



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

RÉGIMEN DE INCENDIOS FORESTALES EN CHILE CENTRO SUR DURANTE OLAS DE CALOR

Por: **Felipe Vargas Gómez**

Habilitación profesional presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y
Matemáticas de la Universidad de Concepción para optar al
título profesional de Geofísico

2023

Concepción, Chile

Profesor Guía:

PhD. Martín Jacques Coper

Comisión evaluadora:

MSc. Jorge Saavedra Saldías - PhD. Francisco De La Barrera

© 2023, Felipe Andrés Vargas Gómez

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



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

RÉGIMEN DE INCENDIOS FORESTALES EN CHILE CENTRO SUR DURANTE OLAS DE CALOR

Por: **Felipe Vargas Gómez**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la
Univerisdad de Concepción para optar al título profesional de Geofísico

2023

Concepción, Chile

Profesor Guía:

PhD. Martín Jacques Coper

Comisión evaluadora:

MSc. Jorge Saavedra Saldías - PhD. Francisco De La Barrera

A Nelly, Jocelyn y Zoila.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo de los siguientes proyectos:

- CONICYT-ANID/Fondecyt/11170486 Heat waves in Central Chile and their predictability: our possible tropical connection?
- ANID/FONDAP/15110009 y ANID/FONDAP/1522A0001 Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2.

Resumen

Durante la última década se han generado incendios forestales de amplias repercusiones en Chile centro-sur (33° - 43° S). Uno de los elementos vinculados al desarrollo de estos eventos han sido las altas temperaturas. Si bien se ha documentado respecto a escenarios ambientales críticos para el desarrollo de incendios en esta zona (e.g. Laurenti et al., 2017), aún no se ha caracterizado cuantitativamente la asociación entre olas de calor (ODC de ahora en adelante) y el régimen del fuego. Para abordar este tema con foco en Chile centro-sur, en este trabajo se crearon compuestos de campos de variables atmosféricas extraídas del reanálisis climático ERA5 (Hersbach et al., 2020) para fechas de ODC ocurridas en los veranos extendidos -i.e. noviembre a marzo- desde 2002 hasta 2022. A su vez, a partir del reporte de incendios forestales de la Corporación Nacional Forestal se confeccionaron campos grillados de número de eventos y superficie diaria quemada por los incendios forestales en la misma resolución del reanálisis ($0.25 \times 0.25^{\circ}$). De esta manera se evaluaron características estadísticas como duración, número y extensión regional de las ODC para luego explorar y caracterizar asociaciones con el patrón de incendios forestales. Asimismo, mediante un análisis de componentes principales, se establecieron modos dominantes de ocurrencia de olas de calor en Chile centro-sur y se determinaron sus asociaciones con el régimen de incendios forestales. Finalmente, se realizó una descripción sinóptica promedio de las olas de calor y la progresión típica asociada en el campo de incendios forestales.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes del régimen del fuego en Chile	1
1.2. Antecedentes Generales	4
1.2.1. Zona centro-sur de Chile	4
1.2.2. Olas de Calor en Chile Centro-sur	7
1.2.2.1. Caracterización de las Olas de Calor	8
1.2.3. Régimen de incendios en Chile centro-sur.	10
1.2.4. Clima e incendios forestales en Chile	12
2. Hipótesis y objetivos	16
2.1. Hipótesis	16
2.2. Objetivo General	16
2.3. Objetivos Específicos	16
3. Datos	17
3.1. El régimen de incendios en Chile centro-sur	17
3.2. Reanálisis ERA5	17
3.3. Campos grillados de incendios / reanálisis	18
3.4. R-Explorer	19
4. Métodos	20
4.1. Cálculo de olas de calor	20
4.2. Patrones de área quemada y ocurrencia de incendios forestales durante olas de calor	20
4.2.1. Número de olas de calor	21
4.2.2. Duración de las olas de calor	22
4.2.3. Régimen intraestacional de incendios forestales durante olas de calor	22
4.2.4. Extensión regional de las olas de calor	22
4.3. Análisis de componentes principales.	23
4.3.1. Evolución de las ODC	23

4.4. Compuestos sinópticos	24
5. Resultados	25
5.1. El régimen de incendios forestales en Chile centro-sur	25
5.1.1. Intervalos de área quemada período 2002-2022	26
5.1.2. Área regional quemada en el rango intraestacional	27
5.2. Patrones espaciales de las olas de calor	28
5.2.1. Número de Olas de Calor	30
5.2.2. Duración de las olas de calor	32
5.3. Análisis espacial de área quemada en función de la región de ocurrencia de las ODC	33
5.4. Régimen de incendios forestales durante Olas de Calor	34
5.5. Número de olas de calor	38
5.6. Duración de las olas de calor y régimen de incendios forestales . .	40
5.7. Régimen intraestacional de incendios forestales durante olas de calor	42
5.8. Extensión de las olas de calor	43
5.9. Área quemada en función de la región de ocurrencia de las ODC .	44
5.10. Variabilidad atmosférica en torno a las ODC	48
5.11. Condiciones sinópticas	51
6. Discusión	54
7. Conclusiones	57
7.1. Régimen regional de incendios forestales durante Olas de Calor . .	57
7.1.1. Olas de calor durante un régimen de incendios intenso (F F_{P90})	58
7.1.2. Olas de calor según magnitud de los incendios	59
7.2. Régimen de incendios según características de las ODC	59
7.2.1. Número de olas de calor por temporada	59
7.2.2. Duración Olas de Calor	60
7.3. Extensión regional de las olas de calor	60
7.4. Modos de variabilidad	60
Referencias	62
Apéndices	68
A.	68
A1. Cálculo de la humedad relativa	68
A2. Tasas de incendios	69
A3. HWN	70
A4. Duración de las Olas de Calor	72
A4.1. Probabilidad de registrar regímenes intensos de incendios según ODC_D	73
A5. Intraestacionalidad	74
A6. Extensión de las ODC	75

A7. ACP	76
A8. Glosario	80

Índice de cuadros

1.2.1.Zonas bioclimáticas y precipitación anual media por región administrativa. Fuente: DMC, 2020a; DGA, 2020.	4
1.2.2.Megaincendios de la década 2012-2022 en la zona centro-sur de Chile, fecha de inicio, control, superficie afectada y temperatura máxima registrada durante su ocurrencia. Fuentes: CONAF, 2022a; DMC, 2022	12
5.1.1.Área regional quemada y número de incendios del periodo 2002-2022.	25
5.1.2.Área quemada por incendios forestales durante el período 2002-2022 en función de determinados intervalos.	27
5.4.1.Porcentaje de área quemada según intervalos de superficie quemada, considerando registros sin ola de calor, durante olas de calor, y la incorporación de ventanas de 1, 3, 5 y 10 días antes y después de olas de calor para el período 2002-2002.	38
5.7.1.Área quemada según cada ventana de tiempo (1 semana, 2 semanas, 3 semanas y 1 mes) durante olas de calor respecto a la climatología (2002-2022).	43

Índice de figuras

1.2.1. Modelo Digital de Elevación en metros sobre el nivel del mar de la Zona centro-sur de Chile. Elaboración propia en base al catálogo de información Geoespacial IDE Chile, 2019, a partir de Satélite ALOS.	6
1.2.2. Uso de suelo en Chile centro sur. Elaboración propia en base al Sistema de Información Territorial, CONAF, 2019.	7
1.2.3. Compuesto del primer día de ocurrencia de olas de calor en Chile central para los veranos (diciembre, enero, febrero) de 1872-2010 mediante datos del reanálisis 20CR. Sombreado indica anomalías de temperatura media a 2 metros respecto al período 1961–1990. En líneas grises se indica desviación estándar de la temperatura máxima para las olas de calor cada 0.5°C. Línea roja solida (línea segmentada azul) y línea sólida negra (línea segmentada negra) indican anomalías positivas (negativas) de presión atmosférica a nivel del mar cada 1hPa y de altura geopotencial en 500 hPa cada 25mgp, respectivamente. (Jacques-Coper et al., 2021).	10
1.2.4. Ocurrencia de incendios (barras) y superficie quemada (línea sólida roja) en la zona centro-sur de Chile entre los años 1984 y 2022. Fuente: CONAF, 2022b.	11
1.2.5. Ocurrencia mensual media de incendios forestales (barras) y superficie quemada media por mes (línea sólida roja, en escala logarítmica) en la zona centro-sur de Chile entre los años 1984 y 2022. Fuente: CONAF, 2022b	12
1.2.6. Compuesto de la temperatura del aire en 850hPa (en colores) y vectores de viento a la misma altura considerando meses de anomalías altas de superficie quemada menos meses de anomalías bajas. El vector más grande representa una diferencia de viento de 4ms^{-1} . La letra H indica el centro de la anomalía anticiclónica de alta presión. Las flechas curvas negras indican el área denotada por anomalías de viento del este y el rectángulo blanco describe Chile centro-sur (entre las regiones de Valparaíso y Los Ríos). El contorno segmentado encierra los puntos de grilla donde la diferencia de las anomalías mensuales mayores con las menores fue significativa con un $p < 0.05$ de acuerdo a un test de Monte Carlo (McWethy et al., 2021).	15

5.1.1.(a) Área total quemada en hectáreas y (b) ocurrencia de incendios forestales del período 2002-2022.	26
5.1.2.Frecuencia de temporadas de acuerdo al número de días de las ODC (en porcentaje) por región para el período 2002-2022. "Sin ODC" se refiere a las temporadas que no registraron ODC.	28
5.2.1.(a) Número total de olas de calor, (b) duración total de las olas de calor del período 2002-2022 y (c) temperatura máxima media de la ola de calor de mayor amplitud de cada temporada entre 2002 y 2022.	29
5.2.2.Frecuencia de temporadas entre 2002-2022 registrando (a): cero olas de calor, (b): una ola de calor, (c): 2 olas de calor, y (c): 3 olas de calor.	31
5.2.3.Frecuencia de temporadas de acuerdo al número de días de las ODC (en porcentaje) por región para el período 2002-2022. "Sin ODC" se refiere a las temporadas que no registraron ODC.	32
5.3.1.Patrones espaciales (a,b) y temporales (c,d) del primer y segundo modo principal definidos a partir del campo grillado de ocurrencias de ODC para el período 2002-2022.	33
5.4.1.Diagrama de cajas del porcentaje de área quemada por incendios forestales ocurridos durante olas de calor respecto al área quemada en el período 2002-2022. Las líneas horizontales rojas indican mediana, mientras que los percentiles 25 y 75 se representan por los límites de los recuadros azules. Las líneas negras segmentadas representan valores mínimos y máximos no atípicos. Valores atípicos (outliers) se representan por cruces rojas.	35
5.4.2.Diagrama de caja del porcentaje de incendios forestales registrados durante olas de calor respecto a la ocurrencia total de incendios del período 2002-2022. Líneas horizontales rojas indican mediana, mientras que los percentiles 25 y 75 se representan por recuadros azules. Líneas negras segmentadas señalan distribución inferior y superior, en tanto valores atípicos (outliers) se representan por cruces rojas.	36
5.4.3.Diagrama de caja del porcentaje de área quemada durante olas de calor considerando régimen intenso de incendios forestales del período 2002-2022 (FF_{P90}). Líneas negras segmentadas señalan distribución inferior y superior, en tanto valores atípicos (outliers) se representan por cruces rojas.	37
5.5.1.Diagrama de caja del área quemada distribuida espacialmente en cada región de la zona centro-sur durante temporadas (a): que no registraron olas de calor; (b): que registraron una ola de calor; (c): de 2 olas de calor; y (d): con 3 olas de calor. Líneas horizontales rojas indican mediana, mientras que los percentiles 25 y 75 se representan por recuadros azules (verdes en el caso de (a): $ODC_N=0$). Líneas negras segmentadas señalan distribución inferior y superior, en tanto outliers se representan por cruces rojas.	39

5.5.2.Área quemada regional en función del número de olas de calor por temporada, normalizado por la frecuencia de temporadas correspondiente (puntos coloreados representan cada valor regional, mientras que puntos negros sólidos representan la integración de la zona centro-sur). Se ajustaron regresiones lineales simples por región (líneas segmentadas de colores; línea negra integra la zona centrosur).	40
5.6.1.Área quemada (en escala logarítmica) por temporada en función de la número total de días bajo ODC de acuerdo al campo grillado de la zona centro sur (0.25x0.25°)	41
5.6.2.Probabilidad de registro de superficies superiores al percentil 90 de área quemada según duración en días de Olas de calor ocurridas en las regiones de Maule, Ñuble y Biobío.	42
5.8.1.Porcentaje superficial cubierto en cada región por olas de calor en relación a al área quemada durante ellas.	43
5.9.1.La porción occidental de cada región representa el área quemada durante olas de calor definidas entre las regiones de Ñuble y Los Lagos (según el modo 1). La porción oriental de cada región representa el porcentaje de área quemada correspondiente al total de cada región durante los veranos extendidos de 2002 a 2022.	45
5.9.2.La porción occidental de cada región representa el área quemada durante olas de calor definidas entre las regiones de Valparaíso y Maule. La porción oriental de cada región representa el porcentaje de área quemada correspondiente al total de cada región durante los veranos extendidos de 2002 a 2022.	45
5.9.3.Evolución del área quemada en torno a la ocurrencia de ODC. Compuestos regionales de área quemada 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas (a) en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos), y (b) en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule), de acuerdo al Análisis de componentes principales.	46
5.10. (a) Compuestos regionales de temperatura (líneas sólidas) y de humedad relativa (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos), y (b) Compuestos regionales de la magnitud del viento (líneas sólidas) y de fracción nubosa (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la Compuestos regionales de la presión a nivel del mar 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos).	49

5.10.2(a) Compuestos regionales de la componente meridional del viento (líneas sólidas) y de la componente zonal (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos), y (b) Compuestos regionales de la presión a nivel del mar 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos).	50
5.11.1 Compuesto del campo de presión superficial y temperatura superficial en torno al inicio de las 42 ODC caracterizadas en la zona sur (Entre las regiones de Ñuble y De Los Lagos, Modo 1), (a) 7 días antes del inicio, (b) 3 días antes del inicio, (c) 1 día antes del inicio, (d) al inicio de las ODC (ODC_{ini}), (e) un día después del inicio y (f) 3 días tras el inicio de las ODC.	52
5.11.2 Compuesto del campo de presión superficial y temperatura superficial en torno al inicio de las 31 ODC caracterizadas en la zona central (Entre las regiones de Valparaíso y Del Maule, Modo 2), (a) 7 días antes del inicio, (b) 3 días antes del inicio, (c) 1 día antes del inicio, (d) al inicio de las ODC (ODC_{ini}), (e) un día después del inicio y (f) 3 días tras el inicio de las ODC.	53
A2.1.(a) Tasa de área quemada diaria durante olas de calor respecto a la tasa de área quemada diaria del período 2002-2022 y (b) Tasa de ocurrencia diaria durante olas de calor respecto a tasa diaria de ocurrencia del período 2002-2022.	69
A3.1. Diagrama de caja de ocurrencia porcentual distribuida espacialmente en cada región de la zona centro-sur durante temporadas (a): que no registraron olas de calor; (b): que registraron una ola de calor; (c): de 2 olas de calor; y (d): con 3 olas de calor. Líneas horizontales rojas indican mediana, mientras que los percentiles 25 y 75 se representan por recuadros azules (verdes en el caso de (a): $ODC_N=0$). Líneas negras segmentadas señalan distribución inferior y superior, en tanto outliers se representan por cruces rojas.	70
A3.2. Scatterplot en escala logarítmica de la ocurrencia regional de acuerdo al número de olas de calor por temporada, normalizado por la frecuencia de temporadas correspondiente (puntos coloreados representan cada valor regional, mientras que puntos negros sólidos representan la integración de la zona centro-sur). Se ajustaron regresiones lineales simples por región (líneas segmentadas de colores; línea negra integra la zona centrosur).	71
A4.1. Área afectada (en escala logarítmica) por temporada en función de la número total de días bajo ODC de acuerdo al campo grillado de las regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins ($0.25 \times 0.25^\circ$)	72
A4.2. Área afectada (en escala logarítmica) por temporada en función de la número total de días bajo ODC de acuerdo al campo grillado de las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos ($0.25 \times 0.25^\circ$) .	72

A4.3. Probabilidad de registro de superficies superiores al percentil 90 de área quemada según duración en días de Olas de calor ocurridas en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins.	73
A4.4. Probabilidad de registro de superficies superiores al percentil 90 de área quemada según duración en días de Olas de calor ocurridas en las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.	73
A5.1. Superficie regional afectada - en escala logarítmica- de acuerdo al número de olas de calor por temporada, normalizado por la frecuencia de temporadas correspondiente (puntos coloreados representan cada valor regional, mientras que puntos negros sólidos representan la integración de la zona centro-sur). Se ajustaron regresiones lineales simples por región (líneas segmentadas de colores; línea negra integra la zona centrosur).	74
A6.1. Porcentaje superficial cubierto por Olas de calor en relación a al área afectada durante ellas en (a) las regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins, y en (b) las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.	75
A7.1. La porción occidental de cada región representa la superficie afectada durante olas de calor definidas entre las regiones de Ñuble y Los Lagos (según el modo 1). La porción oriental de cada región representa el porcentaje de área quemada correspondiente al total de cada región durante los veranos extendidos de 2002 a 2022, exceptuando el verano 2016-2017.	76
A7.2. La porción occidental de cada región representa la superficie afectada durante olas de calor definidas entre las regiones de Valparaíso y Maule. La porción oriental de cada región representa el porcentaje de área afectada correspondiente al total de cada región durante los veranos extendidos de 2002 a 2022, exceptuando el verano 2016-2017.	76
A7.3. Compuestos regionales de área quemada 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas (a) en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos), y (b) en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule) sin considerar la temporada 2016-2017.	77
A7.4.(a) Compuestos regionales de temperatura (líneas sólidas) y de humedad relativa (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule), y (b) Compuestos regionales de la magnitud del viento (líneas sólidas) y de fracción nubosa (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona central (regiones de Ñuble a Los Lagos).	78

A7.5.(a) Compuestos regionales de la componente meridional del viento (líneas sólidas) y de la componente zonal (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule), y (b) Compuestos regionales de la presión a nivel del mar 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule).	79
--	----

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes del régimen del fuego en Chile

La zona centro-sur de Chile (32° - 43° S) ha estado afectada por incendios forestales de gran extensión (i.e. superiores a mil e incluso diez mil hectáreas de afectación) durante los últimos años, derivando en perjuicios socioeconómicos y ambientales de magnitud (e.g. Laurenti et al., 2017; González et al., 2020). Las anomalías climáticas del período han sostenido condiciones proclives a la propagación del fuego, tales como condiciones cálidas de temperatura superficial y la denominada megasequía que ha asolado la zona (Garreaud et al., 2020). Ambas variables, determinantes en la fenología del combustible vegetal de los ecosistemas mediterráneos y templados correspondientes a esta zona, implican una disminución en el contenido de humedad de la vegetación, reduciendo así la cantidad de calor requerida para la ignición (Van Wagner et al., 1987). Este escenario climático sustentó el desarrollo de incendios forestales destructivos, como sucedió con el megaincendio “Agua Fría” en las cercanías del Parque Nacional Radal Siete Tazas en febrero de 2020, el cual consumió 15 mil hectáreas de plantaciones forestales y bosque nativo, afectando al área silvestre protegida, involucrando asimismo la evacuación de poblados amenazados por el comportamiento extremo del fuego. En el transcurso en la década 2010-2020 se registraron extensos eventos en la zona sur, como el megaincendio Pichiqueime (25 mil hectáreas, región del Biobío, diciembre de 2011), los incendios forestales en las Reservas Nacionales China Muerta, Malleco y en el Parque Nacional Tolhuaca (de un total de 12600 hectáreas afectadas, Región de la Araucanía,

2015), además de una decena de eventos superiores a 10 mil hectáreas ocurridos durante la denominada "tormenta de fuego" del año 2017 (CONAF, 2022a). Como característica común, estos desastres ocurrieron durante lapsos de extrema temperatura superficial del aire en las zonas central (32° - 36° S) y sur (36° - 43° S), un factor de relevancia al analizar las configuraciones atmosféricas asociadas a eventos extremos de incendios. La persistencia de esta condición se denomina ola de calor (ODC), un fenómeno asociado al deterioro de cultivos (Piticar, 2019; Tudela et al., 2022), detrimento de cuerpos glaciares (Pelto, 2022; Pelto et al., 2022) y perjuicios al bienestar humano (Bell et al., 2008; Oudin Åström et al., 2011), además de ejercer presión sobre bosques y formaciones vegetales (Miranda et al., 2020). Asimismo se les ha atribuido la ocurrencia de incendios forestales de proporción en Portugal, España, Francia, Italia, Grecia, Rusia, Estados Unidos, Canadá y Australia (Mills, 2005; Trigo et al., 2005; Barriopedro et al., 2011; Cardil et al., 2014, 2015; Salis et al., 2014; Parente et al., 2018), así como miles de fallecimientos en Europa y Asia (Instituto nacional de estadísticas y estudios económicos, 2022; Federal Statistical Office of Germany, 2022; Instituto de Salud Carlos III, 2022; Directorate-General for Health, 2022; Zhang et al., 2018).

Particularmente para Chile centro-sur, el nexo entre la variabilidad climática y el régimen de incendios se puede establecer considerando múltiples escalas de tiempo. Al respecto la literatura considera variabilidad estacional e interanual en el régimen de incendios forestales a través de indicadores de modos climáticos en esta escala, como la Oscilación del Sur (ENOS, Bjerknes, 1969) y la Oscilación Antártica (SAM, Gong and Wang, 1999; Fogt and Marshall, 2020), asociados con anomalías positivas (negativas) de precipitación en la zona centro-sur de acuerdo a las fases ENOS cálida (fría) y SAM negativa (positiva), relacionadas- o no, según cada caso- a un consecutivo incremento en la disponibilidad del combustible vegetal, sujeto a posteriores condiciones estacionales cálidas, características a intensos regímenes de área quemada y de ocurrencia de incendios forestales en la zona (Urrutia-Jalabert et al., 2018). Otro enfoque develador de la asociación clima-incendios surge de la confección de modelos teóricos multivariados, a través de la integración de predictores antropogénicos y bioclimáticos. De esta forma, es posible establecer asociaciones jerárquicas que explican el comportamiento del fuego por medio de cada variable. Este procedimiento posiciona a la temperatura superficial del

aire como índice del comportamiento del fuego (Gómez-González et al., 2019; McWethy et al., 2018), enfatizando su relación con el contenido de humedad del combustible vegetal y su susceptibilidad a arder, en función – a su vez- de la latitud (ecosistema-región). A la par de las fluctuaciones de la temperatura se presentan variaciones en campos atmosféricos característicos, como la humedad relativa, viento en superficie, radiación solar, presión atmosférica, entre otros; de acuerdo con la configuración sinóptica que se presente. En vista de ello, la investigación de la meteorología reinante durante eventos de incendios forestales en Chile resulta particularmente atractiva para caracterizar uno de sus posibles forzantes. En Chile, el dispositivo de incendios engloba una enorme coordinación a nivel humano, la cual consolida programas preventivos y de respuesta, encauzados a la minimización de pérdidas considerando combate de incendios, protocolos locales, educación y monitoreo ambiental. El eje de monitoreo facilita el reconocimiento de zonas y períodos susceptibles a la propagación de incendios forestales, permitiendo una administración óptima de recursos. En este sentido, prima el diagnóstico del estado de la materia vegetal combustible, el cual está condicionado por la variabilidad del tiempo atmosférico y la administración de zonas rurales. Con el transcurso del verano se torna imprescindible dar seguimiento a indicadores de ocurrencia y propagación de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile, ya que el estado del combustible vegetal - dependiente de las condiciones cálidas y secas propias de la estación - predispone su eventual desarrollo. En superposición a esta condición estacional adquieren relevancia para la ocurrencia de incendios forestales de magnitud eventos meteorológicos de alta temperatura, como las olas de calor (Mills, 2005; Trigo et al., 2005; Barriopedro et al., 2011; Cardil et al., 2014, 2015; Salis et al., 2014; Parente et al., 2018).

En consideración a estos argumentos se dispone el presente trabajo, enfocado en la determinación de patrones de covariabilidad entre olas de calor e incendios forestales en Chile centro-sur. Para ello se empleó en una primera parte, el catastro de incendios forestales dispuesto por la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2022a), cuyos registros integran desglose de superficie quemada, cronología de cada incendio, causa, ubicación y meteorología in-situ. Por otra parte, se empleó el reanálisis climático ERA-5, considerando el período 2002-2022, a fin de identificar eventos de ODC y realizar un tratamiento estadístico. La estructura de este trabajo aborda en primera instancia aspectos teóricos y técnicos del régimen del fuego y de las olas de calor en Chile centro-sur en una sección de antecedentes generales;

seguidamente se establece la hipótesis investigativa, junto a los objetivos generales y específicos del análisis. Posteriormente se propone el método de tratamiento, tras lo que se exponen los correspondientes resultados. Por último se aúnan conclusiones generales y se amplían los alcances de la investigación en la sección de discusión.

1.2. Antecedentes Generales

1.2.1. Zona centro-sur de Chile

El dominio de estudio comprende la banda latitudinal 32°S-43°S, delimitada por el oeste por la costa del Pacífico oriental y, por el este, por la cordillera de Los Andes, considerando las regiones administrativas de Valparaíso a Los Lagos (cuadro 1.2.1), donde se concentra el 86 % de la población Chilena (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017). La transición de ecosistemas mediterráneos en la zona central (regiones de Valparaíso a la del Biobío) hacia ecosistemas templado-lluviosos en la zona sur (regiones de la Araucanía a Los Lagos) está determinada por el gradiente meridional de precipitación y humedad. Éste define la acumulación de combustible vegetal^{A8}: mientras la limita en la zona central (32° - 36°S), propicia su volumen en la zona sur (36° - 43°S). Tal caracterización climática es diferenciada en cada cuenca según los distintos usos de suelo, que incluyen superficie agrícola, pastizal-matorral, plantaciones forestales y bosque nativo. En términos de conservación, cabe señalar que la zona de estudio en plenitud se erige en uno de los 34 hotspots de biodiversidad planetarios (Brooks et al., 2006).

Región	Zona bioclimática	Precipitación anual	Área
Valparaíso	Mediterráneo	523.9 mm	16323 km ²
Metropolitana	Mediterráneo	286.6 mm	15392 km ²
O'Higgins	Mediterráneo	370.46 mm	16349 km ²
Maule	Mediterráneo	595.9 mm	30322 km ²
Ñuble	Mediterráneo	936.4 mm	13104 km ²
Bio bío	Mediterráneo/Templado	984.2 mm	24022 km ²
Araucanía	Templado	1114.7 mm	31838 km ²
Los Ríos	Templado	1722.3 mm	18245 km ²
Los Lagos	Templado	1565.6 mm	48408 km ²

Cuadro 1.2.1: Zonas bioclimáticas y precipitación anual media por región administrativa. Fuente: DMC, 2020a; DGA, 2020.

