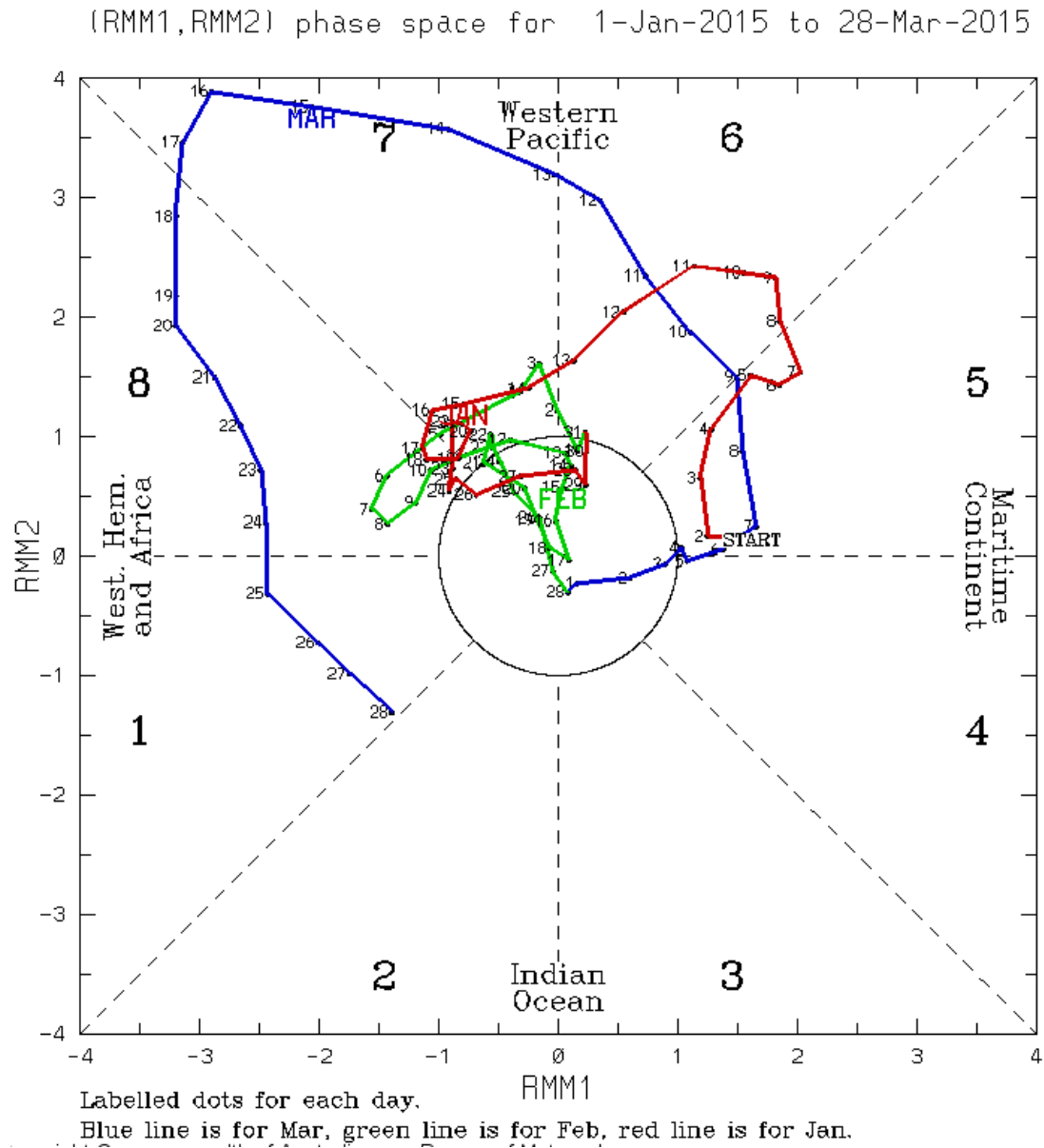


Figura 4.3.6: Diagrama de fases activas de MJO para los meses de enero (rojo), febrero (verde) y marzo (azul) de 2015.

