



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Ambientales
Programa de Magister en Ciencias Regionales

**Estimación del peligro de incendios forestales en la
Zona Centro-Sur de Chile (32°-38°S) para el siglo XXI
ante el escenario RCP 8.5**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Regionales

ISABELLA VALENTINA CIOCCA TOBAR
CONCEPCIÓN-CHILE
2021

Profesor Guía: Alfonso Fernández Rivera
Dpto. de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Universidad de Concepción

RESUMEN

La Zona Centro-Sur de Chile (ZCSCCh) ha sido históricamente afectada por incendios forestales, lo que ha traído consigo daños tanto a los ecosistemas como a la población. Asimismo, se ha reconocido la existencia de una relación entre la actividad de los incendios forestales (ocurrencia y severidad) en esta zona con tres factores principales: el clima, la cobertura vegetal y la actividad humana. En Chile, el clima y la cobertura vegetal se comportan como factores condicionantes, mientras que la actividad humana actúa como factor gatillante.

En las últimas décadas ha aumentado la ocurrencia y severidad del fuego en el mundo, especialmente en zonas de clima mediterráneo como es la ZCSCCh, asociado al cambio climático global en conjunto con las políticas históricas de manejo del fuego, tendencia que continuaría hacia mediados y finales del siglo XXI. Desde el año 2010, la ZCSCCh ha entrado en un período de sequía sin precedentes en mil años, aumentando la ocurrencia de megaincendios (>200 hectáreas) como consecuencia de veranos más cálidos y secos, en conjunto con paisajes compuestos por grandes parches homogéneos de plantaciones exóticas pirófitas asociadas a la industria forestal nacional.

En este trabajo se estima el peligro de incendios forestales en base a la susceptibilidad ambiental estacional de la ZCSCCh (32-38°S) para el siglo XXI, ante el escenario de cambio climático global RCP8.5, a una resolución de 9 km. Para ello se implementó el modelo Potential Fire Index (PFI) que ha demostrado buenos resultados a escala global, y es actualmente utilizado como sistema de monitoreo en tiempo real en Brasil. Los datos climáticos utilizados corresponden a proyecciones climáticas regionales (RCM) simuladas con downscaling dinámico en el modelo Weather Research and Forecasting (WRF).

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que para mediados (2046-2050) y finales (2091-2100) del siglo XXI aumentará el peligro de incendios forestales en el área de estudio. Este aumento será más importante al occidente (Cordillera de la Costa y Valle Central), zona que alberga las principales ciudades del país, así como gran parte de la industria forestal y agrícola. En verano (DEF), otoño (MAM) y primavera (SON) se reconoce una homogenización de niveles medios de peligro, mientras que en invierno (JJA) se espera que aumente el peligro al norte de los 36°S. Dicha homogenización ocurre en zonas caracterizadas por la presencia de plantaciones homogéneas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus* sp. (especies pirófitas), lo que podría aumentar la ocurrencia de megaincendios en el siglo XXI para la ZCSCCh.



A mi familia y la Tierra, que me inspiran día a día.

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor guía, Dr. Alfonso Fernández por su paciencia, enseñanzas y oportunidades. Gracias por mostrarme e invitarme a profundizar en el mundo de la investigación, especialmente en los glaciares de montaña. Gracias por ayudarme a abrir la mente y entender las bondades de la Geología y la Geografía cuando trabajan juntas.

A la profesora Dra. Edilia Jaque, por permitirme ingresar al Magíster en Ciencias Regionales y al fascinante mundo de los incendios forestales, así como a la docencia universitaria, algo que me llenó de felicidad y profundizó mi amor por la enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

A mi familia, Tatiana, Leonardo, Caterina, Fabiana y Anibal, por el apoyo incondicional, por mostrarse siempre interesadas/os cuando trataba de explicar lo que iba aprendiendo (y así entenderlo mejor también) y por el amor que me entregan día a día. Gracias por caminar conmigo y permitirme crecer.

A mis amigos Nicolás, Belén y Josefa por siempre estar presentes y al tanto de todo, por su amor y compañía.

A Camilo, Feña, Romi, Samu, José, Javier, Gabi, Gene, Ale, Oscar y Tobi por el apañe, conciencia y amor en la cuarentena.

ÍNDICE

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES GENERALES.....	5
2.1 Estadísticas históricas de incendios forestales en Chile	7
2.2 Cambio climático e incendios forestales.....	14
2.3 Modelo forestal chileno y la construcción del riesgo de incendios	24
2.4 Análisis del peligro de incendios	31
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	36
3.1 Hipótesis.....	41
3.2 Objetivo general	41
3.3 Objetivos específicos.....	42
3.4 Área de estudio	42
4. METODOLOGÍA.....	47
4.1 Potential Fire Index.....	47
4.1.1 Precipitación acumulada diaria (pp)	47
4.1.2 Factor de precipitación (PF)	48
4.1.3 Días de Sequía (DD)	49
4.1.4 Riesgo de Fuego Básico (BR)	49
4.1.5 Factor de Humedad Relativa Mínima (RH).....	50
4.1.6 Factor de Temperatura Máxima (RT)	51
4.2 Input	51
4.2.1 Datos climáticos	51
4.2.2 Datos de cobertura vegetal.....	56
4.2.3 Datos de incendios forestales.....	57
4.3 Implementación del PFI.....	60
4.4 Validación del PFI.....	61

4.5	Variaciones altitudinales de PFI	61
5.	RESULTADOS	62
5.1	PFI en verano (DEF)	62
5.2	PFI en otoño (MAM)	67
5.3	PFI en invierno (JJA).....	71
5.4	PFI en primavera (SON).....	75
6.	DISCUSIÓN.....	80
6.1	Limitaciones del trabajo.....	90
7.	CONCLUSIONES.....	93
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	98
9.	ANEXO	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Ocurrencia nacional histórica (naranja) y daño nacional histórico en hectáreas (morado) de incendios forestales período 1964-2018. Modificado de CONAF (2019b).....	9
Figura 2.2.	(a) Distribución del promedio mensual de hectáreas quemadas en 1985-2017 y del número de incendios durante el período 1985-2019; (b) Logaritmo de la superficie mensual afectada en los períodos 1985-1993, 1994-2001, 2002-2009 y 2010-2017. Elaborados con datos de CONAF (2019b).	11
Figura 2.3.	(a) Ocurrencia regional de incendios forestales, período 1977-2017; (b) Superficie regional quemada (ha) por incendios forestales, período 1977-2017; (c) Ocurrencia regional de incendios de magnitud (≥ 200 ha), período 1985-2018. Elaborados con datos de CONAF (2019a).	13
Figura 2.4.	Porcentaje de causas generales (izquierda) y causas accidentales específicas (derecha) de incendios forestales en Chile, período 2003-2019. Elaborado con datos de CONAF (2019a).....	14
Figura 2.5.	Superficie en hectáreas por uso de suelo a nivel regional actualizado a agosto de 2017. Elaborado con datos de CONAF(2019c).....	29
Figura 3.1.	Área de estudio y distribución de altitudes.....	43
Figura 4.1.	Mapas de precipitación diaria promedio para cada estación y período en estudio. ..	54
Figura 4.2.	Mapas de temperatura diaria promedio para cada estación y período en estudio.	55
Figura 4.3.	Mapa de cobertura vegetal basado en la clasificación USGS de 24 categorías.	57

Figura 4.4. Focos de incendios MCD14ML en el área de estudio.....	58
Figura 5.1. Promedio estacional de PFI en verano (DEF) para los tres períodos en estudio.....	64
Figura 5.2. Boxplot de altitud (m) según niveles de PFI en DEF para los períodos en estudio. Promedio: línea punteada; Mediana: línea continua.	66
Figura 5.3. Promedio estacional de PFI en otoño (MAM) para los tres períodos en estudio.....	69
Figura 5.4. Boxplot de altitud (m) según niveles de PFI en MAM para los períodos en estudio. Promedio: línea punteada; Mediana: línea continua.	71
Figura 5.5. Promedio estacional de PFI en invierno (JJA) para los tres períodos en estudio.	73
Figura 5.6. Boxplot de altitud (m) según niveles de PFI en JJA para los períodos en estudio. Promedio: línea punteada; Mediana: línea continua.	75
Figura 5.7. Promedio estacional de PFI en primavera (SON) para los tres períodos en estudio.	77
Figura 5.8. Box plot de altitud (m) según niveles de PFI (Tabla 5.4) para SON en los períodos 2002-2005, 2046-2050 y 2091-2100; promedio: línea punteada y mediana: línea continua.	79



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Modelos de peligro de incendios forestales revisados	32
Tabla 4.1. Detalle de cálculo de precipitaciones para los once períodos precedentes al día a evaluar (n).....	48
Tabla 4.2 Ecuaciones para el cálculo de los factores de precipitación (PF) para cada período de precipitación acumulada (pp).	48
Tabla 4.3. Clasificaciones de uso de suelo USGS del área de estudio, su equivalente IGBP* y valores de la constante de inflamabilidad A correspondientes (Modificado de Waigort Setzer et al. 2019).	50
Tabla 4.4. Niveles de peligro y valores de PFI (adaptada de JUSTINO et al. 2011).	51
Tabla 4.5. Descriptores de base de datos MODIS Collection 6 (GIGLIO et al. 2018).	59
Tabla 4.6. Variables y horario UTC utilizados como input.	60
Tabla 5.1. Estadísticas de validación del PFI 2002-2005 para DEF.	63
Tabla 5.2. Número y porcentaje de píxeles en DEF por categoría de PFI, para cada período. ..	64
Tabla 5.3. Estadísticas de validación del PFI 2002-2005 para MAM.	68
Tabla 5.4. Número y porcentaje de píxeles en MAM por categoría de PFI, para cada período. .	69
Tabla 5.5. Estadísticas de validación del PFI 2002-2005 para JJA.....	72
Tabla 5.6. Número y porcentaje de píxeles en JJA por categoría de PFI, para cada período. ...	74
Tabla 5.7. Estadísticas de validación del PFI 2002-2005 para SON.....	76
Tabla 5.8. Número y porcentaje de píxeles en SON por categoría de PFI, para cada período. .	77

1. INTRODUCCIÓN

El clima, el tipo de cobertura vegetal y la actividad humana son los principales factores que controlan la ocurrencia de incendios forestales en el mundo. Este fenómeno se presenta en la mayoría de los biomas, incluyendo zonas climáticas mediterráneas, boreales o tropicales, y afecta a diversos tipos de vegetación (JUSTINO et al. 2011; MORITZ et al. 2012; ARCHIBALD et al. 2013).

Especialmente en países con clima mediterráneo, biomas presentes en Sudamérica, África, Australia, Europa y Norteamérica, el efecto potencial del cambio climático, asociado al aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones, contribuiría al aumento de la ocurrencia y severidad de incendios forestales por lo que su estudio se ha vuelto una preocupación seria (ARCA et al. 2010; GONZÁLEZ et al. 2011; BEDIA et al. 2013; MORITZ et al. 2012; BROTONS et al. 2013; IPCC, 2014; DE LA BARRERA et al. 2018; McWETHY et al. 2018; BARBERO et al. 2019; PEREIRA et al. 2020; MOREIRA et al. 2020).

A pesar de que los incendios forestales juegan un rol fundamental en la dinámica de diversos ecosistemas, habiendo ocurrido desde que las plantas poblaron la superficie terrestre, en las últimas décadas se han considerado un problema crítico en varios países del mundo (CHUVIECO et al. 2007; PAUSAS & KEELEY, 2009; GONZÁLEZ et al. 2011; ARCHIBALD et al. 2013; HURTEAU et al. 2014; CONAF, 2017).

Algunos de los impactos negativos de los incendios forestales en los ecosistemas son cambios en la estructura de los bosques, pérdida de suelos fértiles, pérdida de servicios ecosistémicos, desertificación, modificación del ciclo hidrológico y contaminación atmosférica, entre otros (CONAF, 2010; MORAGA PERALTA et al. 2010; JUSTINO et al. 2011; ADAB et al. 2013; CASTILLO et al. 2013; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; CONAF, 2017; DACRE et al. 2018; DE LA BARRERA et al. 2018). En muchos casos, existen asentamientos humanos cerca o dentro de esos ecosistemas que, por tanto, derivan en impactos negativos para la población, por ejemplo, la pérdida de vidas, viviendas y/o actividades económicas y productivas, especialmente en las zonas de interfaz urbano-rural (CASTILLO, 2013; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; DACRE et al. 2018).

A causa de que los incendios forestales impactan a la población y el espacio físico natural y antrópico, este fenómeno se puede considerar como un problema territorial socionatural (CID AGUAYO, 2015), cuyo estudio se vuelve una necesidad tanto para la conservación de los ecosistemas como para la seguridad y reducción del riesgo de la población y sus actividades.

En Chile, la mayoría de los incendios forestales y del área quemada se concentra en la Zona Centro-Sur del país (entre las regiones administrativas de Valparaíso y la Araucanía), especialmente en la época estival. Además, cerca del 90% de ellos son causados por la actividad humana (CONAF, 2019a). Debido al impacto que históricamente han tenido los incendios forestales en el país, se han

desarrollado modelos para estimar el peligro, enfocados tanto en su ocurrencia como en su comportamiento (por ejemplo, JULIO, 1990; CASTILLO & GARFÍAS, 2010; ALTAMIRANO et al. 2013; CASTILLO, 2013; CASTILLO et al. 2015; DACRE et al. 2018). Paralelamente, se ha reconocido una alta sensibilidad de la actividad de los incendios forestales al cambio climático global (MORITZ et al. 2012; GONZÁLEZ et al. 2018; URRUTIA-JALABERT et al. 2018; PEREIRA et al. 2020; GONZÁLEZ et al. 2020), sin embargo, solo se encontró un trabajo que estima el peligro de incendios forestales en Chile ante un escenario de cambio climático (ALTAMIRANO et al. 2013).

Cuando se combina la evidencia de eventos recurrentes con los impactos regularmente observados y las proyecciones de cambio climático, emerge la posibilidad de una alta sensibilidad de la ZCSCCh a sufrir más y mayores incendios forestales en el futuro.

En el presente trabajo se reportan y analizan los resultados de la evaluación del peligro estacional de incendios forestales basado en la susceptibilidad ambiental (o favorabilidad del medio), en la Zona Centro-Sur de Chile (32°-38°S) para mediados (2046-2050) y finales del siglo XXI (2091-2100) bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (IPCC, 2014) y a una escala regional, con el objetivo de establecer un panorama general sobre el impacto del cambio climático a la susceptibilidad de ocurrencia de incendios forestales en esta región y con el fin de aportar a la gestión del riesgo de incendios forestales de largo plazo.

Dado que existen numerosos modelos de estimación del peligro de incendios forestales, se eligió e implementó uno que trabaja con datos de precipitación, temperatura, humedad relativa y cobertura vegetal, pues son los factores ambientales más representativos en la estimación del peligro (Capítulo 2.4). El modelo *Potential Fire Index* (PFI; JUSTINO et al. 2011) determina el potencial de incendio basado en cálculos de susceptibilidad atmosférica y vegetacional, asignando diferentes niveles de peligro. Actualmente es utilizado en Brasil por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE¹) para monitoreo en tiempo real de las condiciones ambientales y su relación con la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales; además, ha demostrado un 70,4% de eficiencia en la estimación del peligro anual de incendios forestales para América del Sur (SILVA, 2019).

Esta tesis se enmarca dentro del Proyecto Fondecyt 1171065 “Incendios forestales, pérdida de diversidad y debilitamiento de economías campesinas, en el contexto del modelo forestal Chileno”, liderado por la Dra. Edilia Jaque.

¹ <https://queimadas.dgi.inpe.br//queimadas/portal/risco-de-fogo-meteorologia>

2. ANTECEDENTES GENERALES

Un incendio forestal puede definirse como una expansión descontrolada de fuego que, cualquiera sea su origen, se propaga por áreas rurales o de interfaz urbano-rural a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, viva o muerta, con peligro o daño a ecosistemas y/o a la población (CASTILLO, 2013; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; DACRE et al. 2018; CONAF, 2019b). Los incendios forestales son particularmente recurrentes en países con climas mediterráneos como Chile, donde se ven intensificados durante la época estival debido a la escasez de precipitaciones y altas temperaturas (DEL HOYO et al. 2008; CASTILLO et al. 2013; HURTEAU et al. 2014; DE LA BARRERA et al. 2018; URRUTIA-JALABERT et al. 2018).

Las condiciones de ignición y propagación de incendios son controladas por el clima, las características del combustible (carga, distribución, continuidad y energía potencial acumulada), la topografía y velocidad del viento (CHUVIECO et al. 1998; JULIO, 1990; JUSTINO et al. 2011; ARCHIBALD et al. 2013; GONZÁLEZ et al. 2018; SILVA et al. 2019). Altas temperaturas y baja humedad en el aire aumentan la probabilidad de ignición, intensificando su efecto cuanto mayor sea la inflamabilidad de la vegetación (CHUVIECO et al. 1998).

En las últimas décadas, la frecuencia y severidad de los incendios forestales ha aumentado en diferentes regiones del planeta (CHUVIECO et al. 2007; GONZÁLEZ et al. 2011; HURTEAU et al. 2014; CONAF, 2017). La modificación

de los regímenes de incendios y la extensión de la temporada, se han asociado a cambios en el clima (como disminución de precipitaciones, alzas de temperatura y aumento de la frecuencia y extensión de sequías) y a cambios en la distribución del combustible asociado a ciertas prácticas de uso de suelo (por ejemplo, conversión de terrenos a plantaciones exóticas de rápido crecimiento, supresión de incendios y acumulación de materia vegetal, abandono de tierras, fragmentación y tala de bosques, extensas áreas de pastoreo y agricultura) (GONZÁLEZ et al. 2011; MORITZ et al. 2012; BROTONS et al. 2013; HURTEAU et al. 2014; CONAF, 2017; DE LA BARRERA et al. 2018; GONZÁLEZ et al. 2018; URRUTIA-JALABERT et al. 2018; MOREIRA et al. 2020; GONZÁLEZ et al. 2020).

Los incendios forestales son la segunda fuente principal de emisiones de GEI a la atmósfera aportando a la contaminación de la misma (JUSTINO et al. 2011; DE LA BARRERA et al. 2018). Las áreas vegetadas almacenan carbono otorgando un servicio ecosistémico de relevancia global y local, sin embargo, al ser quemadas no solo liberan ese carbono como CO₂ o CO a la atmósfera, sino que también aportan material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) y ozono (entre otros compuestos), cancelando los efectos positivos del servicio ecosistémico que proveían (DE LA BARRERA et al. 2018 y las referencias allí; CONAF, 2016; SILVA, 2019). Además, estos compuestos pueden desplazarse grandes distancias impactando negativamente en la salud de las personas, incluso de

aquellas que no fueron afectadas directamente por el incendio (DE LA BARRERA et al. 2018).

Para poder caracterizar el problema de los incendios forestales en Chile, a continuación, se presentan antecedentes referentes a estadísticas históricas, la relación de los incendios forestales y el cambio climático, y la relación del modelo forestal chileno y la construcción del riesgo de incendios forestales. Finalmente, se realiza una revisión de metodologías de estimación de peligro de incendios forestales en Chile y el mundo.

2.1 Estadísticas históricas de incendios forestales en Chile

La sistematización de la información relativa a incendios forestales en Chile se inicia en el año 1964 a través del Departamento de Policía Forestal (Carabineros de Chile) y en 1974 pasa a ser responsabilidad de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) a través del Programa de Protección Contra Incendios Forestales (CONAF, 2010; CASTILLO, 2013). Actualmente se pueden descargar estos datos desde la página web oficial de CONAF, los cuales son actualizados periódicamente (CONAF, 2019a). Es importante mencionar que, a partir de septiembre de 2018, la Región del Biobío se dividió y las 21 comunas que integraban la Provincia de Ñuble se constituyeron como la nueva Región del Ñuble (BCN, 2020), por lo que las estadísticas de CONAF al año 2019 incluyen en la Región del Biobío a las actuales regiones del Biobío y Ñuble, al igual que los datos de las publicaciones citadas en este trabajo.

Entre 1964 y 2019 han ocurrido 248.002 incendios forestales, con un promedio anual de 4.429 incendios, y una superficie total afectada de más de tres millones de hectáreas en ese período (CONAF, 2019a). En este período, el número de incendios ha ido en aumento (Figura 2.1) lo que se ha asociado al uso cada vez más intensivo de los recursos naturales renovables (CASTILLO et al. 2013; CASTILLO et al. 2015). La tendencia que mejor se ajusta a la ocurrencia de incendios forestales es una de tipo lineal que explica el 71% de la varianza de los datos y establece un aumento de 116 incendios al año desde 1964 hasta 2017. Por el contrario, los datos de superficie afectada no poseen una tendencia que explique la varianza de los datos, aunque al evaluar la relación simple entre superficie afectada y número de incendios por temporada, se reconoce que la temporada 2016-2017 ha sido la más severa en los últimos 40 años, afectando más de 100 ha/incendio. Valores similares se reconocen en la temporada 1967-1968, con 120 ha/incendio, sin embargo, en ese entonces el número total de incendios fue solo un 10% de los ocurridos en 2016-2017. Durante la temporada de incendios 2016-2017 (*peak* morado) se quemaron más de 580.000 hectáreas siendo la mayor superficie consumida por incendios forestales desde que se tiene registro (CONAF, 2014; DE LA BARRERA et al. 2018; McWETHY et al. 2018).

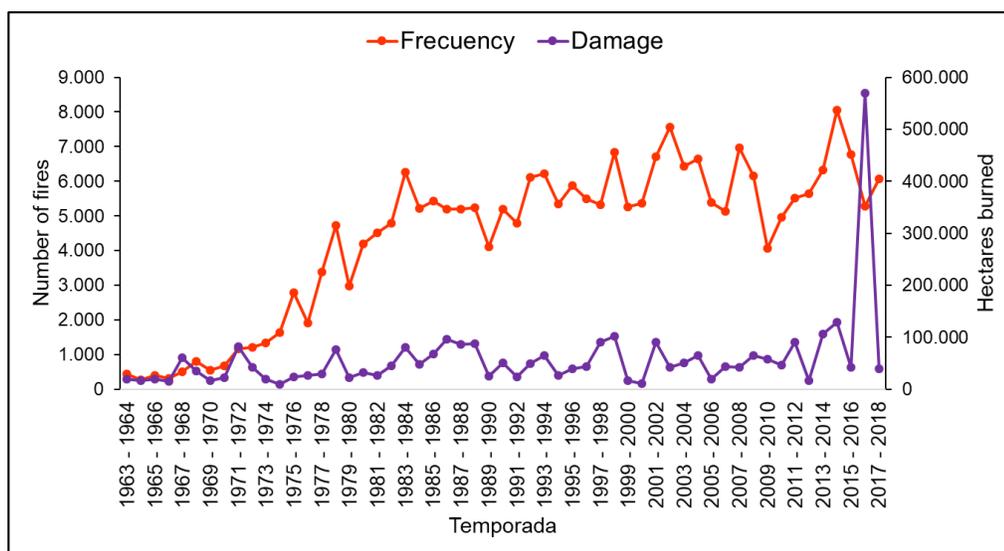


Figura 2.1. Ocurrencia nacional histórica (naranja) y daño nacional histórico en hectáreas (morado) de incendios forestales período 1964-2018. Modificado de CONAF (2019a).

En el último decenio (2009-2018) han ocurrido cerca de 60 mil incendios forestales, representando un 24,9% del total 1964-2018 (~50 años), con un promedio de 6.000 incendios al año, afectando 1.164.163 hectáreas equivalentes a cerca de un 38% del total 1964-2018 (CONAF, 2019a).

La ciclicidad observada en los datos de la Figura 2.1 es característica en “(...) todos los países en que se presenta el problema de incendios forestales (...) [y evidencia que] la inversión en medidas de prevención, detección, control y mitigación de los daños no pueden ser descomprimidas después de una temporada benigna. Siempre se debe estar preparado para enfrentar la situación histórica más grave presentada.” (CONAF, 2010: 10).