El perfil zonal de elevación asciende desde el borde costero, compuesto mayoritariamente por pastizales, matorrales y plantación agrícola-forestal, hasta los máximos relativos de la cordillera de la Costa y de Nahuelbuta, conformadas por pastizal-matorral y plantaciones forestales; disminuyendo posteriormente en la depresión intermedia, destinada a actividades silvoagropecuarias y a al asentamiento de importantes centros poblados (IDE Chile, 2019; CONAF, 2019). En la sección oriental del perfil aumenta la pendiente de elevación y prepondera la silvicultura intensiva, pastizales-matorrales y remanentes de bosque nativo, dando paso en el extremo superior a ecosistemas altoandinos de gran valor ecológico, fundamentales para la provisión de agua en las cuencas Little Cárdenas et al. (2022).

Desde el año 2010 el área ha estado supeditada a una intensa sequía, expresada en anomalías negativas de precipitación y de escorrentía superficial (Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2017, 2020). Tal grado de exposición no solo ha repercutido en la seguridad hídrica de la población, sino que también en el desarrollo y productividad de los ecosistemas esclerófilos de la zona central (Miranda et al., 2020). En perspectiva hidroclimática, este escenario es favorable a la intensificación de eventos meteorológicos de calor extremo (Schumacher et al., 2019).

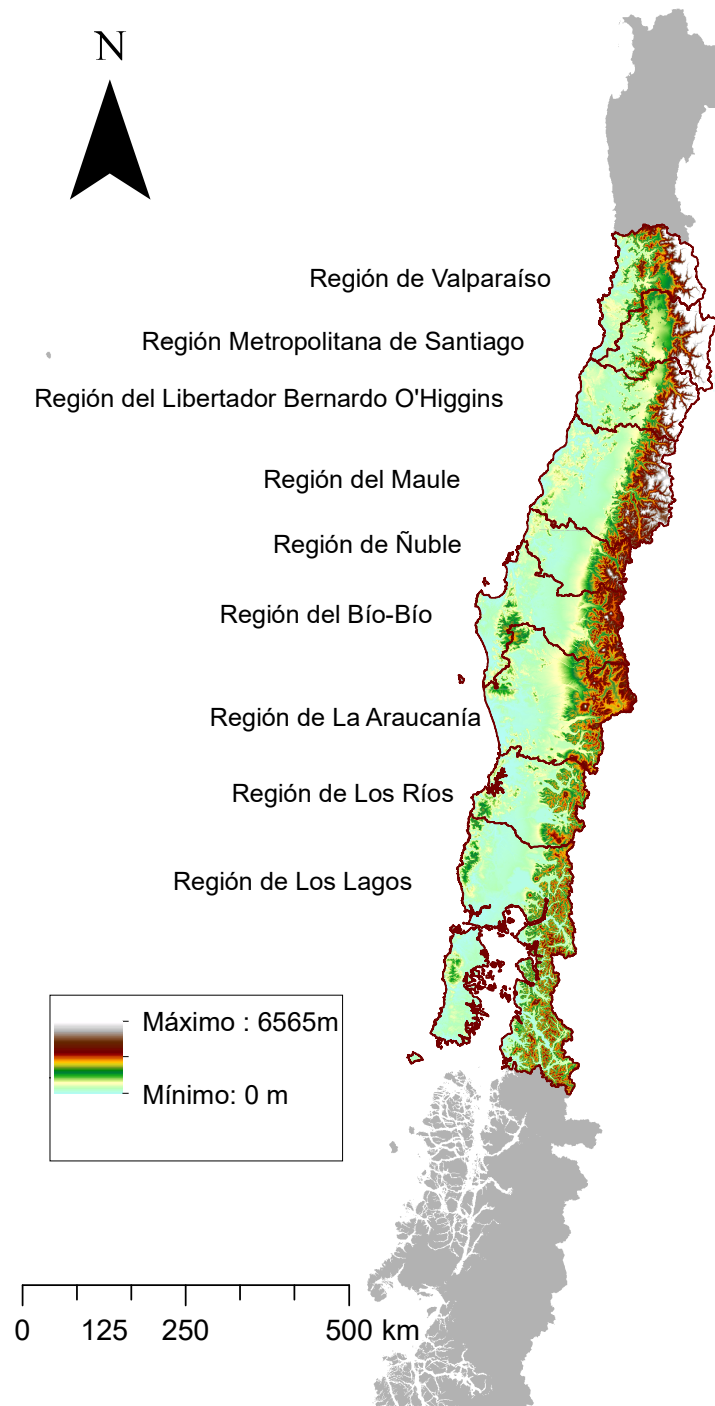


Figura 1.2.1: Modelo Digital de Elevación en metros sobre el nivel del mar de la Zona centro-sur de Chile. Elaboración propia en base al catálogo de información Geoespacial IDE Chile, 2019, a partir de Satélite ALOS.

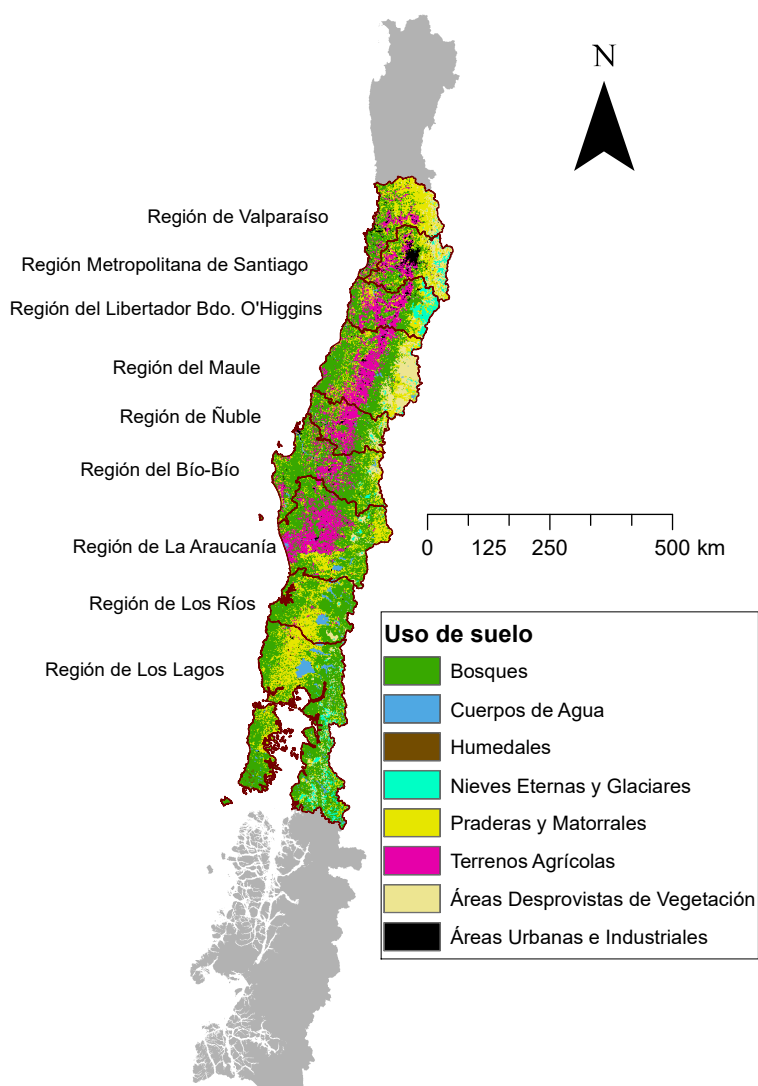


Figura 1.2.2: Uso de suelo en Chile centro sur. Elaboración propia en base al Sistema de Información Territorial, CONAF, 2019.

1.2.2. Olas de Calor en Chile Centro-sur

En la literatura se ha documentado cómo los registros regionales de temperatura en Chile manifiestan tendencias positivas respecto a la frecuencia, duración y amplitud de las ODC (Piticar, 2018). A estos eventos se asocia una lista de impactos, entre los que figuran el deterioro de cultivos agrícolas (Piticar, 2019; Tudela et al., 2022), condiciones de estrés (browning) sobre ecosistemas mediterráneos (Miranda et al., 2020), vaciamientos glaciares súbitos ("glofs", Pelto, 2022; Pelto et al., 2022), incremento en la tasa de morbilidad y en el riesgo

de mortalidad (Ciciretti et al., 2021; Bell et al., 2008; Oudin Åström et al., 2011), compromiso en el suministro eléctrico e hídrico sumado a la dificultad en el control de incendios forestales (Laurenti et al., 2017; Bowman et al., 2019). La Organización Mundial de Meteorología (OMM o WMO, por sus siglas en inglés) no fija parámetros exclusivos para definir las olas de calor (ODC) y se atiene a describirlas como períodos de anomalías cálidas persistentes sobre una gran extensión (World Meteorological Organization, 2009), con lo cual son aplicables criterios de persistencia e intensidad para su caracterización. La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) reconoce como ODC períodos de al menos 3 días consecutivos con temperaturas máximas superiores al primer armónico (ciclo anual) conformado por el percentil 90 de las temperaturas máximas diarias correspondientes al período climatológico de referencia (DMC, 2020b).

1.2.2.1. Caracterización de las Olas de Calor

La ocurrencia de ODC en la zona centro-sur de Chile está condicionada por el paso sobre el cono sur del continente de un sistema migratorio de alta presión (Garreaud et al., 2002; Demortier et al., 2021). Éste determina el incremento en la temperatura superficial por múltiples factores: primeramente, a raíz del calentamiento adiabático por subsidencia debido a la compresión de aire troposférico, proceso que también reduce su humedad. A ello se suma el descenso de viento cálido y seco por la ladera de sotavento de la Cordillera de los Andes (30°- 40°S) inducido por conservación de masa, debido al flujo hacia el oeste generado por ajuste geostrófico en niveles bajos (Montecinos et al., 2017; McWethy et al., 2021). Como configuración precursora de esta circulación se observa el paso de una dorsal en altura, la cual actúa acentuando el calentamiento de la columna de aire en la tropósfera baja, promoviendo cielos despejados y subsecuentes máximos de radiación de onda corta incidente (Figura 1.2.3, Jacques-Coper et al., 2021).

Esta configuración sinóptica que induce condiciones secas y cálidas no sólo se emplaza en el rango de variabilidad sinóptica, pues se ha determinado que sus características pueden ser moduladas en la escala intraestacional (Demortier et al., 2021; Jacques-Coper et al., 2021). Esto sucede a través de teleconexiones desencadenadas por pulsos convectivos tropicales, propios de la Oscilación de Madden Julian (MJO), que provocan la propagación de ondas tipo Rossby

por la tropósfera del Pacífico Sur en niveles medios y bajos –similares al patrón del Pacífico Sudamericano (PSA, Mo and Paegle, 2001; Robertson and Mechoso, 2003; Risbey et al., 2018) -, derivando consecuentemente en anomalías positivas de altura geopotencial en Chile durante la ocurrencia y desarrollo de las ODC ((Barrett et al., 2016; Jacques-Coper et al., 2016; Rondanelli et al., 2019). Demortier et al., 2021 atribuyen a este tren de ondas - expresado en la alternancia vaguada/dorsal- en latitudes medias el 94% de las olas de calor de verano (Noviembre a Marzo) en Chile centro-sur, enfatizando el mecanismo de modulación por teleconexiones de origen tropical. En particular, Demortier et al., 2021 indican que la mayor frecuencia de estos eventos ocurre durante las fases activas 2, 3 y 7 de la MJO. A esta escala de variabilidad se superpone la contribución de señales sinópticas y estacionales para, en conjunto, modular la ocurrencia de olas de Calor (Jacques-Coper et al., 2021).

La modulación sinóptica-intraestacional de las ODC en Chile centro-sur permite extender el análisis de riesgos asociados a ellas bajo estas escalas de tiempo, por ende, en términos de gestión del territorio es crucial ponderar la contribución de las distintas escalas de variabilidad atmosférica relevantes. En función de ello se justifica explorar posibles vínculos entre la variabilidad climática y el régimen del fuego.

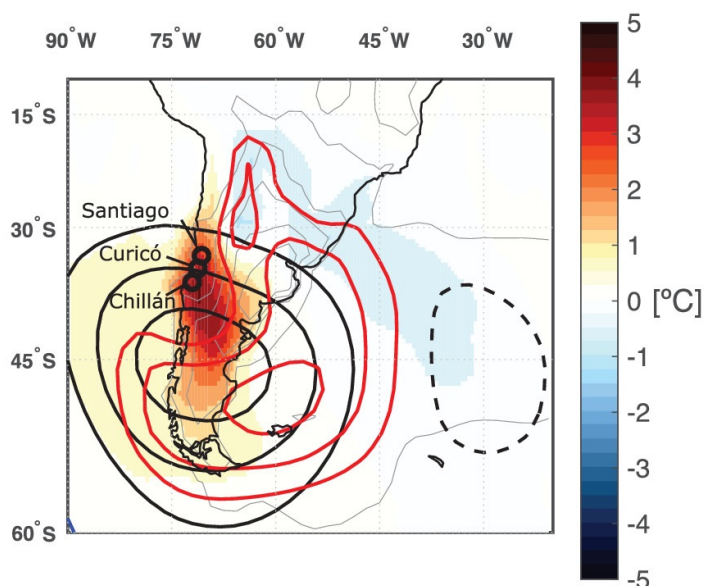


Figura 1.2.3: Compuesto del primer día de ocurrencia de olas de calor en Chile central para los veranos (diciembre, enero, febrero) de 1872-2010 mediante datos del reanálisis 20CR. Sombreado indica anomalías de temperatura media a 2 metros respecto al período 1961–1990. En líneas grises se indica desviación estándar de la temperatura máxima para las olas de calor cada 0.5°C . Línea roja sólida (línea segmentada azul) y línea sólida negra (línea segmentada negra) indican anomalías positivas (negativas) de presión atmosférica a nivel del mar cada 1hPa y de altura geopotencial en 500 hPa cada 25mgp, respectivamente. (Jacques-Coper et al., 2021).

1.2.3. Régimen de incendios en Chile centro-sur.

Hay diversos factores que determinan el régimen de incendios. Por una parte, cabe considerar características biogeográficas, tales como la topografía, el tipo de uso de suelo, y el tipo de ecosistema; mientras que factores como la variabilidad del tiempo atmosférico y la acción humana- se presentan como determinantes en consolidar su régimen. Respecto al territorio nacional, la zona centro-sur (área de estudio) concentra el 97.6 % de los incendios forestales (y un 94.5 % de la superficie quemada), indicando una tendencia positiva en el período 1984-2022 (CONAF, 2022b). Pese a promediar 68 mil hectáreas quemadas por temporada, el registro revela gran variabilidad interanual, destacando la temporada 2016-2017, que afectó 566 mil hectáreas en la zona centro-sur. Un factor determinante para alcanzar tal cifra fue la ocurrencia de megaincendios en el mes de enero del año 2017, cuya magnitud sin precedente superó los máximos relativos registrados en

las temporadas 2014-2015 (128 mil ha), 2021-2022 (120 mil ha), 2013-2014 y 2019-2020 (101mil ha ambas), como se observa en la Figura 1.2.4.

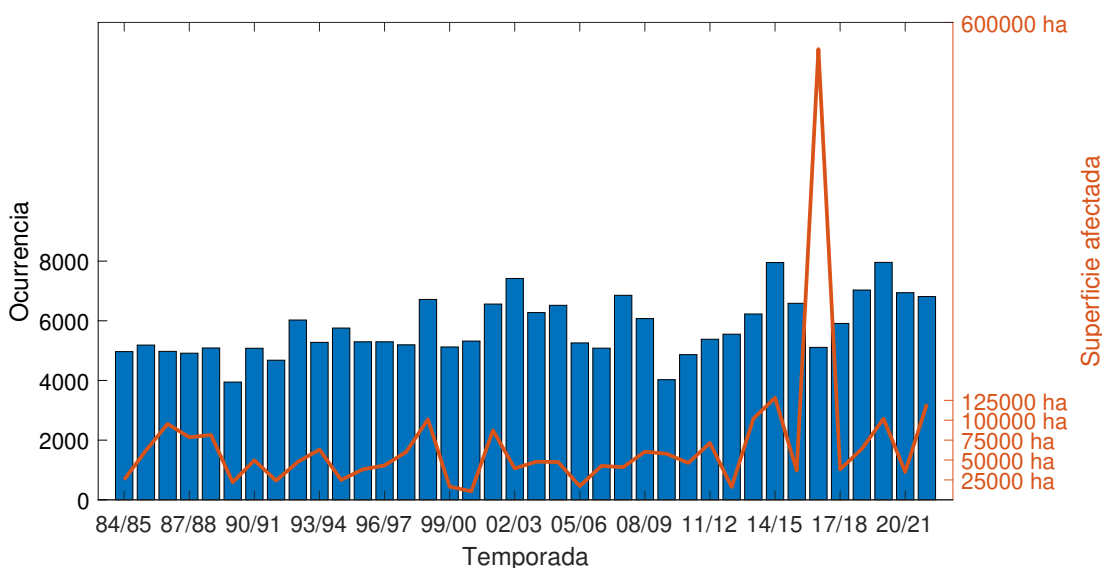


Figura 1.2.4: Ocurrencia de incendios (barras) y superficie quemada (línea sólida roja) en la zona centro-sur de Chile entre los años 1984 y 2022. Fuente: CONAF, 2022b.

En cuanto al ciclo anual, la distribución de incendios de la zona centro-sur presenta máximos absolutos en torno a los meses de enero y febrero (Figura 1.2.5), concentrando en los meses de Noviembre a Marzo el 96 % de los incendios ocurridos y el 82 % del área quemada del período.

En cuanto al registro de megaincendios^{A8}, la década 2012-2022 es destacable, dado que ocurrieron 17 eventos, mientras que el periodo previo (1984-2011) registró sólo 6. En el plano humano, los incendios extremos se han reflejado en severos daños materiales y a comunidades, implicando un incremento en el gasto público-privado en combate por la dificultad de su control y el subsecuente proceso de restauración (González et al., 2020). Entre los eventos relevantes resaltan el incendio forestal “El Carrizo” (15 mil hectáreas quemadas) ocurrido el 3 de enero de 2014 en la Región Metropolitana, sucedido por el incendio forestal “Batuco-Toconey” en la región del Maule, iniciado el 4 de enero del mismo año (14 mil hectáreas quemadas), así como los ya mencionados megaincendios de la tormenta de fuego, de los cuales superó todo umbral el incendio forestal Las Máquinas (región del Maule, 160

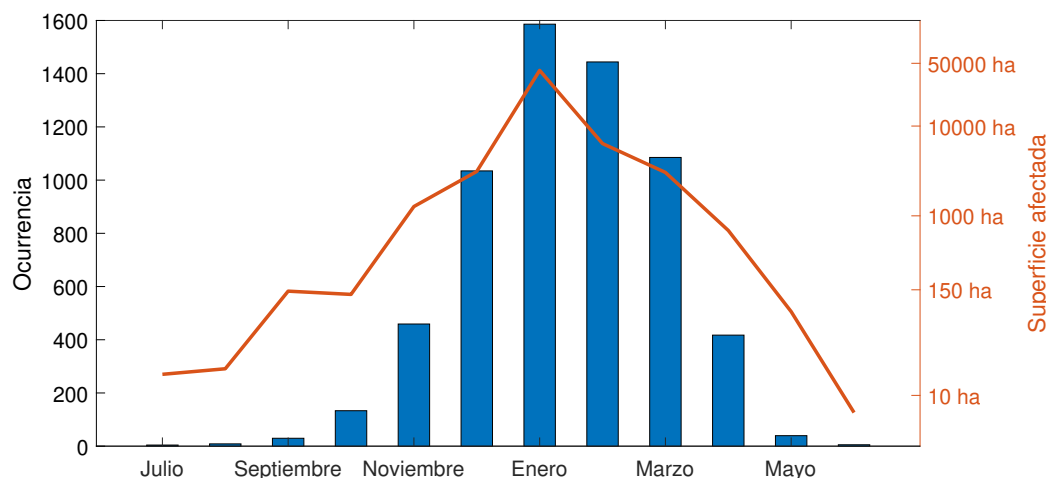


Figura 1.2.5: Ocurrencia mensual media de incendios forestales (barras) y superficie quemada media por mes (línea sólida roja, en escala logarítmica) en la zona centro-sur de Chile entre los años 1984 y 2022. Fuente: CONAF, 2022b

mil hectáreas quemadas). En paralelo a la ocurrencia de incendios extremos fueron registrados valores históricos de temperatura en estaciones meteorológicas del área de estudio (Cuadro 1.2.2), lo que sugiere correspondencia entre los sucesos.

Incendio Forestal	Comuna	Inicio	Control	Superficie	T°Máx (Estación, fecha)
El Carrizo	Melipilla	03-ene-14	12-ene-14	14805 ha	35,2°C (330020, 11-ene-14)
Batuco // Toconey	Constitución	04-ene-14	12-ene-14	14050 ha	34,8°C (340031, 11-ene-14)
Canelillos Valdés	San Javier	11-ene-15	16-ene-15	13833 ha	33,7°C (340031, 16-ene-15)
Las Cardillas	Vichuquén	14-ene-17	03-feb-17	37308 ha	37,3°C (340031, 25-ene-17)
Nilahue Barahona	Pumanque	17-ene-17	27-ene-17	46490 ha	37,3°C (340031, 25-ene-17)
El Perdigadero	Paredones	18-ene-17	25-ene-17	12684 ha	37,3°C (340031, 25-ene-17)
Las Máquinas	Cauquenes	20-ene-17	09-feb-17	159812 ha	41,5°C (360011, 26-ene-17)
Santa Cruz	Cauquenes	20-ene-17	03-feb-17	11579 ha	41,5°C (360011, 26-ene-17)
San Antonio	Florida	20-ene-17	06-feb-17	30391 ha	41,5°C (360011, 26-ene-17)
Caserío Chaimávida	Concepción	25-ene-17	06-feb-17	15204 ha	34,1°C (360019, 26-ene-17)
Los Caulles - Tomeco	Yumbel	25-ene-17	16-feb-17	11655 ha	34,1°C (360019, 26-ene-17)
Santa Apolonia	Quirihue	25-ene-17	05-feb-17	10829 ha	41,5°C (360011, 26-ene-17)
Huampuli	San Nicolás	26-ene-17	01-feb-17	14249 ha	41,5°C (360011, 26-ene-17)
Agua Fría	Molina	09-feb-20	16-mar-20	14988 ha	35,3°C (340031, 09-feb-20)

Cuadro 1.2.2: Megaincendios de la década 2012-2022 en la zona centro-sur de Chile, fecha de inicio, control, superficie afectada y temperatura máxima registrada durante su ocurrencia. Fuentes: CONAF, 2022a; DMC, 2022

1.2.4. Clima e incendios forestales en Chile

La atribución de variabilidad atmosférica al régimen de incendios forestales no sólo facilita la anticipación a escenarios de riesgo, sino que permite enfocar

esfuerzos de mitigación sobre otros componentes de dicho régimen, como los factores humano y de uso del suelo. En este contexto se ha identificado a la temperatura como referencia de la variabilidad del régimen de incendios en el área de estudio (Gómez-González et al., 2019). De similar modo se ha establecido relación con el régimen del fuego en Chile centro-sur a factores como la topografía o la presencia de bosques y plantaciones forestales (McWethy et al., 2018).

En complemento al análisis multivariado se han aplicado métodos geoestadísticos en la búsqueda de patrones climáticos que dictaminen el comportamiento del fuego: A escala interanual se ha determinado cómo el aumento en el número de incendios y en el área quemada por temporada en Chile centro-sur se correlaciona con la precipitación invernal de la temporada previa, en vista de la acumulación de materia vegetal combustible, lo que se condice con la fase cálida (fría) de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), asociada a anomalías positivas (negativas) de precipitación en invierno. Esta relación es robusta en la zona central (González et al., 2011; Urrutia-Jalabert et al., 2018).

Se observa, a su vez, en registros instrumentales de las regiones de O'Higgins al Biobío una asociación negativa entre la precipitación de primavera-verano y la intensidad del régimen de incendios de la temporada en curso para dicha zona, la cual puede ser modulada por el Modo Anular del Sur (SAM, por sus siglas en inglés), el cual exhibe valores negativos (positivos) durante primaveras y veranos más lluviosos (secos) de lo habitual en Chile centro-sur (Fogt and Marshall, 2020). Entre las regiones de la Araucanía y Los Lagos la asociación negativa entre el régimen de incendios y la precipitación de primavera-verano es aún más fuerte, remarcando la relación positiva entre el número de incendios y la polaridad del índice del SAM.

En cuanto a la covariabilidad estacional del campo de temperatura y el régimen de incendios, se ha determinado que anomalías positivas (negativas) de temperatura durante invierno-primavera entre las regiones de Valparaíso al Maule corresponden a un aumento (disminución) en el área quemada en la zona central por temporada. De igual forma, el área quemada entre las regiones del Biobío a La Araucanía está correlacionada de manera positiva con la temperatura de verano en dicha zona. Finalmente, en el tramo comprendido entre las regiones de la Araucanía a Los Lagos se registra una asociación favorable

del régimen del fuego con la temperatura máxima de verano en la zona sur. Tales asociaciones se refieren esencialmente a la predisposición del combustible vegetal a arder, lo cual es modulado por su contenido de humedad, variable dependiente de la estacionalidad de la precipitación y la temperatura. Se ha registrado esta codependencia clima-combustible y subsecuente impacto en el patrón de incendios en ecosistemas de Sudáfrica y Norteamérica (Archibald et al., 2009; Littell et al., 2009) dando cuenta de una mayor o menor resistencia al fuego (inflamabilidad) según los montos de precipitación y el promedio estacional de temperatura. A partir del trabajo de Urrutia-Jalabert et al., 2018 se observa cómo a medida que se avanza hacia el Polo Sur, se fortalece la relación positiva estacional entre la temperatura y el área afectada por incendios forestales, indicando una fuerte influencia térmica en la porción sur del gradiente meridional de precipitación/combustible. En tal caso el régimen de incendios se limita por el factor clima. Respecto a la zona central de Chile, se caracteriza una dependencia más bien interanual y dependiente de la precipitación, responsable de la acumulación de material vegetal combustible. En este caso, el régimen de incendios está limitado por combustible (e indirectamente por el clima).