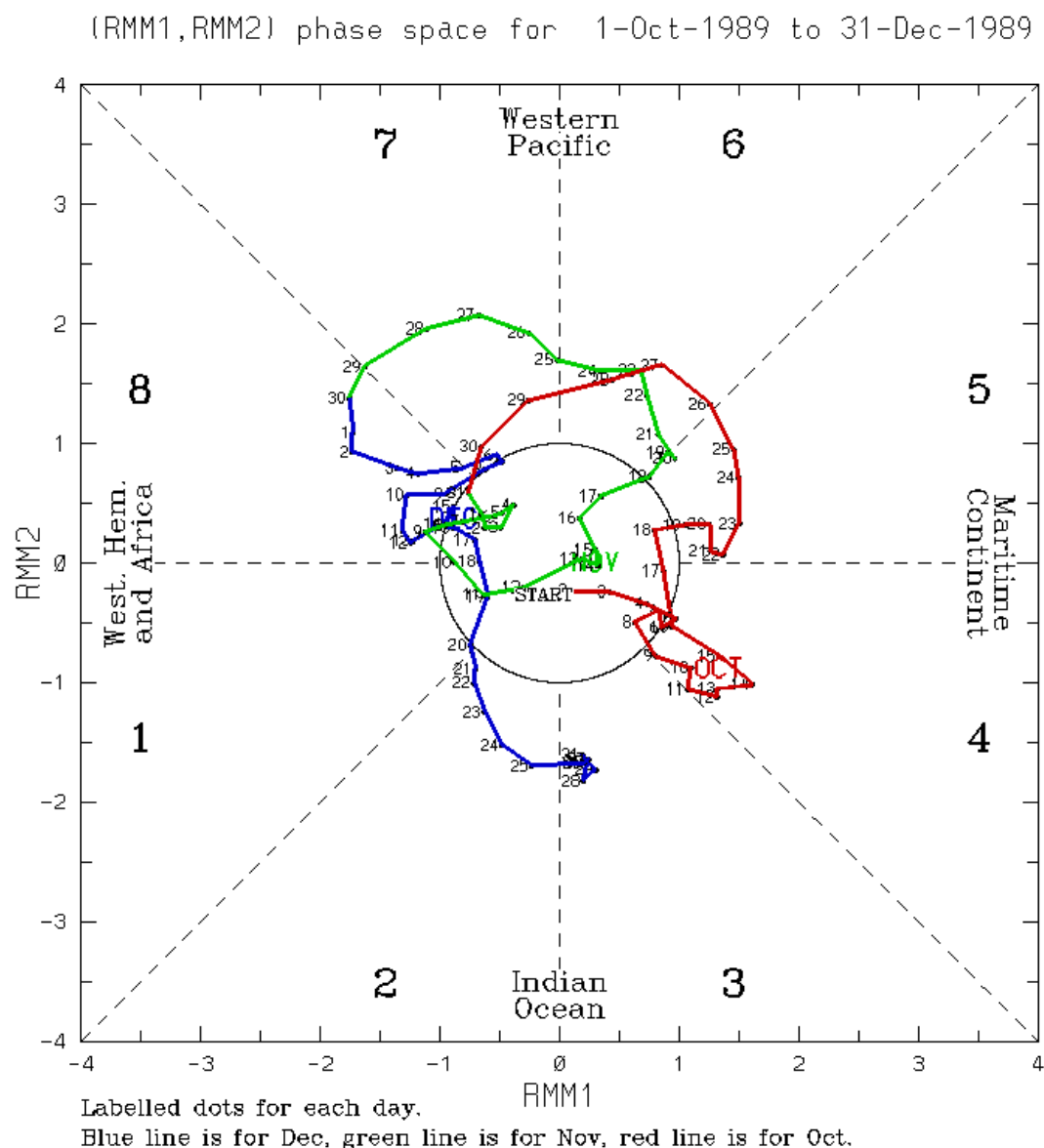


Figura 4.3.7: Diagrama de fases activas de MJO para los meses de octubre (rojo), noviembre (verde) y diciembre (azul) de 1988.

La figura 4.3.7 muestra las fases de MJO para los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1988. La primera OC comienza el 1 de noviembre se encuentra en el límite de la fase 7 y 8 pero en fase inactiva, los días anteriores se encuentran en la fase 7 activa. El evento de 24 de enero de 1989 se encuentra en la fase 4 (figura 4.3.8) activa y el último evento con fecha 17 de febrero se encuentra en la fase 7 activa de MJO. Los días en que sigue el evento de ola de calor ocurren en la fase

activa 8.