La mayor ocurrencia de incendios forestales a nivel nacional se asocia al período estival, al igual que la mayor cantidad de hectáreas quemadas (Figura 2.2a), pues es la época del año con mayores temperaturas, baja humedad relativa, bajas o nulas precipitaciones y con un importante estrés hídrico de la vegetación tanto viva como muerta, lo que genera una alta inflamabilidad de ella facilitando la propagación del fuego (CONAF, 2010). En la Figura 2.2b se presenta el logaritmo de la superficie mensual afectada por incendios forestales en Chile en los períodos 1985-1993, 1994-2001, 2002-2009 y 2010-2017. En ella se puede ver que entre junio y enero la superficie mensual afectada ha aumentado sostenidamente en el tiempo. Entre diciembre y febrero de los cuatro períodos se quemó entre el 71,63% (1985-1993) y el 87,77% (2010-2017) de la superficie anual afectada. Así mismo, en el período 2010-2017, durante el cual se ha identificado un alargamiento del déficit hídrico estival y disminución de precipitaciones en invierno (GONZÁLEZ et al. 2011; GARREAUD et al. 2017; GONZÁLEZ et al. 2018), la superficie afectada aumentó entre febrero y mayo, meses en que la tendencia venía a la baja.

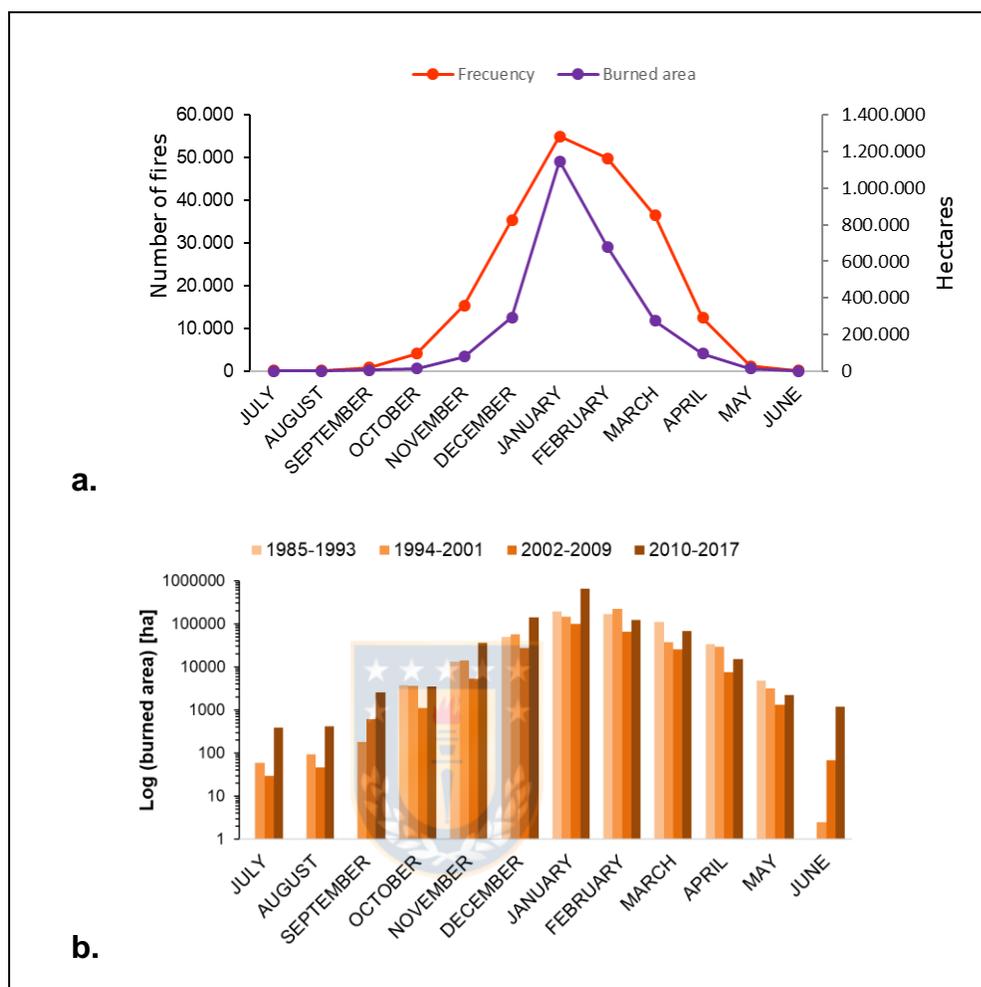


Figura 2.2. (a) Distribución del promedio mensual de hectáreas quemadas en 1985-2017 y del número de incendios durante el período 1985-2019; (b) Logaritmo de la superficie mensual afectada en los períodos 1985-1993, 1994-2001, 2002-2009 y 2010-2017. Elaborados con datos de CONAF (2019a).

Otro rasgo relevante de los incendios forestales en Chile es que poseen una clara distribución espacial, concentrando tanto el número de focos como la superficie afectada entre las regiones de Valparaíso y la Araucanía (32°-39°30'S), o Zona Centro-Sur de Chile (ZCSCh). Esta zona alberga casi 14 millones de habitantes que representan el 78,9% de la población nacional (INE, 2018) y concentra el

90,6% de los incendios forestales ocurridos entre 1977 y 2017 (Figura 2.3a), el 86,1% de la superficie quemada en el mismo período (Figura 2.3b) y el 88,5% de los incendios de magnitud (>200 ha) ocurridos entre 1985 y 2017 (Figura 2.3c) (CONAF, 2019a). Los incendios de magnitud son aquellos que afectan 200 o más hectáreas; en general, se caracterizan por poseer una extensión muy superior a la media de la zona afectada, por ser difíciles de controlar debido su alta intensidad y propagación, y por generar importantes daños ambientales y económicos a asentamientos humanos y a la población como consecuencia de su severidad y extensión (CONAF, 2010).

Por último, en Chile, casi el 90% de los incendios forestales son causados por la actividad humana. Entre los años 2003 y 2019, el 56,48% de los incendios forestales fueron causados de forma accidental y el 32,16% de manera intencional (es decir, un 88,64% de origen antrópico). En el mismo período, el 11,01% fue originado por causas desconocidas y un 0,35% por causas naturales (Figura 2.4) (CONAF, 2019a). Dentro de las causas antrópicas accidentales, la más común es 'tránsito de personas, vehículos o aeronaves' con un 30,7% del total nacional seguida de 'actividades recreativas' con un 7,2% del total nacional (CONAF, 2019a).

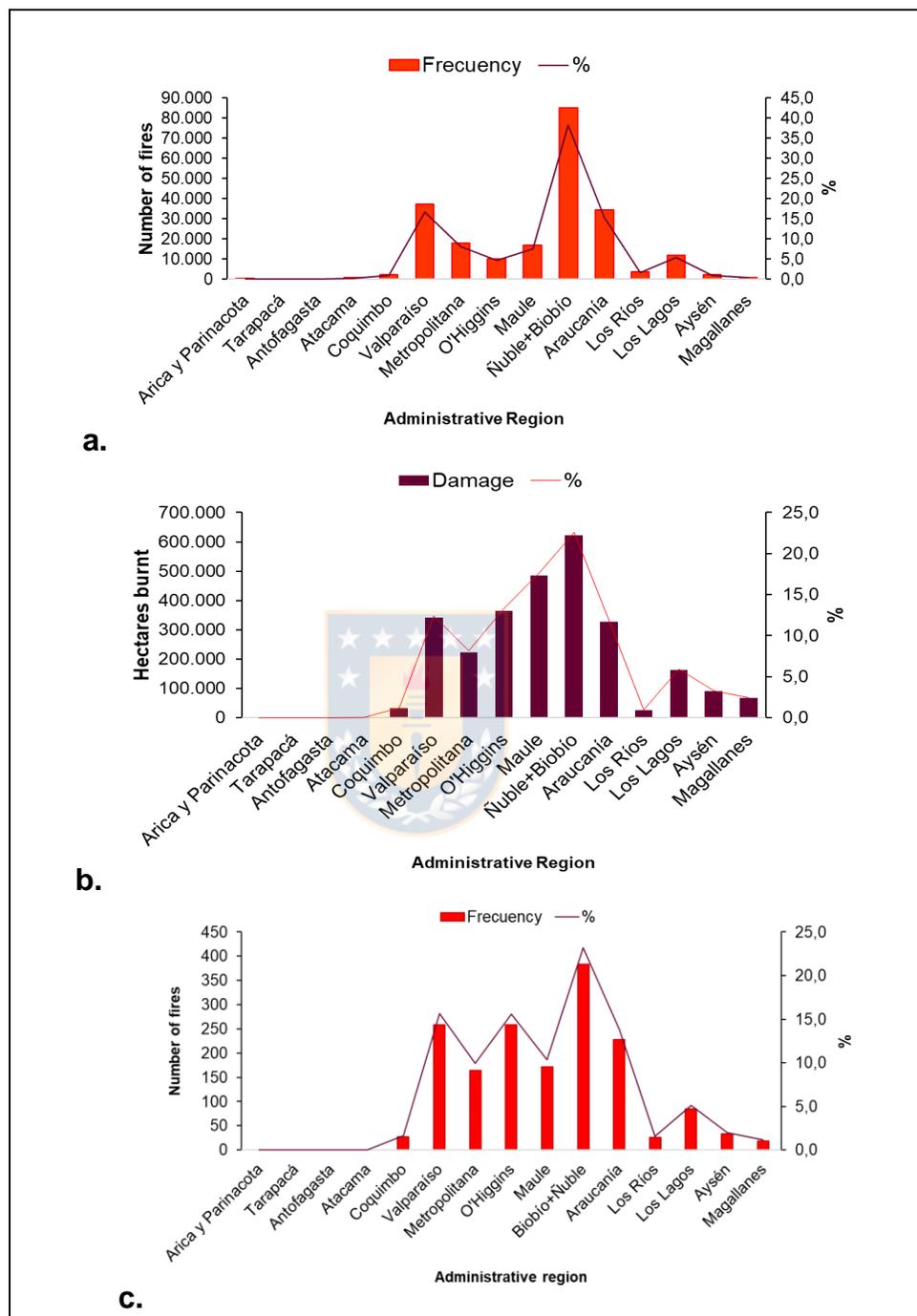


Figura 2.3. (a) Ocurrencia regional de incendios forestales, período 1977-2017; (b) Superficie regional quemada (ha) por incendios forestales, período 1977-2017; (c) Ocurrencia regional de incendios de magnitud (≥ 200 ha), período 1985-2018. Elaborados con datos de CONAF (2019a).

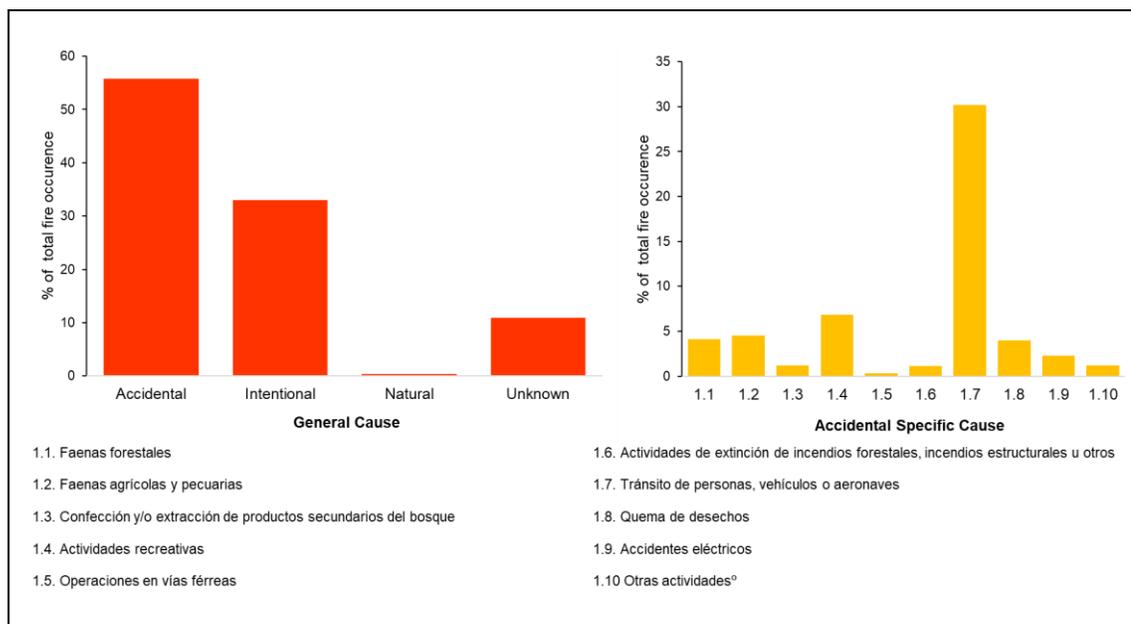


Figura 2.4. Porcentaje de causas generales (izquierda) y causas accidentales específicas (derecha) de incendios forestales en Chile, período 2003-2019. Elaborado con datos de CONAF (2019a).

2.2 Cambio climático e incendios forestales

El cambio climático se entiende como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (NACIONES UNIDAS, 1992: 3). Por su parte, el calentamiento global se define como un aumento gradual, observado o proyectado, de la temperatura superficial global como una de las consecuencias del forzamiento radiativo (perturbación de energía del sistema terrestre respecto del balance radiativo) (IPCC, 2014).

El actual escenario de cambio climático global se atribuye fundamentalmente al aumento de las temperaturas como consecuencia del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antrópico en la atmósfera (IPCC, 2014). El forzamiento radiativo del sistema climático ha aumentado continuamente desde el inicio del siglo XXI, al igual que la concentración atmosférica de CO₂, que ha aumentado un 40% entre 1970 y 2011 respecto del período 1750-1970 (IPCC, 2014). Esto ha significado alteraciones en los sistemas humanos y naturales incluyendo el aumento del nivel del mar, pérdida de cobertura nival, perturbaciones en la circulación general de la atmósfera, cambios en los regímenes de precipitación, aumento de sequías, inundaciones, olas de calor, incendios forestales u otras formas de clima extremo, disminución del número de días y noches fríos, aumento de días y noches cálidos, y pérdida de biodiversidad, entre otros (IPCC, 2014). Algunos de estos fenómenos ya se están empezando a observar en Chile Centro-Sur (GARREAUD et al. 2017; URRUTIA-JALABERT et al. 2018; GONZÁLEZ et al. 2020).

El *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), comunidad científica internacional interesada en el cambio climático, sus impactos, riesgos futuros y las opciones de adaptación y mitigación (IPCC, 2020), ha revisado las evidencias y modelos abocados al entendimiento del cambio climático y ha propuesto en su informe de 2014 cuatro escenarios de forzamiento radiativo (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) en base a proyecciones de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), para crear conciencia de la irreversibilidad y alcance de los

efectos del cambio climático a los tomadores de decisiones (IPCC, 2014). La importancia de estos escenarios radica en que permiten hacer proyecciones climáticas basadas en estándares mundiales y, por lo tanto, los resultados pueden ser entendidos y utilizados por toda la comunidad científica (PALOMINO-LEMUS, 2015). De los cuatro escenarios, RCP2.6 es el escenario más favorable pues estima que para el año 2100 el forzamiento radiativo de la Tierra será de $2,6 \text{ W/m}^2$ e implica mantener el calentamiento global menor a 2°C sobre los niveles pre-industriales. En contraposición, el escenario más pesimista es el RCP8.5, que estima que para el año 2100 el forzamiento radiativo será igual o superior a $8,5 \text{ W/m}^2$ asumiendo que las emisiones de GEI se mantendrán iguales o superiores a las de la actualidad, y que para finales de siglo la temperatura superficial terrestre aumentará más de 2°C (IPCC, 2014).

El efecto potencial del cambio climático en las regiones de clima mediterráneo (presentes en Sudamérica, África, Australia, Europa y Norteamérica) es una preocupación seria ya que los cambios proyectados en los extremos climáticos se estima que favorezcan la actividad del fuego (ARCA et al. 2010; BEDIA et al. 2013; BARBERO et al. 2019; MOREIRA et al. 2020; PEREIRA et al. 2020). Por lo tanto, anticipar los cambios en los regímenes de incendios y el riesgo en el futuro son herramientas útiles tanto para las políticas de adaptación de bosques como para el manejo del fuego (DUPUY et al. 2020).

En Chile, al sur de los 30°S, y especialmente en la ZCSCh, las condiciones climáticas están relacionadas indudablemente a la ocurrencia de incendios forestales (URRUTIA-JALABERT et al. 2018). La variación de la precipitación acumulada anual se debe en gran parte al fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) que se caracteriza por la alternancia de períodos de 3 a 7 años más secos y fríos (La Niña) o más lluviosos y cálidos (El Niño) que el promedio de largo plazo en el Pacífico (DGF, 2006; CR2, 2018). Algunos de los eventos ENSO más fuertes registrados son los de 1982-83, 1987-88 y 1997-98 (GONZÁLEZ et al. 2011; URRUTIA-JALABERT et al. 2018). Otros fenómenos climáticos globales que influyen en las precipitaciones en Chile Centro-Sur es la PDO (Oscilación Decadal del Pacífico), un “modo natural «tipo ENOS», pero sus fases cálidas y frías tienden a prevalecer por décadas” (CR2, 2018: 9), y la AAO (Oscilación Antártica) que en su fase positiva conlleva la disminución de precipitaciones y anomalías positivas de temperatura (URRUTIA-JALABERT et al. 2018).

Al evaluar la relación entre la ocurrencia de incendios forestales y la variabilidad climática en Chile Centro-Sur (32°-43°S) entre 1976 y 2013, reconoce una correlación positiva entre los años Niño en los inviernos del año anterior a la temporada de incendios, especialmente en los más intensos (1982-83, 1986-87, 1997-98), y el área quemada; una correlación positiva entre la fase positiva de AAO y el número de incendios y área quemada; y una correlación positiva entre el aumento de las temperaturas máximas medias en verano y la actividad del fuego (URRUTIA-JALABERT et al. 2018).

Entre los años 1979 y 2005 en Chile Central (31°-37°S) se ha observado un enfriamiento costero junto a un aumento de temperaturas en la Depresión Central y los Andes (GARREAUD, 2011). Desde 1980 se ha reconocido una disminución en las precipitaciones a lo largo de las cordilleras de la Costa y de los Andes (GARREAUD et al. 2017 y las referencias en él). Desde mediados de la década de los '70 la Zona Central de Chile ha experimentado un aumento pronunciado de las temperaturas máximas pudiendo destacarse cuatro eventos importantes multianuales de sequía: 1945-47, 1967-69, 1988-90 y 2010-2019; históricamente estos eventos han sido de uno o dos años de duración y asociados a variaciones climáticas de origen natural, sin embargo, desde el año 2010 se ha reconocido un déficit de precipitaciones de entre un 20% y 30% (CR2, 2018; GONZÁLEZ et al. 2018). Este déficit de lluvias continuado en el tiempo y de gran extensión espacial, no tiene precedentes en los últimos 70 años y, de acuerdo a reconstrucciones climáticas mediante dendrocronología, tampoco en el último milenio, de manera que se le ha denominado "Megasequía" (CR2, 2018; GARREAUD et al. 2017). En base a los registros de la segunda mitad del siglo XX para muchas de las estaciones meteorológicas ubicadas entre los 35° y 38°S, la duración y severidad de la megasequía es un evento sin precedentes (GONZÁLEZ et al. 2018). Considerando el cambio climático, las megasequías serán cada vez más frecuentes en el futuro pudiendo llegar incluso a ser la condición media para finales del siglo XXI (CR2, 2018).

Durante la megasequía, el Pacífico ecuatorial se ha caracterizado por condiciones neutras de ENSO, salvo los años 2010, en que se reconoce un evento La Niña, y 2015 en que se desarrolla un evento fuerte de El Niño que no contribuye a disminuir el déficit hídrico; además, gran parte del período se encuentra dentro de una fase fría de la PDO (2007-2014) (CR2, 2018; GARREAUD et al. 2017).

Entre 2010-2015, se reconoce una disminución en los caudales de los ríos, que alcanza un 70% en las regiones de Valparaíso y Coquimbo y un 25% hacia el sur, en paralelo con la elevación progresiva de la línea de nieves (isoterma 0°C) durante la primavera y verano (CR2, 2015). También se ha reconocido una disminución en el crecimiento vegetacional en el área comprendida entre las regiones de Coquimbo y O'Higgins y el aumento en un 70% de la superficie quemada por incendios forestales, de la extensión de la temporada de incendios prácticamente a todo el año y un aumento del 27% en el número de incendios de magnitud (>200 ha) entre las regiones de Valparaíso y Araucanía (CR2, 2015). Entre noviembre y marzo del período 2010-2015 en la ZCSCh (32°-39°S), el área total quemada por incendios forestales se relaciona negativamente con las anomalías de precipitación anual y positivamente con la temperatura máxima (GONZÁLEZ et al. 2018). Al comparar dicho período con el período 1990-2009 se ha reconocido que: i) aumentó el área afectada por incendios de magnitud en todos los tipos de cobertura vegetacional, pero especialmente en las plantaciones exóticas (+161%), ii) las regiones más afectadas fueron las del Maule, Biobío,

Ñuble y Araucanía, iii) aumentó la duración de los incendios, el número de incendios simultáneos y el tiempo transcurrido entre la detección y extinción de los mismos, iv) el déficit sostenido de lluvias durante ese período fue el factor más crítico en el aumento de la actividad de incendios forestales, v) existe una extensión de la temporada de incendios de magnitud en un 44% (76 días), durante el período 1990-2009, la temporada de incendios de magnitud (>200 hectáreas) se extendía desde octubre hasta mediados de abril, y en 2010-2015 se extiende desde julio hasta mayo e incluso junio del año siguiente (GONZÁLEZ et al. 2018).

Así, la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos en conjunto con las influencias históricas de los modos climáticos en la ocurrencia de incendios forestales en Chile y en especial en la ZCSCh, son factores importantes a considerar al evaluar el peligro de incendios forestales en el largo plazo ante un escenario desfavorable en las condiciones climáticas globales.

Para estudiar el desarrollo y evolución del sistema climático, y así poder estimar su respuesta ante diversos forzamientos radiativos con el fin de hacer predicciones a corto, mediano y largo plazo, se utilizan los Modelos Climáticos Globales (GCM por sus siglas en inglés) (PALOMINO-LEMUS, 2015). Sin embargo, debido a su baja resolución, su uso en análisis regionales se ve limitada.

Para lograr estimaciones más reales es necesario realizar *downscaling* o regionalización de los GCM mediante Modelos Climáticos Regionales (RCM), que corresponde al aumento de la resolución mediante la incorporación de factores locales (geográficos, topográficos, distribución tierra-agua y vegetación) y variables meteorológicas de entrada con una resolución de 50, 25 o 10 Km aproximadamente (DGF, 2006; PALOMINO-LEMUS, 2015). Esta herramienta permite una mejor caracterización de las regiones en cuanto a su clima y permite hacer proyecciones de su evolución en el futuro para prever los impactos del cambio climático (GARREAUD, 2011). Los dos tipos clásicos de *downscaling* son el *downscaling* estadístico y el *downscaling* dinámico. El primero se basa en la estimación de relaciones estadísticas lineares, no lineares, condicionales y/o estocásticas entre parámetros observacionales de escala local (*sub-grid scale*) y escala regional (*grid scale*), para luego forzar dichas ecuaciones con los datos de salida de los GCM (WILBY & WIGLEY, 1997). En el caso del *downscaling* dinámico, este se basa en la utilización de modelos climáticos de área limitada y mayor resolución que un GCM considerando como condiciones de borde las salidas de los GCM, por lo que los resultados se ven fuertemente influenciados por ellos (WILBY & WIGLEY, 1997; GARREAUD, 2011).