Análisis a escala mensual respecto al área de estudio han determinado anomalías de circulación atmosférica anticiclónicas al suroeste de América del Sur como forzantes de gran escala para períodos caracterizados por grandes extensiones afectadas por incendios forestales (McWethy et al., 2021). Estas anomalías modulan procesos que mantienen condiciones propicias para la ocurrencia de incendios de proporción en la zona de estudio, descritos a continuación:

- Anomalías positivas de radiación de onda corta incidente, lo cual induce un incremento en la temperatura superficial del aire y aumento de la evapotranspiración.
- Bloqueo de sistemas frontales por la anomalía de alta presión atmosférica.
- Reducción del flujo superficial del oeste en la zona central, lo cual limita el enfriamiento del flujo frío de los vientos oceánicos del oeste.

El posicionamiento del centro de alta presión deriva por balance geostrófico en viento del este en la tropósfera baja al norte del centro del anticiclón. Esto genera advección de aire seco y cálido, el que al descender por la ladera oriental de los

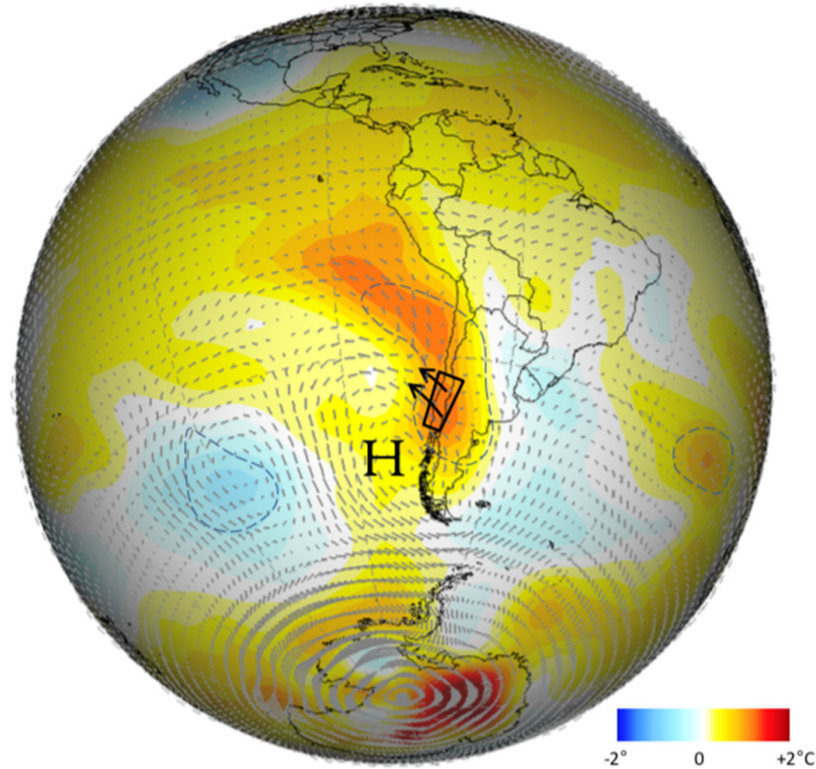


Figura 1.2.6: Compuesto de la temperatura del aire en 850hPa (en colores) y vectores de viento a la misma altura considerando meses de anomalías altas de superficie quemada menos meses de anomalías bajas. El vector más grande representa una diferencia de viento de 4ms^{-1} . La letra **H** indica el centro de la anomalía anticiclónica de alta presión. Las flechas curvas negras indican el área denotada por anomalías de viento del este y el rectángulo blanco describe Chile centro-sur (entre las regiones de Valparaíso y Los Ríos). El contorno segmentado encierra los puntos de grilla donde la diferencia de las anomalías mensuales mayores con las menores fue significativa con un $p < 0.05$ de acuerdo a un test de Monte Carlo (McWethy et al., 2021).

Andes refuerza el calentamiento adiabático generado por subsidencia.

Estos procesos reducen el contenido de humedad del combustible vegetal, condición requerida para el desarrollo de incendios de proporción.

Capítulo 2

Hipótesis y objetivos

2.1. Hipótesis

Las olas de calor en Chile centro sur favorecen el desarrollo de incendios forestales.

2.2. Objetivo General

Caracterizar la evolución media de parámetros de incendios forestales (i.e. número de eventos, superficie afectada) en Chile centro sur durante olas de calor en los veranos extendidos (noviembre-marzo del año siguiente) entre 2002 y 2022.

2.3. Objetivos Específicos

- Analizar el patrón de ocurrencia (número) de incendios y de superficie afectada durante olas de calor en cada una de las regiones administrativas comprendidas en la zona centro-sur.
- Describir patrones generales de las olas de calor para evaluar su progresión sinóptica, junto con caracterizar el desarrollo del régimen de incendios forestales asociado sobre el área de estudio.

Capítulo 3

Datos

3.1. El régimen de incendios en Chile centro-sur

Para examinar el régimen de incendios en Chile centro-sur se analizará la base de datos de incendios forestales generada por la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2022a), la cual incluye para cada incendio declarado:

- Ubicación geográfica del punto estimado de inicio: latitud y longitud.
- Horas de inicio, control y extinción.
- Área afectada.

A partir del set de datos se consideró cada incendio georreferenciado (98 % del total) para los veranos extendidos (noviembre a marzo del año siguiente) entre 2002 y 2022.

3.2. Reanálisis ERA5

ERA5 es un modelo de circulación atmosférica global elaborado por el Centro Europeo de previsiones meteorológicas a mediano plazo (ECMWF), el cual se alimenta de numerosas observaciones meteorológicas in situ y remotas para generar simulaciones (Hersbach et al., 2020). Cubre el periodo 1959-2023; su resolución espacial horizontal es de $0.25 \times 0.25^\circ$ (celdas de aproximadamente $25 \times 25 \text{ km}^2$) y 137 niveles verticales; su resolución temporal es horaria. Para analizar

la relación entre el régimen del fuego y las olas de calor, la variable principal será la temperatura máxima diaria en la zona centro-sur de Chile, a propósito de definir las olas de calor.

Para generar el conjunto de datos de ERA5 se accedió, para los veranos extendidos entre 1991 y 2022, al catálogo de:

- Temperatura a 2 metros (T_{2m})
- Temperatura punto rocío (T_{d2m})
- Porcentaje de nubosidad (N)
- Componente zonal del viento a 10 metros (u)
- Componente meridional del viento a 10 metros (v)
- Presión a nivel medio del mar (SLP)

La estimación de la humedad relativa se detalla en el Apéndice A1.

3.3. Campos grillados de incendios / reanálisis

Para el dominio de estudio, se cuenta con campos de variables de reanálisis. De acuerdo a su resolución horizontal ($0.25 \times 0.25^\circ$), a cada una de las regiones de Chile centro-sur corresponden determinados puntos de grilla. Respecto a tal grilla del reanálisis se agruparon y asignaron los incendios forestales iniciados en cada punto, considerando:

- A. La suma de incendios iniciados en cada punto de grilla (IF_O), y
- B. El área quemada total por los incendios iniciados en cada punto de grilla (IF_{AA} , en hectáreas).

Tanto los datos de reanálisis como los datos de incendios forestales están integrados a escala diaria, considerando el horario de verano en Chile GMT-3.

ERA5 ha sido validado para la zona de estudio usando observaciones de temperatura superficial del aire y precipitación (e.g. Rusticucci et al., 2014 y

Demortier et al., 2021). Tales esfuerzos de validación permiten fundamentar su aplicación, revelando un ajuste fiable en gran parte del dominio, a excepción de la franja meridional costera, dónde no se logra una captura fidedigna del ciclo diario de temperatura, lo que podría estar atribuido a dificultades del modelo en representar procesos acoplados ante una topografía compleja, además de corresponder a la sección de transición océano-continente.

3.4. R-Explorer

Se accedió a la plataforma de visualización y descarga de datos de reanálisis ERA-5 “R-Explorer” del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2 (disponible en: <https://replorer.cr2.cl/>) para la manipulación eficiente y representación gráfica de los datos en el dominio Chile-Pacífico.

Capítulo 4

Métodos

4.1. Cálculo de olas de calor

Con el fin de abordar la potencial relación entre el combustible vegetal, el régimen de incendios y la temperatura, fue aplicada la definición de olas de calor empleada por la DMC, considerando como ODC aquellas fechas cuya temperatura máxima superó en al menos 3 días consecutivos el ciclo anual del percentil 90 de temperatura máxima diaria a partir del período climatológico 1991-2020 (DMC, 2020b) para cada punto de grilla, determinando ocurrencia y estadísticos representativos para cada verano extendido (indistintamente temporada de incendios forestales):

- Número de olas de calor por temporada (ODC_N).
- Duración de las olas de calor: duración total en días de las olas de calor registradas en cada temporada de incendios (ODC_D).
- Amplitud de las olas de calor (ODC_A), representada por la máxima temperatura de cada ODC.

4.2. Patrones de área quemada y ocurrencia de incendios forestales durante olas de calor

En función de ello se evaluó la contribución de los episodios de olas de calor al área quemada de todo el período para cada punto de grilla, así como la contribución de la ocurrencia de incendios durante olas de calor a la absoluta. Al tratarse de

resultados proporcionales es posible distinguir el régimen de incendios de cada región respecto a las demás, conservando su varianza.

De igual forma se evaluó la contribución a un régimen intenso de incendios forestales por períodos de olas de calor, determinados al superar el percentil 90 de área quemada (FF_{P90}).

Posteriormente, a fin de abordar la ocurrencia de incendios en torno a olas de calor se aplicó un criterio flexible para incluir la contabilización de área quemada por olas de calor junto a los días previos y posteriores a sus ocurrencias.

De este modo se integraron en progresión 1, 3, 5 y 10 días antes del inicio y tras el término de las olas de calor a la contabilización de área quemada, considerando disgregación en la magnitud:

- Área diaria quemada sobre 0 hectáreas hasta 1 hectárea.
- Área diaria quemada sobre 1 hectárea hasta 10 hectáreas.
- Área diaria quemada sobre 10 hectáreas hasta 50 hectáreas.
- Área diaria quemada sobre 50 hectáreas hasta 200 hectáreas.
- Área diaria quemada sobre 200 hectáreas hasta 1000 hectáreas.
- Área diaria quemada sobre 1000 hectáreas hasta 10000 hectáreas.
- Área diaria quemada sobre 10000 hectáreas.

4.2.1. Número de olas de calor

Se plantea estudiar la eventual variabilidad interanual del régimen de olas de calor y de parámetros de incendios forestales. Para ello se calculó el número de ODC por temporada en cada punto de la grilla (ODC_N), asignando correspondientemente las distribuciones regionales de área quemada y de ocurrencia de incendios forestales.

Se ajustaron posteriormente regresiones lineales simples al área regional quemada y a la ocurrencia de incendios de acuerdo con el número de ODC, tomando en cuenta una normalización de la sumatoria de cada variable por la cantidad de temporadas correspondientes al número de olas de calor.

4.2.2. Duración de las olas de calor

Cómo variable dependiente del número de olas de calor se filtró la ocurrencia de incendios al superar el último decil de área quemada en función de la duración de las olas de calor por temporada, asignando resultados en términos de probabilidad.

4.2.3. Régimen intraestacional de incendios forestales durante olas de calor

Con el propósito de inspeccionar variaciones del régimen de incendios durante la ocurrencia de olas de calor en la escala intraestacional se realizó una sumatoria del área quemada a lo largo de cada temporada de incendios de acuerdo a las siguientes ventanas temporales:

- Una semana (7 días),
- dos semanas (14 días),
- tres semanas (21 días), y
- un mes.

Posteriormente se consideró el rango intercuartil de cada región como medida representativa de la superficie quemada en cada ventana temporal.

De esta forma se comparó mediante anomalías de superficie quemada - respecto a las medias climatológicas de período 2002-2022- la contribución de períodos con registros de olas de calor en cada ventana de tiempo respecto a su valor climatológico.

4.2.4. Extensión regional de las olas de calor

Como medida adicional a los índices señalados para representar la intensidad de las olas de calor se integró el porcentaje de superficie regional diaria cubierta por olas de calor, con lo que se evaluó su contribución de acuerdo a su extensión al área quemada y ocurrencia.

4.3. Análisis de componentes principales.

Los alcances del manejo grillado de datos posibilitan una caracterización local de la ocurrencia de olas de calor, mas el establecimiento de métricas generalizables en el espacio amplían la capacidad operacional, ya sea en términos de análisis o de previsión. Con este propósito se aplicó un análisis de componentes principales 4.3.1 respecto a la ocurrencia de olas de calor considerando los veranos extendidos (noviembre-marzo) entre 1991 y 2022, a fin de determinar modos comunes de variabilidad del campo grillado.

A través de la composición matricial por valores propios (Lorenz, 1956) es posible representar la matriz de m -series de olas de calor $F_m(t)$ (campo grillado) por k -valores propios, o modos, a través de la descomposición en m -vectores propios E (patrón espacial) y las componentes principales $A^k(t)$.

$$F_m(t) = \sum_{k=1}^{k=m} E_m^k A^k(t) \quad (4.3.1)$$

La correlación r con la componente principal A_k se puede evaluar:

$$r_m^k = \frac{\sum_{t=1}^n (A^k(t) - \overline{A^k})(F_m(t) - \overline{F_m})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (A^k(t) - \overline{A^k})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (F_m(t) - \overline{F_m})^2}}$$

Donde $\overline{A^k}$ y $\overline{F_m}$ son las medias en el tiempo de la matriz $A^k(t)$ (componente principal k) y de la matriz $F_m(t)$ de olas de calor.

De esa forma se establecieron modos principales de covariabilidad de las olas de calor a partir del campo grillado, estableciendo indicadores espaciales.

Posteriormente se asignó la contribución de estos períodos al régimen de incendios forestales.

4.3.1. Evolución de las ODC

A raíz de la caracterización regional determinada por el análisis de componentes principales se consideró una ventana de 10 días previos y 10 posteriores al inicio de las olas de calor a fin de visualizar el desarrollo regional de la ocurrencia y el área quemada por incendios forestales. El día de inicio de las ODC (día cero) se

determinó como el primero de los requeridos para considerarse ODC.

De igual manera se observó la progresión regional de variables atmosféricas integradas al estado del combustible vegetal, concentradas en torno a la ocurrencia de olas de calor: humedad relativa, viento en sus componentes meridional y vertical, nubosidad y precipitación.

Cabe indicar que para evitar autocorrelación inducida se consideraron menos de los 10 días posteriores a ciertas ODC, dado que para esa ventana al registrar más de una ODC se asignaron los días posteriores a cada ODC hasta el eventual registro de otra en dicho lapso, a contar del cual se consideraron como días correspondientes a una nueva ODC.

4.4. Compuestos sinópticos

Finalmente se analizaron compuestos sinópticos en torno a la ocurrencia de olas de calor, a fin de caracterizar la progresión de variables atmosféricas - temperatura superficial a 2 metros y presión a nivel del mar- previo, durante y posterior a la ocurrencia de ODC de acuerdo a la clasificación resultante del análisis de componentes principales.

Capítulo 5

Resultados

5.1. El régimen de incendios forestales en Chile centro-sur

El régimen de los incendios forestales registrados en Chile centro-sur en el periodo 2002-2022 posiciona a las regiones Del Maule, De La Araucanía y Del Biobío como las más afectadas en términos de área; mientras que las regiones Del Biobío, De La Araucanía y de Valparaíso fueron las de mayor ocurrencia de incendios (Cuadro 5.1.1). Su representación grillada (Figura 5.1.1) muestra máximos locales de ocurrencia de incendios y de área quemada en el Valle Central, en la Cordilleras De La Costa y de Nahuelbuta, revelando mínimos relativos de ambas variables en la Cordillera de Los Andes.

Región	Área quemada	Número de incendios
De Valparaíso	108910 ha	11647
Metropolitana	119139 ha	7509
De O'Higgins	196473 ha	3769
Del Maule	381967 ha	9696
De Ñuble	95563 ha	7225
Del Biobío	220033 ha	28778
De La Araucanía	286755 ha	19449
De Los Ríos	6603 ha	1858
De Los Lagos	21037 ha	3123
Total	1436480 ha	93054

Cuadro 5.1.1: Área regional quemada y número de incendios del periodo 2002-2022.

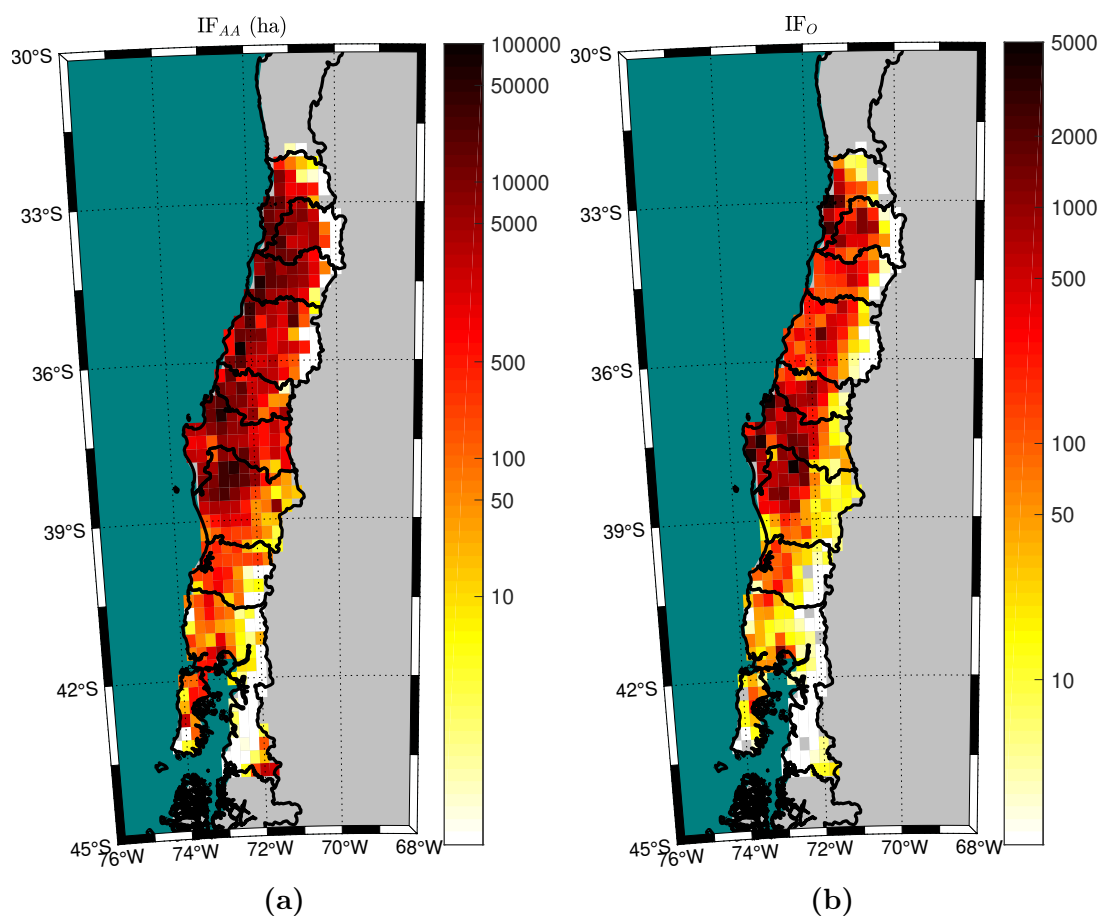


Figura 5.1.1: (a) Área total quemada en hectáreas y (b) ocurrencia de incendios forestales del período 2002-2022.

5.1.1. Intervalos de área quemada período 2002-2022

Pese a que las categorías de menor densidad de área quemada registraron mayor número de incendios, la totalización de área fue minoritaria en comparación a la abultada proporción de área quemada clasificadas según densidades de área quemada superiores, pese a ser las de menor frecuencia en el registro (Cuadro 5.1.2).

Intervalo	Área quemada total	Número de incendios
Sobre 10000ha	432345 ha	30
1000 - 10000 ha	421362 ha	383
200 - 1000 ha	286093 ha	1316
50 - 200 ha	132794 ha	2625
10 - 50 ha	89419 ha	7330
1 - 10 ha	62977 ha	30880
0 - 1 ha	11490 ha	50490
Total	1436480 ha	93054

Cuadro 5.1.2: Área quemada por incendios forestales durante el período 2002-2022 en función de determinados intervalos.

5.1.2. Área regional quemada en el rango intraestacional

Se calculó el área quemada contabilizando distintas ventanas temporales en cuanto a su duración en días dentro del rango intraestacional: de una, dos, tres semanas y un mes (Cuadro 5.7.1), referentes al valor regional de la suma de los rangos intercuartiles de cada punto de grilla en el período 2002-2022.

Como representación del régimen climatológico del área quemada (suma de los rangos intercuartiles del área quemada de los puntos de grilla pertenecientes a cada región para el período 2002-2022) se presenta la distribución en la región del Maule, en función de las ventanas descritas.

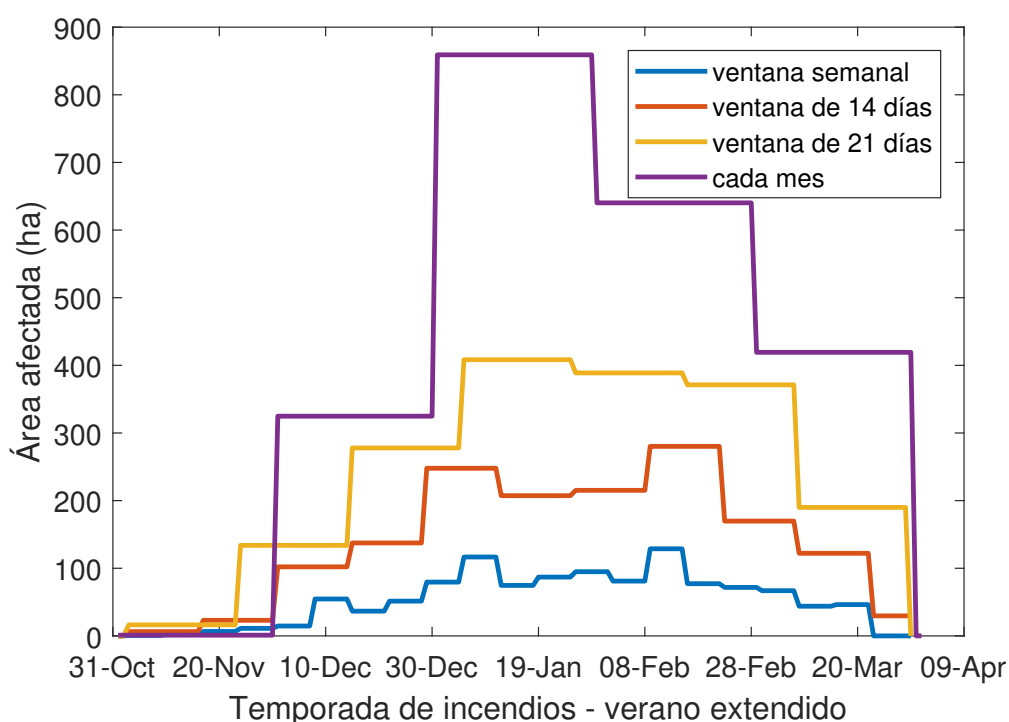


Figura 5.1.2: Frecuencia de temporadas de acuerdo al número de días de las ODC (en porcentaje) por región para el período 2002-2022. "Sin ODC" se refiere a las temporadas que no registraron ODC.

5.2. Patrones espaciales de las olas de calor

La distribución espacial de los índices cumulativos de número y duración de las olas de calor (ODC_N y ODC_D) así como del índice de amplitud media (ODC_A) definen patrones longitudinales en Chile centro sur para el período 2002-2022 (Figura 5.2.1). Cada índice resalta en magnitud a lo largo del Valle Central y de la Cordillera de la Costa, alcanzando sectores costeros e interiores en la zona sur. Los menores valores tanto de ODC_N como de ODC_D se registran principalmente en la costa de la zona central, así como en sectores precordilleranos del dominio.

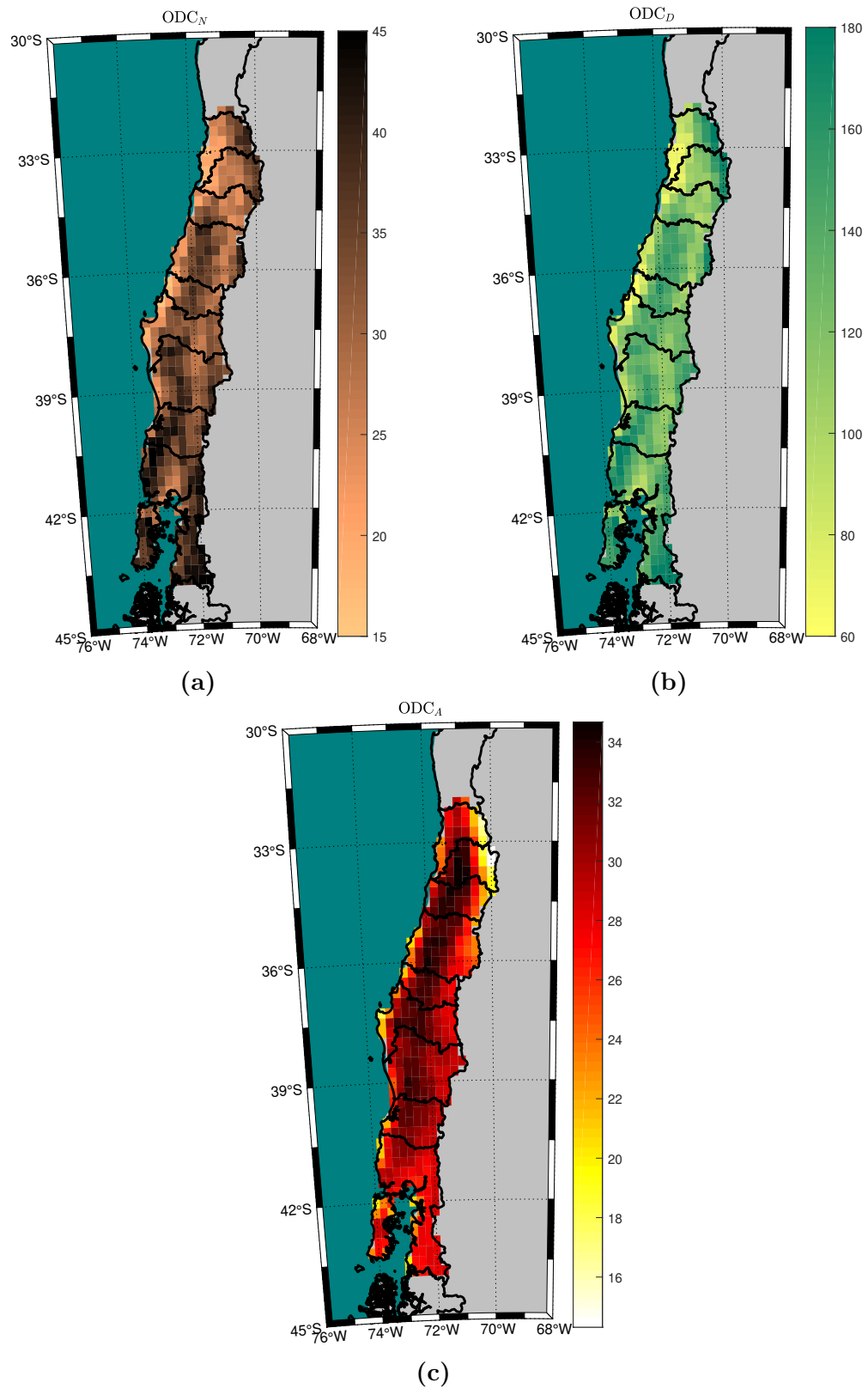


Figura 5.2.1: (a) Número total de olas de calor, (b) duración total de las olas de calor del período 2002-2022 y (c) temperatura máxima media de la ola de calor de mayor amplitud de cada temporada entre 2002 y 2022.