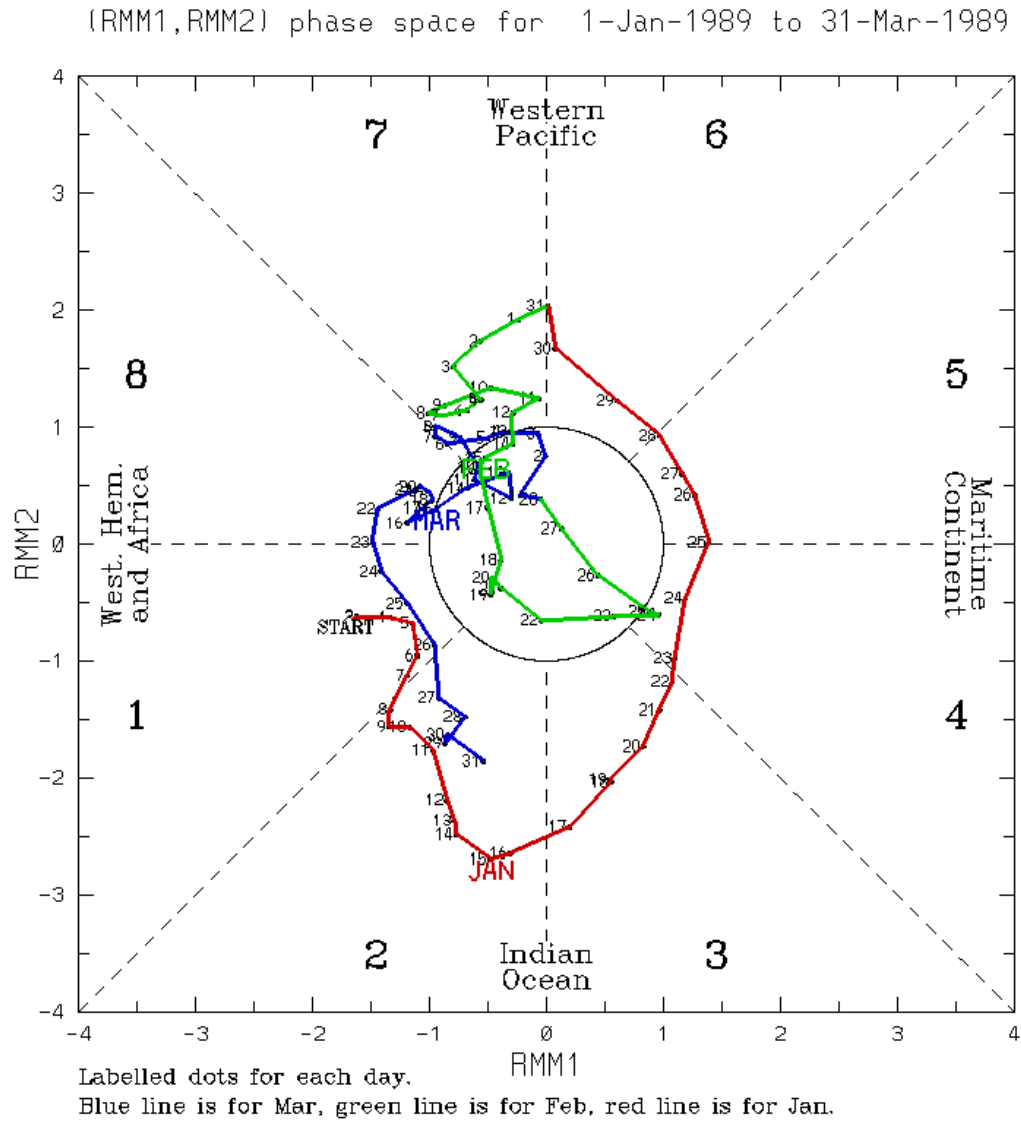


Figura 4.3.8: Diagrama de fases activas de MJO para los meses de enero (rojo), febrero (verde) y marzo (azul) de 1989.

Capítulo 5

Discusión

5.1. Respuesta de caudal a intensidad y duración de olas de calor

Las olas de calor de verano extendido muestran una fuerte correspondencia en tiempo e intensidad entre la señal de temperatura máxima de la estación DMC ubicada en la ciudad y la señal de la cuenca cordillerana registrada en la variable de CAMELS/CR2MET. La excepción de la cuenca de Río Biobío en Ralcahue, que muestra una señal media de temperatura menor en la cuenca andina. La intensidad de las olas de calor (anomalías) es menor en rango de latitudes más bajas (Chile central) y aumenta entre los 37-47°S, luego, al sur de 47°S disminuyen las anomalías de temperatura máxima a aproximadamente 1°C. La relación contraria se manifiesta al analizar la persistencia de las olas de calor: éstas tienen mayor duración en la zona centro de Chile y disminuyen su duración hacia latitudes más altas. Para las cuencas que manifiestan un aumento de caudal tras la ocurrencia de olas de calor, se observa una leve relación negativa con la temperatura ($r = -0,16$) y una mayor relación negativa con la persistencia ($r = -0,27$), esto quiere decir que, a medida que aumenta la intensidad o la duración del evento, el aumento de caudal

va siendo menor. En cambio, para las cuencas que muestran una disminución de caudal se observa una gran relación directa con la persistencia, es decir a medida que los eventos de olas de calor aumentan su duración, el régimen disminuye menos.

Las cuencas que exhiben disminución de caudal durante una OC, muestran una señal de PET mayor que en las cuencas que aumentan el caudal (figura 4.2.2). PET da un límite superior de evapotranspiración si no hay limitación de humedad en la superficie (disponibilidad de agua). Por ende, no correspondería atribuir a la señal de PET como equivalente de la cantidad de agua que se evaporaría desde las superficies de los cursos de agua estudiados. Por otro lado, la evaporación (efectiva, no potencial) puede jugar un factor más relevante en el caudal de aquellas cuencas que no presentaron respuesta a las olas de calor, puede ser un tema propuesto para otro estudio.

5.2. Diferente comportamiento de caudal entre cuencas

Los ríos de ciertas cuencas no muestran una respuesta a los eventos de olas de calor (figura 4.2.4), esto puede deberse al tipo de régimen de aquel río: pluvial, pluvial-nival. La figura 5.2.1 muestra la señal de probabilidad de precipitación en los días anteriores y posteriores a eventos de olas de calor, en cada cuenca, clasificadas según si el caudal respectivo aumenta o disminuye en torno a OC. El grupo correspondiente a disminución de caudal (figura 4.2.4) muestra una mayor probabilidad media de precipitación que el grupo que muestra un aumento de caudal durante una OC.