Ya que los RCM aumentan la resolución espacial de los resultados, son de especial utilidad en regiones costeras con variaciones importantes de relieve, baja extensión areal y gradientes marcados en la dirección E-W como es el caso de Chile, cuyo ancho es similar a la resolución de los modelos globales (DGF,

2006; GARREAUD, 2011). Chile continental (18°-53°S) está limitado al oeste por el Pacífico oriental y al este por la Cordillera de los Andes, y posee diversas zonas climáticas y topografías complejas, lo que hace difícil modelar características locales con modelos climáticos de baja y media resolución (BOZKURT et al. 2019).

En 1989, FUENZALIDA et al. ya destacaban la necesidad y utilidad del desarrollo de modelos de cambio climático a escala regional como una de las perspectivas de investigación sobre cambio climático en Chile, con el objeto de estimar sus impactos en el país y la requerida planificación territorial subsecuente (FUENZALIDA et al. 1989).

En el año 2006, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile desarrolla el “Estudio sobre la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” solicitado por la Corporación Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Las proyecciones desarrolladas con PRECIS (*Providing Regional Scenarios for Climate Studies*, desarrollado por el *Hadley Centre* del Reino Unido) abarcaron específicamente el período 2070-2100, con una resolución de 25 y 50 km, y estimaron un calentamiento sobre Chile continental y el océano adyacente respecto del período 1960-1990, junto a una tendencia a la disminución de las precipitaciones anuales acumuladas en la zona centro-sur de Chile (DGF, 2006; GARREAUD, 2011).

En el año 2018, un segundo proyecto de simulaciones climáticas para Chile en el siglo XXI fue publicado en el informe “Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad” del Centro para el Clima y Resiliencia (CR2) de la Universidad de Chile. Las proyecciones climáticas simuladas con RegCM4 para el período 2021-2050 a una resolución de 10 km y bajo el escenario RCP8.5 proyectan un aumento de la temperatura anual para todo el territorio chileno “con un gradiente de mayor a menor de norte a sur y de Cordillera a Océano” (p. 3), la disminución del promedio anual de precipitación, un aumento de olas de calor (más de 5 días consecutivos con temperaturas 5° mayores del valor de referencia) y de la intensidad de las precipitaciones diarias para la zona centro y sur del país (CR2, 2018). BOZKURT et al. (2019) detalla la metodología y datos utilizados para modelar el periodo histórico 1980-2005 con RegCM4 forzado con reanálisis de dicho período y su posterior comparación con datos observacionales de referencia CR2MET.

Estas proyecciones sugieren que las condiciones climáticas promedio para la segunda mitad del siglo XXI en Chile serán similares a las experimentadas en la temporada de megaincendios 2016/2017, lo que aumenta drásticamente la potencial ocurrencia de grandes incendios forestales en el futuro, especialmente si no se hacen cambios sustanciales en el uso del territorio y la gestión de desastres (GONZÁLEZ et al. 2020).

2.3 Modelo forestal chileno y la construcción del riesgo de incendios

La cobertura vegetal responde a fenómenos de la dinámica natural de los ecosistemas, pero fundamentalmente a las políticas económicas de cada país (HEILMAYIR et al. 2016).

En el caso de Chile, la consolidación de la industria forestal en base a la explotación de monocultivos de especies exóticas pirófitas (fundamentalmente *Pinus radiata* y *Eucaliptus* spp.) para celulosa y madera, han contribuido a que los incendios forestales presenten una distribución espacial asociada a la presencia de estos cultivos, afectando principalmente a la ZCSCCh (GONZÁLEZ et al. 2011; CID AGUAYO, 2015; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; DE LA BARRERA et al. 2018).

Si bien la explotación maderera y la deforestación en Chile data desde el siglo XVI (HEILMAYR et al. 2016; URRUTIA-JALABERT et al. 2018 y las referencias en él), la expansión de las plantaciones forestales asociadas al desarrollo de la industria forestal chilena comienza en la década de 1930 con las plantaciones de *Pinus radiata* para sustentar la industria de la pulpa y papel, y en la década de los 60 se instalan nuevas plantas de pulpa y tableros, lo que lleva a la utilización intensiva de dichas plantaciones (BASCUÑÁN, 2007). En 1974 comienza a regir el Decreto de Ley N° 701 (DL 701) para incentivar el desarrollo forestal e industrial, combatir la erosión de los suelos y recuperar suelos degradados (BASCUÑÁN, 2007; CONAF, 2016; CID AGUAYO, 2015; GONZÁLEZ-REYES et

al. 2017), relacionando la transición forestal con las políticas económicas neoliberales impuestas por la Dictadura en el país (HEILMAYR et al. 2016). El DL 701 tuvo vigencia hasta 1998; año en que se aprueba la Ley N° 19.561 que cambia el enfoque del instrumento hacia pequeños propietarios y la recuperación de suelos degradados, extendiendo su vigencia por 15 años más (CONAF, 2016). En el año 2010 se renueva la vigencia del DL 701 por dos años, expirando la vigencia del sistema de incentivos el 31 de diciembre de 2012 (CONAF, 2016; CONAF, 2019c). La implementación del DL 701 propició el crecimiento de las tasas de forestación nacional mediante bonificaciones estatales del 75% de los costos asociados a este proceso, manejo y administración junto a la eliminación de la tributación de terrenos forestales determinados por CONAF especialmente en las regiones del centro y sur del país, facilitó la concentración de tierras para uso forestal en manos de unas pocas empresas, e implicó la devaluación de la mano de obra y las economías de escala (BASCUNÁN, 2007, CID AGUAYO, 2015). De hecho, gran parte de la superficie cubierta por plantaciones forestales exóticas en Chile se puede atribuir al DL 701 (CONAF, 2016). Desde los años '90 el sector forestal (suelos forestados, industrias, puertos de embarque para exportación y puntos de distribución para el mercado interno) se consolida en la economía nacional gracias al aumento de la superficie plantada y de las exportaciones (BASCUNÁN, 2007).

La mayoría de las plantaciones incentivadas por el DL 701 se localizan entre los 34°S y 44°S, y hasta el año 2007 el 46% de los suelos plantados con dicho

instrumento a nivel nacional se concentraban en la Región del Biobío (actuales regiones del Biobío y Ñuble), que a su vez poseía el 47% de su superficie cubierta de plantaciones (CONAF, 2014). Entre 1986 y 2011, el área total de bosques nativos decreció a una tasa de 0,3% anual entre los 32°S y 44°S, y se convirtió de bosque nativo a plantaciones el 14,3% en la Región del Maule, y el 12,6% de la antigua región del Biobío (HEILMAYR et al. 2016).

La industria forestal chilena ha desplazado a los productores campesinos mediante la compra de terrenos, competencia por recursos hídricos, contaminación por uso de agroquímicos y el riesgo de incendios forestales, siendo estos últimos “un muy poderoso símbolo material de la inestabilidad socioambiental del ensamblaje que constituyen las plantaciones forestales” (CID AGUAYO, 2015: 107). Cabe destacar que la externalidad del riesgo de incendios forestales no está contemplada en la legislación chilena, pues las empresas no son responsables legalmente de los daños que los incendios de sus predios puedan causar en terceros, y solo son responsables por violaciones a la ley de bosques que pueden sancionarse con multas; los costos de reconstrucción, control de plagas y restauración del patrimonio natural, entre otros, recaen en el Estado y en las familias campesinas afectadas (CID AGUAYO, 2015). Una de las zonas más propensas a la ocurrencia de este fenómeno en Chile es la interfaz urbano-forestal o urbano-rural, que corresponde al límite (zona o franja) entre áreas de ocupación humana y áreas cuyo uso de suelo está destinado para uso forestal, agrícola u otro, en que ambos componentes coexisten en un gradiente

espacial (CASTILLO, 2013; CASTILLO et al. 2015; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016). Esto se debe principalmente a la alta densidad de población en sus bordes y derivan de las actividades que allí se practican como extracción de material vegetal, recreación o depósito de desperdicios, entre otros (CASTILLO, 2013; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; DACRE et al. 2018). Estas áreas son de especial interés en la gestión del riesgo de incendios forestales dada su alta potencialidad de ser focos de incendios, así como por la necesidad de involucrar y capacitar a la población que en ellas habitan; de hecho, la caracterización del riesgo de incendios forestales en estas zonas se ha vuelto uno de los principales objetivos en el desarrollo de los modelos predictivos dada su alta criticidad (ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016).



Dentro de las coberturas vegetales vulnerables a los incendios forestales en Chile se encuentran las praderas, matorrales, bosques nativos, humedales y plantaciones forestales exóticas (CONAF, 2010; ALTAMIRANO et al. 2013). En general, la vegetación nativa de Chile no está adaptada para resistir incendios forestales y las especies que tienen mayor capacidad de resistencia y resiliencia se ven igualmente afectadas dada la gran magnitud e intensidad de los eventos (ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016). Esto se debe a que el fuego no forma parte de la regulación natural de la dinámica generativa de los bosques nativos chilenos, por lo que no han desarrollado mecanismos de defensa contra los incendios forestales (CONAF, 2010), aunque igualmente su ocurrencia ha contribuido a perfilar durante siglos el tipo y distribución espacial de las comunidades

vegetales, modificando además los ciclos hidrológicos y la erosión del suelo (CHUVIECO et al. 1998). Por otra parte, las plantaciones forestales exóticas están más adaptadas al fuego: gran parte de ellas son inflamables lo que se relaciona con un rápido crecimiento e incluso la facilitación de la germinación luego del incendio, y una consecuente fragmentación de los ecosistemas preexistentes (ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; GÓNZÁLEZ et al., 2020).

Según el Catastro Vegetacional de 2017 el territorio nacional posee 17.665.354 hectáreas de bosques, equivalentes al 26,6% de la superficie total (Figura 2.5). De este 26,6%, un 17,46% corresponde a plantaciones forestales (3.084.354 hectáreas), un 81,58% a bosque nativo (14.411.031 ha) y un 0,96% (169.969 ha) a bosques mixtos (CONAF, 2019d). Este porcentaje de plantaciones no pareciera ser muy alto, sin embargo, al analizar su distribución espacial, la perspectiva cambia. En el período 1985-2011, la expansión de las plantaciones forestales se centró principalmente entre las regiones de Valparaíso y los Ríos, y en los períodos 1986-2001 y 2001-2011, las plantaciones forestales aumentaron a una tasa del 4,3% y 2,2% anual respectivamente, siendo situadas sobre tierras agrícolas (45,1%), matorrales (31%) y bosques nativos (22,3%) (HEILMAYR et al. 2016). En las regiones del Maule, Biobío y Ñuble, que son el centro de la industria forestal del país, entre 1986 y 2011 se convirtió un 16,3% de los bosques nativos a plantaciones forestales (HEILMAYR et al. 2016).

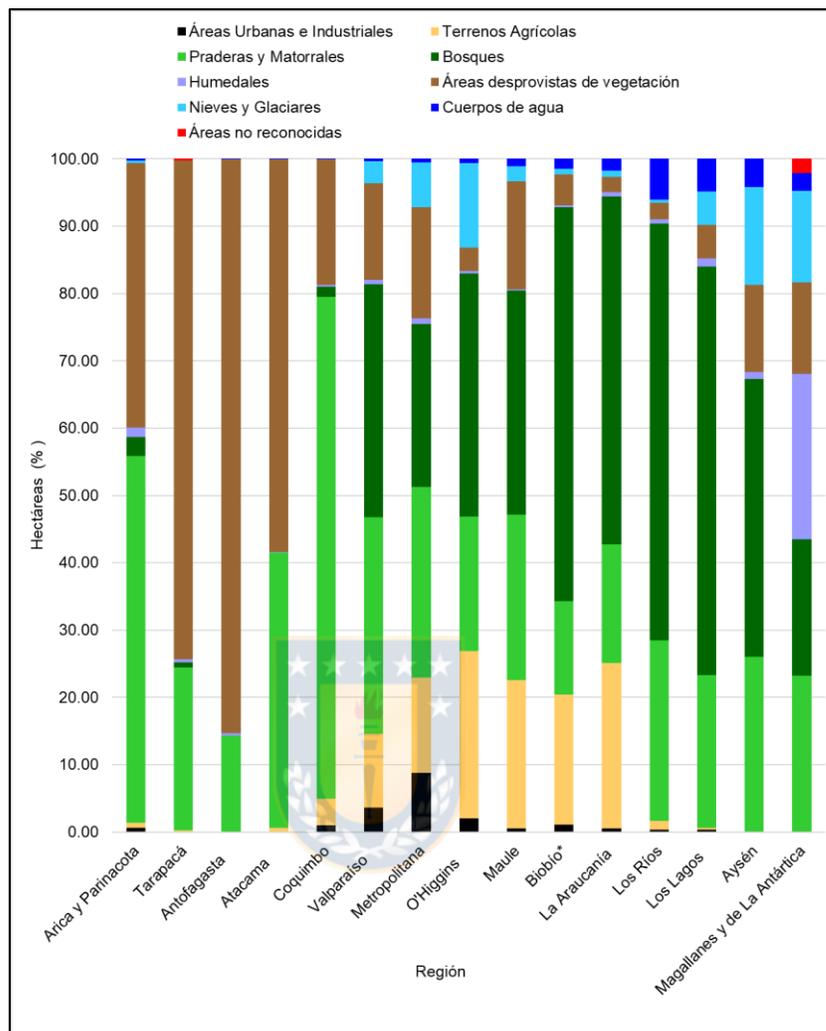


Figura 2.5. Superficie en hectáreas por uso de suelo a nivel regional actualizado a agosto de 2017. Elaborado con datos de CONAF(2019d).

Diversos estudios han reconocido una correlación entre la ocurrencia de incendios forestales y la distribución de las plantaciones forestales exóticas pirófitas en el país (por ejemplo, GONZÁLEZ et al. 2011; CID AGUAYO, 2015; DÍAZ-HORMAZÁBAL et al. 2016; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; DE LA

BARRERA et al. 2018; McWETHY et al. 2018; GÓMEZ-GONZÁLEZ et al. 2018; GÓMEZ-GONZÁLEZ et al. 2019; GÓNZÁLEZ et al. 2020).

Las regiones de Valparaíso, Metropolitana, Biobío, Ñuble y Araucanía presentan un alto porcentaje de superficie apta para el desarrollo forestal (CASTILLO, 2013; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; HEILMAYR et al. 2016). En ellas, gran parte de las áreas quemadas corresponden a plantaciones forestales de pinos y eucaliptos, tierras agrícolas y matorrales (CASTILLO, 2013; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; McWETHY et al. 2018; GÓMEZ-GONZÁLES et al. 2018; GÓMEZ-GONZÁLEZ et al. 2019). Desde los años '90 ha aumentado la frecuencia de temporadas extremas (definidas en base a la extensión de la superficie quemada) que han afectado plantaciones de especies exóticas (GONZÁLEZ et al. 2011). La ocurrencia de megaincendios en zonas donde abundan estas plantaciones de especies exóticas pirófitas endémicas de países que sufren regularmente estos fenómenos no puede ser coincidencia y debería servir como un llamado de atención sobre sus restricciones y manejo (DE LA BARRERA et al. 2018). Ante condiciones meteorológicas/climáticas desfavorables combinadas con una inadecuada planificación y regulación de plantaciones forestales intensivas de especies exóticas pirófitas, los megaincendios podrían seguir ocurriendo (DE LA BARRERA et al. 2018).

2.4 Análisis del peligro de incendios

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales (peligro) diversos estudios se han centrado en proponer y evaluar modelos a diferentes escalas espaciales y/o temporales. Igualmente, para contribuir al manejo y control del fuego se han desarrollado modelos de comportamiento o propagación del fuego que incluyen en los factores condicionantes la velocidad y dirección del viento.

La predicción de incendios forestales es difícil ya que depende de la combinación de diversos factores, tanto físicos (meteorología, clima, estado de la vegetación o combustible) como humanos (densidad de la población, exposición, etc.) (DACRE et al. 2018). La modelación de incendios moderna utiliza relaciones matemáticas que describen las características potenciales del fuego y, según su objetivo, se pueden clasificar en: índices o modelos de peligro, modelos de comportamiento del fuego, modelos de los efectos del fuego o modelos de humo, análisis socioeconómicos, entre otros (CHUVIECO et al. 1998; ARROYO et al., 2008; CASTILLO et al. 2015).

Al revisar diferentes metodologías de estimación del peligro de incendios forestales (Tabla 2.1) es posible inferir que i) la predicción de incendios forestales es inherentemente probabilística, tal como señala DACRE et al. (2018), ii) las variables a considerar dependen de la escala de trabajo: por ejemplo, a mayor resolución espacial las variables antrópicas toman mayor relevancia, iii) que las

herramientas SIG y modelos matemáticos de regresión logística o lineal múltiple son las metodologías más utilizadas, y iv) que las variables más representativas son precipitación (también representada como días consecutivos sin lluvia), temperatura, humedad relativa, cobertura vegetal, topografía y dirección del viento (las dos últimas en el caso de los modelos de propagación). Dichos trabajos han centrado su atención en conocer las causas, consecuencias y comportamiento de los incendios en base a datos del pasado y del presente, y su predicción es fundamentalmente a corto plazo o en tiempo real.

Tabla 2.1. Modelos de peligro de incendios forestales revisados

Autor (es)	Nombre	Metodología	Variables	Área de estudio
Julio (1990) Castillo (2013) Castillo et al. (2015)	Índice General de Riesgo	Regresión lineal múltiple con cinco variables independientes	Temperatura Humedad relativa Velocidad del viento Factor de sequía Factor de estacionalidad	Chile centro-sur (32°36'S)
Etxeberría et al. (2002)	Mapa de peligro de incendio forestal	Álgebra de mapas ráster	Mapa de peligro de inicio del fuego (factor de vegetación, factor humano, factor de insolación y factor altitud) Mapa de peligro de la capacidad de propagación del fuego (composición vectorial de modelo BEHAVE).	Valle de Oiartzun, NE de Gipuzkoa.
Chuvieco et al. (2007)	Modelo de Peligro de Incendios Forestales	Teledetección y SIG Regresión logística Modelo BEHAVE Modelo empírico basado en ajustes de regresión	Probabilidad de ignición asociada a factores humanos Probabilidad de ignición asociada a la ocurrencia de rayos Probabilidad de ignición asociada al estado hídrico de la vegetación Probabilidad de propagación	Aragón, Madrid, Comunidad de Valencia y provincia de Huelva
Torres-Rojo et al. (2007)	Índice de Peligro de Incendios Forestales de Largo Plazo	Comportamiento crítico autoorganizado de los incendios forestales (relación exponencial con el área quemada sobre varios órdenes de magnitud)	Número de incendios de superficie definida (la superficie tiene relación directa con el número de árboles quemados)	México Estados de México

Autor (es)	Nombre	Metodología	Variables	Área de estudio
Arroyo et al. (2008) - Review	Modelo de Rothermel NFDRS BEHAVE (fire behavior prediction and fuel modelling system) FARSITE (fire area simulator) NFMAS (National Fire Management Analysis System) CFFDRS (Canadian forest fire danger rating system) FBP (Fire Behaviour Prediction) FWI (Fire Weather Index) McArthur Forest Fire Danger Rating System McArthur Grass- land Fire Danger Rating System		Condiciones meteorológicas diarias Tipos/Modelos/Características de combustible Modelos de humedad de combustible Comportamiento histórico/modelado del fuego	Varios
Castillo & Garfias (2010)	KITRAL - Velocidad de Propagación Lineal del Fuego	Regresión lineal polinomial	Modelo de combustible (tipo y distribución) Contenido de humedad de la vegetación fina Pendiente Velocidad del viento Proximidad a carreteras	Región del Biobío, Chile
Moraga Peralta (2010)		Evaluación multicriterio (SIG) mediante una ecuación de regresión logística Mapa de probabilidad	Relaciones lineales y exponenciales	Cuenca del Río Tempisque, Costa Rica
Justino et al. (2011)	Potential Fire Index (PFI)		Precipitación diaria Cobertura vegetal Humedad relativa mínima diaria Temperatura máxima diaria	Brasil
Mandel et al. (2011) Coen et al. (2013) Mandel et al. (2014)	WRF-SFIRE	Modelo semi-empírico de propagación del fuego (basado en el modelo de Rothermel) Modelo de quema de combustible y calor liberado (relación exponencial) Modelo de ignición atmosférico	Tipo de combustible Pendiente Velocidad del viento Temperatura y humedad (cambian a medida que cambia el flujo de calor al modelar el incendio)	Estados Unidos
Carrillo et al. (2012)		Modelo de regresión logística + SIG	Precipitación media anual Exposición del terreno Número de ramales de vías de comunicación Número de comunidades rurales	Puebla, México
Altamirano et al. (2013)		Modelo estadístico mediante regresión logística	Temperatura mínima del mes más frío Estacionalidad de la precipitación Distancia a las ciudades	Chile central (33°-34°S) (zona mediterránea)

Autor (es)	Nombre	Metodología	VARIABLES	Área de estudio
Adab et al. (2013)*	Structural Fire Index Fire Risk Index Hybrid Fire Index	Índices empíricos	Humedad de vegetación Pendiente Orientación de pendiente Elevación Distancia a caminos Cercanía a asentamientos	NW-Iran
Vilchis-Francés et al. (2015)		Modelo de regresión logística	Velocidad del viento Déficit de humedad (precipitación) Distancia a vialidades Pendiente Orientación de pendiente	Cuenca del Río Balsas, México
Dacre et al. (2018)		Modelo probabilístico basado en relaciones estadísticas, basado en Julio (1990)	Precipitación diaria a 2 m Temperatura máxima a 2 m Humedad relativa mínima a 2 m Velocidad del viento máxima a 10 m Vegetación (NDVI)	Chile (32°-42°S)
Silva (2019)	PFlv2	Modelo PFI acoplado con una función de crecimiento logístico (Índice de Haines) y un factor de corrección de temperatura según latitud	Precipitación diaria Cobertura vegetal Humedad relativa mínima diaria Temperatura máxima diaria Altitud Temperatura a 950 hPa, 850 hPa, 700 hPa y 500 hPa Temperatura dewpoint a 850 hPa, y 700 hPa	Global (0,5° de resolución)

* Incluye tabla comparativa de otros modelos de peligro de incendios forestales

La estimación de peligro de incendios forestales a nivel nacional y oficial está a cargo de CONAF, entidad de derecho privado dependiente del Ministerio de Agricultura de Chile responsable de administrar la política forestal nacional y fomentar el desarrollo de este sector. En su página web señala dos índices para pronosticar el grado de peligro de incendios forestales: 1) el índice de humedad del combustible fino muerto, basado en los modelos de combustible KITRAL (CONAF, 2019e y referencias ahí citadas), 2) el índice de probabilidad de

ignición, que utiliza la radiación solar de la tarde, la temperatura ambiente y la humedad del combustible fino muerto, aunque no se detallan las ecuaciones correspondientes a este cálculo (CONAF, 2019f). Ambos índices son representados en mapas virtuales que entregan información de peligro diaria y el pronóstico para los dos días posteriores, y no se cuenta con estimaciones disponibles de largo plazo.

Como estimación de largo plazo del peligro de incendios forestales en Chile, solo se encontró un trabajo que aborda el tema. ALTAMIRANO et al. (2013) desarrolló un modelo estadístico de regresión logística para predecir la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales (750 m de resolución) en la zona de Chile central (33°-34°S) basado en tres variables principales: temperatura mínima del mes más frío, estacionalidad de la precipitación (variables climáticas) y distancia más cercana a infraestructura (variable de actividad humana). Para ello, evalúa el modelo en el período histórico 2004-2008 y luego se estiman las proyecciones para el año 2050. En el primer caso, la exactitud global del modelo fue de un 64,8% y las celdas con alta probabilidad de ocurrencia de incendios forestales estaban dominadas por matorrales, plantaciones exóticas y terrenos agrícolas. Para el segundo caso, asumen que la cobertura del suelo no cambia, utilizan datos climáticos proyectados a partir del modelo HadCM3 que considera un aumento de 1°C para el año 2050 y contemplan una disminución en 1 km en la distancia a las ciudades. El modelo predice que la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales aumentará en gran parte del área de estudio.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Chile, los incendios forestales son un problema recurrente que presenta una clara distribución espacial, concentrando tanto el número de focos como la superficie afectada entre las regiones de Valparaíso y la Araucanía (32°-39°30'S). Esto puede asociarse con tres factores principales:

- i. El clima, ya que esta zona posee principalmente características mediterráneas con veranos secos y cálidos e inviernos fríos y lluviosos.
- ii. El tipo de cobertura vegetal, pues alberga la mayor parte de las plantaciones forestales exóticas pirófitas del país y un gran porcentaje de bosque nativo.
- iii. La cantidad de población, pues en Chile el 88% de los incendios forestales son causados por la actividad humana y esta zona concentra cerca del 80% de los habitantes del país.