5.2.1. Número de Olas de Calor

Tras examinar la contribución de ocurrencia y área quemada durante olas de calor al régimen de incendios del período 2002-2022, se evaluó la distribución en frecuencia de las olas de calor por temporada dentro del periodo 2002-2022 (Figura 5.2.2), visualizando la recurrencia de temporadas indicando $ODC_N=0$ (ninguna ola de calor), $ODC_N=1$, $ODC_N=2$ y $ODC_N=3$. No se incluye la distribución de mayores números de olas de calor dadas sus bajas frecuencias.

La distinción entre temporadas sin ODC exhibe un patrón dipolar: prácticamente en la mitad de las temporadas la porción norte de la zona de estudio no registró ODC; mientras que en la porción sur de la zona de estudio, el número de olas de calor habitual fue de una por temporada, distribuyendo para $ODC_N=2$ y $ODC_N=3$.

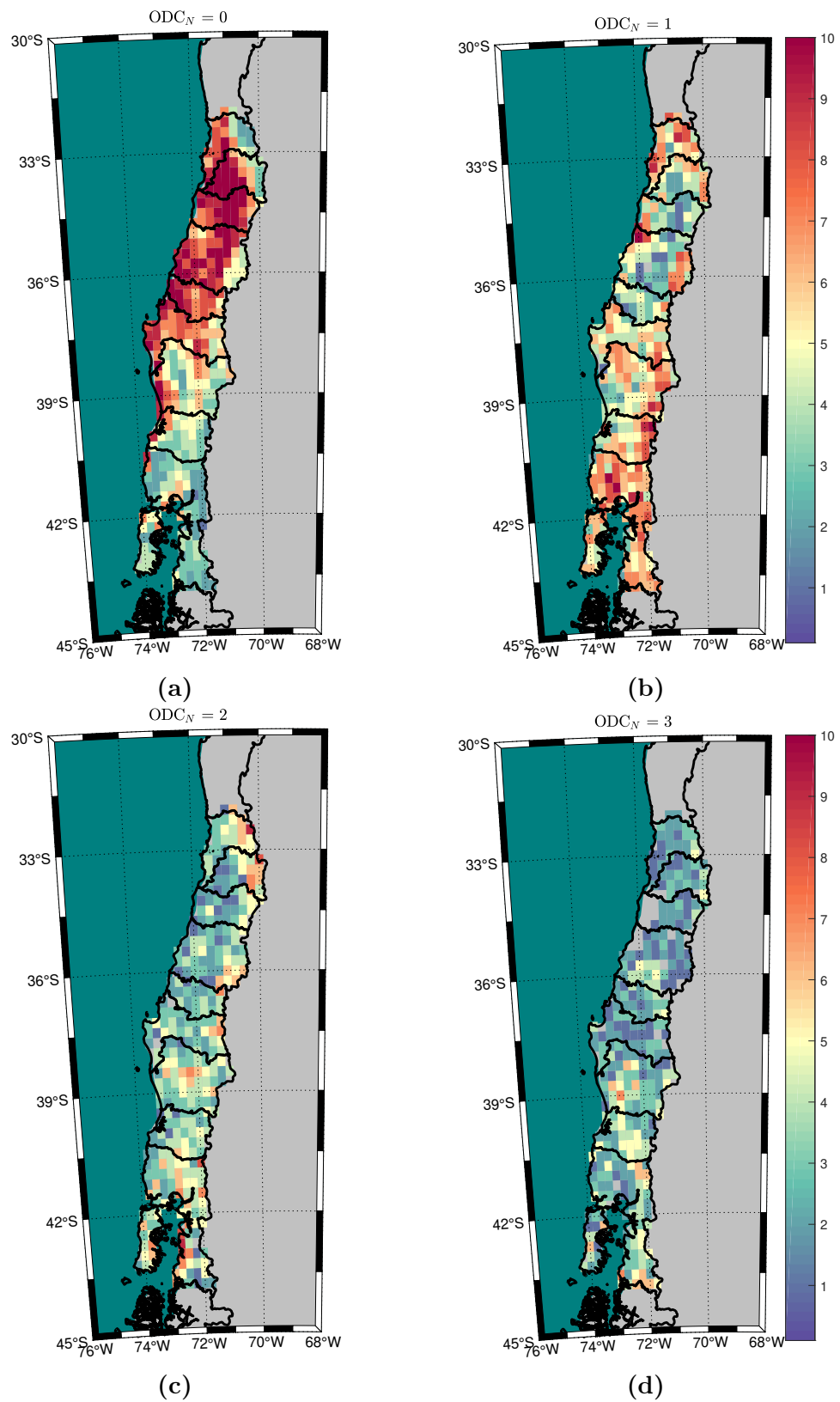


Figura 5.2.2: Frecuencia de temporadas entre 2002-2022 registrando (a): cero olas de calor, (b): una ola de calor, (c): 2 olas de calor, y (d): 3 olas de calor.

5.2.2. Duración de las olas de calor

En términos de la duración de las ODC (Figura 5.2.3) se observa disminución en el porcentaje de temporadas que registraron numerosos días bajo ODC en la zona centro-sur, contabilizando la mayor parte de las temporadas sin días de olas de calor. A nivel regional se observa variación en la extensión de los días por temporada bajo ODC:

- En las regiones de Los Lagos, Los Ríos y de La Araucanía la duración de las ODC no supera 30 días por temporada
- Para las regiones del Biobío, Maule, Ñuble y O'Higgins se observaron duraciones máximas de las ODC superiores a 30 días, alcanzando hasta 55.
- Las regiones de Valparaíso y Metropolitana exhiben un régimen de duración de menor amplitud respecto al de las regiones de O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío.

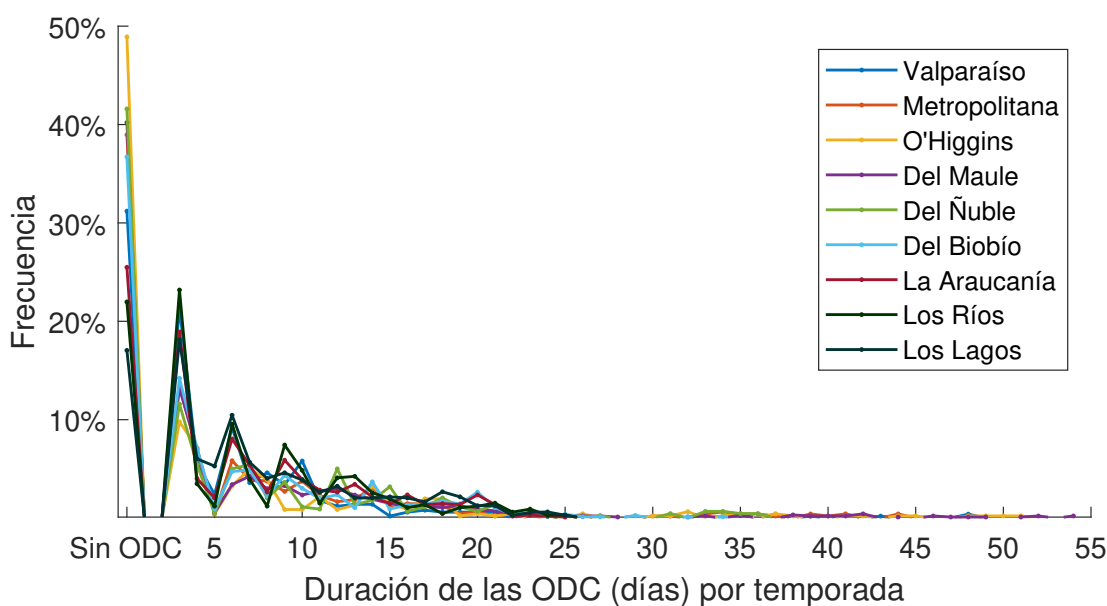


Figura 5.2.3: Frecuencia de temporadas de acuerdo al número de días de las ODC (en porcentaje) por región para el período 2002-2022. "Sin ODC" se refiere a las temporadas que no registraron ODC.

5.3. Análisis espacial de área quemada en función de la región de ocurrencia de las ODC

Como se muestra en la Figura 5.3.1, el primer modo de covariabilidad de la matriz de ocurrencia de ODC explica un 32% de su varianza . El patrón espacial de este modo describe magnitudes que - integradas con el patrón temporal- concentran la ocurrencia de ODC entre las regiones de Ñuble y de Los Lagos (zona sur: 36° - 43°S).

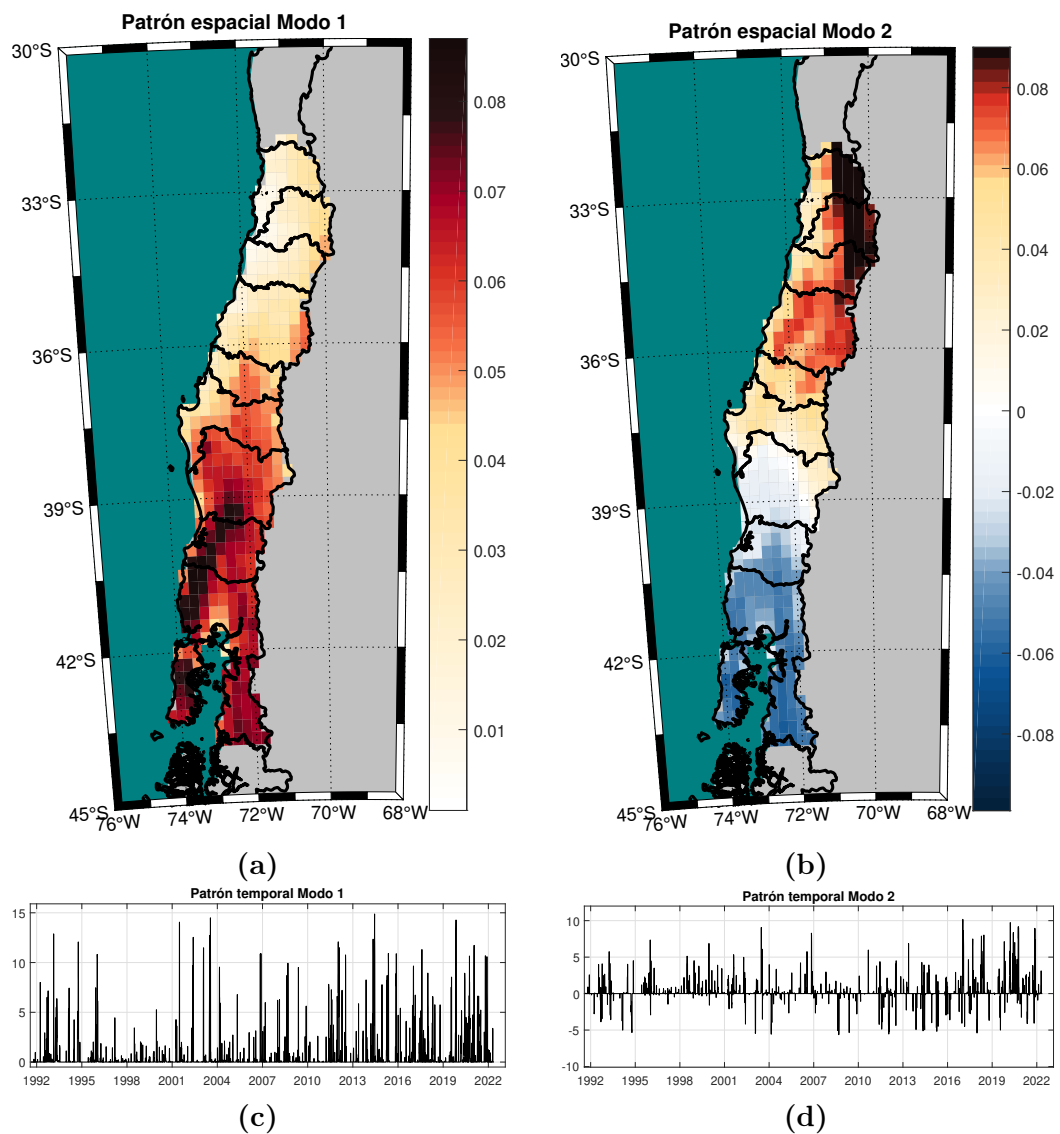


Figura 5.3.1: Patrones espaciales (a,b) y temporales (c,d) del primer y segundo modo principal definidos a partir del campo grillado de ocurrencias de ODC para el período 2002-2022.

En seguida, el segundo modo principal representa un 16 % de la varianza total, describiendo de acuerdo al signo del patrón temporal 5.3.1 un dipolo de ocurrencia de ODC: reproducidas - de mejor manera- entre las regiones de Valparaíso a Maule (32°-36°S), a la vez que no ocurren entre las regiones de Ñuble y de los Lagos. Oposición del signo temporal constituye -en menor medida que para las regiones de Valparaíso a Maule- ODC entre las regiones de Ñuble y de Los Lagos, a la par de una supresión de las ODC entre las regiones de Valparaíso y de Maule.

Para fines prácticos se considerará la ocurrencia de olas de calor concentradas entre las regiones de Ñuble y de Los Lagos (modo 1) y la ocurrencia de ODC entre las regiones de Valparaíso y Maule (sólo una parte del dipolo representado en el patrón espacial del modo 2, dado que la otra está contenida por el modo 1).

Los valores propios del modo posterior (modo 3) explican por sí solos menos del 6 % de la varianza de las series de olas de calor, considerando en conclusión los 2 modos cardinales: ODC definidas en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos) y ODC identificadas en la zona centro (regiones de Valparaíso a Maule).

5.4. Régimen de incendios forestales durante Olas de Calor

Al examinar la contribución de área quemada durante olas de calor al área quemada total del período 2002 - 2022 (Figura 5.4.1) se observan regímenes regionales, como se describe a continuación.

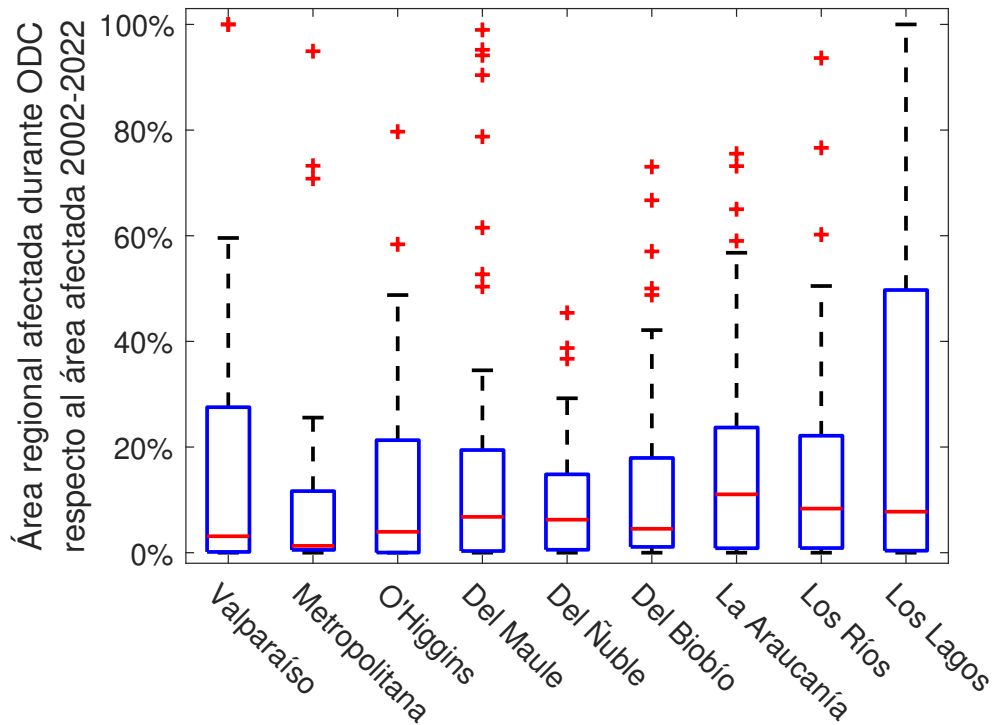


Figura 5.4.1: Diagrama de cajas del porcentaje de área quemada por incendios forestales ocurridos durante olas de calor respecto al área quemada en el período 2002-2022. Las líneas horizontales rojas indican mediana, mientras que los percentiles 25 y 75 se representan por los límites de los recuadros azules. Las líneas negras segmentadas representan valores mínimos y máximos no atípicos. Valores atípicos (outliers) se representan por cruces rojas.

La contribución de área quemada durante olas de calor al régimen regional de incendios forestales fluctúa entre 0.5% y el 23% (media de los percentiles 25 y 75, respectivamente). Resalta en la región de los Lagos, con guarismos entre un 1 y 49.7% (percentil 25 y 75 de la distribución regional de área quemada durante incendios forestales respecto al total para la Región de Los Lagos). Destacando el hecho de que esta región es la de mayor área del dominio (cuadro 1.2.1), se observa que la sección superior de la distribución de área porcentual quemada por incendios durante olas de calor (percentiles sobre 75) presenta valores superiores a 50%, llegando hasta 100% en la región de Los Lagos.

Todas las regiones registran valores atípicos (outliers) con áreas de alto porcentaje de superficie quemada durante olas de calor, particularmente la región del Maule, señalando la correspondencia en el área quemada por incendios forestales durante eventos de calor. Al respecto, las regiones de Valparaíso y Los Lagos exhiben zonas en las que ocurrieron incendios forestales exclusivamente durante olas de

calor (Figuras 5.4.1 y 5.4.2). Pese a ello, los valores intermedios (mediana) de las regiones de Valparaíso a O'Higgins aluden a un régimen menos determinado por olas de calor respecto a las regiones de la zona sur. Cabe destacar que en todas las regiones se registran años en que las ODC prácticamente no contribuyen al área quemada total (i.e. valores cercanos a 0).

La contribución del número de incendios durante olas de calor al régimen de incendios en Chile centro-sur (Figura 5.4.2 exhibe porcentajes menores (percentiles 25 y 75, respectivamente entre 3.5 y 11 %) entre las regiones de Valparaíso y del Biobío, incrementando entre las regiones de La Araucanía a Los Lagos, resultando máxima en esta última (percentil 75=26 %).

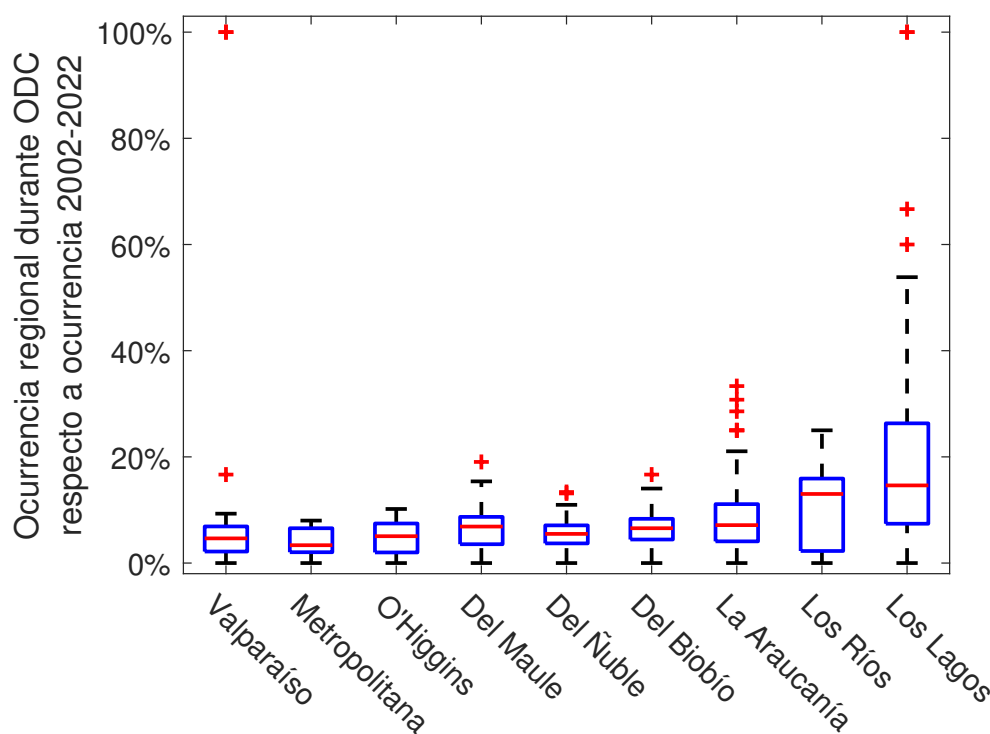


Figura 5.4.2: Diagrama de caja del porcentaje de incendios forestales registrados durante olas de calor respecto a la ocurrencia total de incendios del período 2002-2022. Líneas horizontales rojas indican mediana, mientras que los percentiles 25 y 75 se representan por recuadros azules. Líneas negras segmentadas señalan distribución inferior y superior, en tanto valores atípicos (outliers) se representan por cruces rojas.

Mediante una caracterización regional de la ocurrencia durante olas de calor se nota una mayor incidencia de las ODC en el régimen de incendios forestales en la zona sur respecto a la zona central.

Respecto a la proporción de incendios forestales intensos (FF_{P90}) ocurridos durante ODC se observa de modo similar a 5.4.1 que las medianas de cada región son inferiores al 10%, sin embargo, al considerar valores atípicos, se identifican zonas afectadas en al menos un 50% de su superficie durante olas de calor al tratarse de un régimen intenso de incendios (Figura 5.4.3, outliers).

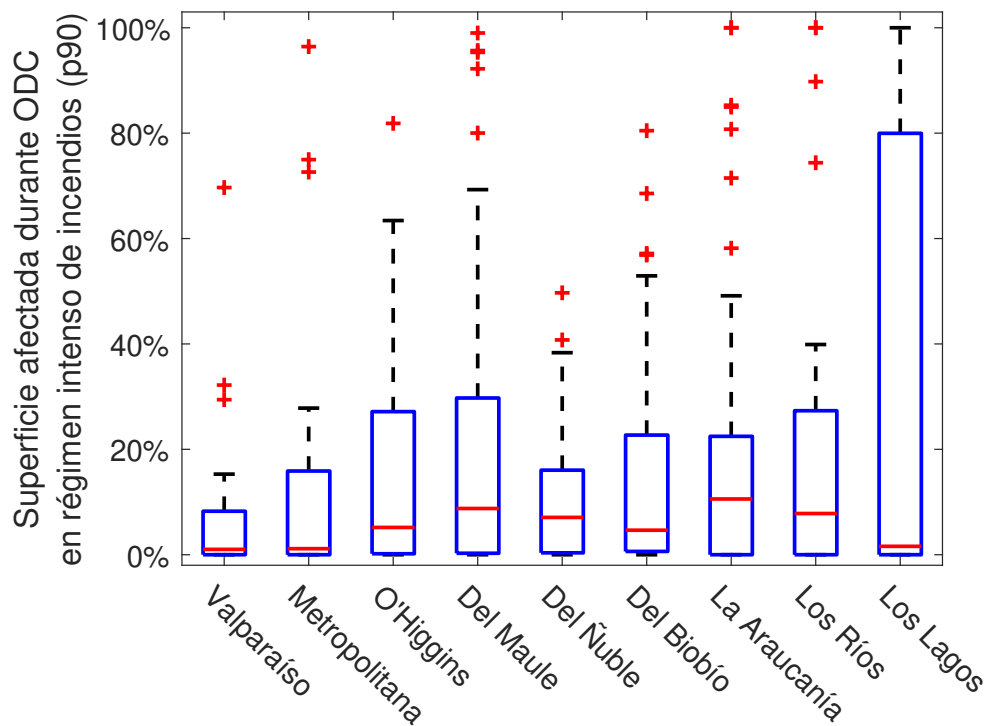


Figura 5.4.3: Diagrama de caja del porcentaje de área quemada durante olas de calor considerando régimen intenso de incendios forestales del período 2002-2022 (FF_{P90}). Líneas negras segmentadas señalan distribución inferior y superior, en tanto valores atípicos (outliers) se representan por cruces rojas.

Algunas regiones resaltan en términos de áreas quemada en regímenes intensos de incendios forestales durante olas de calor, como la región de Los Lagos, sucedida por la región del Maule, de La Araucanía y en menor medida en sectores de las regiones de Los Ríos y Del Biobío.

Regímenes intensos de incendios forestales en las regiones de Valparaíso y Metropolitana muestran menor asociación con eventos de olas de calor.

La distribución de incendios forestales según categoría de superficie quemada destaca la correspondencia entre incendios de magnitud y olas de calor, aún más si se extiende la ventana de análisis días previos y posteriores al evento (1, 3, 5 y 10 días). Este análisis en particular permite englobar la totalidad de los eventos de área quemada superiores a 10 mil hectáreas en torno a olas de calor, en particular, si se extiende el período considerado en torno a ODC 10 días antes y 10 días después de ellas (Cuadro 5.4.1).

A medida que consideran intervalos de área quemada inferiores, la asociación con eventos de olas de calor es menor.

Área quemada	Sin ODC	ODC	± 1 día	± 3 días	± 5 días	± 10 días
Sobre 10000 ha	33 %	67 %	70 %	93 %	97 %	100 %
1000 - 10000 ha	75 %	25 %	32 %	37 %	41 %	47 %
200 - 1000 ha	86 %	14 %	16 %	19 %	23 %	31 %
50 - 200 ha	88 %	12 %	14 %	17 %	21 %	29 %
10 - 50 ha	91 %	9 %	11 %	15 %	19 %	28 %
1 - 10 ha	93 %	7 %	9 %	13 %	17 %	25 %
0 - 1 ha	94 %	6 %	8 %	12 %	16 %	24 %

Cuadro 5.4.1: Porcentaje de área quemada según intervalos de superficie quemada, considerando registros sin ola de calor, durante olas de calor, y la incorporación de ventanas de 1, 3, 5 y 10 días antes y después de olas de calor para el período 2002-2002.