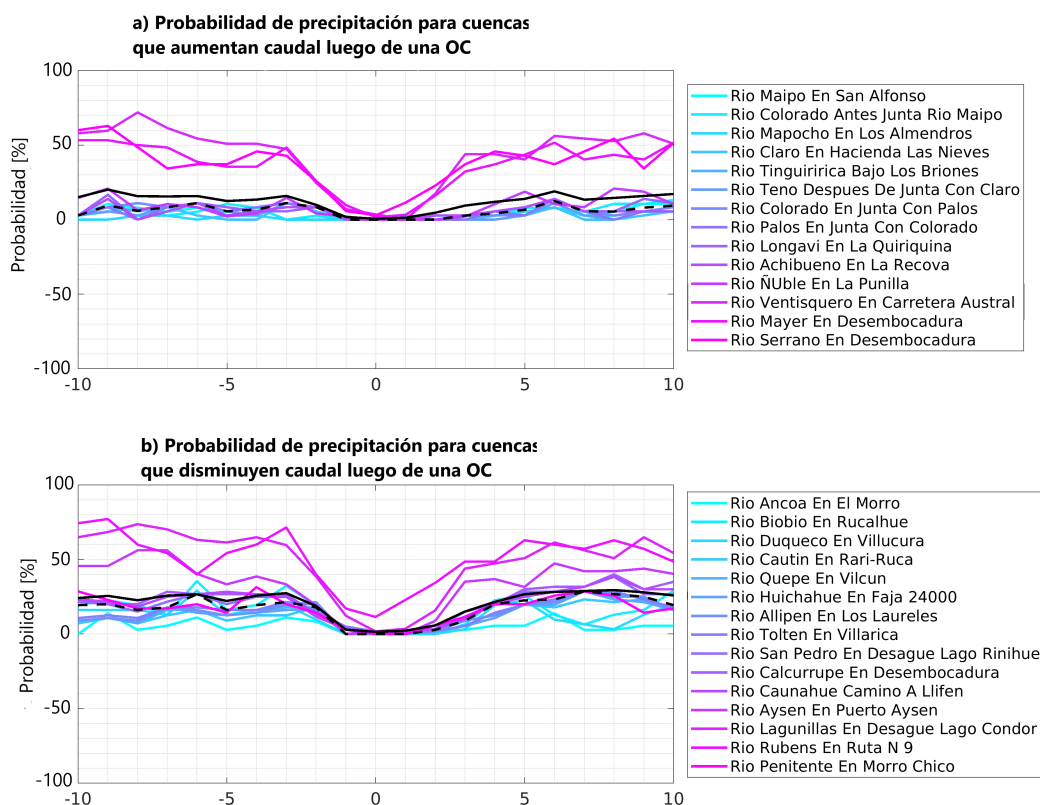


Figura 5.2.1: a) Señal promedio de probabilidad de precipitación para cuencas que aumentan su caudal durante los eventos de olas de calor. b) Señal de probabilidad de precipitación para cuencas que disminuyen su caudal durante los eventos de olas de calor. Línea negra presenta la media, línea punteada representa la mediana de las series coloreadas. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

Existen cuencas que muestran una disminución de caudal tras las olas de calor y que, sin embargo, durante los días anteriores a OC, muestran anomalías positivas de caudal. De acuerdo a la figura 5.2.1, en la zona centro de Chile, esto puede estar asociado a un aumento de la precipitación durante los días anteriores de las OC. De esta misma figura se observa que las cuencas de australes del país (al sur de 39°S) muestran una señal de probabilidad de precipitación mayor, que aumenta en los días más lejanos (entre día -10 y -5) al evento de ola de calor y disminuye los días del evento. Para ambos casos, en cuencas que aumentan o disminuyen su caudal, los días que ocurren olas de calor (día 0) la probabilidad de precipitación es prácticamente nula. Lo mismo se observa en la figura 5.2.3,

donde las probabilidades de precipitación disminuyen en todas las cuencas.