Por lo tanto, y a modo general, la ocurrencia de incendios forestales en la ZCSCCh depende del clima y cobertura vegetal como factores condicionantes, y de la actividad antrópica como factor gatillante. A su vez, el daño ocasionado por los incendios forestales dependerá de las condiciones climáticas, estructura de la vegetación y topografía, así como de la disponibilidad de recursos para el control de ellos y su funcionamiento efectivo (CONAF, 2010).

Ante un escenario de cambio climático que necesita ser enfrentado con políticas sociales, económicas y ambientales de mitigación y adaptación, el problema de los incendios forestales constituye un riesgo socionatural que involucra importantes decisiones políticas, pero también posee un alto grado de incertidumbre; es decir, estamos ante un problema científico posnormal (FUNTOWICZ & RAVETZ, 1993; DELGADO & MARIN, 2017). Los problemas socioambientales que resultan de las actividades industriales y agrícolas modernas se caracterizan por ser ubicuos y generar impactos de largo plazo, por lo que las metodologías para hacer frente a dichos problemas no pueden ser las mismas que los causaron y, dada la incertidumbre del conocimiento científico respecto a los escenarios futuros, la toma de decisiones debe hacerse en base a proyecciones (FUNTOWICZ & RAVETZ, 1993) o, al menos, considerarlas.

Un aspecto de gran utilidad para la planificación territorial y el desarrollo de políticas públicas en lo que respecta al cambio climático y especialmente a los incendios forestales, es contar con proyecciones climáticas para las próximas décadas que permitan evaluar la vulnerabilidad socioambiental ante dichos cambios y diseñar políticas de mitigación y adaptación (CR2, 2018) a diferentes escalas espaciales y temporales, ya que estas permitirían cuantificar los efectos del cambio climático en nuestros recursos ambientales y actividades económicas (GARREAUD, 2011: 13). Conjuntamente, y dado que la cobertura vegetal es el combustible principal en la ocurrencia de incendios forestales, el conocimiento

preciso de su distribución espacial es crítico al momento de analizar, modelar y predecir el comportamiento del fuego (ARROYO et al. 2008).

En el caso de Chile, es posible que la conversión intensiva de paisajes naturales de bosques nativos, matorrales y pastizales a plantaciones forestales exóticas pirófitas pueda tener un efecto en la magnitud y recurrencia de los incendios forestales por lo que se hace urgente evaluar las posibles consecuencias de los incendios y megaincendios en este tipo de paisajes (DE LA BARRERA et al. 2018). Asimismo, las causas antrópicas y el impacto de los incendios forestales en los sistemas socio-ecológicos sugieren que los extensos paisajes dedicados a monocultivos para producción industrial de madera ya no son sostenibles en el Centro-Sur de Chile y, por lo mismo, una adecuada planificación de usos de suelo y manejo de bosques y combustibles son claves en la reducción de la vulnerabilidad de dichos paisajes (GÓMEZ-GONZÁLEZ et al. 2018). Entender cómo los patrones del paisaje determinan la ocurrencia de incendios forestales es importante para la toma de decisiones en planes de ordenamiento territorial, pero es difícil debido a las complejas relaciones entre los factores que influyen en los incendios forestales (ALTAMIRANO et al. 2013).

El cambio climático, el cambio de uso de suelo, el crecimiento de las ciudades, la expansión forestal y la residencia en zonas de interfaz urbano-rural, implican un aumento del riesgo de los habitantes. Esto hace necesario contar con estimaciones de peligro y vulnerabilidad para generar información y herramientas

para una gestión del riesgo de corto, mediano y largo plazo. Específicamente, los índices de peligro de incendios forestales de largo plazo son indicadores de condiciones estables que favorecen la ocurrencia de dicho fenómeno, por lo que su utilidad reside en que permiten determinar áreas con alto riesgo de incendio, así como para determinar áreas prioritarias de prevención y manejo del fuego (TORRES-ROJO et al. 2007).

Es así como la estimación del peligro de incendios forestales en Chile desde una perspectiva de largo plazo se hace muy necesaria en el marco de la adaptación al cambio climático, sobre todo considerando que la institucionalidad solo cuenta con proyecciones de peligro de corto plazo y que durante el desarrollo de esta investigación solo se encontró un artículo (ALTAMIRANO et al. 2013) que estudia esta temática al largo plazo (mediados del siglo XXI).

Las proyecciones climáticas regionales para el siglo XXI en Chile estiman a escala anual, un aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones, y un aumento de las olas de calor y de la intensidad de precipitaciones diarias para la zona centro sur del país (DGF, 2006; GARREAUD, 2011; CR2, 2018). Todos estos factores contribuyen a la ocurrencia de incendios forestales y, por lo tanto, aumentan el riesgo de la población y los ecosistemas frente a ellos. Dado que el clima es uno de los principales factores condicionantes para la ocurrencia de incendios forestales, estimar la susceptibilidad ambiental a la ocurrencia de este fenómeno para el siglo XXI puede aportar antecedentes a la gestión del

riesgo de largo plazo (planificación y adaptación), especialmente en la zona Centro-Sur de Chile Asimismo, la evaluación del impacto del cambio climático en la susceptibilidad ambiental a la ocurrencia de incendios forestales puede contribuir en las tareas de educación, prevención, adaptación y mitigación para disminuir el riesgo en los territorios, especialmente considerando que la gran mayoría de ellos es causado por la actividad antrópica. Asimismo, al considerar el escenario más desfavorable de cambio climático RCP8.5 (IPCC, 2014) se puede modelar el peligro en caso de que las acciones de reducción de las emisiones de GEI y la mitigación del cambio climático a nivel global sean prácticamente nulas.

CASTILLO et al. (2015) ya sugería que el cambio climático podría afectar el aumento en la cantidad y severidad de los incendios forestales en Chile, pero que aún faltaba evidencia científica para verificarlo. Este trabajo busca aportar evidencia científica para empezar a dilucidar cuantitativamente los impactos del cambio climático en la actividad de incendios forestales en Chile en el siglo XXI y complementar los resultados obtenidos por ALTAMIRANO et al. (2013).

Para ello se decide utilizar el modelo *Potential Fire Index* (JUSTINO et al. 2011) basado en la susceptibilidad ambiental (clima y cobertura vegetal), en combinación con proyecciones climáticas regionales para los períodos 2045-2050 y 2090-2100 para la ZCSCCh entre los 32°S y 38°S, desarrolladas por el *Mountain Geoscience Group* (MGSG) de la Universidad de Concepción mediante

downscaling dinámico (DD) con WRF bajo el escenario de forzamiento radiativo RCP8.5 (FERNÁNDEZ et al. 2020) y datos de cobertura vegetal utilizados como *input* en WRF para el DD (SERTEL et al. 2009). El modelo PFI demostró un 70,4% de eficiencia en la estimación del peligro anual de incendios forestales para América del Sur al compararlo con los datos de ocurrencia de incendios forestales de Terra/MODIS en el período 2001-2016 (SILVA, 2019).

3.1 Hipótesis

El cambio climático proyectado incrementará progresivamente la actividad del fuego en la Zona Centro-Sur de Chile (32°-38°S) para mediados y finales del siglo XXI, evidenciado por el aumento de la susceptibilidad ambiental a la ocurrencia de incendios forestales y del área amenazada.

3.2 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es estimar el peligro estacional de incendios forestales en la Zona Centro-Sur de Chile (32°-38° S) para mediados y finales del siglo XXI, bajo el escenario RCP8.5 y a una resolución espacial de 9 km.

3.3 Objetivos específicos

1. Implementar y validar la aplicabilidad del PFI en la Zona Centro-Sur de Chile (32°- 38° S) para el período histórico 2002-2005.
2. Estimar la susceptibilidad de ocurrencia de incendios forestales con el modelo PFI en la Zona Centro-Sur de Chile para los períodos 2046-2050 y 2091-2100.
3. Evaluar las variaciones altitudinales del peligro de incendio forestales de los tres períodos en estudio.



3.4 Área de estudio

El área de estudio se define de acuerdo a la distribución histórica de incendios forestales en Chile y los datos del *downscaling* climático de FERNÁNDEZ et al. (2020) a utilizar. Comprende seis regiones administrativas que abarcan desde la Región de Valparaíso (32°S) hasta la Región del Biobío (38°S), Zona Centro-Sur de Chile (en adelante ZCSCh) (Figura 3.1). Esta área alberga a 12.925.629 habitantes que representan el 73,5% de la población nacional (INE, 2018), el 75,2% de los incendios forestales ocurridos entre 1977-2017, el 75,1% de los incendios de magnitud sucedidos entre 1985-2017, y el 74,1% de la superficie nacional afectada entre 1977-2017 (CONAF, 2019a). Además, concentra el 73,4% de las áreas urbanas e industriales del país, el 67,3% de terrenos agrícolas y el 26,6% de los bosques, que incluyen al 67,18% de las plantaciones forestales,

el 17,61% de bosque nativo y el 52,77% del bosque mixto a nivel nacional (CONAF, 2019d).

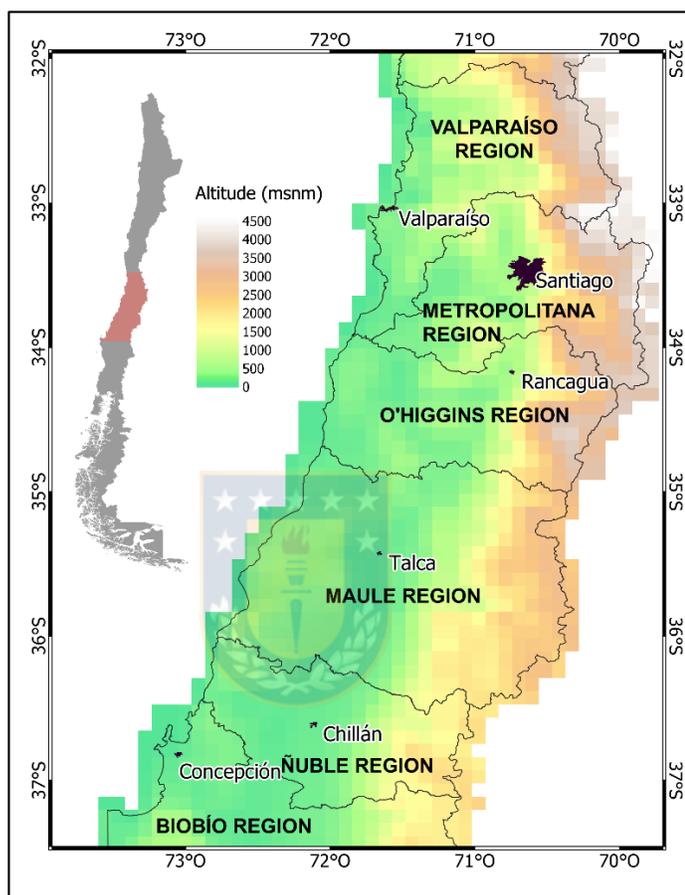


Figura 3.1. Área de estudio y distribución de altitudes.

En esta zona, la cobertura vegetal nativa varía latitudinalmente desde bosques y matorrales esclerófilos en el norte hacia bosques temperados en el sur (McWETHY et al. 2018), aunque toda la región ha experimentado cambios en el uso de suelo hacia terrenos de plantaciones forestales exóticas dominadas por las especies *Pinus radiata* y *Eucaliptus globulus* (HEILMAYR et al. 2016; GONZÁLEZ et al. 2018). De acuerdo al catastro vegetacional de CONAF,

actualizado a agosto de 2017, entre las regiones de Valparaíso y Biobío se concentra el 57,7% de las plantaciones de *Eucalyptus* sp. y el 74,8% de las plantaciones de *Pinus radiata* (CONAF, 2019d). Cabe mencionar que en el período 2001-2017 la mayoría de la superficie quemada en la zona Centro-Sur de Chile fueron bosques de plantaciones exóticas, bosques nativos esclerófilos, bosques mixtos (nativo-exótico) y matorrales; y las coberturas con menos área quemada durante el mismo período fueron las tierras agrícolas o desprovistas de vegetación (McWETHY et al. 2018).

Entre los casos más dramáticos de incendios forestales que han afectado la ZCSCCh se puede reconocer el megaincendio forestal que arrasó con más de 28 mil hectáreas de bosque nativo, plantaciones (forestales y agrícolas), matorrales y pastizales, entre el 31 de diciembre de 2011 y el 6 de enero de 2012, ocurrido en el seno de las plantaciones forestales de las regiones del Biobío y la Araucanía, dejando dos muertos, 224 viviendas destruidas y más de mil damnificados (RESUMEN.CL, 2017). De igual forma, entre el 11 de enero y el 18 de febrero del 2017 se produjeron grandes incendios forestales el país que fueron catalogados como los peores de la historia de Chile y clasificados como tormentas de fuego (DE LA BARRERA et al. 2018). Se consumieron 518.000 hectáreas siendo las plantaciones forestales las más afectadas, hubo 11 muertos, 3000 viviendas destruidas, y el costo de combate del fuego fue de más de 370 millones de dólares (DE LA BARRERA et al. 2018). Es más, entre el 01/01/2017 y el 28/02/2017 entre las regiones de Valparaíso y Biobío se perdió

un 30% de las plantaciones forestales versus un 10% de la superficie total de bosques nativos (DE LA BARRERA et al. 2018). McWETHY et al. (2018) señala que la distribución del área quemada entre 2001 y 2017 entre las regiones de Valparaíso y la Araucanía se puede atribuir al aumento de temperaturas y sequías junto a la disminución de precipitaciones. Además, indican que la retroalimentación entre cobertura vegetal no nativa y condiciones más cálidas y secas promoverían una actividad más extensa del fuego. CONTRERAS et al. (2017) reconocieron que, durante los incendios de 2017 en la Región del Biobío, los bosques nativos ubicados tanto en suelos húmedos como en laderas con baja humedad presentaron mayor resistencia al fuego que las plantaciones forestales, pues poseían mayor humedad relativa y menores temperaturas que su entorno.

En la ZCSCCh, la temporada de incendios se asocia a la época estival, al igual que en el resto del país, siendo enero el mes con la mayor ocurrencia de incendios forestales y la mayor superficie total afectada (CONAF, 2010; CASTILLO, 2013; ÚBEDA & SARRICOLEA et al. 2018; CONAF, 2019a). El clima en el área de estudio es de tipo mediterráneo (SARRICOLEA et al. 2017) y, al igual que otros países con el mismo tipo de clima, alberga ecosistemas naturalmente propensos a los incendios forestales debido a la marcada estacionalidad, que además se ha visto intensificada por el cambio climático global (CASTILLO, 2013; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2018; GARREAUD et al. 2017; GONZÁLEZ et al. 2018). Se caracteriza por un máximo de precipitaciones invernales, un período estival con precipitaciones mínimas que aumentan hacia el sur y una variación norte-sur

desde condiciones semiáridas a condiciones mésicas y húmedas (DGF, 2006; GONZÁLEZ et al. 2018). Las temperaturas siguen la declinación solar, es decir, son menores en invierno y máximas en verano, y se ven principalmente influenciadas por el relieve ya que disminuyen con la altitud y porque la Cordillera de la Costa impide el paso del aire marino hacia las cuencas continentales (DGF, 2006). La Cordillera de la Costa es una de las cuatro macroformas de relieve que hay en el área de estudio, las cuales son, de oeste a este, las planicies litorales (solo en la Región del Biobío), Cordillera de la Costa, Depresión Central (donde se ubican las cuencas continentales) y la Cordillera de los Andes hacia el oriente; ocurriendo todas como rasgos de orientación norte-sur.



4. METODOLOGÍA

Para estimar el peligro de incendios forestales en la ZCSCCh (32°-38° S) para el siglo XXI bajo el escenario RCP 8.5, se utiliza el modelo PFI (JUSTINO et al. 2011) que se basa en la susceptibilidad ambiental de la vegetación a la ocurrencia de incendios forestales. El PFI utiliza valores diarios de precipitación, temperatura máxima del aire y humedad relativa mínima (18 UTC) en conjunto con el tipo de cobertura vegetal.

Para implementar el PFI, se desarrollaron códigos en Python 2.7 en el IDE PyCharm 2017.1.4. Para visualizar y procesar los datos se utilizó Panoply 4.11.1 y QGIS 13.2. A continuación, se detallan los datos utilizados y el procedimiento de cálculo del PFI. A continuación, se indica la secuencia de cálculo del modelo (para más información revisar JUSTINO et al. 2011; WAINGORT SETZER et al. 2017, 2019), los datos de entrada y se detalla la implementación del modelo.

4.1 Potential Fire Index

4.1.1 Precipitación acumulada diaria (pp)

Se determinan los valores diarios de precipitación en milímetros de los once períodos precedentes al día a evaluar (n): pp1, pp2, pp3, pp4, pp5, pp6_10, pp11_15, pp16_30, pp31_60, pp61_90, pp91_120 (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Detalle de cálculo de precipitaciones para los once períodos precedentes al día a evaluar (n).

Nombre	Detalle	Período
pp1	precipitación del día $n-1$	1 día
pp2	precipitación del día $n-2$	1 día
pp3	precipitación del día $n-3$	1 día
pp4	precipitación del día $n-4$	1 día
pp5	precipitación del día $n-5$	1 día
pp6_10	precipitación acumulada entre el día $n-6$ y el día $n-10$	5 días
pp11_15	precipitación acumulada entre el día $n-11$ y el día $n-15$	5 días
pp16_30	precipitación acumulada entre el día $n-16$ y el día $n-30$	15 días
pp31_60	precipitación acumulada entre el día $n-31$ y el día $n-60$	30 días
pp61_90	precipitación acumulada entre el día $n-61$ y el día $n-90$	30 días
pp91_120	precipitación acumulada entre el día $n-91$ y el día $n-120$	30 días

4.1.2 Factor de precipitación (PF)

Posteriormente, para cada período de precipitación acumulada (pp) se calcula un factor de precipitación de acuerdo a las ecuaciones de la Tabla 4.2. Los PF poseen valores entre 0 y 1.



Tabla 4.2 Ecuaciones para el cálculo de los factores de precipitación (PF) para cada período de precipitación acumulada (pp).

Accumulated precipitation (mm)	Precipitation factor (PF)
pp1	$PF_1 = \exp(-0,14pp1)$
pp2	$PF_2 = \exp(-0,07pp2)$
pp3	$PF_3 = \exp(-0,04pp3)$
pp4	$PF_4 = \exp(-0,03 pp4)$
pp5	$PF_5 = \exp(-0,02 pp5)$
pp6_10	$PF_{6_10} = \exp(-0,01pp6_10)$
pp11_15	$PF_{11_15} = \exp(-0,008pp11_15)$
pp16_30	$PF_{16_30} = \exp(-0,004pp16_30)$
pp31_60	$PF_{31_60} = \exp(-0,002pp31_60)$
pp61_90	$PF_{61_90} = \exp(-0,001pp61_90)$
pp91_120	$PF_{91_120} = \exp(-0,0007pp91_120)$

4.1.3 Días de Sequía (DD)

Los días de sequía (*Days of Drought*) representan un período hipotético sin lluvia basado en la cantidad temporal y distribución de las precipitaciones ocurridas, y se calcula según la ecuación 1:

$$DD = 105 * PF_1 * PF_2 * \dots * PF_{61_90} * PF_{91_120} \quad (1)$$

4.1.4 Riesgo de Fuego Básico (BR)

Se determina el Riesgo de Fuego Básico (RB) para cada tipo vegetacional de acuerdo a la ecuación:

$$BR = \frac{0,9 * (1 + \sin(A * DD))}{2} \quad (2)$$

A corresponde a la constante de inflamabilidad de la vegetación: valores bajos de **A** indican que la vegetación requiere de un mayor período de días sin precipitación para alcanzar el máximo valor de BR (0,9) (SILVA et al. 2019), es decir que, a medida que aumenta **A**, las coberturas aumentan su inflamabilidad para un mismo período de tiempo sin precipitaciones. En la Tabla 4.3 se presentan los tipos de cobertura vegetal de acuerdo a la clasificación IGBP (PFI), USGS (WRF) y su respectivo valor de la constante de inflamabilidad **A**. Los guiones indican que **A** no tiene un valor asignado, pero para efectos de cálculos en los códigos se le asigna el valor 0.

Tabla 4.3. Clasificaciones de uso de suelo USGS del área de estudio, su equivalente IGBP* y valores de la constante de inflamabilidad A correspondientes (Modificado de Waigort Setzer et al. 2019).

Clasificación USGS de uso de suelo*		Clasificación IGBP de uso de suelo		Cte. de inflamabilidad A
Categoría	Descripción	Categoría	Descripción	
1	Urban and Built-up Land	13	Urban and Built-up	-
2	Dryland Cropland and Pasture	12	Croplands	4,0
5	Cropland/Grassland Mosaic	14	Cropland/Natural Vegetation Mosaic	4,0
6	Cropland/Woodland Mosaic	14	Cropland/Natural Vegetation Mosaic	4,0
7	Grassland	10	Grasslands	6,0
8	Shrubland	6 y 8	Closed Shrublands and Woody Savannas	2,4
10	Savanna	9	Savannas	3,0
13	Evergreen Broadleaf	2	Evergreen Broadleaf Forest	1,5
15	Mixed Forest	5	Mixed Forest	2,0
16	Water Bodies	17 (0)	Water	-
19	Barren or Sparsely Vegetated	16	Barren/Sparsely Vegetated	-
24	Snow or Ice	15	Snow and Ice	-

* [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/V3/users_guide_chap3.htm#Land Use and](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/V3/users_guide_chap3.htm#Land_Use_and)

4.1.5 Factor de Humedad Relativa Mínima (RH)

Se corrige BR según la humedad relativa mínima diaria del aire (18 UTC) de acuerdo a la ecuación 3. El riesgo RH aumenta cuando la humedad relativa diaria (H_{\min}) es menor a 40% y disminuye cuando H_{\min} es mayor a 40% (JUSTINO et al. 2011).

$$RH = BR * (-0,006H_{\min} + 1,3) \quad (3)$$

4.1.6 Factor de Temperatura Máxima (RT)

Luego se ajusta RH de acuerdo a la temperatura máxima diaria del aire (18 UTC). El riesgo RT aumenta con temperaturas (T_{max}) mayores a 30°C y disminuye cuando T_{max} es menor a 30°C (JUSTINO et al. 2011). El cálculo se realiza de acuerdo a la ecuación 4:

$$RT = RH * (0,02T_{max} + 0,4) \quad (4)$$

En la Tabla 4.4 se presentan las categorías de peligro del PFI. Los números entre paréntesis indican la representación de niveles de PFI en los *boxplot* de altitudes.

Tabla 4.4. Niveles de peligro y valores de PFI (adaptada de JUSTINO et al. 2011).