5.5. Número de olas de calor

Tras examinar la contribución de ocurrencia y área quemada durante olas de calor al régimen de incendios del período 2002-2022 se observó la representación de área quemada y número de incendios según el número de ODC por temporada. En términos de área quemada las regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins concentran el 31 % de superficie durante veranos que no registraron olas de calor, proporción que se reduce hacia el sur. Las regiones mencionadas alcanzan un 20 % de superficie quemada respecto al período 2002-2022 al contabilizar las temporadas que registraron una ola de calor ($ODC_N=1$); mientras la zona sur bajo esa condición concentra un 18 % de área quemada. Al considerar $ODC_N=2$ y $ODC_N=3$, las regiones de la zona sur registran 26 y 20 % de área quemada, respectivamente, reparando en que son menos frecuentes (Figura 5.5.1).

Tras normalizar la superficie quemada por el número de olas de calor de cada temporada, se realizaron regresiones lineales simples por región (Figura 5.5.2), ajustando pendientes positivas significativas en la integración de todo el dominio y para cada serie regional, salvo respecto a las regiones de Valparaíso y de O'Higgins.

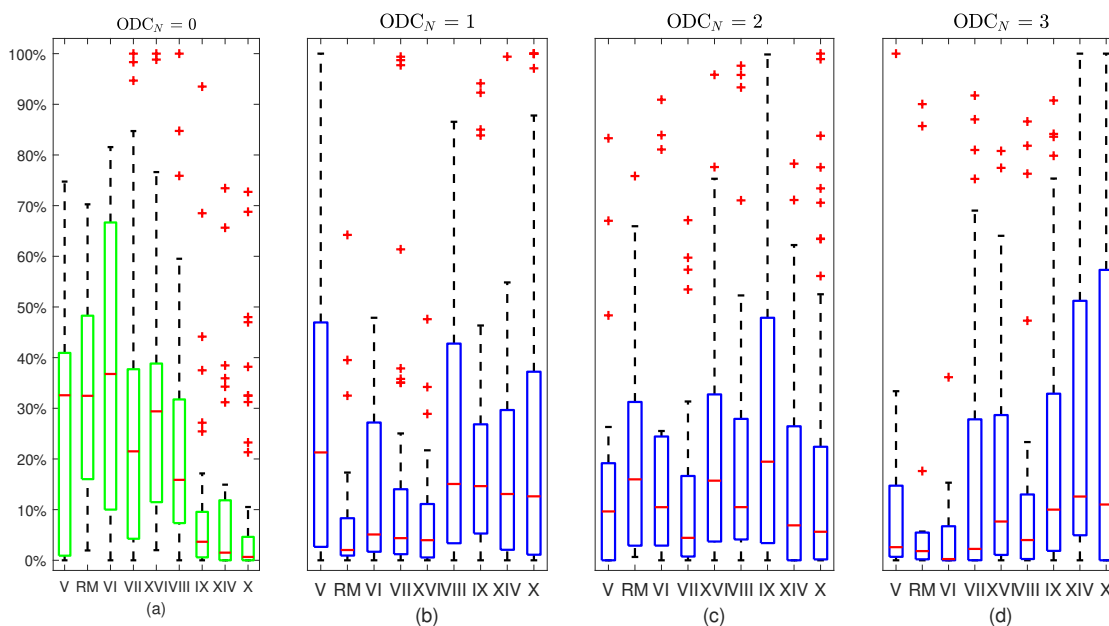


Figura 5.5.1: Diagrama de caja del área quemada distribuida espacialmente en cada región de la zona centro-sur durante temporadas (a): que no registraron olas de calor; (b): que registraron una ola de calor; (c): de 2 olas de calor; y (d): con 3 olas de calor. Líneas horizontales rojas indican mediana, mientras que los percentiles 25 y 75 se representan por recuadros azules (verdes en el caso de (a): $ODC_N=0$). Líneas negras segmentadas señalan distribución inferior y superior, en tanto outliers se representan por cruces rojas.

A su vez, en términos porcentuales la ocurrencia en temporadas de incendios sin olas de calor fue mayoritaria en la zona central (48%), disminuyendo gradualmente en todo el dominio al considerar $ODC_N=1$, $ODC_N=2$ y $ODC_N=3$ (Apéndice A3.1).

Pese a ello, al normalizar la ocurrencia de incendios por el número de ODC de cada temporada (Apéndice A3.2) se observan pendientes positivas y significativas al agregar el dominio y para cada serie regional, con las excepciones de las regiones Metropolitana de O'Higgins y del Biobío, cuyas pendientes resultaron negativas.

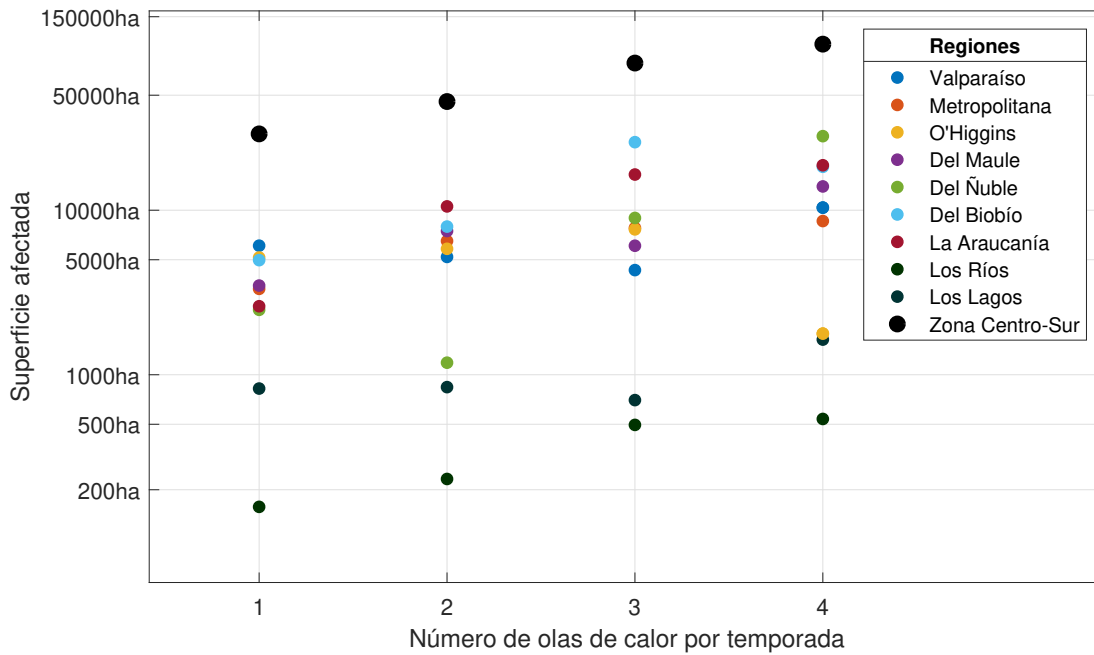


Figura 5.5.2: Área quemada regional en función del número de olas de calor por temporada, normalizado por la frecuencia de temporadas correspondiente (puntos coloreados representan cada valor regional, mientras que puntos negros sólidos representan la integración de la zona centro-sur). Se ajustaron regresiones lineales simples por región (líneas segmentadas de colores; línea negra integra la zona centrosur).

Las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos ajustaron pendientes positivas máximas respecto a la zona centrosur.

5.6. Duración de las olas de calor y régimen de incendios forestales

En general, se aprecia una tendencia al aumento en el área quemada a medida que se registran más días en ODC. Al menos los valores máximos de área quemada se emplazan en la porción superior de días en ODC. Conforme a ello se registran mínimos de superficie quemada superiores a medida que la duración de las ODC es mayor, en particular para las regiones Metropolitana, de O'Higgins, Del Maule, Del Biobío y Del Ñuble, las cuales exhiben un patrón del número de días en ODC superior en comparación al de las demás (Figura 5.6.1, Apéndice A4.1 y Apéndice A4.2).

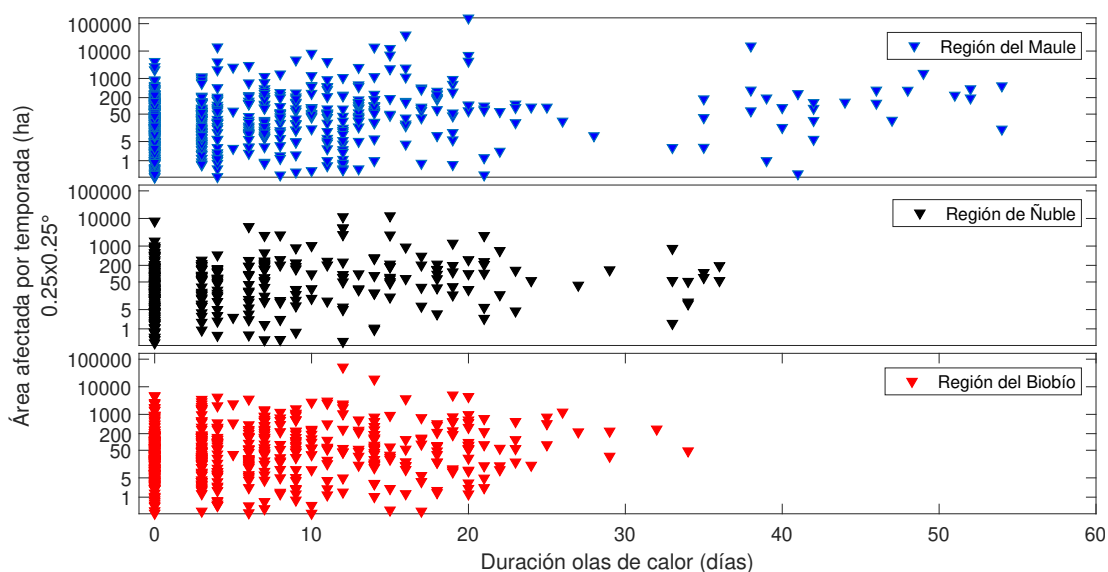


Figura 5.6.1: Área quemada (en escala logarítmica) por temporada en función de la número total de días bajo ODC de acuerdo al campo grillado de la zona centro sur ($0.25 \times 0.25^\circ$)

A fin de profundizar el análisis de la posible relación entre ODC e incendios forestales se evaluó la duración de las ODC ante regímenes intensos de incendios forestales (FF_{P90}), observando un aumento en la probabilidad de ocurrencia a medida que incrementan los días totales en ODC por temporada a lo largo de las regiones de Chile centro-sur (Figuras 5.6.2, A4.3 y A4.4).

Los límites superiores de duración, así como la probabilidad máxima de ocurrencia difieren según la región, pues en la zona sur (regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos) la probabilidad máxima de ocurrencia de temporadas intensas se acerca al 50%; mientras que en las regiones de O'Higgins, del Maule, del Ñuble y del Biobío, de hasta 55 días bajo ODC, alcanza el 100% de probabilidad de ocurrencia ante un régimen intenso de incendios forestales, es decir que en aquellas temporadas de incendios al registrar duración máxima en días de ODC se registró el total de área quemada bajo régimen intenso de incendios para el período 2002-2022.

Como se indicó anteriormente (Figura 5.6.1, Apéndice A4.1 y Apéndice A4.2), es menos frecuente registrar temporadas de incendios con altos números de días bajo ODC.

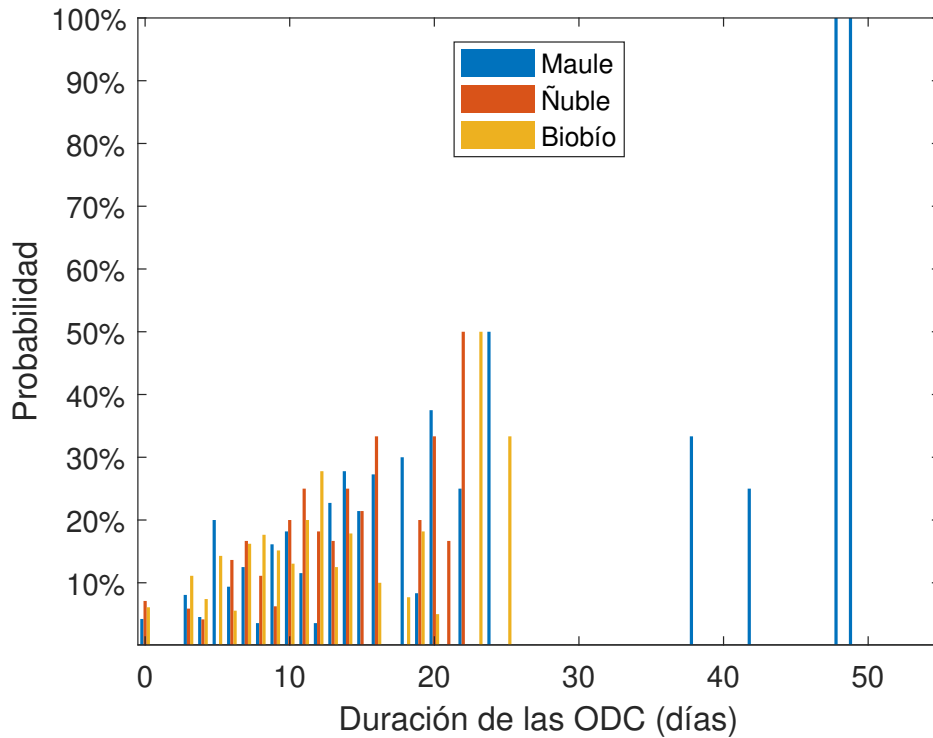


Figura 5.6.2: Probabilidad de registro de superficies superiores al percentil 90 de área quemada según duración en días de Olas de calor ocurridas en las regiones de Maule, Ñuble y Biobío.

5.7. Régimen intraestacional de incendios forestales durante olas de calor

Respecto al total regional se observa que la diferencia en superficie al considerar ocurrencia de olas de calor es positiva y se incrementa mientras mayor es la ventana temporal considerada, a excepción de lo observado para la Región de Valparaíso (de diferencia positiva, pero de disminución a medida que la ventana incrementa).

Región	1 semana	2 semanas	3 semanas	1 mes
Región de Valparaíso	751,9 ha	690,9 ha	772,4 ha	327,2 ha
Región Metropolitana	2487,6 ha	2978,6 ha	3073,7 ha	3543,4 ha
Región de O'Higgins	2087,2 ha	2972,5 ha	4293,7 ha	4690,7 ha
Región del Maule	9593,3 ha	14180,7 ha	13989,5 ha	13132,2 ha
Región del Ñuble	885,1 ha	1017,3 ha	1155,6 ha	1690,5 ha
Región del BíoBío	2529,1 ha	2592,6 ha	3453,8 ha	5831,2 ha
Región de La Araucanía	1978,9 ha	2498,5 ha	2957,9 ha	3224,6 ha
Región de Los Ríos	30,7 ha	60,7 ha	69,3 ha	84,9 ha
Región de Los Lagos	151,2 ha	247,9 ha	292 ha	429,6 ha

Cuadro 5.7.1: Área quemada según cada ventana de tiempo (1 semana, 2 semanas, 3 semanas y 1 mes) durante olas de calor respecto a la climatología (2002-2022).

5.8. Extensión de las olas de calor

Se estudió la extensión porcentual de cada ODC en cada región y su eventual asociación con el área quemada por los incendios que ocurrieron durante las respectivas ODC (Figura 5.8.1, Apéndice A6.1a y Apéndice A6.1b):

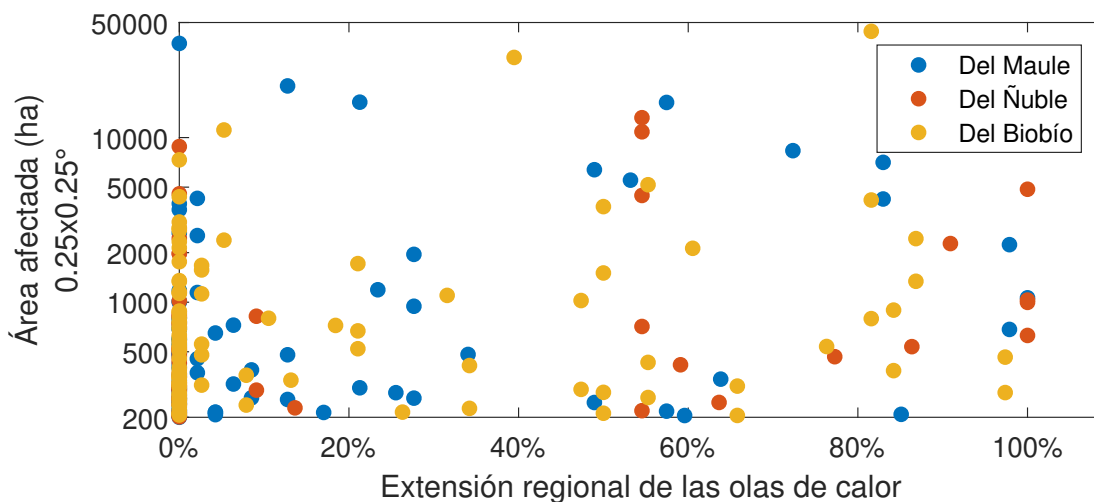


Figura 5.8.1: Porcentaje superficial cubierto en cada región por olas de calor en relación a al área quemada durante ellas.

En términos de altas superficies afectadas se aprecia cómo a medida que la extensión regional de las olas de calor fue mayor, se registraron áreas quemadas superiores a 5 mil hectáreas. Cabe notar la variabilidad del registro de área quemada sin olas de calor.

5.9. Área quemada en función de la región de ocurrencia de las ODC

La expresión del régimen de incendios de acuerdo a los primeros modos de ODC definidos tras el análisis de componentes principales, representa, para el modo 1, hasta un 40 % del área quemada durante ODC (región de Ñuble), comprendiendo en la zona sur porcentajes de área quemada en torno al 30 % por las ODC registradas (42), respecto al total de área del período 2002-2022. Las regiones de la zona central no comprenden más de un 4 % de área quemada por esta definición de ODC (Figura 5.9.1).

Al considerar la definición de olas de calor respecto a la zona central (Figura 5.9.2), se alcanzaron porcentajes de área quemada de hasta 60 % (Región del Maule) durante las 31 ODC correspondientes a la definición, bordeando en la zona central entre un 20 y 30 %, salvo en la región de Valparaíso, cuyo monto porcentual quemado respecto al total del período fue de 9 %. Las regiones de la zona sur presentaron montos de área quemada representativos de menos del 15 % del período 2002-2022, salvo en las regiones de Ñuble y Biobío, cuyas proporciones de área quemada estuvieron en torno al 40 % del total del período.

A fin de apartar los montos de superficie quemada de las magnitudes fuera de norma de enero de 2017 se graficaron resultados análogos sin considerar la temporada 2016-2017 (Figuras A7.1 y A7.2), exhibiendo resultados similares, salvo en las regiones de O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío al describir las ODC de acuerdo al modo 2 definido por el análisis de componentes principales.

42 ODC

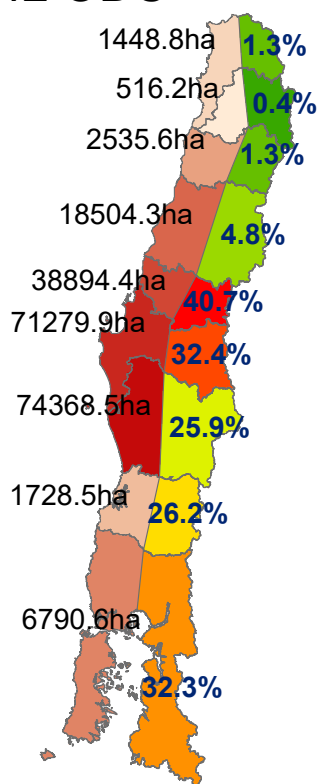


Figura 5.9.1: La porción occidental de cada región representa el área quemada durante olas de calor definidas entre las regiones de Ñuble y Los Lagos (según el modo 1). La porción oriental de cada región representa el porcentaje de área quemada correspondiente al total de cada región durante los veranos extendidos de 2002 a 2022.

31 ODC

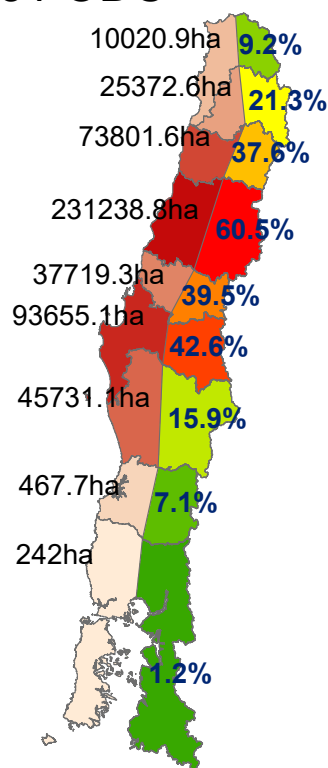
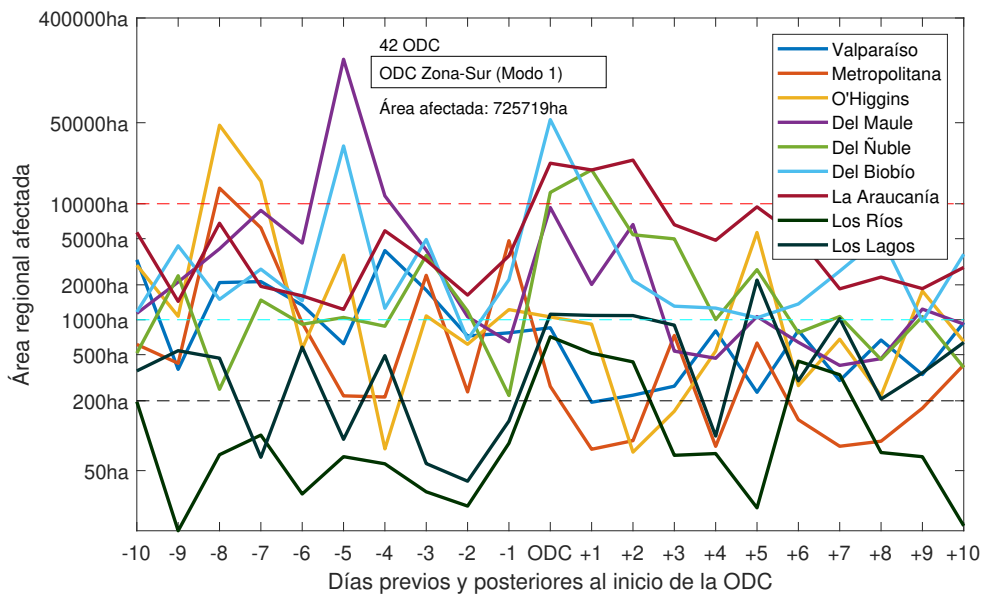


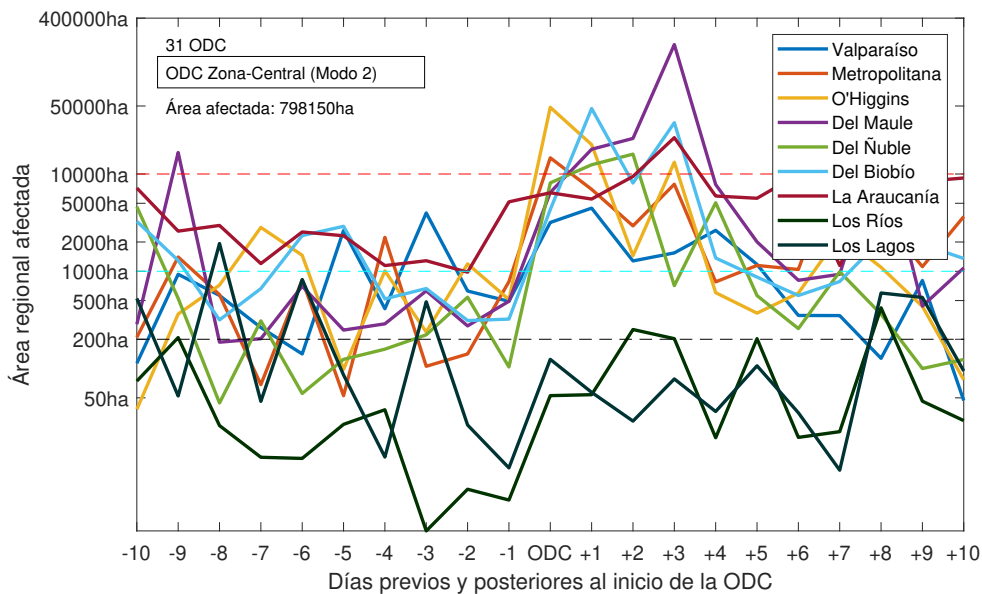
Figura 5.9.2: La porción occidental de cada región representa el área quemada durante olas de calor definidas entre las regiones de Valparaíso y Maule. La porción oriental de cada región representa el porcentaje de área quemada correspondiente al total de cada región durante los veranos extendidos de 2002 a 2022.

Al analizar el período comprendido 10 días antes y 10 días después del inicio de las olas de calor (día 0) de cada conjunto se aprecia cómo en ambos casos y para cada región se registra un incremento en la superficie quemada en torno al día de ocurrencia de las olas de calor, comportamiento sostenido días posteriores.

Pese a que el incremento en área es generalizado en Chile centro sur, las olas de Calor definidas en la zona sur no asocian claro incremento en la superficie afectada de las regiones de Valparaíso y Metropolitana. De forma análoga, las olas



(a)



(b)

Figura 5.9.3: Evolución del área quemada en torno a la ocurrencia de ODC. Compuestos regionales de área quemada 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas (a) en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos), y (b) en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule), de acuerdo al Análisis de componentes principales.

de calor registradas en la zona central no inducen un aumento considerable en el área quemada de las regiones de Los Ríos y Los Lagos. En términos cuantitativos,

el 50 % del área quemada en la zona centro sur para el período 2002-2022 estuvo considerada por el compuesto de 10 días previos y 10 posteriores a las 42 ODC del patrón definido por la zona sur (asociado al modo 1), mientras que el área quemada en Chile centro-sur considerando 10 días previos y posteriores a las 31 ODC definidas en la zona central representó un 55 % del total del período.