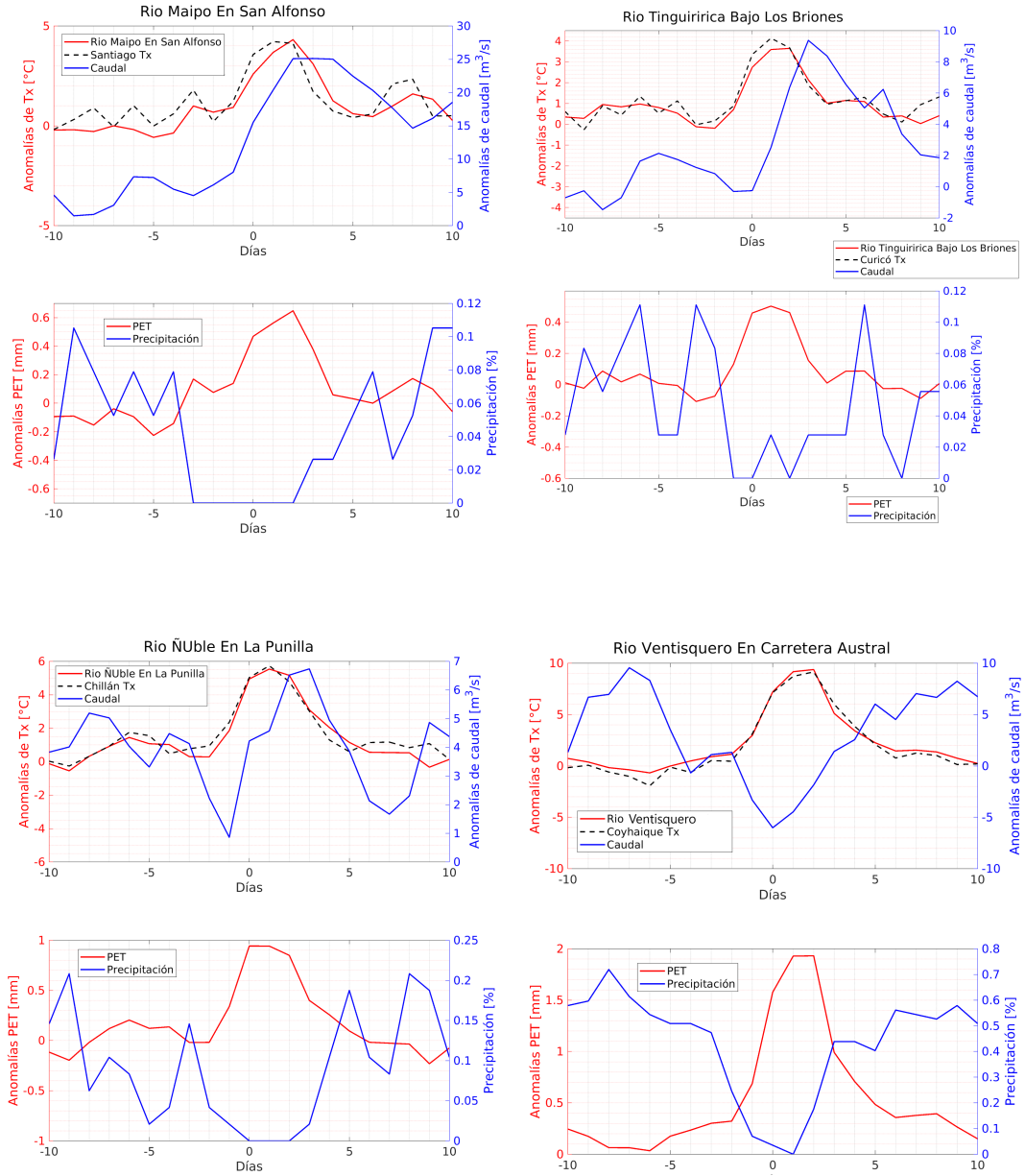


Figura 5.2.2: Panel superior: anomalías de temperatura máxima (en estación meteorológica DMC de referencia (negro segmentado) y en la cuenca estudiada (rojo), caudal (azul). Panel inferior: anomalías PET (rojo) y probabilidad de precipitación (azul) para cuencas del Río Maipo en San Alfonso, Río Tinguiririca bajo los Briones, Río Ñuble en la Punilla y Río Ventisquero en Carretera Austral. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

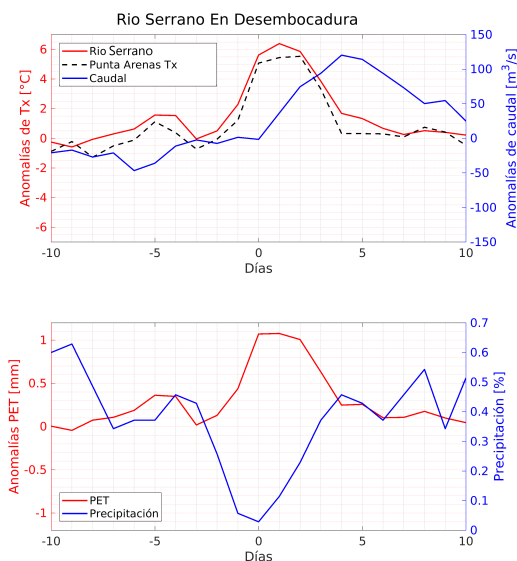


Figura 5.2.3: Panel superior: anomalías de temperatura máxima (en estación meteorológica DMC de referencia (nero segmentado) y en la cuenca estudiada (rojo)), caudal (azul). Panel inferior: anomalías PET (rojo) y probabilidad de precipitación (azul) para cuenca Río Serrano en Desembocadura. Señal de 21 días en torno al comienzo de la OC (día 0), tomando 10 días antes y 10 días después del día 0.

La tabla 5.2.1 muestra las cuencas que aumentaron de caudal durante una OC, expresando cuanto aumenta el caudal máximo en términos de porcentaje respecto al promedio de caudal (régimen de caudal de verano), a su vez se calculó el caudal máximo que alcanza una cuenca durante una ola de calor.

De acuerdo a ejemplos de olas de calor y la respuesta de aumento de caudal, se encontraron ríos cuyo régimen es mayor a comienzos del verano, como es el caso del Río Colorado y las anomalías positivas de caudal al final de verano eran casi inexistentes. En cambio, cuencas como la del Río Serrano en Desembocadura muestra mayor variación de caudal en los meses de febrero y marzo, donde también se observa un aumento en la precipitación. En síntesis, identificamos que el aumento de caudal en las cuencas, asociado a OC, puede ser asociado a distintos factores, por un lado, limitados por temperatura, como es el caso de la cuenca del Río Serrano, ya que tienen gran disponibilidad de nieve. En este caso, las olas de calor

Nombre Cuenca	Día de máximo aumento promedio (MAP) c/r OC (día 0)	MAP [Z-Score]	MAP en señal SY-IS [m^3/s]	Caudal total máximo [m^3/s]	MAP en señal SY-IS como porcentaje del promedio de verano del caudal absoluto [%]	SMAP en señal SY-IS como porcentaje de la desviación estándar de verano del caudal absoluto [%]
Maipo En San Alfonso	+3	0.75	17.34	128.74	15.57	27
Colorado Antes Junta Río Maipo	+3	0.75	5.78	53.7	12.24	30.8
Mapocho En Los Almendros	+4	0.66	1.84	8.9	26.17	28.7
Claro En Hacienda Las Nieves	+3	0.63	1.08	10.01	12.06	20
Tinguirica Bajo Los Briones	+3	0.57	6.24	79.42	8.32	18.14
Teno Despues De Junta Con Claro	+3	0.56	7.4	66.22	12.6	19.75
Colorado En Junta Con Palos	+3	0.61	8.96	59.97	17.58	26.18
Palos En Junta Con Colorado	+3	0.29	0.59	30.64	1.9	3.9
Longavi En La Quiriquina	+3	0.22	2.03	24.96	8.85	15.7
Achibueno En La Recova	+3	0.26	2.24	23.25	10.6	12.5
Nuble En La Pimilla	+3	0.32	3.47	58.65	6.3	7.6
Ventisquero En Carretera Austral	+5	0.37	6.46	50.52	14.65	35.65
Mayer En Desembocadura	+3	0.73	25.93	188.17	15.9	45.13
Serrano En Desembocadura	+4	0.79	125.33	727.4	20.8	59.6