Nivel de peligro		PFI (0-1)
Mínimo	PFI _{min}	0.00 - 0.15
Bajo	PFI _b	0.15 - 0.40
Medio	PFI _{med}	0.40 - 0.70
Alto	PFI _a	0.70 - 0.90
Crítico	PFI _c	0.90 - 1.00

4.2 Input

4.2.1 Datos climáticos

En el presente trabajo se utilizan los datos obtenidos a partir de *downscaling* dinámico (DD) para la ZCSCCh (32°-38°S) a una resolución de 9 km, obtenidos mediante el modelo numérico no hidrostático *Weather Research and Forecasting* (WRF; SKAMAROCK et al. 2008) y forzados por el *Community Earth System Model* (CESM) corregido, un modelo del *Coupled Model Intercomparison Project*

Phase 5 (CMIP5) (FERNÁNDEZ et al. 2020). El DD fue desarrollado por el *Mountain Geoscience Group* (MGSG) de la Universidad de Concepción en colaboración con el Departamento de Geografía de la Universidad Católica de Valparaíso y el Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Viçosa. De acuerdo a la validación del DD para el período 1980-2005, éste reproduce adecuadamente las características espaciotemporales de la región, aunque se reconoce un sesgo positivo para la temperatura y negativo para la precipitación a escala anual al compararlo con los datos observacionales CR2MET (FERNÁNDEZ et al. 2020), sin embargo, estos sesgos son menores a los obtenidos en otros DD en Chile (BOZKURT et al. 2019).

4.2.1.1 *Proyecciones de cambio climático*

Para evaluar los cambios de precipitación y temperatura en los períodos de tiempo a analizar en este trabajo (2002-2005, 2046-2050 y 2091-2100), se comparan los promedios diarios estacionales de ambas variables.

Para la primera mitad del siglo XXI (2046-2050) se estima que las precipitaciones disminuirán durante todo el año: en verano (DEF) se estima una disminución de un 7,6%, en otoño (MAM) de un 28,6%, en invierno (JJA) disminuirían un 28,5% y en primavera (SON), estación con el mayor cambio, disminuirían un 36,1%. Hacia finales del siglo XXI (2091-2100) solo en MAM se mantienen las tendencias a la baja con un -6,2%. En el caso de MAM, JJA y SON, se reconoce un aumento de las precipitaciones con respecto al período anterior del 30,0%, 35,3% y 10,7% respectivamente, sin embargo, este aumento no alcanza los máximos del período

histórico 2002-2005, lo que indica una disminución neta de las precipitaciones para finales del siglo XXI. Al analizar el cambio neto entre el período histórico 2002-2005 y 2091-2100, se estima una disminución de las precipitaciones en MAM, JJA y SON en un 33,1%, 3,3% y 29,3% respectivamente, y un aumento del 20,1% en DEF. La distribución espacial de las precipitaciones se mantendrá en el tiempo, es decir, en DEF las precipitaciones son mínimas, en MAM y SON estas se concentran al oriente y aumentan hacia el sur, mientras que en JJA la franja oriental es más ubicua, con precipitaciones de norte a sur (Figura 4.1). Esto indica que la estacionalidad de las precipitaciones se mantendrá a lo largo del siglo XXI, con veranos serán más secos e inviernos menos lluviosos.

En cuanto a las temperaturas, las simulaciones climáticas indican que hacia mediados y finales del siglo XXI las temperaturas diarias promedio de cada estación aumentarán. Para 2046-2050 la temperatura máxima se estima que aumentará 0,9°C en DEF y JJA, 1,0°C en SON y 1,3°C en MAM. Las temperaturas mínimas aumentarán aún más respecto de 2002-2005, con cambios de +1,7°C en DEF y SON, +1,8°C en JJA y +2,1°C en MAM. Para finales de siglo se estima que las temperaturas sigan aumentando respecto de 2046-2050: las temperaturas máximas variarán +1,5°C en DEF, 1,6°C en MAM, +1,9°C en JJA y +1,4°C en SON, mientras que las mínimas aumentarán 2,0°C en SON, 2,3°C en MAM y 2,6°C en JJA. Finalmente, al estimar el cambio neto entre 2002-2005 y 2091-2100, se estima que las temperaturas máximas aumentarán 2,5°C

en DEF y SON, y 2,9°C en MAM y JJA, y que las temperaturas mínimas aumentarán 3,7°C en DEF, 4,4°C en MAM y JJA, y 3,8°C en SON.

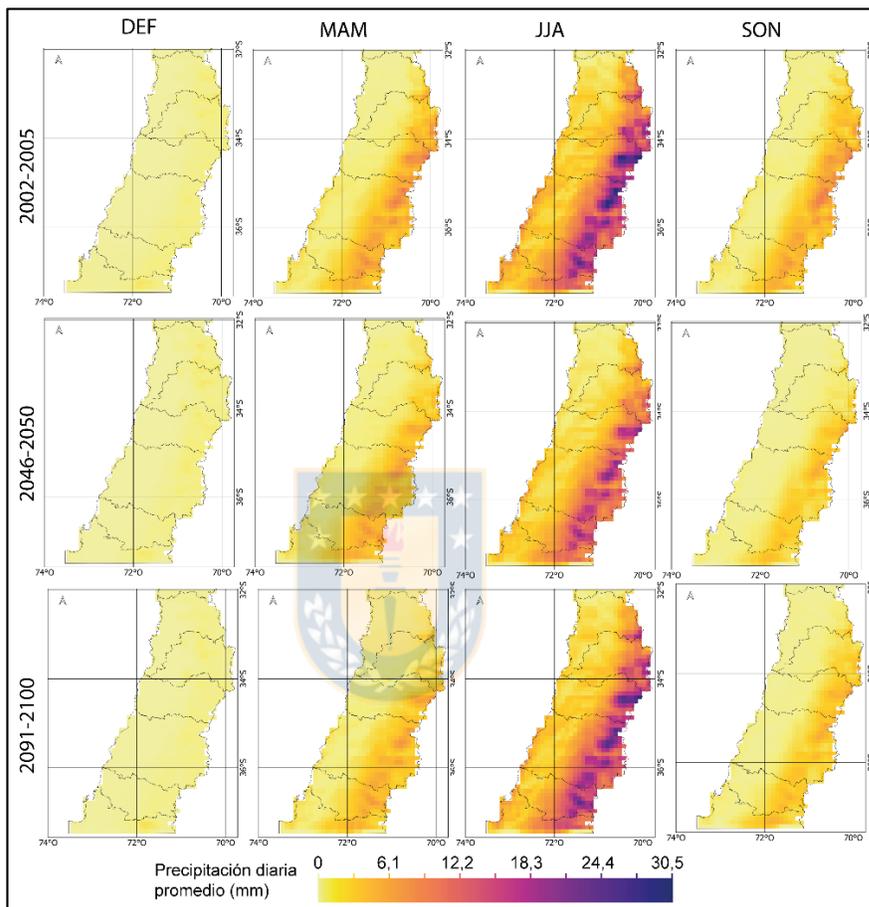


Figura 4.1. Mapas de precipitación diaria promedio para cada estación y período en estudio.

En la Figura 4.2 se puede ver que, para los tres períodos, las mayores temperaturas se concentran en una franja occidental norte-sur, relacionada con la Cordillera de la Costa y el Valle Central, y al igual que las precipitaciones, muestran un comportamiento característico de climas mediterráneos, con temperaturas mayores en la época estival, que disminuyen en otoño y primavera

hasta alcanzar las menores temperaturas en invierno. A mediados y finales de siglo las mayores temperaturas se concentran al norte y occidente del área de estudio, y al oriente, se ve que los valores mínimos aumentan en el tiempo. Además, se observa un aumento de las temperaturas hacia el oriente que es más notorio en DEF y MA, indicando una Precordillera más cálida. Estos resultados sugieren que, aunque la estacionalidad de las temperaturas se mantendrá en el tiempo, en general, las estaciones serán más cálidas.

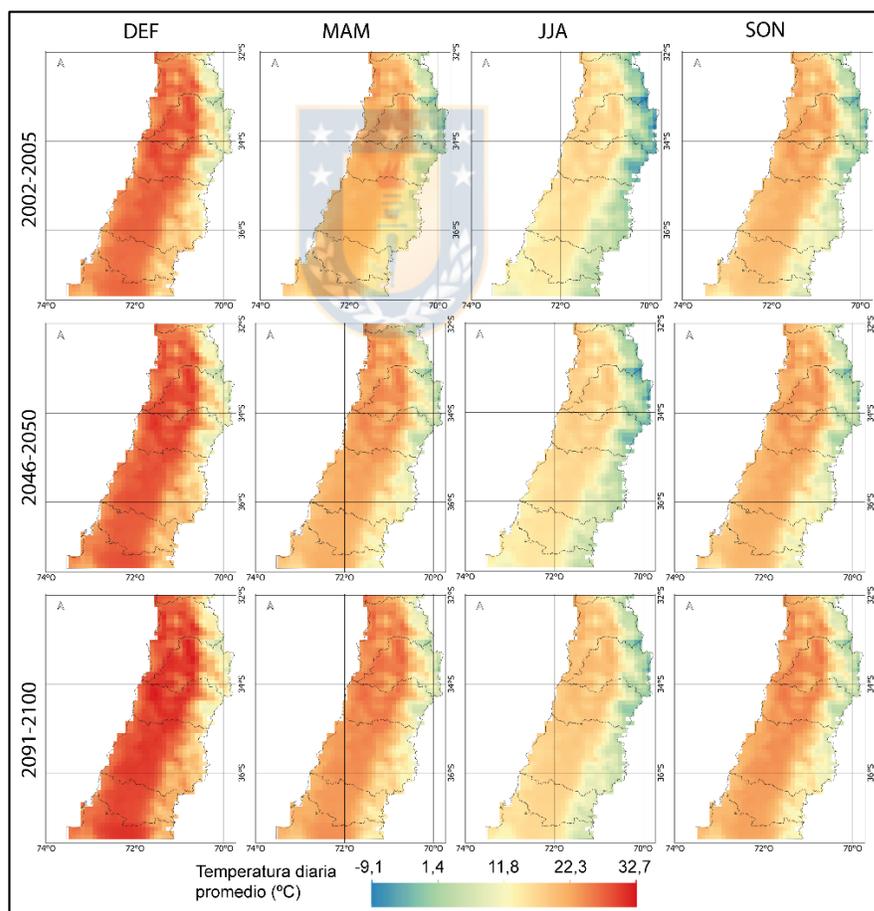


Figura 4.2. Mapas de temperatura diaria promedio para cada estación y período en estudio.

4.2.2 Datos de cobertura vegetal

Se utilizan datos de cobertura vegetal basados en los datos del satélite AVHRR que abarcan desde abril de 1992 a marzo de 1993 con una resolución de ~1 km utilizados como *input* en WRF para el *downscaling* climático (SERTEL et al, 2009). Estos datos están clasificados según las 24 categorías de cobertura de suelo de la USGS, las cuales se pueden correlacionar con la clasificación IGBP requerida por el PFI (Tabla 4.3).

En el área de estudio se puede reconocer una variación norte-sur de las coberturas vegetales y también de oeste a este, esto último asociado principalmente con las grandes formas del relieve chileno y las actividades productivas que se desarrollan en el área de estudio (Figura 4.3). Al norte, de oeste a este, dominan áreas de mosaico de tierras de cultivos y pastizales (*cropland/grassland mosaic*), matorrales (*shrubland*) y zonas con poca vegetación o desprovistas de ella (*barren and sparsely vegetated*). Entre los 34°S y 36°S, predominan, al oeste, zonas de mosaico de tierras de cultivos y pastizales seguidas por bosques mixtos (*mixed forest*), tierras de secano y pastizales (*dryland cropland and pasture*). Hacia el oriente abundan mosaicos de tierras de cultivos y bosques (*cropland/Woodland mosaic*) y en la cordillera andina dominan las zonas con poca vegetación o desprovistas de ella que varían a una cobertura tipo sabana (*savanna*) hacia el sur. Al sur del área de estudio son abundantes los bosques mixtos tanto al occidente como al oriente, y al centro predominan los

mosaicos de tierras de cultivo y bosques, secundados por zonas de secano y de pastoreo.

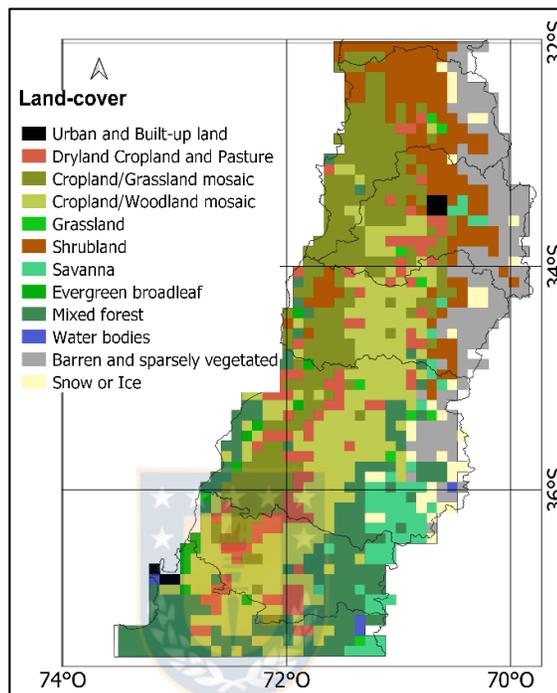


Figura 4.3. Mapa de cobertura vegetal basado en la clasificación USGS de 24 categorías.

4.2.3 Datos de incendios forestales

Para evaluar la efectividad de predicción del modelo PFI, se comparan los niveles de peligro con la distribución de focos de incendios activos MODIS *Collection 6 NRT Hotspot/Active Fire Detections* (MCD14ML) de 1 km de resolución² (Figura 4.4). Este producto se construye mediante un algoritmo contextual que examina cada píxel y le asigna una clase según la información de píxeles vecinos,

²<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/mcd14ml>

basándose en la fuerte emisión de radiación infrarrojo medio (MIR) de los incendios forestales para poder detectarlos (GIGLIO et al. 2018).

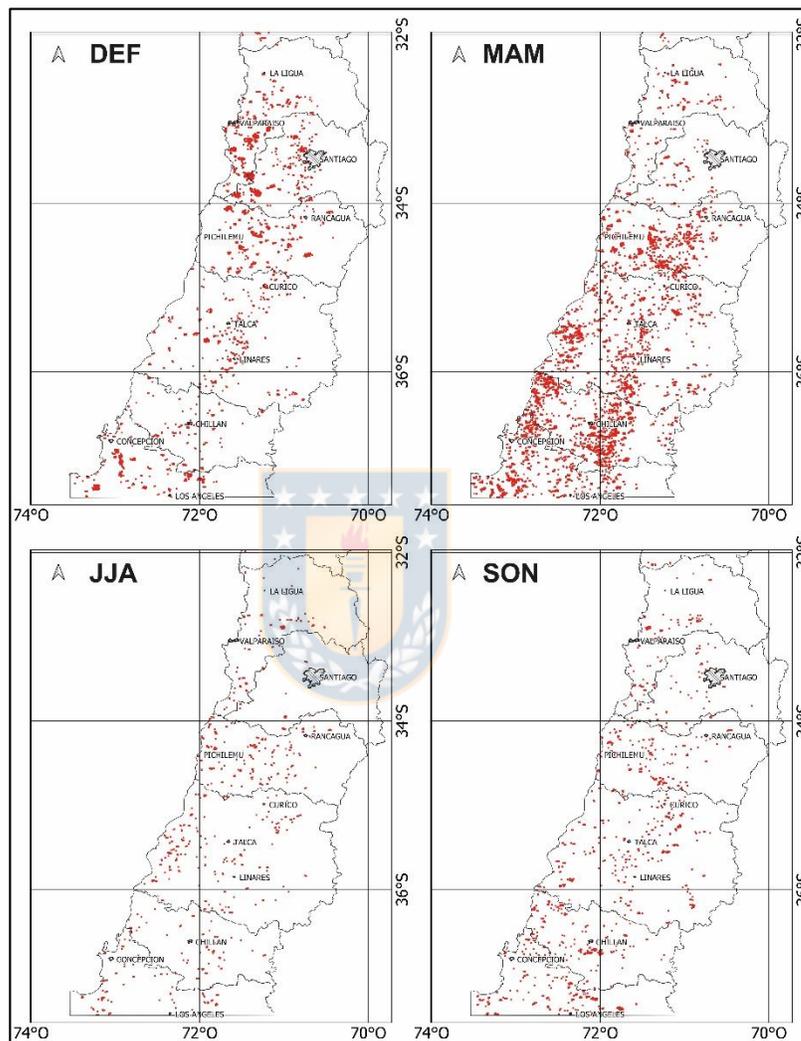


Figura 4.4. Focos de incendios MCD14ML en el área de estudio.

Para el análisis, estos datos se filtraron de acuerdo al tipo de foco inferido correspondiente a la categoría 'presumiblemente incendios forestales' ($type = 0$), y una confianza de detección ($confidence$) ≥ 30 , que incluye a píxeles de incendios nominales y de alta confianza, valores sugeridos para disminuir las falsas

alarmas (GIGLIO et al. 2018). Para situar temporalmente los datos se utiliza la fecha de la primera detección. En la Tabla 4.5 se detallan algunos de los descriptores de la base de datos.

Tabla 4.5. Descriptores de base de datos MODIS Collection 6 (GIGLIO et al. 2018).

Atributo	Descripción corta	Descripción larga
Latitude Longitude	Latitude Longitude	Center of 1km fire pixel but not necessarily the actual location of the fire as one or more fires can be detected within the 1km pixel.
Brightness	Brightness temperature 21 (Kelvin)	Channel 21/22 brightness temperature of the fire pixel measured in Kelvin.
Scan	Along Scan pixel size	The algorithm produces 1km fire pixels but MODIS pixels get bigger toward the edge of scan. Scan and track reflect actual pixel size.
Track	Along Track pixel size	The algorithm produces 1km fire pixels but MODIS pixels get bigger toward the edge of scan. Scan and track reflect actual pixel size.
Acq_Date	Acquisition Date	Data of MODIS acquisition.
Acq_Time	Acquisition Time	Time of acquisition/overpass of the satellite (in UTC).
Satellite	Satellite	A = Aqua and T = Terra.
Confidence	Confidence (0-100%)	This value is based on a collection of intermediate algorithm quantities used in the detection process. It is intended to help users gauge the quality of individual hotspot/fire pixels. Confidence estimates range between 0 and 100% and are assigned one of the three fire classes (low-confidence fire, nominal-confidence fire, or high-confidence fire).
Version	Version (Collection and source)	Version identifies the collection (e.g. MODIS Collection 6) and source of data processing: Near Real-Time (NRT suffix added to collection) or Standard Processing (collection only). "6.0NRT" - Collection 6 NRT processing. "6.0" - Collection 6 Standard processing. Find out more on collections and on the differences between FIRMS data sourced from LANCE FIRMS and University of Maryland .
Bright_T31	Brightness temperature 31 (Kelvin)	Channel 31 brightness temperature of the fire pixel measured in Kelvin.
FRP	Fire Radiative Power (MW - megawatts)	Depicts the pixel-integrated fire radiative power in MW (megawatts).
Type	Inferred hot spot type	0 = presumed vegetation fire 1 = active volcano 2 = other static land source 3 = offshore
DayNight	Day or Night	D= Daytime fire, N= Nighttime fire

4.3 Implementación del PFI

Para implementar el modelo en Python 2.7 se utilizaron las salidas de WRF horarias listadas en la Tabla 4.6, y los paquetes netCDF4 y numpy.

Tabla 4.6. Variables y horario UTC utilizados como input.

Variable WRF	Horario UTC	Descripción	Unidad
RAINCL	12:00:00	Accumulated total cumulus precipitation	mm
RAINNC	12:00:00	Accumulated total grid scale precipitation	mm
T2	18:00:00	Temperature at 2 m	K
P	18:00:00	Perturbation pressure	Pa
PB	18:00:00	Base state pressure	Pa
QVAPOR	18:00:00	Water vapor mixing ratio	kg kg ⁻¹

Los datos de precipitación entregados por WRF corresponden a la precipitación acumulada y están divididos en dos variables: RAINCL y RAINNC, las cuales se suman para luego obtener los valores diarios. La humedad relativa diaria máxima se calculó según las ecuaciones 5, 6 y 7 ^{3,4}:

$$ES = 10 * 0,6112e^{(17,67 * \frac{T2-273,15}{T2-29,65})} \quad (5)$$

$$QVS = \frac{0,622 * ES}{(0,01P_{tot} - (1 - 0,622) * ES)} \quad (6)$$

$$RH = 100 * \left(\frac{QV}{QVS}\right) \quad (7)$$

³ https://wrf-python.readthedocs.io/en/latest/user_api/generated/wrf.rh.html

⁴ https://www.ncl.ucar.edu/Support/talk_archives/2012/1161.html

Donde **ES** es un factor de temperatura, **QVS** corresponde a un factor integrado de presión P_{tot} ($P_{tot} = P + P_B$) y temperatura T_2 , y **RH** es la humedad relativa, calculada a partir de la presión de vapor Q_V y el factor Q_{VS} .

Luego de extraer y calcular todas las variables, se simuló el PFI para el período histórico 2002-2005 y los períodos futuros 2046-2050 y 2091-2100. Dado que el PFI entrega resultados diarios, se calculan los promedios estacionales (DEF, MAM, JJA y SON) de cada píxel para los tres períodos.

4.4 Validación del PFI

Para validar el modelo se filtraron los focos de incendios MCD14ML presentes en el área de estudio, y se calcularon las estadísticas espaciales de la presencia de dichos focos en cada uno de los niveles de peligro del PFI (categorías). Para ello, se determinó el número de píxeles por categoría, el número de píxeles con incendios en cada categoría, el número de focos de incendios por categoría y los porcentajes asociados a cada uno de estos valores. Además, se calculó el promedio de focos por píxel de cada categoría y la desviación estándar de dicho promedio. Todos estos cálculos se realizaron en QGIS.

4.5 Variaciones altitudinales de PFI

Para comparar la distribución altitudinal de cada nivel de peligro de PFI para cada uno de los períodos en estudio se cruzó la información de altitud y nivel de peligro de cada píxel, para luego obtener los *boxplot* del cada ráster resultante. Estos procesos se realizaron en QGIS.

5. RESULTADOS

A continuación, se presenta el reporte de resultados de peligro estacional de incendios forestales en la ZCSCCh (32°-38°S) estimado con el modelo PFI.

En todos los períodos y estaciones se reconoce una zonificación en dos franjas norte-sur que coinciden con el macrorrelieve de la zona de estudio: una franja oriental (FO_r) que coincide con la cordillera de los Andes (grandes elevaciones, bajas temperaturas y mayores precipitaciones) y donde predomina PFI_b, especialmente al norte de los 36°S, al sur de esta latitud, el peligro tiende a aumentar en DEF y MAM debido a la disminución de altitudes y aumento de la cobertura vegetal; y una franja occidental (FO_{cc}) que coincide con el Valle Central y la Cordillera de la Costa (menores elevaciones y precipitaciones, mayores temperaturas) en la que predominan niveles de peligro más altos (PFI_{med}, PFI_a y/o PFI_c dependiendo de la estación). En el Anexo se presentan una compilación del PFI y sus variaciones altitudinales para todas las estaciones y los 3 períodos en estudio.

5.1 PFI en verano (DEF)

Al comparar los resultados de PFI del período 2002-2005 con la distribución de focos de incendios MCD14ML se obtiene que el 35,52% del total de píxeles poseen focos de incendios (Figura 5.1). De ellos, PFI_{med} concentra el 38,28% de los focos de incendios con 0,47 focos promedio por píxel (fpp), seguido de PFI_b con el 33,07% (0,35 fpp) y PFI_a con el 18,79% de ellos (0,97 fpp). Las categorías

más extremas, PFI_{min} y PFI_c, concentran el 9,77% (0,71 fpp) y 0.09% (0,5 fpp) de los focos de incendio respectivamente. Por lo tanto, Las categorías PFI_{med}, PFI_a y PFI_c albergan al 57,16% de los focos de incendios ocurridos en DEF entre 2002-2005.

Tabla 5.1. Estadísticas de validación del PFI 2002-2005 para DEF.