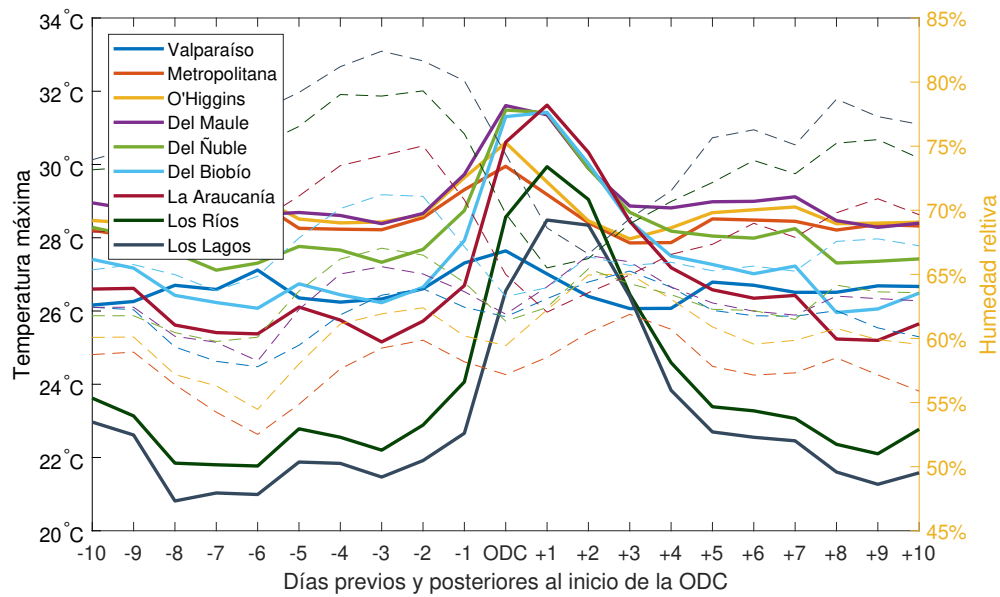
Al sustraer del análisis de compuestos la temporada 2016-2017 se observa que el peak de superficie afectada en la Región Del Maule considerando definición de ODC en la zona central (a partir del modo 2) es correspondiente esencialmente a esa temporada. (Figura A7.3).

5.10. Variabilidad atmosférica en torno a las ODC

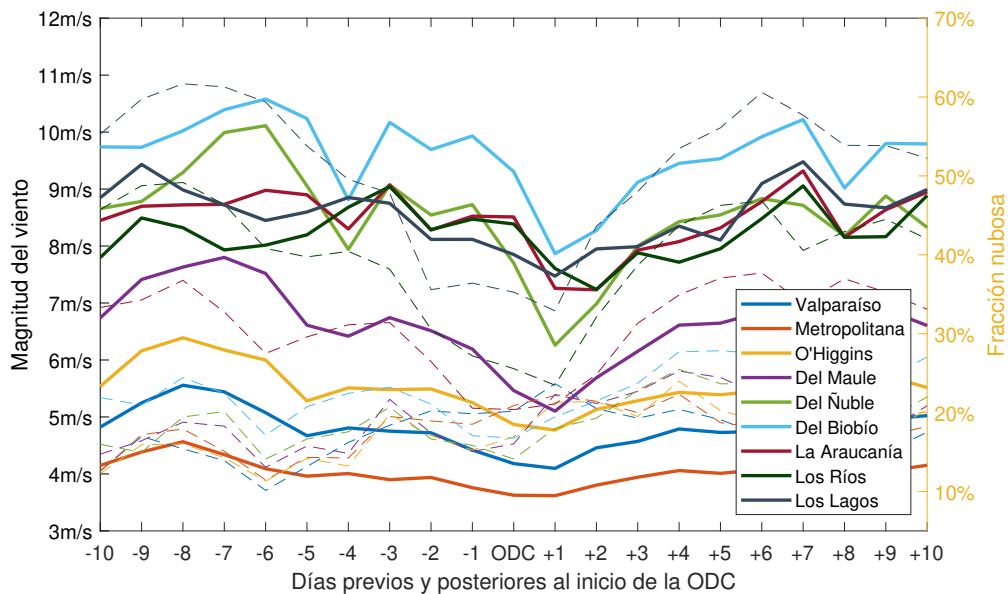
Considerando las regiones definidas a partir de los principales modos de variabilidad obtenidos del análisis de componentes principales, en esta subsección se analiza la evolución de distintas variables atmosféricas en una ventana de 21 días centrada en el día 0 de las ODC.

Durante los primeros días de ocurrencia de las ODC definidas tanto en la zona centro como en la zona sur se observa una disminución del porcentaje de humedad relativa en el dominio de estudio (Figuras 5.10.1 y), el cual es recuperado a su condición previa posteriormente. En el caso de las olas de calor definidas en la zona central se aprecia un incremento en la magnitud de la componente sur del viento días previos a las ODC, llegando a valores máximos entre el día de inicio (día cero) de las ODC y el segundo (+2). El compuesto de viento para olas de calor definidas en la zona sur (Figura 5.10.2) reproduce este incremento y máximos de viento meridional días previos a la ocurrencia de las ODC en cada región. Para ambos conjuntos (ODC definidas en la zona sur y definidas en la zona central) se aprecia disminución del viento zonal antes de las olas de calor, alcanzando mínimos al día de su ocurrencia (día 0). Las regiones de la zona sur promedian viento del este al día 0 de las ODC en el caso de las ODC definidas entre las regiones de Ñuble y Los Lagos (Figura 5.10.2).

Respecto a la cobertura nubosa se observa una disminución porcentual en cada región y en ambos modos durante las ODC, a la vez que el campo de presión - de magnitudes superiores a mayor latitud- alcanza valores mínimos, tras días de un sostenido incremento.



(a)



(b)

Figura 5.10.1: (a) Compuestos regionales de temperatura (líneas sólidas) y de humedad relativa (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos), y (b) Compuestos regionales de la magnitud del viento (líneas sólidas) y de fracción nubosa (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la Compuestos regionales de la presión a nivel del mar 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos).

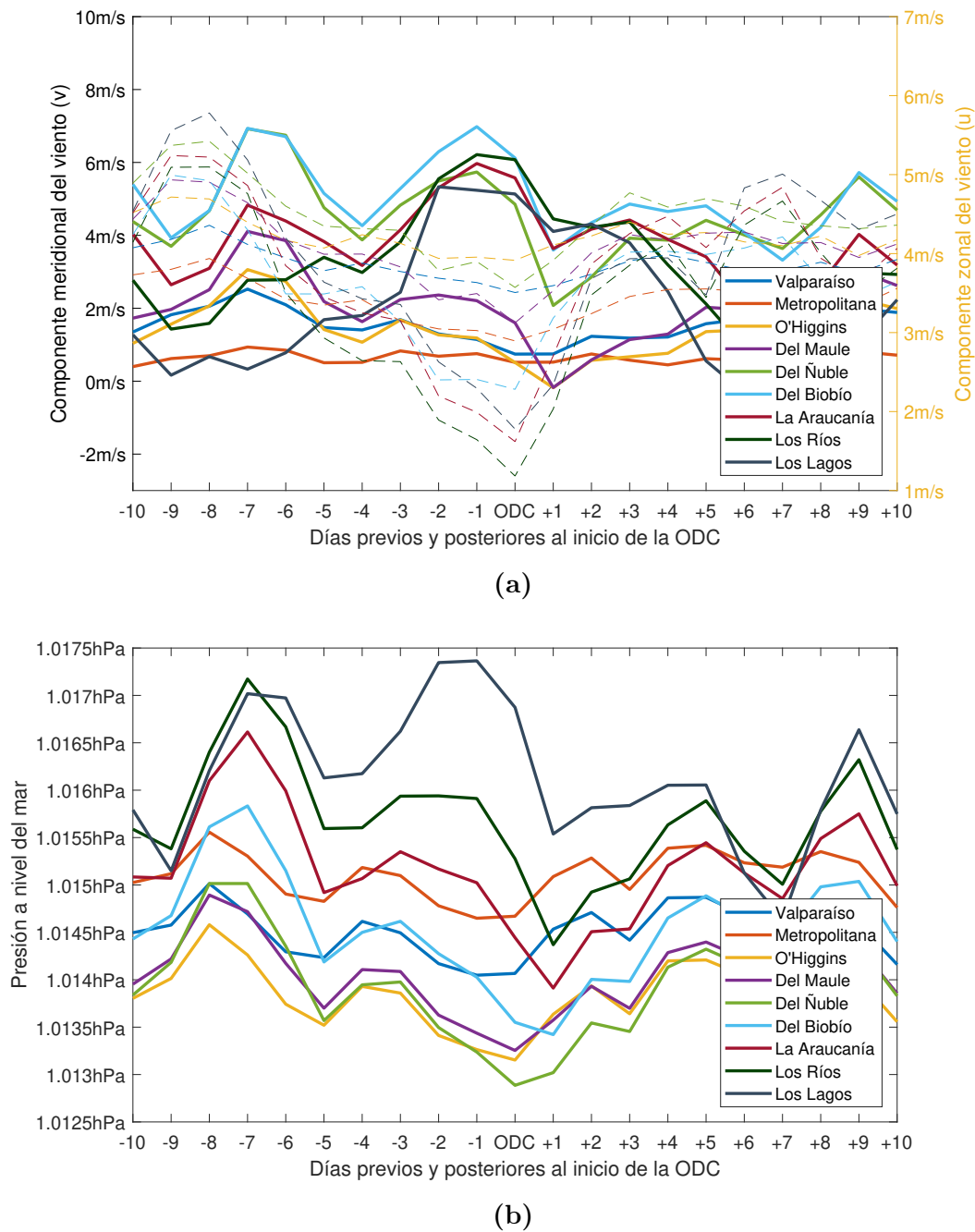


Figura 5.10.2: (a) Compuestos regionales de la componente meridional del viento (líneas sólidas) y de la componente zonal (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos), y (b) Compuestos regionales de la presión a nivel del mar 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos).

5.11. Condiciones sinópticas

Para explorar las condiciones sinópticas que enmarcan la ocurrencia de olas de calor se analizó la evolución en el campo de presión siete, tres y 1 día antes de su ocurrencia, así como en su inicio (día 0), día uno y tres. Se observa la llegada al continente de un anticiclón migratorio, ya sea en el compuesto de ODC definidas en la zona central o en la zona sur al día de inicio (día 0).

La diferenciación en las condiciones sinópticas respecto a ambas definiciones de ODC (de acuerdo a la zona sur y de acuerdo a la zona centro) radica en la latitud media de ingreso del anticiclón migratorio al continente: en torno a 36°S para ODC definidas en la zona sur, mientras que para las definidas en la zona central en torno a 32°S. Esto determina las regiones sobre las que se posiciona la baja costera que se espera se desarrolle al norte de dicho anticiclón. En este contexto, se observa disminución en la magnitud del viento durante la ola de calor, detrimento en la humedad relativa, incremento en la temperatura superficial y el ingreso desde la cordillera de los andes de viento seco descendente en dirección a la costa de Chile.

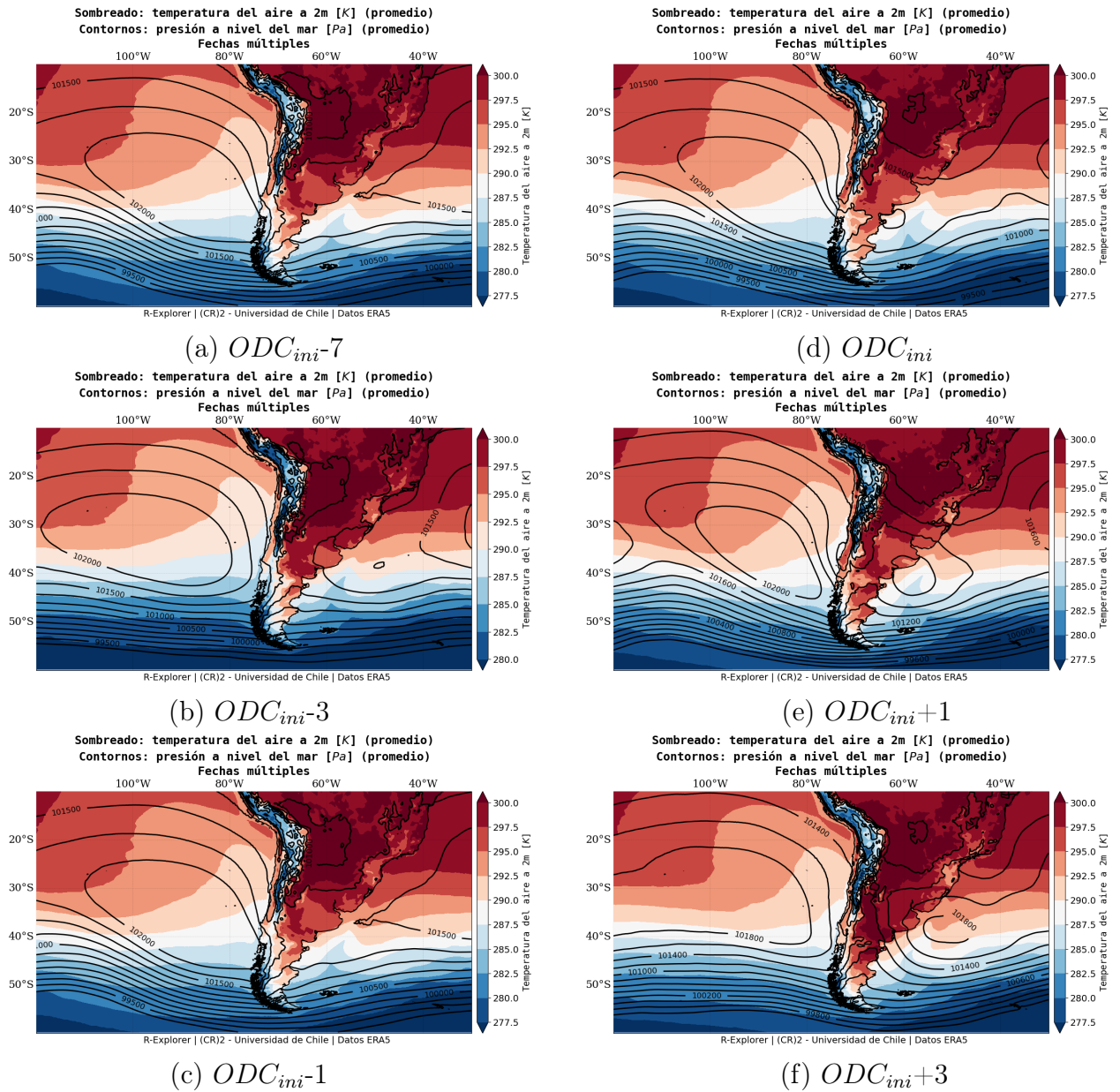


Figura 5.11.1: Compuesto del campo de presión superficial y temperatura superficial en torno al inicio de las 42 ODC caracterizadas en la zona sur (Entre las regiones de Ñuble y De Los Lagos, Modo 1), (a) 7 días antes del inicio, (b) 3 días antes del inicio, (c) 1 día antes del inicio, (d) al inicio de las ODC (ODC_{ini}), (e) un día después del inicio y (f) 3 días tras el inicio de las ODC.

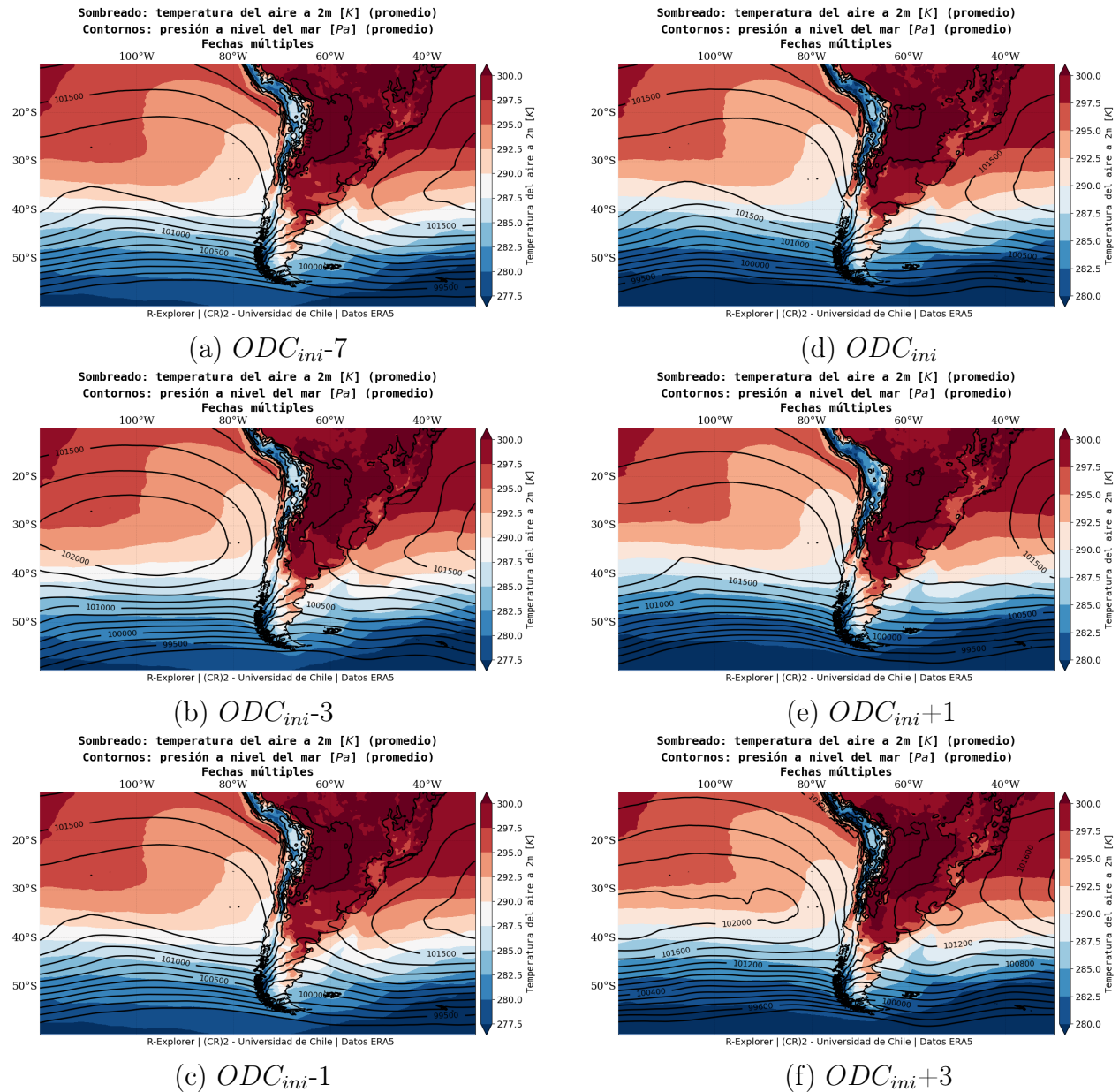


Figura 5.11.2: Compuesto del campo de presión superficial y temperatura superficial en torno al inicio de las 31 ODC caracterizadas en la zona central (Entre las regiones de Valparaíso y Del Maule, Modo 2), (a) 7 días antes del inicio, (b) 3 días antes del inicio, (c) 1 día antes del inicio, (d) al inicio de las ODC (ODC_{ini}), (e) un día después del inicio y (f) 3 días tras el inicio de las ODC.

Capítulo 6

Discusión

El presente estudio plantea posibilidades de investigación en torno a la caracterización del régimen de incendios forestales asociado a olas de calor, particularmente respecto a la atribución de factores involucrados en dicho escenario.

En primer lugar, cabe mencionar la mayor sensibilidad a la meteorología extrema de la zona sur de Chile respecto a la de la zona central, característica que puede explicar una mayor variación en la superficie afectada durante olas de calor (Figuras 5.4.1 y 5.4.3). En el presente estudio se observa cómo parte de la variabilidad de los incendios forestales de la zona sur de Chile descrita en Urrutia-Jalabert et al. (2018) puede ser atribuida a eventos de olas de calor; es decir, estos eventos representan parte importante del total estacional de área quemada analizado en dicho estudio.

Además, el caso de la zona sur puede ser caracterizado en torno al número de incendios, cuya fracción registrada durante olas de calor, respecto al total del período 2002-2022, superó a la de la zona central, destacando el hecho de que el total de incendios de las regiones de Los Lagos y de Los Ríos fue menor al de regiones de la zona central (Figura 5.4.2).

Dado que los incendios en la zona sur presentan modulación meteorológica más que por disponibilidad de combustible (Urrutia-Jalabert et al., 2018; McWethy et al., 2021), cabe remarcar la inherente responsabilidad atribuida al factor humano en la generación de incendios forestales. En consideración a ello resulta pertinente el

fortalecimiento del sistema preventivo de incendios, particularmente en torno a ventanas de alta temperatura, ideales para una mayor propagación de incendios.

Diversificación de la matriz de uso de suelo

McWethy et al. (2018) señalan que la agricultura es un factor esencial que modula el régimen de incendios en Chile centro-sur. Esta actividad económica territorial es dinámica y precisa análisis y planificación, particularmente tomando en cuenta las grandes extensiones de tierra destinadas a dicha actividad. Considerando la ocurrencia de extensos incendios forestales, resulta razonable en esta línea gestionar la continuidad espacial de los combustibles vegetales de la zona centro-sur de Chile, fomentando una diversificación en la matriz de uso del suelo.

Si bien la temperatura es crucial para el régimen de incendios, factores como el viento y la topografía pueden promover la propagación de incendios. Sin embargo, en términos de proyecciones, la temperatura destaca en las tendencias de aumento esperadas en las próximas décadas (Lindsey and Dahlman, 2020); por lo tanto, a través de esta variable sería esperable contar con cambios en el comportamiento del fuego. Con esta consideración, resultan atingentes los estudios destinados a comprender la interacción entre incendios y eventos extremos como las ODC.

Asimismo, y a corto plazo, es fundamental contar con buena capacidad de pronóstico de ODC en las escalas sinóptica e intraestacional, considerando su contribución a un potencial desarrollo de incendios complejos.

Ejemplos vivos del impacto de la temperatura extrema en Chile centro sur fueron los episodios de incendios en enero de 2017 (Laurenti et al., 2017) y de febrero de 2023, cuyos registros de temperatura y área quemada marcaron máximos históricos.

Capítulo 7

Conclusiones

La influencia de las olas de calor sobre el comportamiento del fuego se vuelve evidente a través del análisis de incremento en el área quemada sustentado durante estos eventos en Chile centro-sur, como exhibe el registro histórico.

En concreto, resalta el abultado porcentaje de área quemada correspondiente a megaincendios (eventos que superan 10 mil hectáreas) durante olas de calor en el período 2002-2022 (67 % respecto a toda la superficie afectada por megaincendios), tomando en cuenta que corresponden a la categoría de mayor afectación y de menor frecuencia

El régimen de incendios descrito a lo largo de Chile centro-sur exhibe zonas de mayor variabilidad que otras durante olas de calor, ya sea en términos de superficie o de número de incendios (Figura 5.1.1).

7.1. Régimen regional de incendios forestales durante Olas de Calor

Durante olas de calor se aprecia, como patrón común, que en cada una de las regiones los porcentajes de área quemada superan la media climatológica. Esto es particularmente destacable, tomando en cuenta la baja frecuencia de ODC: entre un 2.5 % y un 6 % del período (Figura 5.2.1 (b)).

En el extremo superior, las distribuciones regionales de área quemada (representadas arbitrariamente por el percentil 75 %, (Figura 5.4.1)), bordean

el 20 %, salvo en la región de Los Lagos, de 49 % de área quemada durante ODC. Esto no excluye que se observen mayores porcentajes de afectación durante ODC en zonas específicas, tal como exhiben los valores atípicos (outliers) en las regiones de Valparaíso, Metropolitana, Del Maule y de Los Ríos , dando cuenta de sectores afectados mayoritariamente durante olas de calor.

Respecto a las secciones inferiores de las distribuciones de área quemada (percentil 25 %), cabe señalar que hay zonas de baja actividad durante las ODC en cada región.

El patrón de número de incendios durante ODC exhibe un régimen similar al de la media climatológica en Chile centro-sur, salvo en La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, que corresponde a una zona con mayores números de incendios durante ODC.

7.1.1. Olas de calor durante un régimen de incendios intenso (FF_{P90})

La caracterización sectorial área quemada superior al percentil 90 (FF_{P90}) puntualiza zonas donde prácticamente la totalidad del área de este subconjunto fue afectada durante ODC: específicamente en las regiones Metropolitana, Maule, Araucanía, Los Ríos. Destaca la Región de Los Lagos, cuya distribución de área quemada se inclina hacia la derecha 5.4.3, es decir, manifiesta numerosas zonas de alto porcentaje superficial afectado durante ODC.

La Región de Valparaíso no presenta un patrón espacial particular de área quemada durante ODC.

Este comportamiento es acorde a lo concluido por Urrutia-Jalabert et al. (2018), cuya caracterización destaca –a nivel estacional e interanual– la correlación positiva entre las anomalías de temperatura (particularmente altas durante ODC) y las de área quemada en la zona sur de Chile.

7.1.2. Olas de calor según magnitud de los incendios

En términos de la magnitud de los incendios forestales, adquiere realce el alto porcentaje (67%) afectado durante olas de calor considerando megaincendios (i.e., áreas quemadas superiores a 10 mil hectáreas). Al analizar la ventana de los compuestos de olas de calor 10 días ante su inicio y 10 días tras su fin, se engloba el 100% del área afectada por megaincendios. De acuerdo a la baja frecuencia de megaincendios y el alto porcentaje de área que implican respecto a las demás clasificaciones (Cuadro 5.4.1) adquiere especial foco la asociación entre olas de calor y megaincendios: existe una mayor probabilidad de su ocurrencia durante ODC.

Al considerar, por otro lado, clasificaciones de incendios con menor área quemada se reduce progresivamente la correspondencia entre períodos de olas de calor y porcentajes de área quemada.

7.2. Régimen de incendios según características de las ODC

7.2.1. Número de olas de calor por temporada

En términos del área quemada por temporada y la frecuencia de las ODC, se describe en la zona centro-sur una correlación positiva, salvo en las regiones de Valparaíso y de O'Higgins. Cabe considerar que en la zona central es más frecuente un verano sin olas de calor, mientras que en la zona sur lo es un verano con una, constituyendo el régimen de incendios asociado a ellas, descrito en los apartados previos (Figura 5.5.2).

Cabe notar que veranos sin olas de calor en la zona central no implican la ausencia de eventos extremos de temperatura que no sean lo suficientemente persistentes para ser clasificados como tales, pero que sí pueden ser muy intensos. Este tipo de eventos muy cálidos y no persistentes no han sido abordados por el presente estudio.

En cuanto al número de incendios y al número de olas de calor, se aprecia

correspondencia esencialmente en la zona sur, excluyendo de esta asociación a las demás regiones del dominio (Figura A3.2).

7.2.2. Duración Olas de Calor

En función del número total de días por temporada bajo ODC (Figuras 5.6.2, A4.3 y A4.4) se observa un aumento en la probabilidad de registrar superficies afectadas sobre el percentil 90 a medida que el número de días en ODC es mayor, teniendo presente que la frecuencia de temporadas se reduce a medida que el número de días de ODC incrementa.

7.3. Extensión regional de las olas de calor

La comparación de área quemada con la extensión de las olas de calor no exhibe un claro patrón (Figura 5.8.1, Apéndice A6.1a y Apéndice A6.1b, sin embargo, al considerar la cubierta parcial o total de las regiones bajo ODC se registraron superficies afectadas considerables.