Cuadro 5.2.1: Cuantificación de los aumentos de caudal por OC en las cuencas identificadas. Las columnas representan: 1) nombre cuenca; 2) día de máximo aumento promedio (MAP) c/r OC (día 0); 3) MAP [z-score]; 4) MAP en señal SY-IS [m^3/s], usando ecuación (3.3.2); 5) caudal máximo absoluto, obtenido de caudal promedio absoluto más MAP en señal SY-IS (ver cuadro 4.2.1) ; 6) MAP en señal SY-IS como porcentaje del promedio de verano del caudal absoluto [%] (ver Cuadro 4.2.1); 7) MAP en señal SY-IS como porcentaje de la desviación estándar de verano del caudal absoluto [%] (ver Cuadro 4.2.1).

son más frecuentes e inducen mayor aumento de caudal en los meses de febrero y marzo (hacia fines de verano). En otras cuencas el aumento de caudal puede estar limitado por la disponibilidad de nieve. En la cuenca del Río Colorado antes junta Río Maipo, se observa que la mayor variabilidad positiva de caudal ocurre en noviembre y diciembre, donde hay mayor disponibilidad de nieve. Por lo tanto, olas de calor inducen una respuesta en el caudal, donde uno de las principales limitantes es la disponibilidad de nieve, produciendo el caudal máximo en los primeros meses de verano. Cabe destacar, que aunque la contribución hídrica de la nieve estacional origina la mayor parte de los caudales de la cuenca del Maipo, la contribución hídrica de los glaciares juega un rol clave, ya que ocurre exactamente en los periodos cuando la cobertura nival está agotada, o sea al final del verano y durante periodos de sequía (Ayala et al., 2018).

Si bien este es un factor importante, la cantidad de nieve almacenada el invierno anterior al verano no muestra una relación con la variabilidad de caudal de la temporada estival, como es el caso de la cuenca del Río Maipo, que también se ve limitada por nieve.

5.2.1. Factores relevantes en respuesta de caudal

El área de la cuenca de estudio tiene un rol fundamental en la variación de caudal mostrando una fuerte relación positiva con el aumento de caudal. Específicamente, mientras más grande sea la cuenca, mayor es el aumento de caudal tras eventos de olas de calor. En efecto, éste es el factor más determinante en la respuesta de caudal. Para la mayoría de las cuencas el modo de variabilidad interanual ENOS muestra una señal similar de evolución de caudal durante veranos clasificados en distintas a sus fases (El Niño, La Niña y neutro). Sin embargo, se observa que la intensidad de caudal cambia, siendo mayor para los años neutros, seguido por eventos ocurridos en fase de La Niña y con menor magnitud en la fase de El Niño. En la cuenca del Río Longaví, se observa que cuando ocurre mayor señal es en la fase de la Niña.

Como se mencionó anteriormente, en ninguna cuenca la cantidad de nieve acumulada no es relevante en determinar aumento de caudal.

5.2.2. Tiempo de respuesta

El derretimiento de nieve tiene un tiempo de respuesta característico a los eventos de olas de calor. De acuerdo a la figura 5.2.2, figura 5.2.3 y figuras ya estudiadas anteriormente el desfase promedio corresponde aproximadamente a dos días tras la OC. De acuerdo al Test de Rodionov, el cambio de régimen ocurre mayormente entre el día 1 y 2 desde que comienza en evento y muy pocas veces comienza el mismo día. Cuando el caudal aumenta entre un 0-20 % tras la OC, el caudal máximo se da al día 3. En cuencas donde el aumento de caudal es mayor al 20 % el caudal máximo ocurre al día 4 tras la OC. Es decir, mientras mayor sea la magnitud de aumento de caudal, el caudal máximo ocurrirá más alejado a la fecha de comienzo del evento.

5.3. Análisis Sinóptico y de Gran Escala

Las olas de calor pueden relacionarse con variados patrones de circulación de gran escala. Se observó que existe un patrón de ondas en el Pacífico Sur, el cual se propaga desde Oceanía al sur de Sudamérica. Cuando las anomalías positivas de altura geopotencial se encuentran sobre el sur de Sudamérica o de Chile, produce anomalías positivas de temperatura máxima en las cuencas andinas, siendo máximas entre el primer y segundo día de evento de ola de calor. De acuerdo a Demortier et al., (2021), se revela un patrón de vaguada que exhibe un anticiclón de bloqueo en la superficie sobre gran parte del suroeste de Sudamérica, el flujo seco y cálido del este parece acompañar el calentamiento anómalo, que se induce en las cuencas cordilleranas.

De acuerdo a las fases de MJO del presente estudio, se encontró que varias olas de calor ocurren en la fase 7 activa o se encuentran en dicha fase los días anteriores al evento. Lo cual coincide con lo dicho por Demortier et al., (2021), que menciona que la fase activa 7 de la MJO promueve patrones subestacionales que favorece este patrón de circulación en el Pacífico Sur.

Capítulo 6

Conclusión

En la presente investigación se estudió el impacto de olas de calor en el caudal de cuencas cordilleranas que tuvieran nieve o glaciares, específicamente en la zona central, sur y austral del país, desde la Región Metropolitana hasta Magallanes, durante el verano extendido (noviembre-marzo) en el periodo 1980-2016 (37 años). El área de estudio se limitó entre latitudes 32°S y 56°S y las longitudes 76°W y 66°W. La extensión latitudinal es un rol importante debido a la gran diversidad climática.