DEF	Total de pixeles		Píxeles con focos de incendios		Focos de incendios		Focos por píxel	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Promedio	Dev. Std.
PFI _{min}	80	6,49	43	3,49	221	9,77	0,71	1,66 E-15
PFI _b	576	46,72	143	11,60	748	33,07	0,35	1,36 E-14
PFI _{med}	466	37,79	190	15,41	866	38,28	0,47	1,88 E-14
PFI _a	110	8,92	61	4,95	425	18,79	0,97	1,03 E-14
PFI _c	1	0,08	1	0,08	2	0,09	0,50	0
Total	1233	100,00	438	35,52	2262	100,00		

En cuanto a la distribución espacial, en 2002-2005 el PFI se correlaciona bastante bien con la ubicación histórica de focos de incendios. En FOr, predomina PFI_b mientras que en FOcc domina PFI_{med} y PFI_h, mientras que PFI_{min} disminuye de norte a sur (Figura 5.1). Al sur de los ~36°S se observa un aumento del peligro de incendios forestales (PFI_{med}) en FOr.

En el período 2046-2050, los valores de PFI en FOr se mantienen similares al período anterior (Figura 5.1). Por el contrario, en FOcc se reconoce un aumento general del peligro evidenciado por una mayor presencia de PFI_a, especialmente al norte del área de estudio, en que se reconoce una concentración o cúmulo de alto peligro a los ~33,5°S, en el límite entre las regiones de Valparaíso y

Metropolitana. También ocurre una migración del PFI_{\min} hacia el sur, siendo más abundante al sur de los 35°S aproximadamente.

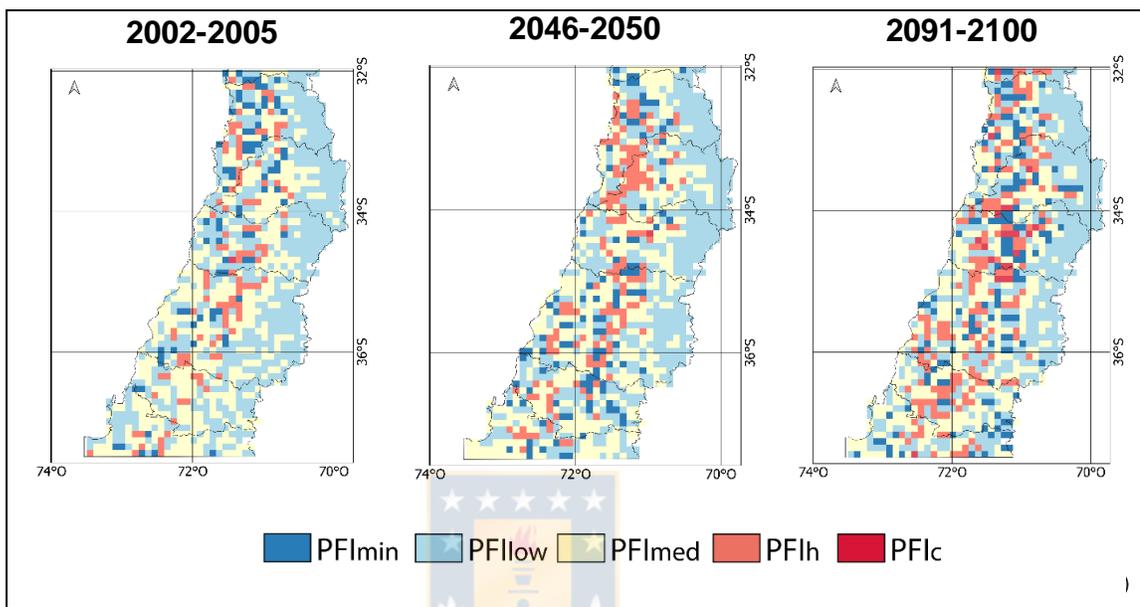


Figura 5.1. Promedio estacional de PFI en verano (DEF) para los tres períodos en estudio.

Estadísticamente, ocurre una leve disminución del número de píxeles PFI_b y PFI_{med} que aportan al aumento de PFI_a (Tabla 5.2), lo que reafirmaría el aumento de la susceptibilidad ambiental en FOcc para mediados del siglo XXI. Los píxeles PFI_{med} se mantienen similares en número respecto del período anterior.

Tabla 5.2. Número y porcentaje de píxeles en DEF por categoría de PFI, para cada período.

<i>Píxeles DEF</i>	<i>2002-2005</i>		<i>2046-2050</i>		<i>2091-2100</i>	
	<i>Nº</i>	<i>%</i>	<i>Nº</i>	<i>%</i>	<i>Nº</i>	<i>%</i>
PFI_{\min}	80	6,49	106	8,60	140	11,35
PFI_b	576	46,72	515	41,77	485	39,33
PFI_{med}	466	37,79	458	37,15	398	32,28
PFI_a	110	8,92	153	12,41	189	15,33
PFI_c	1	0,08	1	0,08	21	1,70
Total	1233	100,00	1233	100,00	1233	100,00

Para finales de siglo (2091-2100), disminuyen los píxeles PFI_b y PFI_{med} , y un aumento de PFI_{min} , PFI_a y PFI_c (Tabla 5.2), evidenciando un aumento sostenido en el tiempo de estas tres categorías en paralelo al aumento de temperatura y disminución de precipitaciones que se esperan para finales de siglo (DGF, 2006; CR2, 2018; Capítulo 4.2.1.1). Cabe destacar que en 2002-2005 todas las categorías de PFI poseen incendios, por lo que un aumento de las zonas PFI_{min} en la franja occidental, en el siglo XXI, no implica necesariamente una disminución de este fenómeno, pues el gatillante principal en Chile es la actividad humana, sin embargo, podría indicar una menor probabilidad de que se gatillen incendios en esas zonas. En cuanto a la distribución espacial, los valores bajos de PFI_b en FO disminuyen tanto hacia el oriente como hacia el sur, mientras que aumenta la presencia de PFI_{med} y PFI_{min} , e incluso se observan algunos píxeles de PFI_a . En este período ya no se observa el cúmulo de alto peligro a los $\sim 33,5^\circ S$, sin embargo, se reconoce una mayor concentración de zonas de PFI_a , PFI_{med} y PFI_c , a los $\sim 34,5^\circ S$.

Al analizar la distribución de las altitudes según categoría de peligro para cada período, se reconoce que el PFI_b posee una mayor dispersión de los datos y una mayor cantidad de datos extremos, llegando el máximo hasta los ~ 4.500 m lo que se asocia con su presencia ubicua en toda el área de estudio (Figura 5.2). En cuanto a las otras categorías, estas poseen promedios bajo los 1.000 m de altitud, rangos intercuartiles entre 200 y 2.000 m aproximadamente, mínimos desde los

0 m y máximos que varían entre ~500 m (PFI_c) y ~2.500 m (PFI_{med}) en los tres períodos.

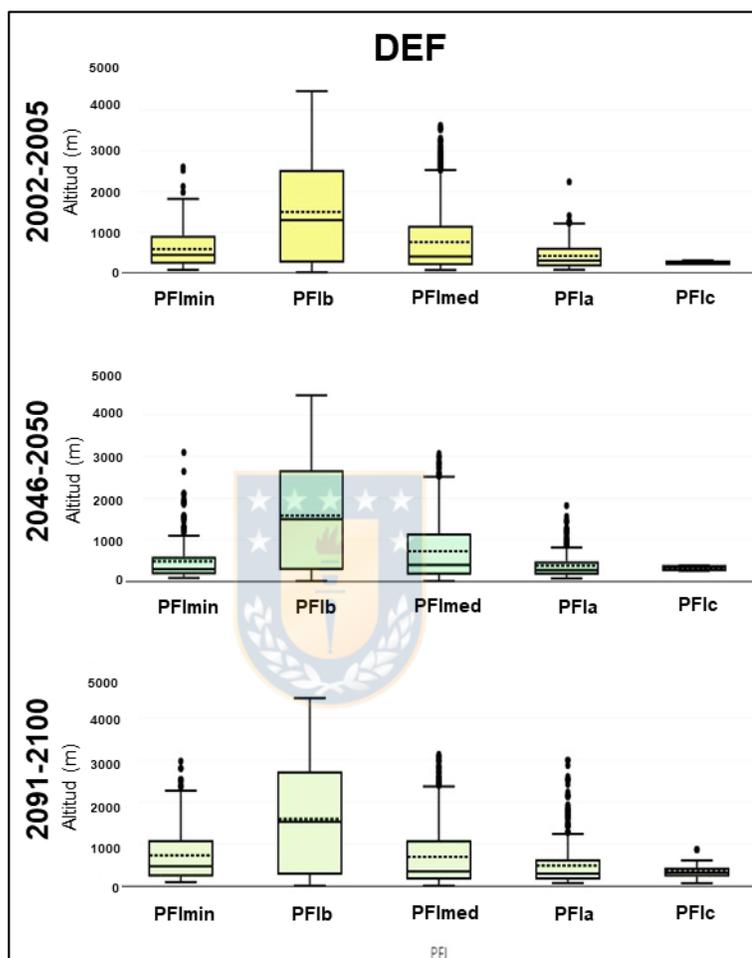


Figura 5.2. Boxplot de altitud (m) según niveles de PFI en DEF para los períodos en estudio. Promedio: línea punteada; Mediana: línea continua.

A mediados de siglo, PFI_{min} presenta una disminución de los máximos y del rango intercuartil, lo que implica una concentración de esta categoría hacia menores altitudes (occidente del área de estudio), que luego vuelven a aumentar en 2091-2100. En los tres períodos esta categoría presenta *outliers* que llegan hasta los

3.000 m de altitud. PFI_{med} tiene un comportamiento más estable en el tiempo, con medias, rangos intercuartiles, máximos y outliers similares, aunque en el período 2002-2005 éstos últimos alcanzan mayores altitudes (~3.800 m). La distribución de altitudes de PFI_a es bastante similar en los tres períodos, aunque se reconoce un aumento de outliers en mayores altitudes hacia mediados y finales del siglo XXI, lo que indicaría un aumento del peligro hacia el oriente del área de estudio, derivado de un aumento en la susceptibilidad ambiental. Finalmente, el PFI_c posee una distribución muy acotada dada la poca cantidad de píxeles, pero también se concentran en menores altitudes.

5.2 PFI en otoño (MAM)

En el período de validación 2002-2005, ocurre un aumento tanto del número de incendios (4.709) como de la cantidad de píxeles que poseen incendios (55,15%) (Tabla 5.3), con respecto a la temporada anterior DEF. Además, PFI_b alberga el mayor número de focos (63,75%) seguido por PFI_{med} (34,74%), que en conjunto poseen el 98,49% de los focos de incendios MCD14ML, con 1,26 y 1,46 incendios promedio por píxel respectivamente. Esto puede deberse a que en abril termina la restricción de quemas (período de quemas controladas estrictas), que inicia el 01 de diciembre del año anterior (Decreto N° 276/1980). La ausencia de píxeles PFI_c y la baja cantidad de PFI_a se puede relacionar con la disminución de temperaturas en esta estación, así como con la ocurrencia de algunas lluvias previas al invierno al sur del área de estudio.

Tabla 5.3. Estadísticas de validación del PFI 2002-2005 para MAM.

Píxeles MAM	Total de píxeles		Píxeles con focos de incendios		Focos de incendios		Focos por píxel	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Promedio	Dev. Std.
PFI_{min}	36	2,92	22	1,78	69	1,47	0,68	4,46 E-16
PFI_b	817	66,26	414	33,58	3002	63,75	1,26	1,04 E-14
PFI_{med}	376	30,49	243	19,71	1636	34,74	1,48	3,02 E-14
PFI_a	4	0,32	1	0,08	2	0,04	0,16	0
PFI_c	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0
Total	1233	100,00	680	55,15	4709	100,00		

En cuanto a la distribución espacial (Figura 5.3), los píxeles PFI_{min} y PFI_a se concentran en FOcc al norte de los 34°S. Hacia el sur domina el PFI_{med} mezclado con PFI_b, lo que indica una disminución estacional de la susceptibilidad ambiental a la ocurrencia de incendios forestales respecto de la temporada anterior, lo cual se condice con las estadísticas nacionales históricas. Además, se reconoce una mayor concentración de PFI_{med} en el límite entre FOcc y FOOr. En FOOr se mantiene la predominancia de PFI_b.

A mediados de siglo, en FOcc, aumenta PFI_a al norte, reconociéndose nuevamente el cúmulo de los ~33,5°S que aparecía en DEF, aunque con una mayor presencia de PFI_{med} que PFI_a, evidenciando la disminución estacional de la susceptibilidad ambiental. Aumenta la presencia de PFI_{min} hacia el sur de los 34°S y disminuye PFI_b, esto último contribuye al aumento del PFI_{min}, PFI_{med} y PFI_a (Tabla 5.4). Respecto a FOOr, se puede ver un aumento de PFI_{med} en su límite occidental, así como al sur de los 36°S. El aumento de PFI_{med} en 2046-2050

implica una mayor homogenización de esta categoría de peligro en el área de estudio.

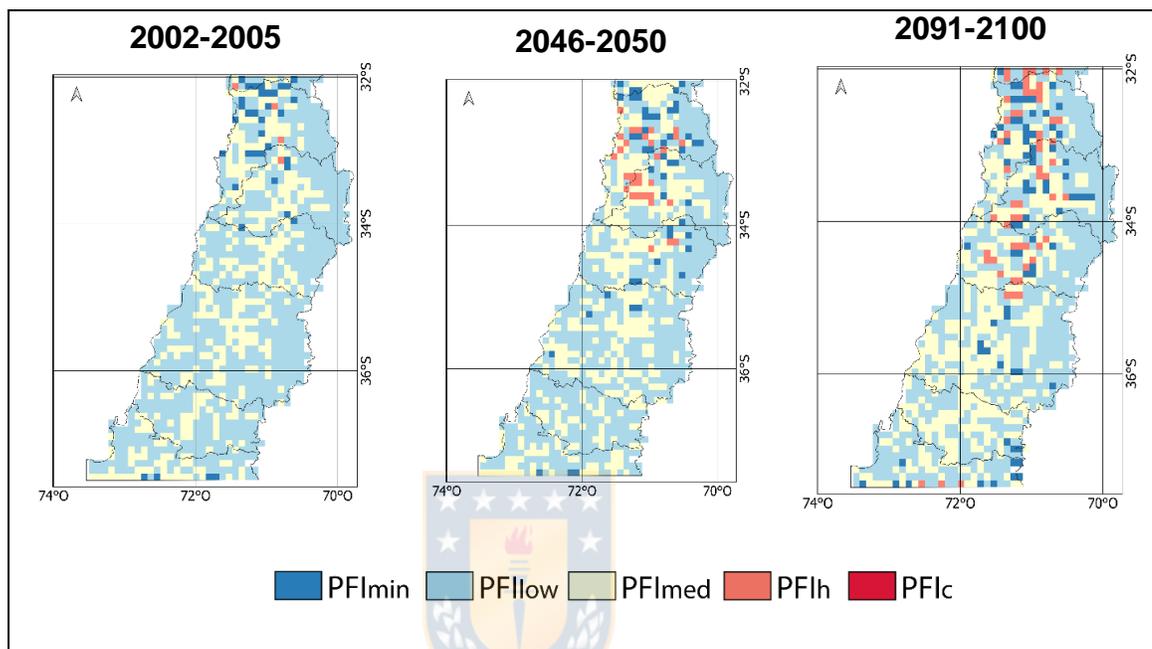


Figura 5.3. Promedio estacional de PFI en otoño (MAM) para los tres períodos en estudio.

Tabla 5.4. Número y porcentaje de píxeles en MAM por categoría de PFI, para cada período.

<i>Píxeles</i> <i>MAM</i>	<i>2002-2005</i>		<i>2046-2050</i>		<i>2091-2100</i>	
	<i>Nº</i>	<i>%</i>	<i>Nº</i>	<i>%</i>	<i>Nº</i>	<i>%</i>
PFI_{min}	36	2.92	50	4.06	74	6.00
PFI_b	817	66.26	732	59.37	663	53.77
PFI_{med}	376	30.49	420	34.06	439	35.60
PFI_a	4	0.32	31	2.51	57	4.62
PFI_c	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Total	1233	100.00	1233	100.00	1233	100.00

En 2091-2100, aumenta PFI_{min}, PFI_a y PFI_c (Tabla 5.4) especialmente al norte de los 35°S. Este aumento ocurre solo en la franja occidental pues la oriental mantiene sus valores bajos hasta los 36°S aproximadamente. La distribución de

las diferentes categorías de peligro en 2091-2100 indican una mayor susceptibilidad ambiental a la ocurrencia de incendios forestales en la franja occidental al norte de los 36°S, y la continuación de la homogenización de PFI_{med} .

Respecto a la distribución de altitudes (Figura 6.5), se observa que el PFI_{min} aumenta sus rangos intercuartiles con el tiempo, pero mantiene promedios cercanos a los 900 m de altitud. Al igual que la temporada anterior, en MAM el PFI_b es la categoría que presenta un mayor rango intercuartil, lo que indica una distribución más amplia en el área de estudio, llegando el máximo a los ~4.500 m de altitud. En este caso la media y la mediana son más distantes, y se mantienen relativamente similares a lo largo del tiempo. A su vez, PFI_{med} posee un rango intercuartil entre 200 y 1.000 m aproximadamente, que supera levemente los 1.000 m de altitud en 2046-2050. Los valores máximos varían en torno a los 2.000 m y posee un gran número de outliers que corresponden a aquellos píxeles ubicados en la franja oriental, preferentemente al sur de los 36°S. Finalmente, PFI_a se acota a altitudes aún más bajas que las categorías mencionadas anteriormente, aunque sus medias son bastante similares a las de PFI_{med} ; sus valores máximos aumentan en 2046-2050 y se mantienen en 2091-2100, períodos en los que además aparecen outliers representantes de FOR.

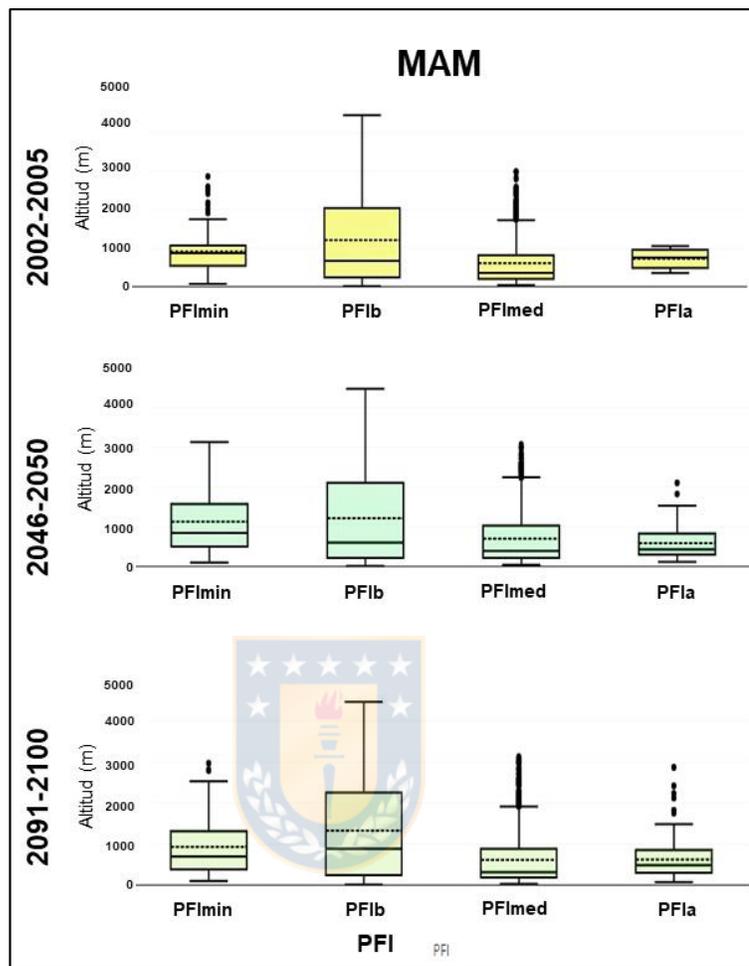


Figura 5.4. Boxplot de altitud (m) según niveles de PFI en MAM para los períodos en estudio. Promedio: línea punteada; Mediana: línea continua.

5.3 PFI en invierno (JJA)

La temporada invernal (JJA) en la ZCSCCh es la temporada con menor ocurrencia de incendios forestales, lo que se condice con el total de focos MCD14ML (724), que es el menor de los cuatro analizados, al igual que el porcentaje de píxeles con incendios (24,01%) (Tabla 5.5). En este caso, menos del 10% de los píxeles en el área de estudio pertenecen a PFI_{min} y PFI_{med}, este último con 0,43 focos

promedio por píxel. Por el contrario, PFI_b concentra el 86,88% de los focos de incendios, pero solo posee 0,19 focos promedio por píxel, lo que podría indicar focos aislados y bien distribuidos en el área de estudio, dado que representan el 90,92% del total de píxeles.

Tabla 5.5. Estadísticas de validación del PFI 2002-2005 para JJA.

JJA	Total de píxeles		Píxeles con focos de incendios		Focos de incendios		Focos por píxel	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Promedio	Dev. Std.
PFI _{min}	38	3,08	0	0,00	0	0,00	0	0
PFI _b	1121	90,92	269	21,82	629	86,88	0,19	5,08 E-15
PFI _{med}	74	6,00	27	2,19	95	13,12	0,43	1,39 E-15
PFI _a	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0
PFI _c	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0
Total	1233	100,00	811	24,01	724	100,00		

Las zonas de PFI_{min} se concentran en FOr, al norte de los 34°S (Figura 5.5). El PFI_{med} se ubica al norte de los ~36°S en FOcc reconociéndose un pequeño cúmulo en la costa de la Región de Valparaíso (~33°S). El resto del área está cubierto por zonas PFI_b, aumentando su presencia de norte a sur, lo que se puede relacionar con la distribución de las precipitaciones (temperaturas) en el área de estudio, que aumentan (disminuyen) de norte a sur.

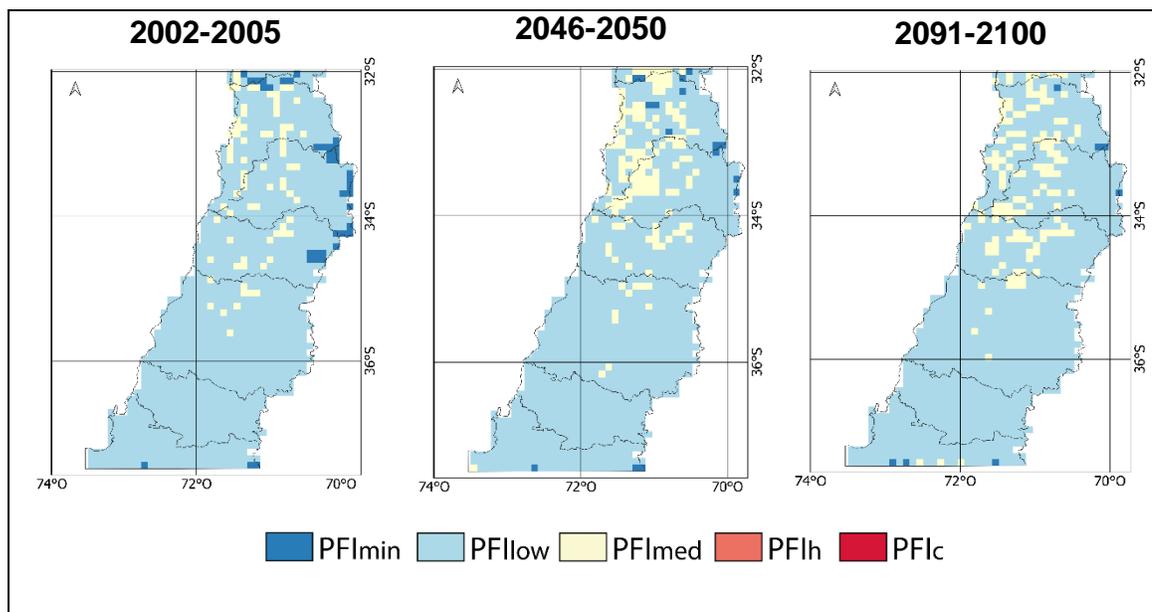


Figura 5.5. Promedio estacional de PFI en invierno (JJA) para los tres períodos en estudio.