7.4. Modos de variabilidad

La principal porción de la variabilidad espacio-temporal de las olas de calor de la zona centro-sur puede corresponder a la ocurrencia de olas de calor que afectan entre las regiones de Ñuble y Los Lagos (modo 1: ODC en la zona sur). Seguidamente, cobran relevancia las olas de calor que ocurren en la zona central, en el tramo Valparaíso - Ñuble (modo 2: ODC en la zona central). La contribución al régimen de incendios considerando ambas definiciones alcanza hasta el 60 % del área quemada regional. No obstante, independiente de la definición empleada, el área afectada en las regiones de Maule, Biobío y Ñuble es considerable.

A través de estas definiciones generalizadas se identifica la condición sinóptica asociada a las ODC: el paso del anticiclón migratorio por Chile centro sur, que induce el desarrollo al norte de una baja presión costera que promueve condiciones secas, cálidas, junto con la intensificación de viento del este en sectores cordilleranos (McWethy et al., 2021).

Estos resultados destacan las posibilidades de pronóstico de ODC estudiadas recientemente por Jacques-Coper et al. (2021). En particular, los autores destacan

la modulación de ODC por parte de las fases activas 2,3 y 7 de la oscilación de Madden Julian, a través de una teleconexión entre sectores tropicales y Chile centro sur, permitiendo proyecciones a escala intraestacional.

Conclusiones generales Condiciones extremas de temperatura no implican un régimen de incendios intensificado, más bien incrementan las probabilidades de tal escenario. Inherentemente la temperatura es una condición requerida por los combustibles vegetales para el desarrollo del fuego, mas este factor interviene en conjunto con variables como el viento, la disponibilidad del combustible y la influencia humana; todos los factores promueven un escenario de incendios forestales complejo.

Las olas de calor representan una ventana de tiempo favorable para el desarrollo del fuego, durante la cual corresponde un grado de atención mayor por parte de los organismos de combate del fuego. Especialmente, los megaincendios del período dan cuenta de esto, En consideración a las tendencias de aumento en la duración, frecuencia y magnitud de las ODC en Chile centro sur durante el periodo 1961-2016 (Piticar, 2018) concierne robustecer el monitoreo de este fenómeno y de las acciones regionales llevadas a cabo para prevenir escenarios de catástrofe, en términos de gobernanza a través de intervenciones en la disposición del combustible y en torno a la prevención, así como también la provisión de recursos para eventuales faenas de supresión de incendios.

Bibliografía

- Archibald, S., Roy, D. P., Brian, W., and Scholes, R. J. (2009). What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biol.*, 15(3):613–630.
- Barrett, B. S., Campos, D. A., Veloso, J. V., and Rondanelli, R. (2016). Extreme temperature and precipitation events in March 2015 in central and northern Chile. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121(9):4563–4580.
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M., and García-Herrera, R. (2011). The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332(6026):220–224.
- Bell, M. L., O’Neill, M. S., Ranjit, N., Borja-Aburto, V. H., Cifuentes, L. A., and Gouveia, N. C. (2008). Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in São Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. *Int. J. Epidemiol.*, 37(4):796–804.
- Bjerknes, J. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly weather review*, 97(3):163–172.
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., and Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophys. Res. Lett.*, 43(1):413–421.
- Bolton, D. (1980). The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Mon. Weather Rev.*, 108(7):1046–1053.
- Bowman, D. M. J. S., Moreira-Muñoz, A., Kolden, C. A., Chávez, R. O., Muñoz, A. A., Salinas, F., González-Reyes, Á., Rocco, R., de la Barrera, F., Williamson, G. J., Borchers, N., Cifuentes, L. A., Abatzoglou, J. T., and Johnston, F. H. (2019). Human-environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires. *Ambio*, 48(4):350–362.
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., da Fonseca, G. A. B., Gerlach, J., Hoffmann, M., Lamoreux, J. F., Mittermeier, C. G., Pilgrim, J. D., and Rodrigues, A. S. L. (2006). Global Biodiversity Conservation Priorities. *Science*, 313(5783):58–61.
- Cardil, A., Eastaugh, C. S., and Molina, D. (2015). Extreme temperature

- conditions and wildland fires in Spain. *Theoretical and applied climatology*, 122:219–228.
- Cardil, A., Salis, M., Spano, D., Delogu, G., and Molina Terren, D. (2014). Large wildland fires and extreme temperatures in sardinia (Italy). *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 7(3):162.
- Ciciretti, R., Barraza, F., De la Barrera, F., Urquieta, L., and Cortes, S. (2021). Relationship between Wildfire Smoke and Children’s Respiratory Health in the Metropolitan Cities of Central-Chile. *Atmosphere*, 13(1):58.
- CONAF (2019). Sistema de información territorial. *Superficies Catastros Usos de Suelos y Recursos Vegetacionales*.
- CONAF (2022a). Base de datos de incendios forestales.
- CONAF (2022b). Estadísticas de incendios forestales en Chile.
- Demortier, A., Bozkurt, D., and Jacques-Coper, M. (2021). Identifying key driving mechanisms of heat waves in central Chile. *Clim. Dyn.*, 57(9):2415–2432.
- DGA (2020). Sistema hidrométrico 1991-2020.
- Directorate-General for Health (2022). Sistema de monitoreo Ícaro. <https://transparencia.sns.gov.pt/explore/dataset/evolucao-diaria-do-indice-icaro/table/?flg=pt&refine.periodo=2022&sort=periodo>. [En línea; accedido el 28 de septiembre de 2022].
- DMC (2020a). Informe climatológico anual 1991-2020.
- DMC (2020b). Informe técnico - olas de calor en Chile: Una nueva metodología para el estudio y monitoreo de los eventos de altas temperaturas.
- DMC (2022). Informe climatológico diario.
- Federal Statistical Office of Germany (2022). Mortality figures in June 2022 by 8% above the median of previous years. https://www.destatis.de/EN/Press/2022/07/PE22_295_126.html. [En línea; accedido el 28 de septiembre de 2022].
- Fogt, R. L. and Marshall, G. J. (2020). The southern annular mode: variability, trends, and climate impacts across the southern hemisphere. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(4):e652.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(12):6307–6327.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., and Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.*, 40(1):421–439.

- Garreaud, René D., Rutllant, José A., and Fuenzalida, H. (2002). Coastal Lows along the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution. *Mon. Weather Rev.*, 130(1):75–88.
- Gong, D. and Wang, S. (1999). Definition of antarctic oscillation index. *Geophysical research letters*, 26(4):459–462.
- González, M. E., Lara, A., Urrutia, R., and Bosnich, J. (2011). Climatic change and its potential impact on forest fire occurrence in south-central Chile (33°–42°s). *Bosque*, 32(3):215–219.
- González, M., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M., Pauchard, A., Hoyos, J., Cordero, L., et al. (2020). Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. *Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)*, 2:84.
- Gómez-González, S., González, M. E., Paula, S., Díaz-Hormazábal, I., Lara, A., and Delgado-Baquerizo, M. (2019). Temperature and agriculture are largely associated with fire activity in Central Chile across different temporal periods. *For. Ecol. Manage.*, 433:535–543.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorolog. Soc.*, 146(730):1999–2049.
- IDE Chile (2019). Infraestructura de datos geoespaciales. <https://www.ide.cl/index.php/imagenes-y-mapas-base>. [En línea; accedido el 13 de agosto de 2023].
- Instituto de Salud Carlos III (2022). Sistema de monitorización de la mortalidad diaria. https://momo.isciii.es/panel_momo/. [En línea; accedido el 28 de septiembre de 2022].
- Instituto Nacional de Estadísticas (2017). Censo 2017. [En línea; accedido el 28 de septiembre de 2022].
- Instituto nacional de estadísticas y estudios económicos (2022). Évolution du nombre de décès depuis le 1 janvier 2022. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6206305?sommaire=4487854>. [En línea; accedido el 28 de septiembre de 2022].
- Jacques-Coper, M., Brönnimann, S., Martius, O., Vera, C., and Cerne, B. (2016). Summer heat waves in southeastern Patagonia: an analysis of the intraseasonal timescale. *Int. J. Climatol.*, 36(3):1359–1374.
- Jacques-Coper, M., Veloso-Aguila, D., Segura, C., and Valencia, A. (2021).

- Intraseasonal teleconnections leading to heat waves in central Chile. *Int. J. Climatol.*, 41(9):4712–4731.
- Laurenti, S., del Interior, S., et al. (2017). Chile y la "tormenta de fuego".
- Lindsey, R. and Dahlman, L. (2020). Climate change: Global temperature. *Climate.gov*, 16.
- Littell, J. S., McKenzie, D., Peterson, D. L., and Westerling, A. L. (2009). Climate and wildfire area burned in western U.S. ecoprovinces, 1916–2003. *Ecol. Appl.*, 19(4):1003–1021.
- Little Cárdenas, C. et al. (2022). El agua y los ecosistemas boscosos en Chile: información para el desarrollo del sector forestal.
- Lorenz, E. N. (1956). *Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction*, volume 1. Massachusetts Institute of Technology, Department of Meteorology Cambridge.
- McWethy, D. B., Garreaud, R. D., Holz, A., and Pederson, G. T. (2021). Broad-Scale Surface and Atmospheric Conditions during Large Fires in South-Central Chile. *Fire*, 4(2):28.
- McWethy, D. B., Pauchard, A., García, R. A., Holz, A., González, M. E., Veblen, T. T., Stahl, J., and Currey, B. (2018). Landscape drivers of recent fire activity (2001–2017) in south-central Chile. *PLoS One*, 13(8):e0201195.
- Mills, G. A. (2005). A re-examination of the synoptic and mesoscale meteorology of ash wednesday 1983. *Australian Meteorological Magazine*, 54(1):35–55.
- Miranda, A., Lara, A., Altamirano, A., Di Bella, C., González, M. E., and Julio Camarero, J. (2020). Forest browning trends in response to drought in a highly threatened mediterranean landscape of South America. *Ecol. Indic.*, 115:106401.
- Mo, K. C. and Paegle, J. N. (2001). The Pacific–South American modes and their downstream effects. *Int. J. Climatol.*, 21(10):1211–1229.
- Montecinos, A., Muñoz, R. C., Oviedo, S., Martínez, A., and Villagrán, V. (2017). Climatological Characterization of Puelche Winds down the Western Slope of the Extratropical Andes Mountains Using the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(3):677–696.
- Oudin Åström, D., Bertil, F., and Joacim, R. (2011). Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies. *Maturitas*, 69(2):99–105.
- Parente, J., Pereira, M. G., Amraoui, M., and Fischer, E. M. (2018). Heat waves in Portugal: Current regime, changes in future climate and impacts on extreme wildfires. *Sci. Total Environ.*, 631–632:534–549.

- Pelto, M. (2022). Cortaderal Glacier, Chile 2022 Heat Wave Reduces Snow Cover, Retreat Continues. *From a Glacier's Perspective*.
- Pelto, M. S., Dryak, M., Pelto, J., Matthews, T., and Perry, L. B. (2022). Contribution of Glacier Runoff during Heat Waves in the Nooksack River Basin USA. *Water*, 14(7):1145.
- Piticar, A. (2018). Changes in heat waves in Chile. *Global Planet. Change*, 169:234–246.
- Piticar, A. (2019). Changes in agro-climatic indices related to temperature in Central Chile. *Int. J. Biometeorol.*, 63(4):499–510.
- Risbey, J. S., O’Kane, T. J., Monselesan, D. P., Franzke, C. L. E., and Horenko, I. (2018). On the Dynamics of Austral Heat Waves. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123(1):38–57.
- Robertson, A. W. and Mechoso, C. R. (2003). Circulation Regimes and Low-Frequency Oscillations in the South Pacific Sector. *Mon. Weather Rev.*, 131(8):1566–1576.
- Rondanelli, R., Hatchett, B., Rutllant, J., Bozkurt, D., and Garreaud, R. (2019). Strongest MJO on Record Triggers Extreme Atacama Rainfall and Warmth in Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, 46(6):3482–3491.
- Rusticucci, M., Zazulie, N., and Raga, G. B. (2014). Regional winter climate of the southern central Andes: Assessing the performance of ERA-Interim for climate studies. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119(14):8568–8582.
- Salis, M., Ager, A. A., Finney, M. A., Arca, B., and Spano, D. (2014). Analyzing spatiotemporal changes in wildfire regime and exposure across a mediterranean fire-prone area. *Natural Hazards*, 71:1389–1418.
- Schumacher, D. L., Keune, J., van Heerwaarden, C. C., Vilà-Guerau de Arellano, J., Teuling, A. J., and Miralles, D. G. (2019). Amplification of mega-heatwaves through heat torrents fuelled by upwind drought. *Nat. Geosci.*, 12:712–717.
- Trigo, R. M., García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, I. F., and Valente, M. A. (2005). How exceptional was the early august 2003 heatwave in france? *Geophysical research letters*, 32(10).
- Tudela, V., Sarricolea, P., Serrano-Notivoli, R., and Meseguer-Ruiz, O. (2022). A pilot study for climate risk assessment in agriculture: a climate-based index for cherry trees. *Nat. Hazards*, pages 1–23.
- Urrutia-Jalabert, R., González, M. E., González-Reyes, Á., Lara, A., and Garreaud, R. (2018). Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(4):e02171.
- Van Wagner, C. et al. (1987). *Development and structure of the Canadian forest fire weather index system*, volume 35.

-
- World Meteorological Organization (2009). Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. *World Meteorological Organization*.
- Zhang, L., Zhang, Z., Ye, T., Zhou, M., Wang, C., Yin, P., and Hou, B. (2018). Mortality effects of heat waves vary by age and area: a multi-area study in China. *Environ. Health*, 17(1):1–12.

Apéndice A

A1. Cálculo de la humedad relativa

El cálculo de la humedad relativa (HR) a partir de la temperatura (T) , temperatura punto rocío (T_d) y presión atmosférica a 2 metros de la superficie (p) está dado por

$$HR = 100 \frac{w_s(T_d, p)}{w_s(T, p)} \quad (\text{A1.1})$$

Donde w_s es la razón de mezcla de saturación:

$$w_s = 0,622 \frac{e_s}{p - e_s} \quad (\text{A1.2})$$

Considerando la presión parcial e_s (Bolton, 1980):

$$e_s = 6,112 \exp \left(\frac{17,67 T}{T + 243,5} \right) \quad (\text{A1.3})$$

A2. Tasas de incendios

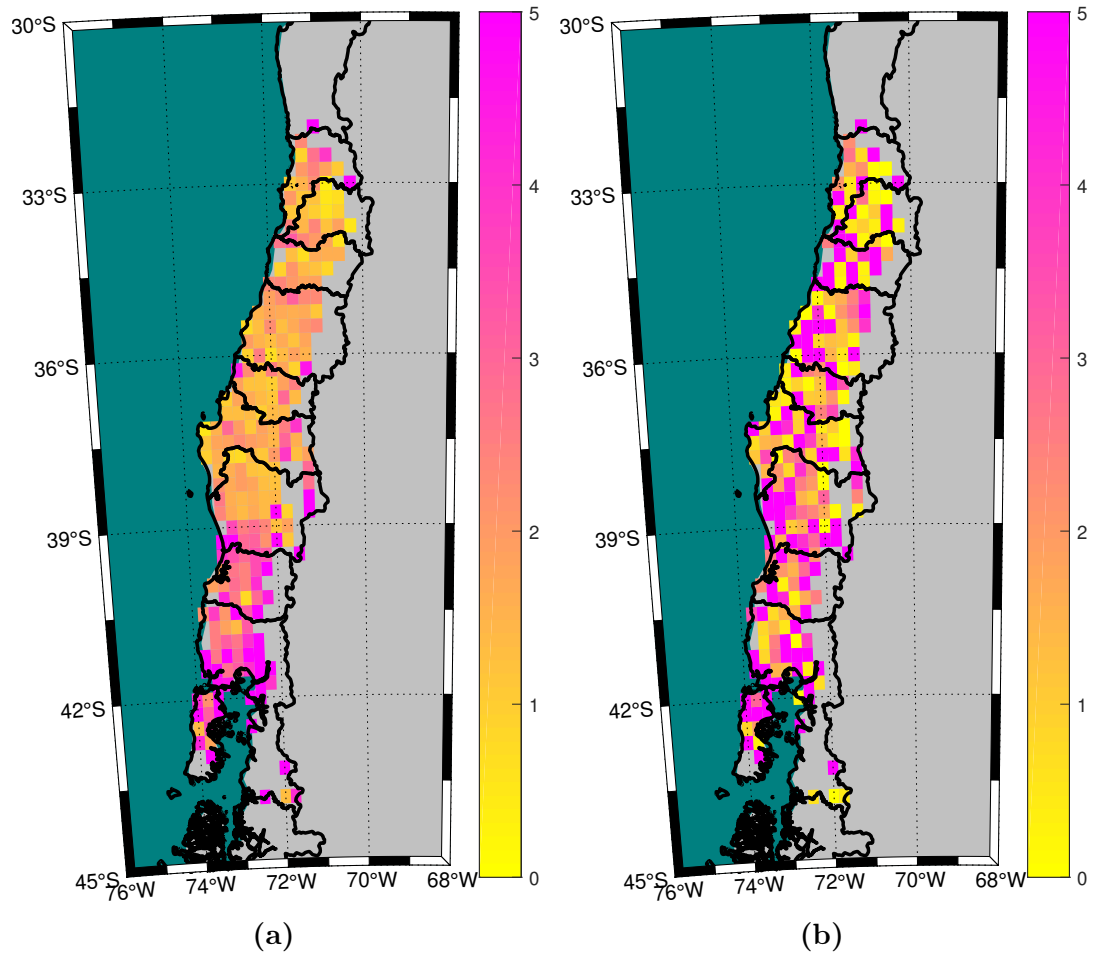


Figura A2.1: (a) Tasa de área quemada diaria durante olas de calor respecto a la tasa de área quemada diaria del período 2002-2022 y (b) Tasa de ocurrencia diaria durante olas de calor respecto a tasa diaria de ocurrencia del período 2002-2022.

A3. HWN

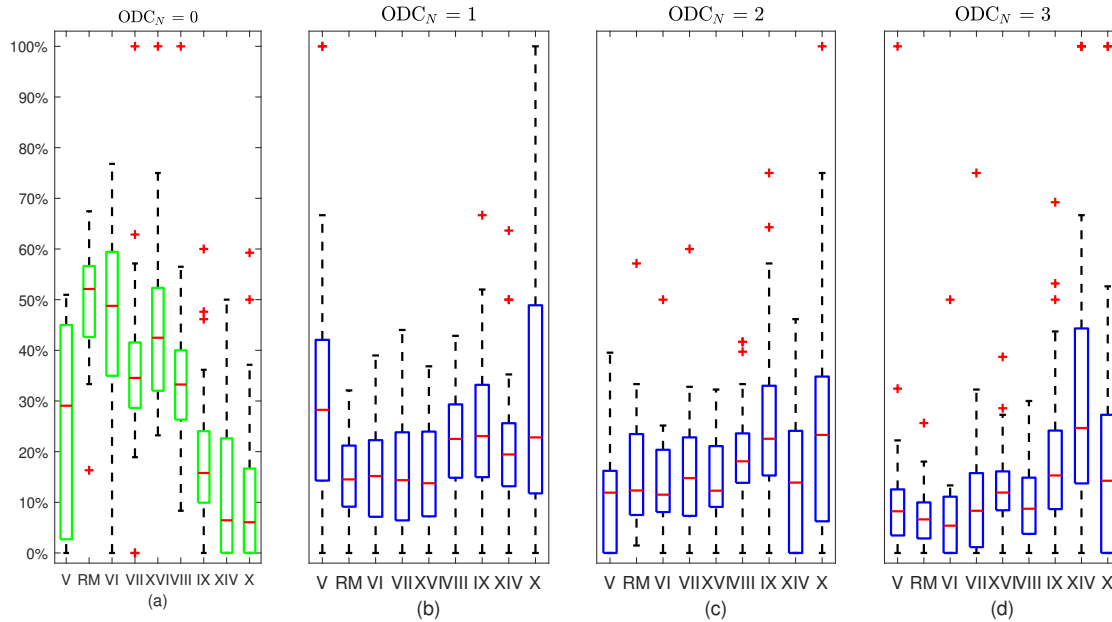


Figura A3.1: Diagrama de caja de ocurrencia porcentual distribuida espacialmente en cada región de la zona centro-sur durante temporadas (a): que no registraron olas de calor; (b): que registraron una ola de calor; (c): de 2 olas de calor; y (d): con 3 olas de calor. Líneas horizontales rojas indican mediana, mientras que los percentiles 25 y 75 se representan por recuadros azules (verdes en el caso de (a): $ODC_N=0$). Líneas negras segmentadas señalan distribución inferior y superior, en tanto outliers se representan por cruces rojas.

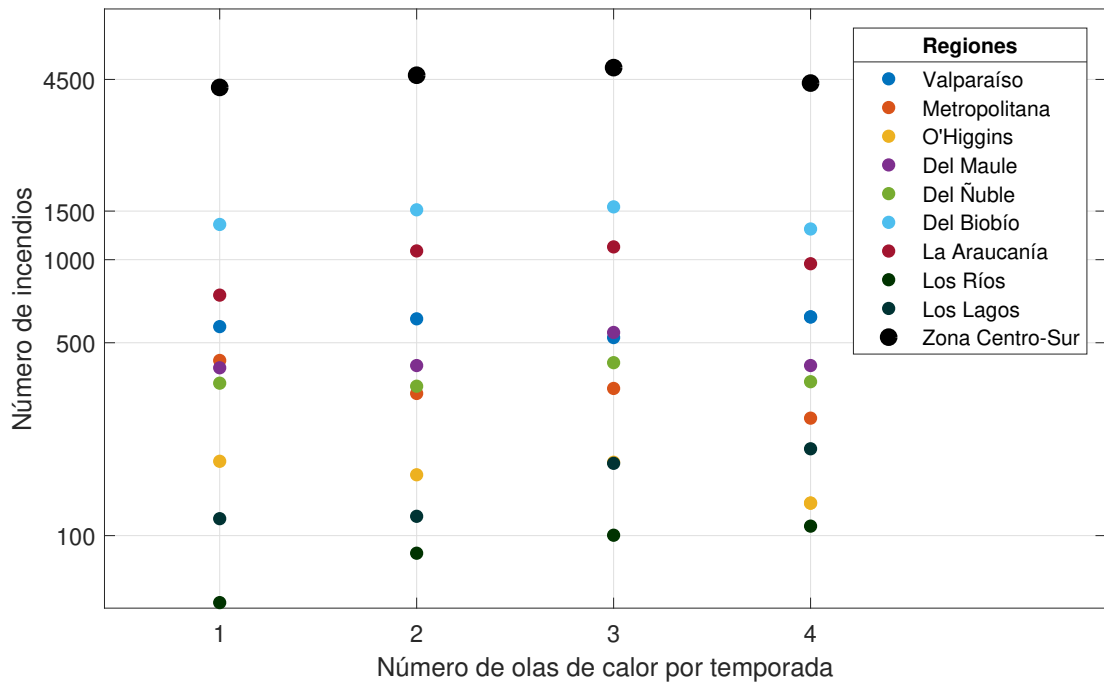


Figura A3.2: Scatterplot en escala logarítmica de la ocurrencia regional de acuerdo al número de olas de calor por temporada, normalizado por la frecuencia de temporadas correspondiente (puntos coloreados representan cada valor regional, mientras que puntos negros sólidos representan la integración de la zona centro-sur). Se ajustaron regresiones lineales simples por región (líneas segmentadas de colores; línea negra integra la zona centrosur).

A4. Duración de las Olas de Calor

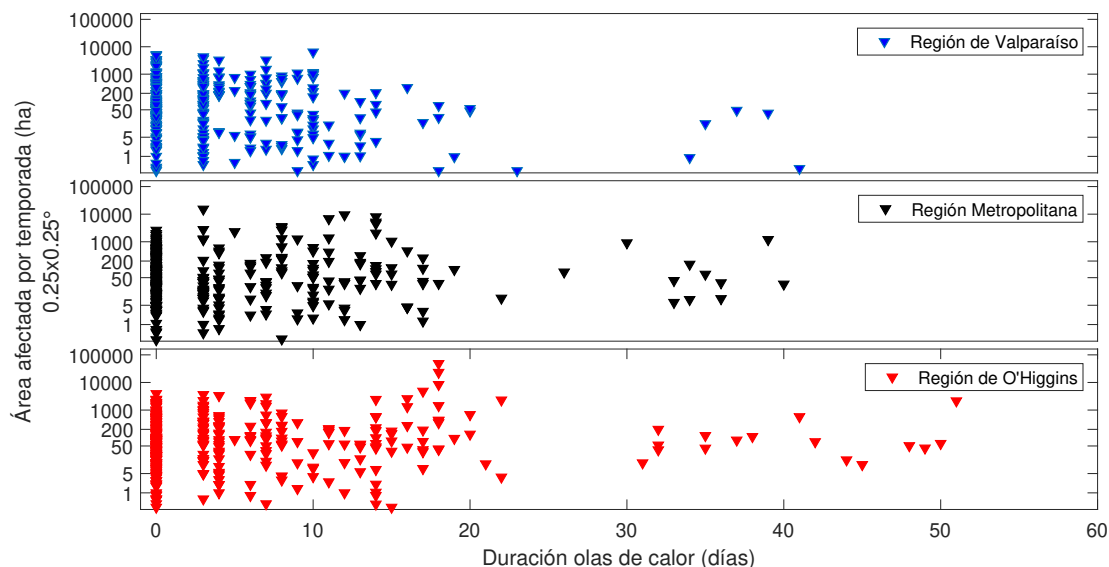


Figura A4.1: Área afectada (en escala logarítmica) por temporada en función de la número total de días bajo ODC de acuerdo al campo grillado de las regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins ($0.25 \times 0.25^\circ$)

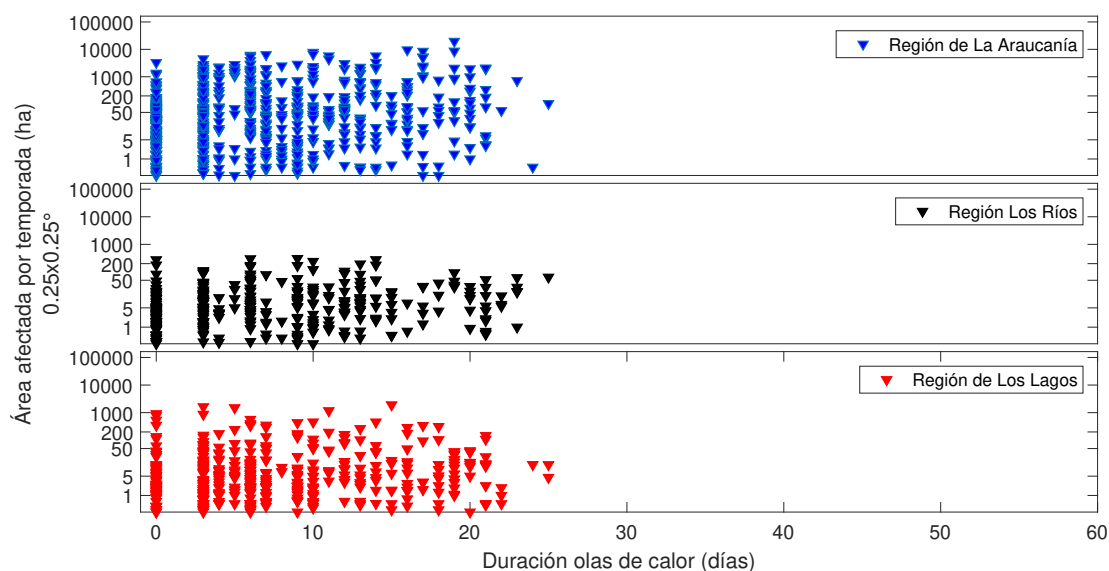


Figura A4.2: Área afectada (en escala logarítmica) por temporada en función de la número total de días bajo ODC de acuerdo al campo grillado de las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos ($0.25 \times 0.25^\circ$)

A4.1. Probabilidad de registrar regímenes intensos de incendios según ODC_D

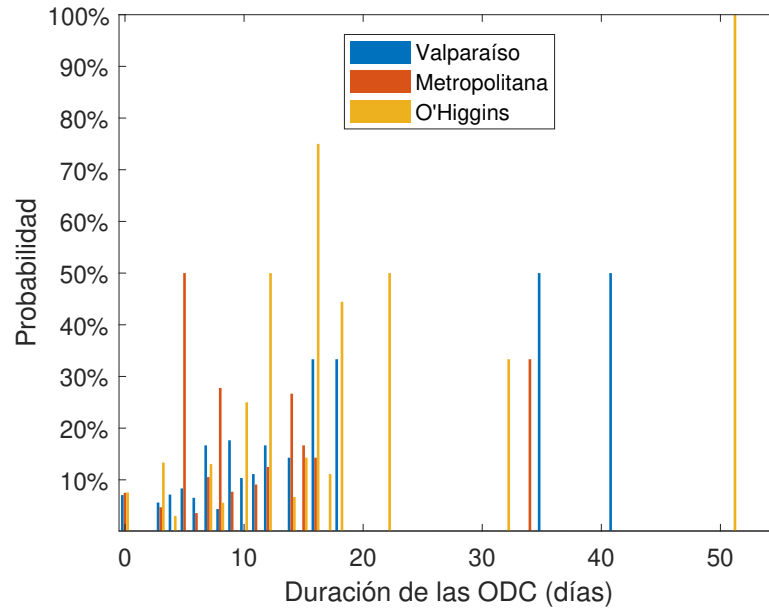


Figura A4.3: Probabilidad de registro de superficies superiores al percentil 90 de área quemada según duración en días de Olas de calor ocurridas en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins.