Para estudiar las olas de calor y posible respuesta en caudales, se utilizaron fechas de eventos de olas de calor cuyos resultados fueron calculados en un trabajo previo sobre la base de registros de temperatura de estaciones DMC ubicadas en el valle central, además de series de tiempo de variables obtenidas para las cuencas desde la plataforma CAMELS-CL, específicamente de las variables de temperatura máxima, caudal, precipitación y evapotranspiración potencial (PET). Se examinó un total de 30 cuencas que cumplieron con la condición de tener al menos 50 % de los datos de verano y el 54 % de eventos de olas de calor correspondiente a cada cuenca. Del total, 14 mostraron aumento de caudal asociado a OC entre el rango de 0.1-0.8 z-score. 16 cuencas mostraron disminución de caudal.

De las 14 cuencas y sus respectivos ríos se concluye que las olas de calor inducen una respuesta en el caudal. La respuesta en el caudal se observa con un desfase de señal promedio de 2 días aproximado, y se produce un cambio de régimen en el segundo o tercer día desde que comienza la ola de calor.

Un factor relevante en el aumento de caudal es el área de la cuenca, a mayor área de cuenca mayor es el caudal y su persistencia de anomalías positivas. Relación entre caudal y ENOS, mostró una señal de aumento de mayor intensidad para eventos influenciados por la fase de La Niña o neutros.

Variabilidad climática de las distintas cuencas muestra que, al ocurrir eventos de olas de calor, se ven limitadas disponibilidad de nieve acumulada, teniendo caudal máximo los primeros meses de verano extendido para cuencas de régimen nival. Por otro lado, en cuencas australes, el caudal máximo ocurre a finales de la temporada estival, que es también cuando se identificaron más eventos de olas de calor. Por lo tanto, se confirma que características como la latitud y altitud de cada cuenca definen la variación de caudal, que también pueden ser limitadas por disponibilidad de nieve o por temperatura. Probabilidad de precipitación es distinta de cero los días anteriores y posteriores al evento de ola de calor. Los días de ola de calor la probabilidad disminuye. Señal de temperatura de estación DMC y de cuencas cordilleranas cuando ocurre una OC, se comportan de manera similar, mostrando solo un leve cambio en la intensidad entre ambas.

Estudio de caso indica que OC presenta un patrón de propagación de onda en el Pacífico Sur. Patrón de altas y bajas presiones produce una teleconexión entre Oceanía y el sur de Sudamérica, produciendo eventos de olas de calor en el centro a la zona austral de Chile. Se confirman resultados previos que destacan el rol de teleconexiones en la génesis de OCs (e.g. Jacques-Coper et al., 2015, Jacques-Coper et al., 2021, Demortier et al., 2021). Los días anteriores o el día de comienzo de ola de calor se encuentra principalmente en fase activa de MJO.

El cálculo de anomalías SY-IS de caudal sirvió de gran manera para encontrar respuesta en las cuencas ante olas de calor. Especialmente, para descubrir que cuencas mostraban un aumento de caudal. Donde los caudales encontrados que mostraban aumento de caudal durante una OC, mostraron una señal de aumento clara, lo cual hizo que el trabajo fuese expedito. Los parámetros utilizados fueron imprescindibles para encontrar una disminución o aumento de caudal, cuyos resultados sirvieron para relacionar variación de caudal con diferentes variables: temperatura máxima, área cuenca, nieve acumulada. El presente estudio es útil para conocer la respuesta caudal ante un evento de ola de calor y como puede ser su impacto debido a diferentes factores y características de la cuenca, ya que en gran parte de Chile y Sudamérica donde la nieve acumulada y glaciares son la principal fuente de agua durante el verano. Como trabajo futuro sería importante extender el periodo de tiempo de estudio hasta el presente debido a la gran cantidad de olas de calor que se han experimentado en los últimos años y así tener resultados más robustos de como se ve afectado el caudal debido a distintas OC. Para mejorar el análisis del estudio sería bueno agregar más variables y compararlas con la variación de caudal, como por ejemplo radiación de onda larga, albedo y evaporación, y de esta manera encontrar qué variables hacen variar el caudal según la característica de distintas cuencas.

Bibliografía

- [1] Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M. y 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.
- [2] Aniya, M., Barcaza, G., Iwasaki, S., 2007. Recent glacier advances at Glaciar Exploradores, Hielo Patagónico Norte, Chile. *Bulletin of Glaciological Research* 24, 49–57.
- [3] Ayala, A., Pellicciotti, F., MacDonell, S., McPhee, J., Vivero, S., Campos, C., Egli, P. (2016). Modelling the hydrological response of debris-free and debris-covered glaciers to present climatic conditions in the semiarid Andes of central Chile. *Hydrological Processes*, 30, 4036– 4058. <https://doi.org/10.1002/hyp.10971>
- [4] Ayala, A., Huss, M., Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nat. Clim. Chang.* 8, 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- [5] Azócar, G., Cereceda, F., Ayala, A., 2019. Glaciares y Cuencas Andinas... Hielos en Peligro
- [6] Bravo, C., Garreaud, R. D., 2011. El régimen nival en cuencas andinas de Chile central. In *Segundo Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima del Pacífico Sudoriental*.