A mediados del siglo XXI (2046-2050), disminuye PFI_b y PFI_{min} , y aumenta PFI_{med} (Tabla 5.6) especialmente al norte del área de estudio, reconociéndose nuevamente el cúmulo en la costa de la Región de Valparaíso y otro a los $\sim 33,5^\circ S$, en el límite entre las Regiones de Valparaíso y Metropolitana (Figura 6.6b). Paralelamente, en la franja oriental disminuyen las zonas PFI_{min} pues pasan a PFI_b , lo que indica un aumento de la susceptibilidad ambiental. Se mantiene la tendencia de aumento del PFI_b hacia el sur.

En 2091-2100 disminuye PFI_{min} y PFI_{med} , lo que contribuye al aumento del PFI_b (Tabla 5.6). PFI_{med} nuevamente se concentra al norte de los $36^\circ S$, evidenciando una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de incendios forestales al occidente y

centro de las Regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins, aunque ya no se observa el cúmulo de lo $\sim 33,5^{\circ}\text{S}$ del período anterior (Figura 5.5).

Tabla 5.6. Número y porcentaje de píxeles en JJA por categoría de PFI, para cada período.

Píxeles JJA	2002-2005		2046-2050		2091-2100	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%
PFI_{min}	38	3,08	16	1,30	7	0,57
PFI_b	1121	90,92	1080	87,59	1093	88,65
PFI_{med}	74	6,00	137	11,11	133	10,79
PFI_a	0	0,00	0	0,00	0	0,00
PFI_c	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Total	1233	100,00	1233	100,00	1233	100,00

En cuanto a la distribución de altitudes (Figura 6.7), estas muestran un aumento del rango intercuartil de PFI_{min} respecto DEF y MAM, en altitudes entre 2.000 y 4.000 m en 2002-2005. Asimismo, en 2046-2050 disminuye el promedio, que luego aumenta en menor proporción hacia finales de siglo. Los mínimos y máximos se mantienen prácticamente constantes a lo largo del tiempo. PFI_b mantiene rangos intercuartiles bastante similares en los tres períodos (entre ~ 200 y ~ 2.000 m), al igual que los mínimos, máximos e incluso los outliers, mientras que el promedio aumenta en el tiempo. Por su parte, PFI_{med} se distribuye entre los ~ 200 m y 1.000 m. El máximo aumenta de ~ 1.000 m en 2002-2005 a ~ 2.000 m en 2046-2050 y se mantiene similar en 2091-2100 aunque con más outliers, evidenciando nuevamente el aumento del peligro en FOr hacia finales de siglo. Por último, las medias aumentan en 2046-2050, pero disminuyen levemente en 2091-2100, eso sí, sin llegar al valor promedio de 2002-2005.

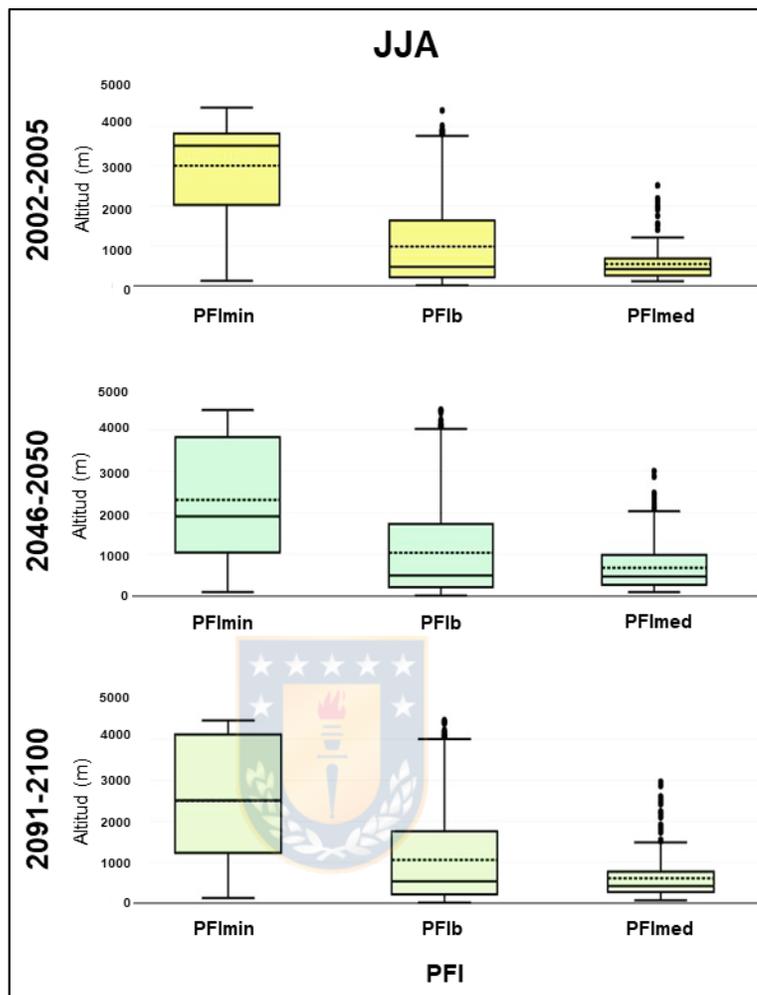


Figura 5.6. Boxplot de altitud (m) según niveles de PFI en JJA para los períodos en estudio. Promedio: línea punteada; Mediana: línea continua.

5.4 PFI en primavera (SON)

SON, al igual que JJA, solo posee PFI_{min} (0,81%), PFI_b (72,91%) y PFI_{med} (26,28%) (Tabla 5.7). De dichos píxeles, solo el 32,20% posee incendios, repartiéndose un 57,49% en PFI_b y un 42,43% en PFI_{med} con 0,56 y 0,28 incendios promedio por píxel, respectivamente.

Tabla 5.7. Estadísticas de validación del PFI 2002-2005 para SON.

SON	Total de píxeles		Píxeles con focos de incendios		Focos de incendios		Focos por píxel	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Promedio	Dev. Std.
PFI _{min}	10	0,81	1	0,08	1	0,08	0,03	1,41 E-17
PFI _b	899	72,91	150	12,17	733	57,49	0,56	5,99 E-15
PFI _{med}	324	26,28	246	19,95	541	42,43	0,28	1,18 E-14
PFI _a	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0
PFI _c	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0
Total	1233	100,00	397	32,20	1275	100,00		

En 2002-2005, PFI_{med} se concentra en FO_{cc}, especialmente al este de ella, mientras que PFI_b domina en FO_r (Figura 5.7). La distribución norte-sur del PFI_{med} es similar a la de DEF y MAM, aunque se reconoce un cúmulo entre los 35°S y 36°S (Región del Maule).

En 2046-2050 hay un importante aumento del PFI_{med} (Tabla 5.8) en FO_{cc}, reconociéndose nuevamente el cúmulo de los ~33,5°S de las temporadas anteriores, y también una alta concentración a los ~35,5°S. PFI_b disminuye considerablemente y PFI_{min} aumenta; además, aparecen dos píxeles PFI_a al norte del área de estudio. FO_r se mantiene similar al 2002-2005, pero con unos pocos píxeles PFI_{med} a los ~34°S y ~36°S.

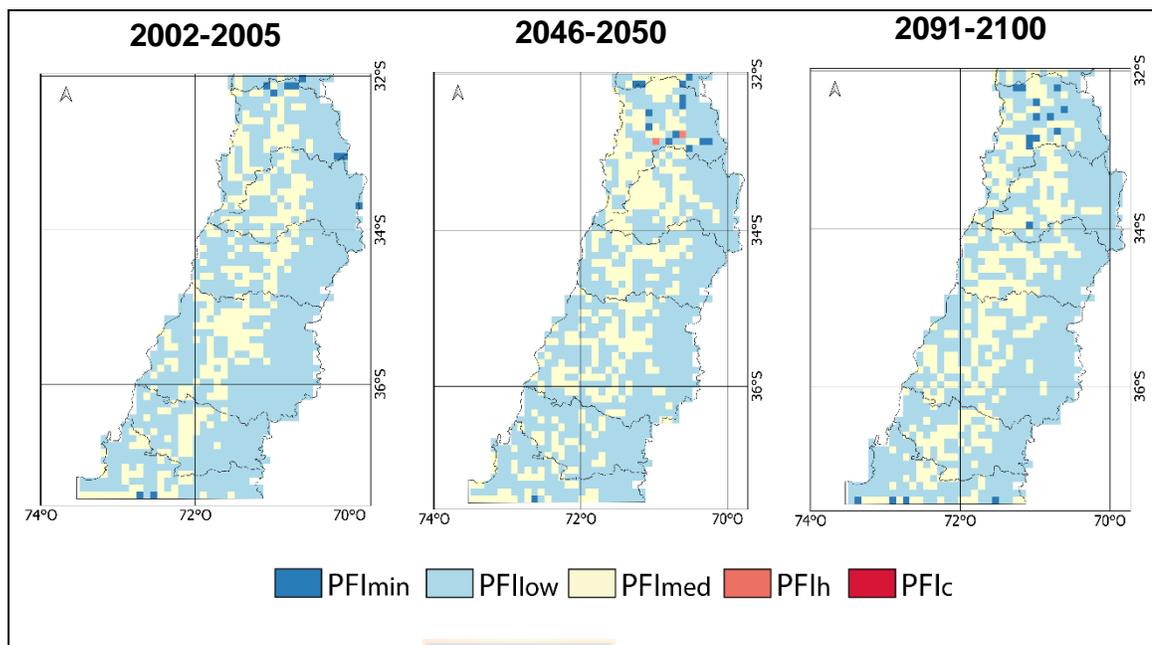


Figura 5.7. Promedio estacional de PFI en primavera (SON) para los tres períodos en estudio.

Tabla 5.8. Número y porcentaje de píxeles en SON por categoría de PFI, para cada período.

Píxeles SON	2002-2005		2046-2050		2091-2100	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%
PFI _{min}	10	0,81	14	1,14	16	1,30
PFI _b	899	72,91	832	67,48	848	68,78
PFI _{med}	324	26,28	385	31,22	369	29,93
PFI _a	0	0,00	2	0,16	0	0,00
PFI _c	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Total	1233	100,00	1233	100,00	1233	100,00

En 2091-2100, al norte de FOcc desaparece PFI_a y aumenta levemente PFI_{min} (Figura 5.7). PFI_{med} disminuye sutilmente (29,93%) respecto de 2046-2050 y PFI_b aumenta casi en la misma proporción (Tabla 5.8). Además, se reconoce un aumento del PFI_{med} al sur de los ~36°S contribuyendo a una homogenización de este nivel de peligro a esas latitudes. FOr se mantiene similar al periodo anterior.

Los *boxplot* de altitudes de 2002-2005 son, en general, similares a los de JJA, aunque el rango intercuartil de PFI_{\min} es más amplio en SON (Figura 5.8). Las medias de esta misma categoría disminuyen en el tiempo desde altitudes cercanas a los 2.000 m hasta ~1.000 m, al igual que los rangos intercuartiles y los máximos. En 2091-2100, donde los rangos son más acotados, aparecen *outliers* de altitudes mayores a los 2.000 m. El rango intercuartil de PFI_b va de ~500 m a ~2.000 m (al igual que en MAM y JJA), las medias son bastante similares en los tres periodos (~1.200 m) al igual que los máximos, indicando nuevamente que la franja oriental diferenciada en los mapas de PFI representa un bajo porcentaje del área de estudio, pues el 50% de los valores ocurre a altitudes más bajas. Por último, PFI_{med} posee los rangos intercuartiles más acotados, variando entre ~100 m y ~1.000 m, lo cual tiene sentido dada su distribución preferencial en el Valle Central. Cabe destacar la gran cantidad de *outliers*, que representan la presencia de niveles medios de peligro en FOr. Los dos píxeles de PFI_a que solo aparecen en 2046-2050, tienen una distribución de altitudes bastante acotada, en torno a los 1.000 m.

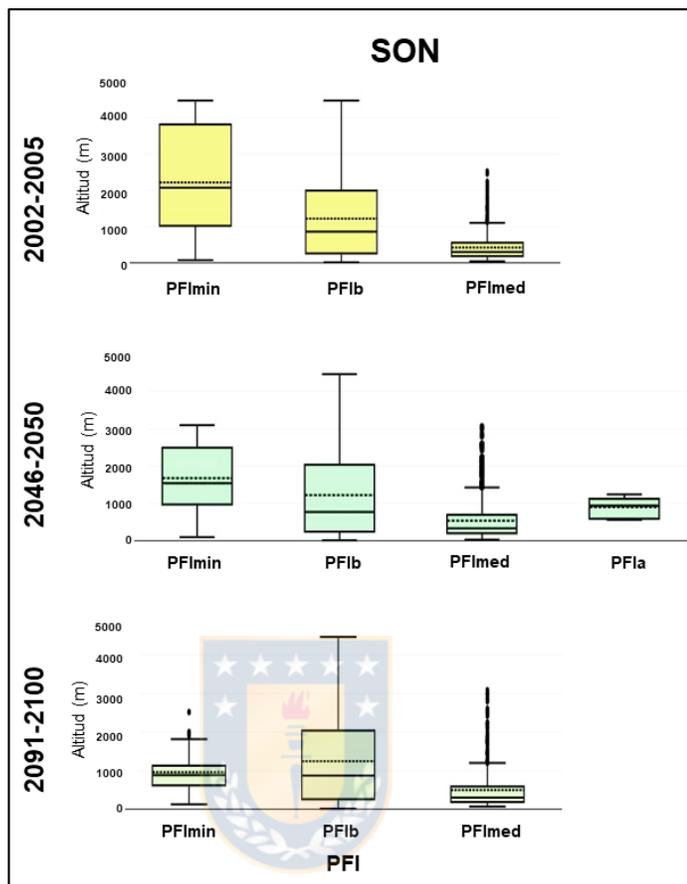


Figura 5.8. Box plot de altitud (m) según niveles de PFI (Tabla 5.4) para SON en los períodos 2002-2005, 2046-2050 y 2091-2100; promedio: línea punteada y mediana: línea continua.

6. DISCUSIÓN

El daño ocasionado por los incendios forestales depende de las características propias del medio, como son las condiciones climáticas, la estructura de la vegetación y la topografía, sin embargo, también depende de la disponibilidad de recursos para el control de ellos y su funcionamiento efectivo (CONAF, 2010).

Desde hace algunas décadas, la Tierra ha ingresado a una era de rápidos cambios ambientales que han resultado en condiciones sin precedentes, por lo que aceptar que el futuro será diferente del pasado y el presente, nos forzará a mirar nuevos horizontes en el manejo de los bosques (MILLAR et al. 2007). Es así que los fuertes impactos que generan los incendios forestales en las sociedades humanas y en las funciones ecosistémicas, han despertado un gran interés en tratar de entender los *drivers* ambientales y sus efectos, especialmente en el contexto de cambio climático antropogénico (MORITZ et al. 2012).

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren un comportamiento de la distribución espacial del peligro estrechamente relacionado con los principales rasgos del macrorrelieve de la zona de estudio, así como con las características climáticas. Por una parte, se reconoce una franja occidental (FOcc) asociada a la Cordillera de la Costa y Valle Central, caracterizada por menores elevaciones (que disminuyen de este a oeste), mayores temperaturas y precipitaciones que aumentan de norte a sur en invierno. Por otra, se observa una franja oriental (FOr) asociada a la Cordillera de los Andes y caracterizada por las mayores

elevaciones de la ZCSCCh, menores temperaturas y mayor cantidad de precipitaciones. FOcc se caracteriza por poseer mayores niveles de peligro (PFI_{med} , PFI_a y/o PFI_c , dependiendo de la estación) que disminuyen de norte a sur, mientras que en FOr predominan valores bajos de peligro (PFI_b) en todas las estaciones, aunque al sur de los $\sim 36^\circ S$ aumenta el peligro (PFI_{med}); esto se ha asociado a la disminución de las altitudes y aumento de la cobertura vegetal.

Tendencias similares reconoce JULIO (1990) al estimar zonas de riesgo de incendios forestales para Chile (32° - $43^\circ S$) entre 1985-1988 a una resolución de 610 km^2 y basado en variables climáticas, vegetacionales, topográficas y antrópicas. El autor reconoce una zonificación en tres franjas norte-sur relacionadas con el macrorrelieve, con un mayor riesgo en algunas zonas costeras, alto riesgo en la mayoría de las zonas situadas en el Valle Central, y riesgo notablemente bajo en la Precordillera y Cordillera Andina. Además, identifica un mayor riesgo al norte del área de estudio que disminuye progresivamente hacia el sur.

Al evaluar la capacidad predictiva del PFI en el período histórico 2002-2005 mediante la comparación con los focos de incendio MDC14ML, los resultados sugieren una buena correlación entre las diferentes categorías de peligro y la distribución de incendios en cada una de ellas. El mejor desempeño se obtuvo para DEF, con el $\sim 57\%$ de los focos en PFI_{med} , PFI_a y PFI_c . En las demás temporadas, dado que las temperaturas son menores y las precipitaciones

aumentan, la susceptibilidad ambiental tiende a disminuir y PFI_b es el nivel de peligro más abundante. Esto implica que más del 50% de los focos de incendios estén en dicha categoría, mientras que el resto se asocia con PFI_{med} . Sin embargo, esto no necesariamente indica un mal desempeño del modelo puesto que la mayoría de los incendios forestales en la ZCSCh son causados por los humanos, lo que implica que estos puedan ocurrir en zonas de baja susceptibilidad ambiental. Además, CONAF posee un período estricto de quemas controladas que va de diciembre del año anterior hasta abril, por lo que después de ese período hay más libertades para la realización de quemas, lo que podría influir en el número de focos de incendios detectados por MODIS. Sin embargo, la utilidad de la estimación del PFI radica en que se pueden evidenciar zonas más susceptibles a la ocurrencia de incendios forestales, y que efectivamente en las estaciones donde la actividad del fuego ha sido históricamente mayor, la susceptibilidad es mucho más homogénea de norte a sur, lo que permite inferir una mayor facilidad para la propagación del fuego y, por ende, para la ocurrencia de megaincendios. Especialmente si se considera que en la última década (2010-2017), la superficie afectada por incendios forestales ha aumentado considerablemente en todos los meses respecto del período 2002-2009 (Figura 2.2b).

En cuanto a las proyecciones de peligro para el siglo XXI, los resultados sugieren que, en general, el peligro de incendios forestales en la ZCSCh, principal bioma mediterráneo en Sudamérica, aumentará para mediados del siglo XXI (2046-

2050), tendencias que se mantendrán o aumentarán e finales de siglo (2091-2100). Además, se reconoce que la distribución en franjas N-S y sus tendencias generales se mantienen. En todos los períodos y estaciones modeladas, PFI_b es la categoría más abundante, sin embargo, al analizar la distribución de altitudes se puede ver que los mayores niveles de peligro se concentran en la franja occidental y que cuando aumentan su presencia hacia el oriente, en FOr, estos suelen quedar representados como outliers. En FOcc, DEF es la estación con mayores niveles de peligro, seguida por MAM, la cual posee una predominancia de PFI_{med} y presencia de PFI_a solo al norte de los ~35°S, los que aumentan continuamente en el tiempo y de norte a sur. SON se caracteriza por poseer solo PFI_{med} y JJA presenta niveles medios de peligro solo al norte de los ~36°S. Cabe destacar que en 2046-2050 ocurre un cúmulo de niveles medios y/o altos de peligro (dependiendo de la estación) a los ~33,5°S, en el límite entre las regiones de Valparaíso y Metropolitana.

Estos resultados se pueden comparar con estudios cuyo enfoque también ha sido determinar la variación del peligro de incendios forestales en el mundo, y especialmente en zonas mediterráneas, similares al Centro-Sur de Chile.

A escala global, MORITZ et al. (2012) evalúa la magnitud y dirección del cambio en la probabilidad de incendios para el siglo XXI a escala global mediante un marco estadístico empírico junto a un ensamble multimodelo de 16 proyecciones GCM, forzadas con el escenario de emisiones A2 y métricas de producción

primaria neta (NPP por sus siglas en inglés) como datos de biomasa, a una resolución de 0,5°. Los autores establecen que la falta de fuego activo en un píxel no se considera condición suficiente para la ausencia estricta de la posibilidad de incendios, ya que dicho píxel puede compartir características ambientales con otras áreas propensas al fuego. Aunque en el corto plazo los modelos coinciden en la dirección de los cambios en un 50% de las tierras, la magnitud y la consistencia de las direcciones de los cambios aumentan sustancialmente hacia finales de siglo. Finalmente, reconocen que tanto en el corto como en el largo plazo los biomas mediterráneos, los matorrales xéricos y desérticos, y los bosques templados de coníferas al occidente de EEUU, así como las regiones secas en latitudes medias y el continente australiano, aumentarán su probabilidad de fuego en casi la totalidad de sus áreas.

A escala regional se han desarrollado proyecciones del peligro de incendios forestales para el siglo XXI con datos climáticos de RCM, pues contribuyen a disminuir las fuentes de incerteza generadas por la baja resolución de los GCM (ARCA et al. 2010), además de que, a escala global, la probabilidad de incendios forestales revela una tremenda heterogeneidad en los patrones futuros, así como en las variables impulsoras de los cambios (MORITZ et al. 2012). Es más, en Grecia y la Península Ibérica ya se ha comparado la aplicabilidad de RCM generados por *downscaling* dinámico (DD) versus *downscaling* estadístico (DE) en proyecciones del peligro de incendios forestales mediante el modelo FWI, concluyéndose que el DE puede ser aplicado exitosamente en la generación de

escenarios de peligro con resultados comparables a los obtenidos con DD (BEDIA et al. 2013). Sin embargo, aunque ambos resultados sugieren un aumento del peligro para mediados del siglo XXI, sus tendencias divergen hacia finales del mismo, por lo que indican que el uso de proyecciones para este último periodo, independientemente de la técnica de *downscaling* utilizada, deben ser utilizadas con precaución.

El *Canadian Fire Weather Index* (FWI) es uno de los modelos de incendios forestales más utilizados a nivel global y provee una representación empírica de las dinámicas de la humedad del combustible, así como de las condiciones meteorológicas, y se basa en la temperatura del aire, humedad relativa, precipitaciones acumuladas cada 24 horas y velocidad del viento (BEDIA et al. 2013; DUPUY et al. 2020; FARGEON et al. 2020; PEREIRA et al. 2020; SILVA et al. 2019). Si bien los índices que componen el FWI fueron calibrados empíricamente en un bosque de pinos jack de Canadá, se ha probado que este sistema funciona bien para regiones mediterráneas (BARBERO et al. 2019).

Al revisar proyecciones del peligro de incendios forestales bajo diferentes escenarios de cambio climático en países con climas mediterráneos, se reconocen tendencias similares a las obtenidas con el PFI para la ZCSCh. Algunas proyecciones muestran un aumento de la actividad del fuego en el sur de Europa, EEUU y algunas zonas de Canadá para el siglo XXI, sin embargo, aún falta evaluar las incertidumbres asociadas a esta tendencia regional para que

puedan contribuir a la toma de decisiones (DUPUY et al. 2020; FARGEON et al. 2020).