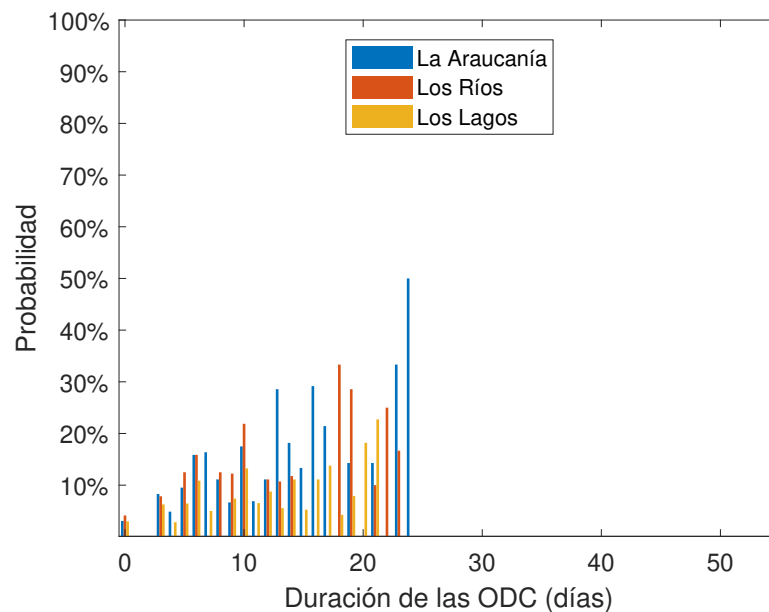


Figura A4.4: Probabilidad de registro de superficies superiores al percentil 90 de área quemada según duración en días de Olas de calor ocurridas en las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.

A5. Intraestacionalidad

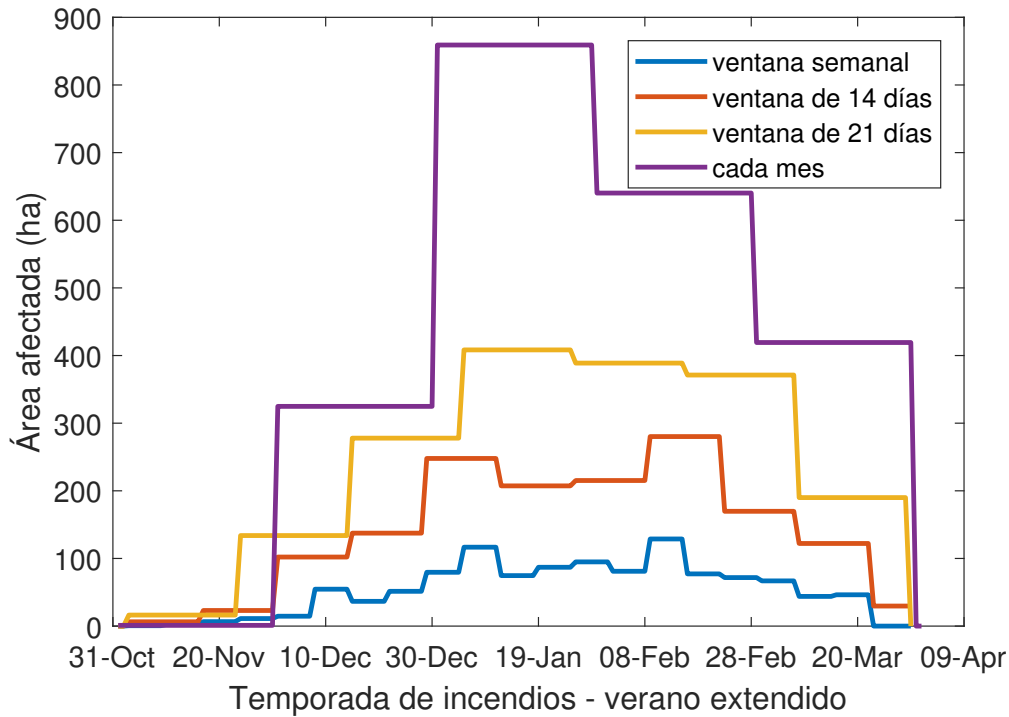


Figura A5.1: Superficie regional afectada - en escala logarítmica- de acuerdo al número de olas de calor por temporada, normalizado por la frecuencia de temporadas correspondiente (puntos coloreados representan cada valor regional, mientras que puntos negros sólidos representan la integración de la zona centro-sur). Se ajustaron regresiones lineales simples por región (líneas segmentadas de colores; línea negra integra la zona centrosur).

A6. Extensión de las ODC

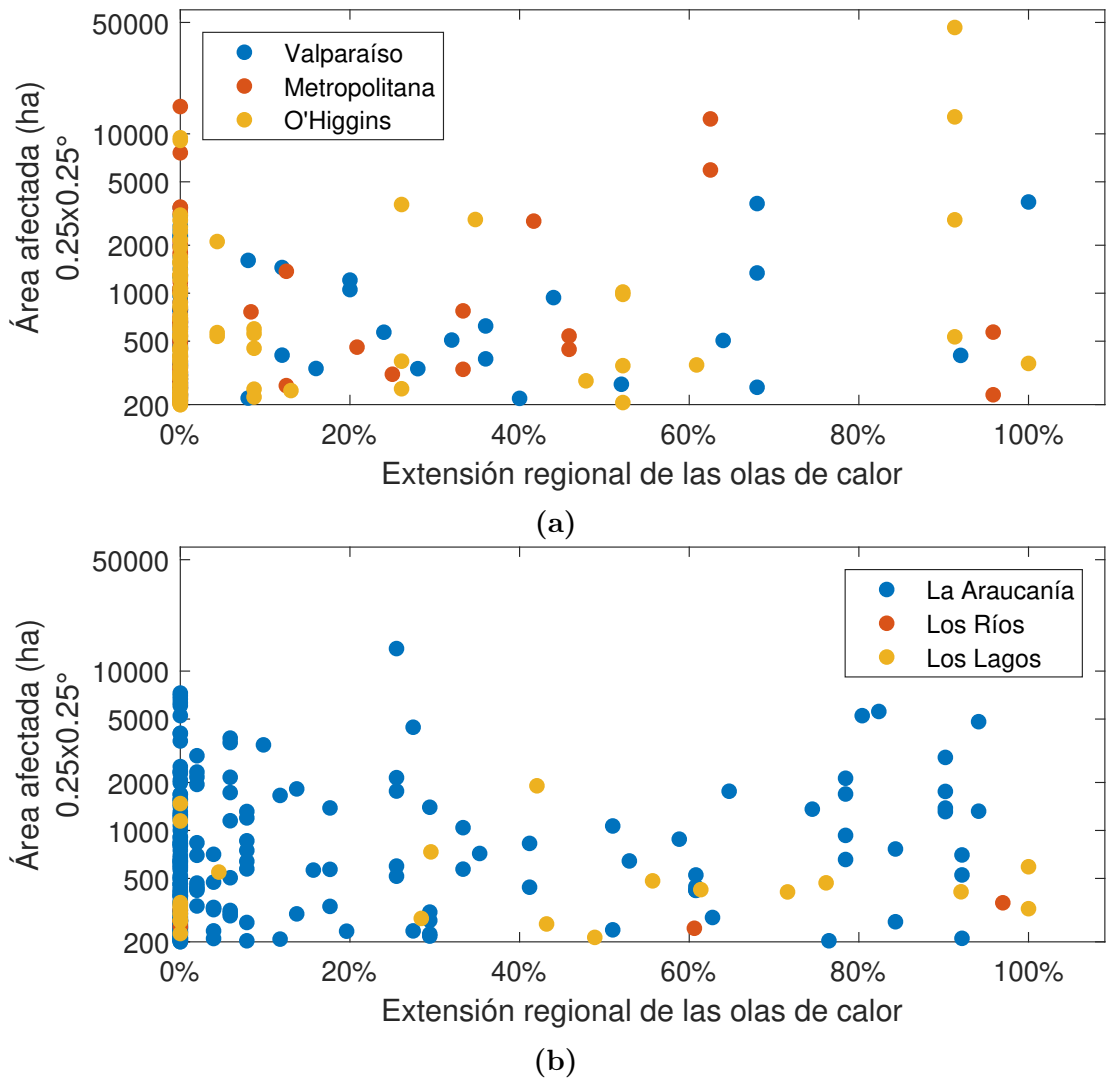


Figura A6.1: Porcentaje superficial cubierto por Olas de calor en relación a al área afectada durante ellas en (a) las regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins, y en (b) las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.

A7. ACP

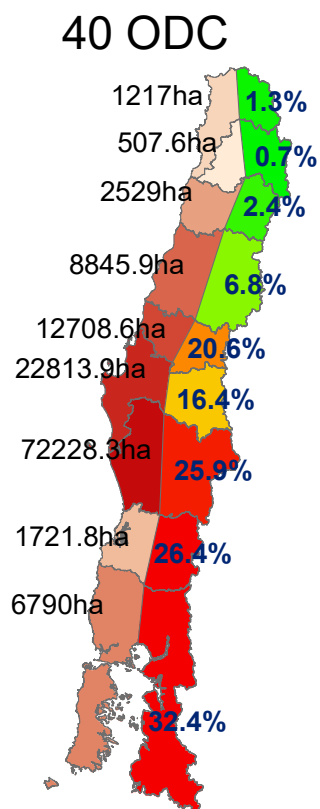


Figura A7.1: La porción occidental de cada región representa la superficie afectada durante olas de calor definidas entre las regiones de Ñuble y Los Lagos (según el modo 1). La porción oriental de cada región representa el porcentaje de área quemada correspondiente al total de cada región durante los veranos extendidos de 2002 a 2022, exceptuando el verano 2016-2017.

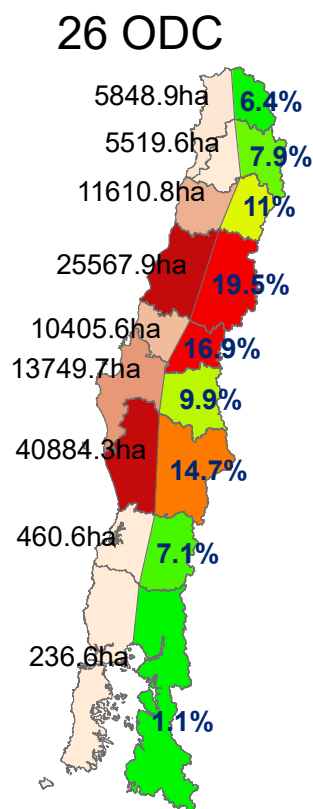
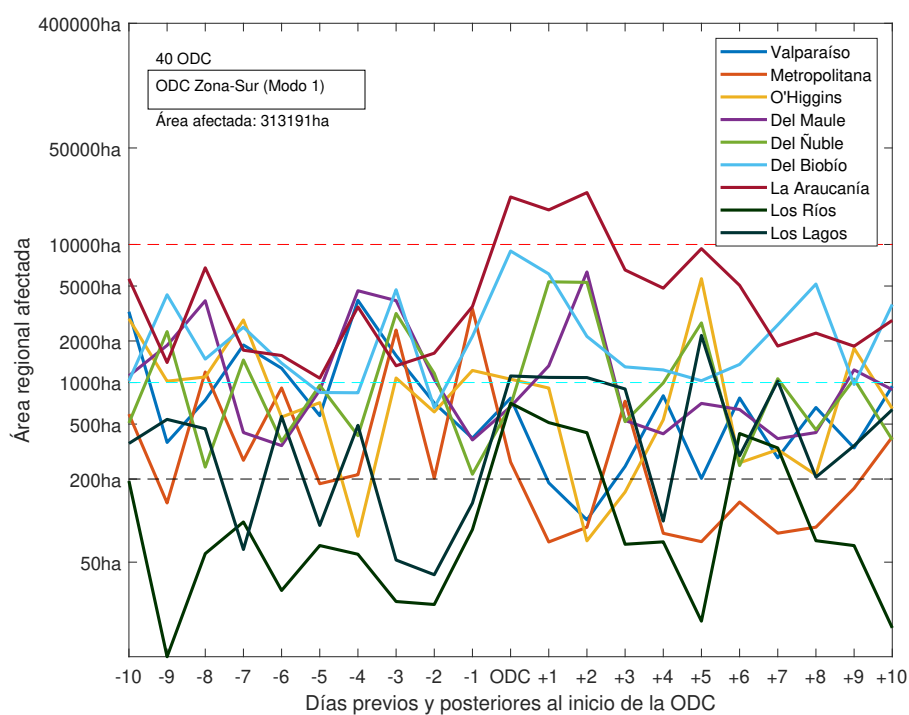
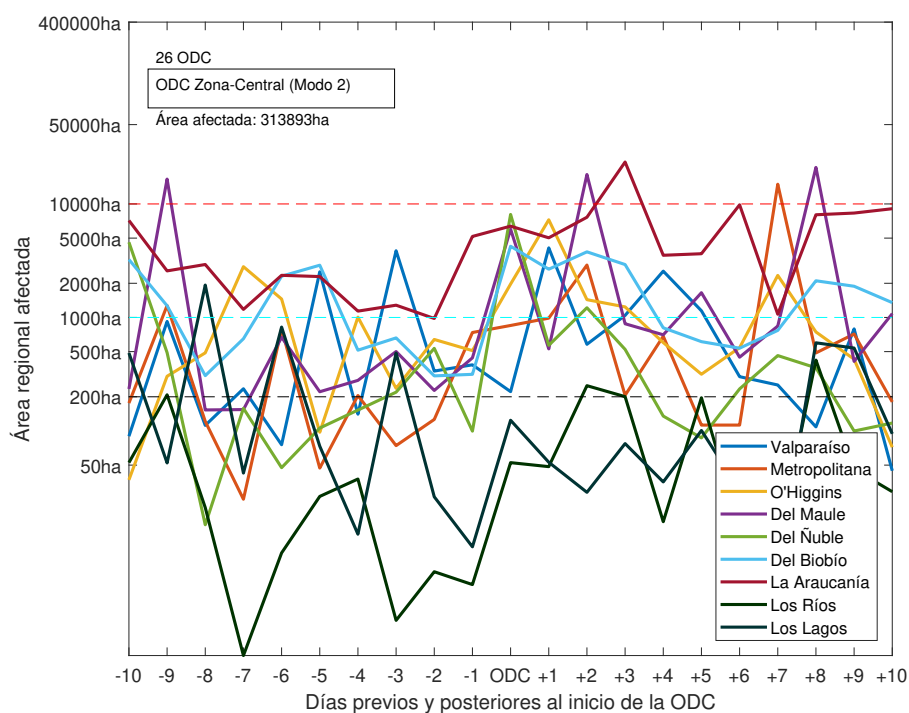


Figura A7.2: La porción occidental de cada región representa la superficie afectada durante olas de calor definidas entre las regiones de Valparaíso y Maule. La porción oriental de cada región representa el porcentaje de área afectada correspondiente al total de cada región durante los veranos extendidos de 2002 a 2022, exceptuando el verano 2016-2017.

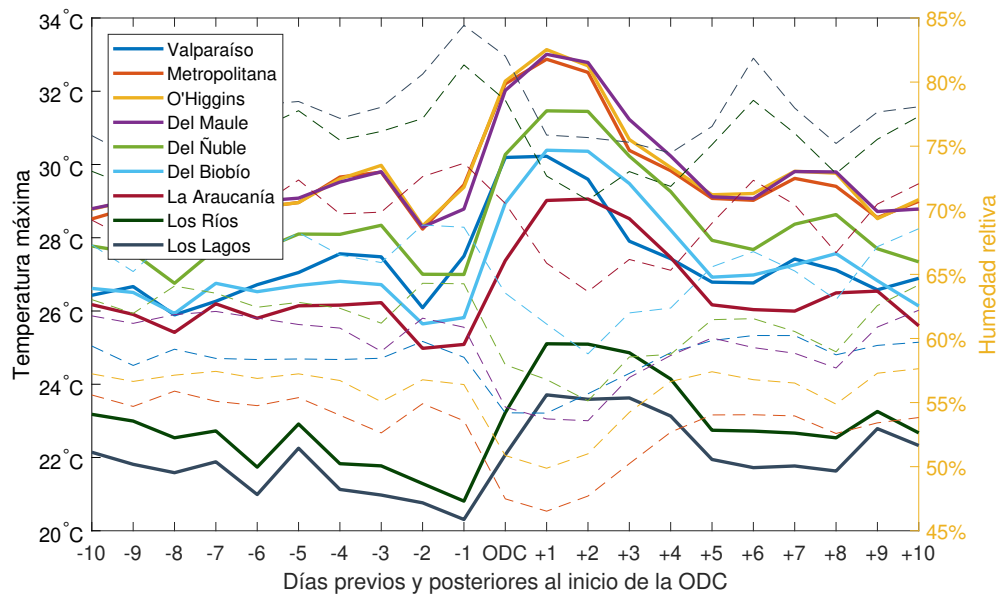


(a)

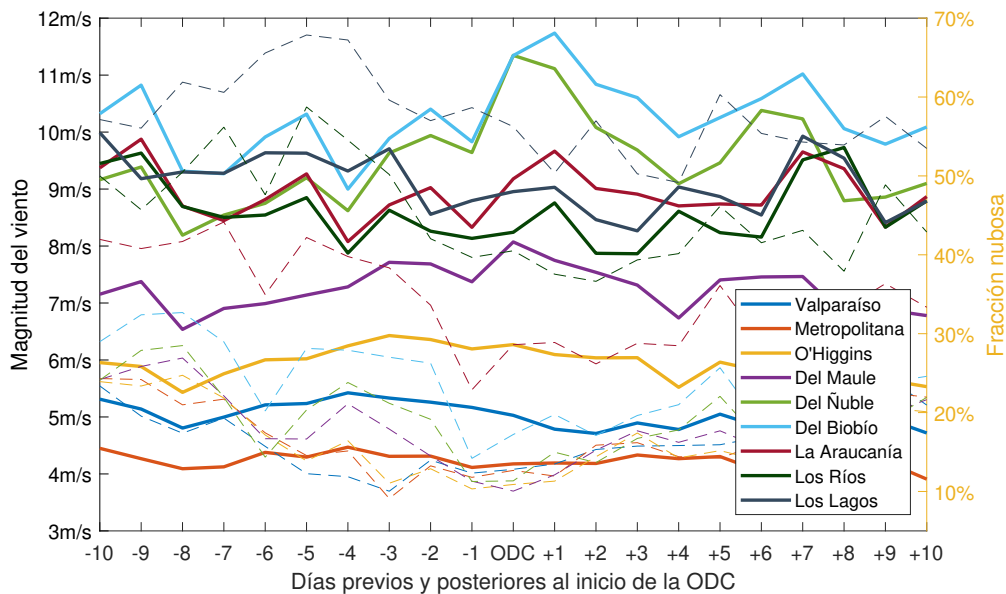


(b)

Figura A7.3: Compuestos regionales de área quemada 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas (a) en la zona sur (regiones de Ñuble a Los Lagos), y (b) en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule) sin considerar la temporada 2016-2017.



(a)



(b)

Figura A7.4: (a) Compuestos regionales de temperatura (líneas sólidas) y de humedad relativa (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule), y (b) Compuestos regionales de la magnitud del viento (líneas sólidas) y de fracción nubosa (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona central (regiones de Ñuble a Los Lagos).

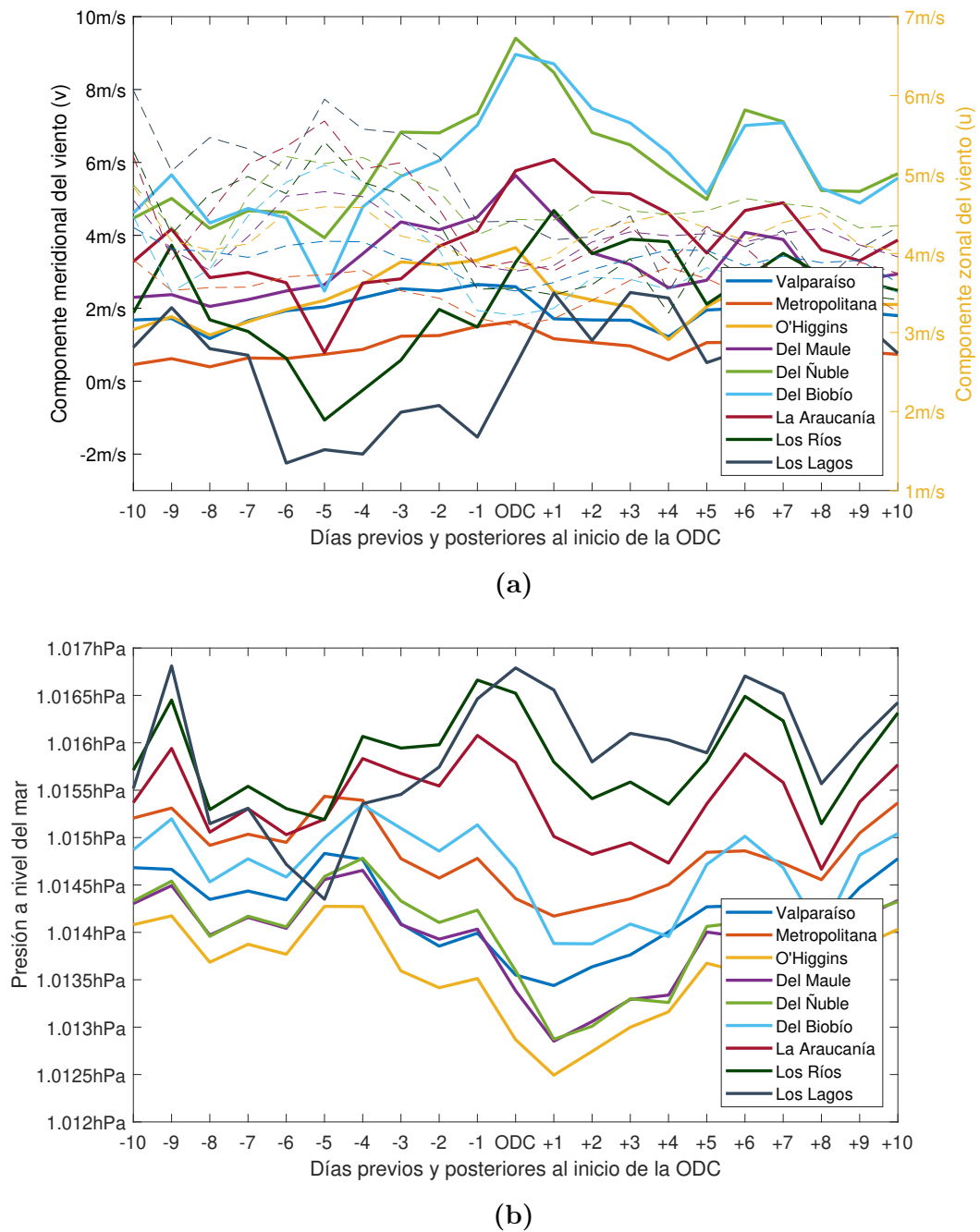


Figura A7.5: (a) Compuestos regionales de la componente meridional del viento (líneas sólidas) y de la componente zonal (líneas segmentadas) 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule), y (b) Compuestos regionales de la presión a nivel del mar 10 días previos y 10 días posteriores al inicio de las olas de calor definidas en la zona central (regiones de Valparaíso a Maule).

A8. Glosario

- Temporada de incendios: Período comprendido entre el 1 de Julio y el 30 de Junio del año posterior, en el cual se registra y combate el régimen de incendios.
- Combustible / Combustible vegetal: Material vegetal fino, medio o grueso susceptible a arder.
- Megaincendios: Incendios cuya superficie afectada fue de más de 10 mil hectáreas.
- Ocurrencia: registro de un evento o más de incendios forestales.