-
- [7] Benn, D., Evans, D., 1998. *Glaciers and Glaciation*. Arnold, London. 734 pp.
- [8] Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Cordero, R. R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R. D. y Chadwick, O. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6.
- [9] Burger, F., Brock, B., Montecinos, A. (2018). Seasonal and elevational contrasts in temperature trends in Central Chile between 1979 and 2015. *Global and Planetary Change*, 162, 136-147.
- [10] Burger, F., Ayala, A., Farias, D., Shaw, T. E., MacDonell, S., Brock, B., Pellicciotti, F. (2019). Interannual variability in glacier contribution to runoff from a high-elevation Andean catchment: understanding the role of debris cover in glacier hydrology. *Hydrological Processes*, 33(2), 214-229.
- [11] Cerne SB, Vera CS. 2011. Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America. *Clim. Dyn.* 36: 2265–2277, doi: 10.1007/s00382-010-0812-4.
- [12] Demortier, A., Bozkurt, D. Jacques-Coper, M. Identifying key driving mechanisms of heat waves in central Chile. *Clim Dyn* 57, 2415–2432 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05810-z>
- [13] Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V. y Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802-808.
- [14] Edwards, A. L. "The Correlation Coefficient." Ch. 4 in *An Introduction to Linear Regression and Correlation*. San Francisco, CA: W. H. Freeman, pp. 33-46, 1976.
- [15] Falvey, M., Garreaud, R. (2007). Wintertime precipitation episodes in central

- Chile: Associated meteorological conditions and orographic influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2), 171-193.
- [16] Emerson, D. G., Vecchia, A. V., Dahl, A. L. (2005). Evaluation of drainage-area ratio method used to estimate streamflow for the Red River of the North Basin, North Dakota and Minnesota.
- [17] 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.
- [18] Giese, B., Urizar, C., Fuckar, S., 2002. Southern Hemisphere origins of the 1976 climatic shift. *Geophysical Research Letters* 29 (2). doi:10.1029/2001GL013268.
- [19] Hegerl, G., Zwiers, F., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y. M., Orsini, J. M. y Stott, P. A. (2007). Understanding and attributing climate change.
- [20] Higgins, R. W., Kim, H. K., Unger, D. (2004). Long-lead seasonal temperature and precipitation prediction using tropical Pacific SST consolidation forecasts. *Journal of climate*, 17(17), 3398-3414.
- [21] IPCC (2014). Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [22] Jacques-Coper, M., Brönnimann, S., Martius, O., Vera, C., Cerne, B., 2016. Summer heat waves in southeastern Patagonia: an analysis of the intraseasonal timescale. *International journal of climatology*, 36(3), 1359-1374.
- [23] Jacques-Coper, M., Brönnimann, S., Martius, O., Vera, C. S., Cerne, S. B. (2015). Evidence for a modulation of the intraseasonal summer temperature in Eastern Patagonia by the Madden-Julian Oscillation. *Journal of Geophysical*

- Research: Atmospheres, 120(15), 7340-7357. Understanding and attributing climate change.
- [24] Koboltschnig, G. R., Schöner, W., Holzmann, H., Zappa, M. (2009). Glacermelt of a small basin contributing to runoff under the extreme climate conditions in the summer of 2003. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(7), 1010-1018.
- [25] Lliboutry, L., 1998. Glaciers of Chile and Argentina. In: Williams, R.S., Ferrigno, J.G. (Eds.), *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: South America*. USGS Professional Paper 1386-I, Online version 1.02.
- [26] Mantua, N. J., y Hare, S. R. (2002). The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58(1), 35-44.
- [27] Montecinos, A., Aceituno, P., 2003. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in Central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate* 16, 281–296.
- [28] Nogami, M., 1972. The snow-line and climate during the last glacial period in the Andes Mountains. *The Quaternary Research* 2, 11.
- [29] Petersen, L., Pellicciotti, F. (2011). Spatial and temporal variability of air temperature on a melting glacier: Atmospheric controls, extrapolation methods and their effect on melt modeling, Juncal Norte Glacier, Chile. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D23).
- [30] Rabassa, J., 1981. Inventario de glaciares y cuerpos de nieve permanentes en los Andes Patagónicos septentrionales, Argentina. *Octavo Congreso Geológico Argentino, Actas* 4, 109–122.
- [31] Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C., Lange, H., 2000. Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Revista de Investigaciones Geográficas* 34, 29–60.
- [32] Rivera, A., Benham, T., Casassa, G., Bamber, J., Dowdeswell, J., 2007. Ice

- elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia icefield, Chile. *Global and Planetary Change* 59, 126–137.
- [33] Rodionov, S. (2004). A sequential algorithm for testing climate regime shifts, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09204, doi:10.1029/2004GL019448.
- [34] Rutllant, J., Fuenzalida, H., 1991. Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology* 11, 63–76.
- [35] Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73.
- [36] Schwerdtfeger, W., 1976. The atmospheric circulation over Central and South America. In: Schwerdtfeger, W. (Ed.), *Climates of Central and South America*. World Survey of Climatology, 12. Elsevier, pp. 1–12.
- [37] Segovia, J., Videla, S. Cuidado informal y políticas públicas chilenas.
- [38] Villalba, R., Lara, A., Boninsegna, J.A., Masiokas, M., Delgado, S., Aravena, J.C., Roig, F.A., Schmelter, A., Wolodarsky, A., Ripalta, A., 2003. Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years. *Climatic Change* 59, 177–232.
- [39] Zappa, M., Kan, C. (2007). Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(3), 375-389.
- [40] Zemp, M. et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature* 568, 382–386 (2019).