Por ejemplo, ARCA et al. (2012) analiza el impacto potencial del cambio climático en Italia para 2071-2100 mediante la aplicación del FWI con el RCM EBU-POM (resolución 25 km) y el escenario de cambio climático A1B SRES, y reconoce que aumentarán los promedios anuales de los parámetros asociados al peligro de incendios, confirmado por un aumento del FWI. Esto combinado con el aumento del número de días con condiciones extremas, podría causar un aumento en la probabilidad de ignición, asociándolo con la ocurrencia de incendios más grandes en las áreas en que estos fenómenos ocurren con frecuencia. Por su parte, FARGEON et al. (2020) evalúa el FWI en Francia bajo los escenarios de forzamiento radiativo RCP4.5 y RCP8.5 (EURO-CORDEX, resolución 50 km) y reconocen un aumento del índice (y por lo tanto del peligro de incendios forestales) en toda el área de estudio, pero especialmente en el área mediterránea (que además presentó las incertidumbres más bajas). Como conclusión sugieren que la proyección del FWI para mediados del siglo XXI sobresaldrá del *background* de la variabilidad natural con un verano tres veces más propenso a la ocurrencia de incendios forestales con aumentos de temperatura mayores a 2°C.

DUPUY et al. (2020) hace una revisión de 23 trabajos publicados entre el 2000 y 2019, sobre proyecciones del peligro de incendios forestales en diferentes

escenarios de cambio climático (resolución entre 12 km y 0,5°) y con distintos modelos de peligro en el sur de Europa que incluyen al FWI, modelos de fuego estadísticos-correlativos, modelos de propagación espacialmente explícitos y modelos dinámicos de vegetación global (DGVM por sus siglas en inglés). Aunque las características de los diferentes modelos los hacen difíciles de comparar, en general los resultados indican un aumento del peligro y extensión de la temporada de incendios forestales, así como aumentos del área quemada y del número de incendios. Además, destacan la importancia de contar con estándares para las proyecciones y métricas de fuego que permitan comparar de mejor manera estos resultados.

El aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones estimadas para el siglo XXI en la ZCSCCh (DGF, 2006; CR2, 2015; Capítulo 4.2.1.1), tendencias similares al resto de países de clima parecido, se ven reflejadas en el aumento del PFI en el tiempo, así como una mayor homogeneidad en el espacio de mayores niveles de peligro, especialmente al occidente del área de estudio. Esto sugiere una posible extensión de la temporada de incendios forestales, así como una mayor probabilidad de ocurrencia de incendios de magnitud para el siglo XXI pues podría contribuir a una mayor propagación y severidad de ellos. Esto se deriva a partir de que la ZCSCCh posee la mayor superficie de cobertura vegetal propensa al fuego (GONZÁLEZ et al. 2011; ÚBEDA & SARRICOLEA, 2016; DE LA BARRERA et al. 2018; McWETHY et al. 2018; GÓMEZ-GONZÁLEZ et al. 2018; GÓMEZ-GONZÁLEZ et al. 2019), junto con lo observado en la última

década en la misma zona: i) déficit de precipitaciones de un 20-30% denominado Megasequía (GONZÁLEZ et al. 2011; GARREAUD et al. 2017; GONZÁLEZ et al. 2018) y ii) aumento en la ocurrencia de megaincendios y de la superficie afectada por incendios forestales a nivel nacional (DE LA BARRERA et al. 2018; Figura 2.2b).

En esta misma década han ocurrido eventos extremos en California, Australia, Portugal, Grecia y Sudáfrica, con cientos de muertos y billones de dólares en pérdidas económicas (MOREIRA et al. 2020). Pero, a pesar de que hay muchos artículos que tratan el tema fuego-clima (*fire-weather*), solo un número relativamente pequeño de ellos discuten los impactos del cambio climático en el área quemada (ARCA et al. 2010). En diversos países se ha utilizado la supresión de los incendios forestales naturales como mecanismo de mitigación, sin embargo, en las últimas décadas se ha identificado que en el largo plazo, esta medida en ecosistemas mediterráneos ha propiciado un aumento en la propagación y severidad de los incendios forestales debido a la gran cantidad de combustible acumulado, junto con olas de calor más frecuentes y disminución de precipitaciones, por lo que se deben pensar nuevas estrategias de adaptación al cambio climático (BROTONS et al. 2013; HURTEAU et al. 2014; BARBERO et al. 2019; MOREIRA et al. 2020). BROTONS et al. (2013) denomina esta contradicción entre la supresión del fuego en el corto plazo y las extensas áreas quemadas en el largo plazo 'paradoja del fuego' (*fire paradox*), y señala que sería importante incluir en la predicción de incendios forestales (además de las

condiciones climáticas y la cobertura vegetal), las estrategias de supresión del fuego debido al impacto que tienen en los cambios de los regímenes de incendios, en especial en el estudio de escenarios futuros que incluyan el cambio climático. Por su parte, MOREIRA et al. (2020) denomina a esta paradoja como la 'trampa del combate del fuego' (*firefighting trap*) y sostiene que la evaluación de la efectividad de las políticas adoptadas en la gestión del problema de los incendios forestales en regiones de climas mediterráneos no debiese medirse en base al área total afectada (como es lo usual) sino más bien como una función de los daños y pérdidas socioecológicas evitadas.

Considerando todo lo anterior, se puede re-argumentar que, para la ZCSCCh, es necesario un “cambio de paradigma en el manejo y prácticas asociadas a las plantaciones productivas de rápido crecimiento [lo que] implica importantes desafíos políticos, institucionales y culturales” (GONZÁLEZ et al. 2011: 218) tanto para el Estado como para el sector forestal. No existe una única solución que abarque todos los desafíos futuros, por lo que la mejor estrategia es combinar diferentes enfoques que permitan integrar estrategias de adaptación (resistencia, resiliencia, y respuesta) y de mitigación (captura de carbono y reducción de la emisión de GEI) (MILLAR et al. 2007), es decir, una mirada integral, interdisciplinaria e intersectorial. Se requiere una visión multisectorial y la implementación de soluciones novedosas (como las estrategias de coexistencia utilizadas por plantas, animales y culturas indígenas), que se basen al menos en promover paisajes menos vulnerables y más resilientes, y en minimizar los

riesgos para los humanos e infraestructura (MOREIRA et al. 2020). Algunas propuestas de manejo de bosques (adaptación y mitigación) frente a un escenario de cambio climático y alta incertidumbre se pueden revisar en MILLAR et al. (2007) y MOREIRA et al. (2020).

Para profundizar en el análisis de los impactos del cambio climático en la ocurrencia de incendios forestales en la Zona Centro-Sur de Chile, se hace necesaria la comparación de estos resultados con los de otros modelos de peligro, así como la evaluación del mismo PFI con otros productos de cobertura vegetal o con otras proyecciones climáticas regionales.

6.1 Limitaciones del trabajo

Dado que la zona Centro-Sur de Chile alberga el 67,18% de las plantaciones forestales, el 17,61% de los bosques nativos y el 52,77% de los bosques mixtos a nivel nacional (CONAF, 2019d), y posee un paisaje de parches extensos, homogéneos y continuos de plantaciones (HEILMAYR et al. 2016; McWETHY et al. 2018) con menor resistencia al fuego que el bosque nativo (CONTERAS et al. 2017; DE LA BARRERA et al. 2018; McWETHY et al. 2018; GÓMEZ-GONZÁLEZ et al. 2018; GÓMEZ-GONZÁLEZ et al. 2019), la inclusión de estos tipos vegetacionales diferenciados en los modelos de incendios para la región mediterránea de Chile sería de gran valor (ALTAMIRANO et al. 2013; BROTONS et al. 2013; BARBERO et al. 2019; DUPUY et al. 2020; MOREIRA et al. 2020; PEREIRA et al. 2020). “El entendimiento de cómo los patrones del paisaje

determinan procesos específicos, tales como la ocurrencia de incendios forestales, es de gran importancia para la toma de decisiones en planes de ordenamiento territorial considerando el contexto económico y social” (ALTAMIRANO et al. 2013: 158) y pueden ser de gran utilidad en la gestión del manejo del fuego (ARCA et al. 2010).

Sin embargo, es en este aspecto que el presente trabajo posee limitaciones, ya que la clasificación vegetal utilizada por el modelo PFI (IGBP) no permite diferenciar entre plantaciones forestales exóticas y bosques nativos. Por otra parte, la cobertura vegetal utilizada en el presente trabajo, aunque se considera que está quedando obsoleta para las modelaciones de WRF (LI et al. 2020), se utiliza de igual forma de manera de evaluar el PFI lo más “crudamente” posible de manera de entregar un producto que permita evaluar la influencia de otras coberturas vegetales en el modelamiento con PFI en el futuro.

En el mundo, los impactos del cambio climático son desiguales pues afectan más a las poblaciones más vulnerables (IPCC, 2014), por lo que estimar cómo contribuirá el cambio climático al problema regional de los incendios forestales en Chile, en especial en la zona Centro-Sur (32°-38°S) incluyendo la variable de cobertura vegetal puede otorgar una perspectiva más integral para la gestión y planificación territorial que vaya orientada en disminuir los impactos y desigualdades de este fenómeno. La expansión de las plantaciones forestales ha estado definida por políticas nacionales y regionales amparadas bajo el modelo

económico neoliberal imperante, lo que ha traído como consecuencia conflictos entre la industria, las comunidades locales, organizaciones medioambientales y el Estado, además de una desigualdad en los impactos de los incendios forestales asociados a ellas (HEILMAYIR et al. 2014; CID AGUAYO, 2015; HEILMAYIR et al. 2020). Es así que la ZCSCh se vuelve un escenario interesante para evaluar si la modificación antrópica del paisaje tiene impactos reconocibles en el peligro de incendios forestales, y abre la interrogante de si esta modificación del paisaje pudiera ser considerada como una variable antropogénica (por ejemplo, MANN et al. 2016) en el estudio del peligro de incendios forestales y sus proyecciones futuras, particularmente luego de que los resultados obtenidos en esta tesis apuntan a una homogenización de la susceptibilidad ambiental.

Por último, es importante mencionar que la Región de la Araucanía, inmediatamente al sur del área de estudio, es una de las regiones más afectadas por incendios forestales a nivel nacional (13,4% del total nacional entre 1985-2017; CONAF, 2019a), posee el 38,5% de su superficie cubierta con plantaciones forestales (CONAF, 2019d) además de una serie de conflictos socioambientales relacionados a este tema (ÚBEDA & SARRICOLEA et al. 2016), y el 23,6% de su población se encuentra en situación de pobreza (MDS, 2017). Por lo tanto, incluirla en futuros análisis de este tipo es fundamental.

7. CONCLUSIONES

Ante un escenario de cambio climático global que necesita ser enfrentado con políticas sociales, económicas y ambientales de mitigación y adaptación, el problema de los incendios forestales en la ZCSCCh se constituye como un riesgo sacionatural que involucra importantes decisiones políticas, pero también posee un alto grado de incertidumbre.

Las proyecciones de cambio climático utilizadas en este trabajo sugieren para mediados del siglo XXI (2046-2050) una disminución de las precipitaciones diarias promedio en todas las estaciones para la ZCSCCh (32°-38°S), con valores específicos de -7,6% en DEF, -28,6% en MAM, -28,5% en JJA y -36,2% en SON, lo que sugiere condiciones más secas para este periodo. Para finales del siglo XXI (2091-2100) la precipitación diaria promedio aumentará +30% en DEF, +35,3% en JJA, +10,7% en SON y disminuirá -6,2% en MAM, respecto de 2046-2050. Al comparar los periodos 2002-2005 y 2091-2100, las precipitaciones disminuirán un -30% en MAM y SON, y un -3% en JJA aproximadamente, mientras que aumentarán cerca de un +20% en DEF.

En cuanto a las temperaturas, las proyecciones sugieren un aumento de la temperatura diaria promedio mínima y máxima en cerca de 1°C y 2°C respectivamente, en 2046-2050. Para finales de siglo, se estima que las temperaturas máximas aumentarán entre 1,4°C y 1,9°C, y las temperaturas mínimas aumentarán entre 2,0°C y 2,6°C, con los mayores incrementos en JJA.

Al comparar el período 2002-2005 y 2091-2100, las temperaturas máximas aumentarán entre 2,5°C y 3,0°C, mientras que la temperatura mínima aumentará más de 3,5°C, con los mayores incrementos en MAM y JJA (+4.4°C).

Los resultados de la estimación del PFI arrojan una clara zonificación de la susceptibilidad ambiental a la ocurrencia de incendios forestales en dos franjas norte-sur, una occidental que abarca las zonas costeras, Cordillera de la Costa y Valle Central (occidente y centro del área de estudio), y una franja oriental limitada por la Cordillera de los Andes y la Precordillera (oriente del área de estudio). Estos rasgos morfológicos se correlacionan a su vez con las temperaturas medias, que aumentan de oeste a este, y las altitudes que, a grosso modo, disminuyen hacia el oeste.

La zonificación en franjas N-S del PFI se correlaciona bastante bien con la ocurrencia de incendios forestales en el período de validación 2002-2005, representados por el producto de focos activos MODIS MCD14ML. La franja occidental, que presenta los valores más altos de peligro en todas las estaciones, es la que alberga la mayoría de los focos. El PFI en la franja oriental no varía considerablemente en las diferentes estaciones, manteniendo una dominancia bajos niveles de peligro en todas ellas. La franja occidental varía según las estaciones y, por ende, de acuerdo a la distribución de temperaturas (precipitaciones) medias estacionales, las cuales disminuyen (aumentan) de norte a sur.

En 2002-2005, DEF es la estación más susceptible a la ocurrencia de incendios forestales con los mayores niveles de peligro. Le siguen MAM y SON en que predominan niveles medios de peligro, y finalmente JJA, la cual posee niveles medios de peligro al norte de los $\sim 36^{\circ}\text{S}$. Estas variaciones se condicen con la actividad histórica de incendios forestales en Chile.

Hacia mediados de siglo (2046-2050), las tendencias espaciales y estacionales se mantienen, sin embargo, se observa un aumento de valores altos de peligro en DEF y MAM, y de valores medios en SON y JJA, lo que indica un aumento de la susceptibilidad ambiental, especialmente al norte del área de estudio. En DEF, MAM y SON aparece un cúmulo de alto y medio peligro a los $\sim 33,5^{\circ}\text{S}$ (Cordillera de la Costa entre las regiones de Valparaíso y Metropolitana).

En 2091-2100 aumenta el peligro en todas las estaciones, manteniendo la distribución general de los períodos anteriores. El aumento del peligro en DEF, MAM y SON se traduce en una mayor homogeneidad del peligro en la franja occidental. El cúmulo de los $\sim 33,5^{\circ}\text{S}$ desaparece en este período.

La presencia de focos de incendios MCD14ML en todas las categorías de peligro en 2002-2005 se puede asociar a la gran influencia del factor humano en la ocurrencia de incendios forestales en Chile. Esto es especialmente preocupante al considerar las proyecciones de homogenización del peligro en la franja occidental pues podría relacionarse con una mayor probabilidad de ocurrencia de

megaincendios en el futuro en DEF, MAM y SON, así como la extensión de la temporada de incendios.

La distribución de altitudes (*boxplot*) sugieren un aumento del peligro de incendios forestales hacia el oriente del área de estudio en 2046-2050 y 2091-2100, especialmente en DEF y MAM, evidenciado por la mayor presencia de *outliers* en dichas categorías.

Los resultados de este trabajo indican un cambio generalizado hacia regímenes climáticos más propensos a la ocurrencia de incendios en zonas que concentran la mayoría de los centros poblados en el área de estudio, además de las plantaciones forestales y las zonas agrícolas.

Para disminuir la incertidumbre y mejorar la consistencia de las proyecciones del peligro de incendios forestales en el siglo XXI y el impacto del cambio climático en la ZCSCh se requiere complementar estos resultados con otros modelos de incendios, así como testarlos con otros RCM disponibles y otras coberturas vegetacionales. Además, se sugiere que en futuros análisis de este tipo se incorpore a la Región de la Araucanía, pues presenta características similares a las regiones estudiadas en el presente trabajo.

Se considera que este trabajo aporta en expandir el estudio del peligro de incendios forestales en la Zona Centro-Sur de Chile, principal zona mediterránea en Sudamérica, ante un contexto de cambio climático y desde una perspectiva regional de largo plazo, además de abrir muchas interrogantes en cuanto a la

influencia de la cobertura vegetal nativa y las plantaciones forestales exóticas pirófitas en los modelos de peligro de incendios forestales. La incorporación de proyecciones del peligro al análisis del problema de los incendios forestales para el desarrollo de políticas públicas, es una herramienta que puede contribuir al mencionado cambio de paradigma, como ha demostrado su utilización cada vez más creciente en otras regiones mediterráneas del planeta.



8. BIBLIOGRAFÍA

- ADAB, H., DEVI KANNIAH, K., & SOLAIMANI, K. (2013). Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, 65, 1723–1743. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>
- ALTAMIRANO, A., SALAS, C., YAITUL, V., SMITH-RAMIREZ, C., & ÁVILA, A. (2013). Influencia de la heterogeneidad del paisaje en la ocurrencia de incendios forestales en Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande*, 55, 157–170.
- ARCA, B., SALIS, M., PELLIZZARO, G., BACCIU, V., SPANO, D., DUCE, P., AGER, A. A. & FINNEY, M. A. (2010). Climate change impact on fire probability and severity in Mediterranean areas. VI International Conference on Forest Fire Research, 1–9. https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2010_arca_b001.pdf
- ARCA, B., PELLIZZARO, G., DUCE, P., SALIS, M., BACCIU, V., SPANO, D., FINNEY, M. A. & SCOCCIMARRO, E. (2012). Potential changes in fire probability and severity under climate change scenarios in Mediterranean areas. In *Modelling Fire Behaviour and Risk* (pp. 92–98).
- ARCHIBALD, S., LEHMANN, C. E. R., GÓMEZ-DANS, J. L., & BRADSTOCK, R. A. (2013). Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(16), 6442–6447. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211466110>
- ARROYO, L. A., PASCUAL, C., & MANZANERA, J. A. (2008). Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 256, 1239–1252. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.048>
- BASCUÑÁN, F. (2007). Modernización forestal y percepción medio ambiental: nacimiento y la empresa INFORSA 1975-2005. Informe de Seminario para optar al Grado de Licenciado en Ciencias Históricas, Departamento de Ciencias Históricas, Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad de Chile. 119 pp.
- BARBERO, R., CURT, T., GANTEAUME, A., MAILLÉ, E., JAPPIOT, M., & BELLET, A. (2019). Simulating the effects of weather and climate on large wildfires in France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(2), 441–454. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-441-2019>
- BEDIA, J., HERRERA, S., MARTÍN, D. S., KOUTSIAS, N., & GUTIÉRREZ, J. M. (2013). Robust projections of Fire Weather Index in the Mediterranean

- using statistical downscaling. *Climatic Change*, 120(1–2), 229–247.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0787-3>
- BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL (BCN). (2020). Nueva región de Ñuble. Recuperado de <https://www.bcn.cl/siit/actualidad-territorial/nueva-region-de-nuble>
- BOZKURT, D., ROJAS, M., BOISIER, J. P., RONDANELLI, R., GARREAUD, R., & GALLARDO, L. (2019). Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest South America: present climate conditions and added value analysis. *Climate Dynamics*, 53(11), 6745–6767.
<https://doi.org/10.1007/s00382-019-04959-y>
- BROTONS, L., AQUILUÉ, N., DE CÁCERES, M., FORTIN, M. J., & FALL, A. (2013). How Fire History, Fire Suppression Practices and Climate Change Affect Wildfire Regimes in Mediterranean Landscapes. *PLoS ONE*, 8(5), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062392>
- CARRILLO GARCÍA, R. L., RODRÍGUEZ TREJO, D. A., TCHIKOUÉ, H., MONTERROSO RIVAS, A. I., & SANTILLAN PÉREZ, J. (2012). Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia*, 37(9), 678–683.
- CASTILLO, M., PEDERNERA, P., & PEÑA, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA*, XIX (3 y 4), 44–53. Recuperado de www.tierramerica.net
- CASTILLO SOTO, M., & GARFIAS SALINAS, R. (2010). Estudio del comportamiento del fuego mediante simulación de incendios forestales en Chile. *Geographicalia*, 58, 81–103.
https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.201058818
- CASTILLO SOTO, M., GARFÍAS SALINAS, R., JULIO ALVEAR, G., & CORREA JIMÉNEZ, L. (2013). Incendios forestales en Chile. Análisis general de riesgos. In *Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos. Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo* (pp. 667–678).
<https://www.riscos.pt/publicacoes/outras-publicacoes/outras/riscos-naturais-antropicos-e-mistos-homenagem-ao-professor-doutor-fernando-rebelo/>
- CASTILLO SOTO, M., JULIO-ALVEAR, G., & GARFIAS SALINAS, R. (2015). Current Wildfire Risk Status and Forecast in Chile: Progress and Future Challenges. In *Wildfire Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 59–75).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410434-1.00004-X>

- CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA (CR2). (2018). Informe Final Proyecto "Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad." 105 pp.
- CHUVIECO, E., MARTÍN, M. P., MARTÍNEZ, J., & SALAS, F. J. (1998). Geografía e incendios forestales. *Serie Geográfica*, 7(7), 11–17.
- CHUVIECO, E., AGUADO, I., YEBRA, M., NIETO, H., MARTÍN, M. P., VILAR, L., MARTÍNEZ, J., PADRÓN, D., MARTÍN, S. & SALAS, J. (2007). Cartografía del peligro de incendios forestales mediante Teledetección y SIG. In Martín (Ed.), *Teledetección - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional* (pp. 19–26).
- CID AGUAYO, B. E. (2015). Economías campesinas, industria forestal e incendios: inestabilidad socionatural y la agricultura como resistencia. *Ambiente & Sociedade*, XVIII(1), 99–120. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31738340007%0A>
- COEN, J. L., CAMERON, M., MICHALAKES, J., PATTON, E. G., RIGGAN, P. J., & YEDINAK, K. M. (2013). WRF-Fire: Coupled weather-wildland fire modeling with the weather research and forecasting model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 16–38. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-023.1>
- CONAF. (2010). Los grandes incendios forestales en Chile 1985-2009. 79 pp.
- CONAF. (2014). Plantaciones y pobreza en comunas forestales forestación y estilo de desarrollo. Departamento de la Gerencia Forestal, CONAF. 78 pp.
- CONAF. (2016). Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV) Chile. 242 pp.
- CONAF. (2017). Análisis de la Afectación y Severidad de los Incendios Forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 sobre los usos de suelo y los ecosistemas naturales presentes entre las regiones de Coquimbo y La Araucanía de Chile. Santiago, Chile. 56 pp.
- CONAF. (2019a). Estadísticas históricas de incendios forestales en Chile. Recuperado de <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/> y consultado en 2019.
- CONAF. (2019b). Incendios forestales. Recuperado de <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/> y consultado en 2019.
- CONAF. (2019c). DL 701 y sus reglamentos. Recuperado de <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/plantaciones-forestales/dl-701-y-sus-reglamentos/> y consultado en 2019.

- CONAF. (2019d). Catastro vegetacional. Recuperado de <http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/> y consultado en 2019.
- CONAF. (2019e). Índice de humedad de combustible fino muerto. Recuperado de <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/indice-de-humedad-del-combustible-fino-muerto/> y consultado en 2019.
- CONAF. (2019f). Índice de probabilidad de ignición. Recuperado de <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/indice-de-probabilidad-de-ignicion/> y consultado en 2019.
- CONTRERAS, A., FUENTES, A., CONTRERAS, F., & CONTRERAS, M. J. (2018). Caracterización de Bosques Nativos que Presentaron Resistencia al fuego en el Megaincendio de la Región del Bio-Bío de Chile. *Cadernos de Agroecología*, 13, 1–5.
- CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA (CR2). (2015). Informe a la Nación “La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro.” Retrieved from www.cr2.cl/megasequia
- CR2. (2018). Informe Final Proyecto “Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad”. FONDAP 1511009, Universidad de Chile, 105 p.
- DACRE, H. F., CRAWFORD, B. R., CHARLTON-PEREZ, A. J., LOPEZ-SALDANA, G., GRIFFITHS, G. H., & VICENCIO VELOSO, J. (2018). Chilean Wildfires Probabilistic Prediction, Emergency Response, and Public Communication. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(11), 2259–2274. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0111.1>
- DELGADO LE, MARÍN VH. (2017). Incendios en el Sur de Chile: un problema posnormal. *Comentarios. Laboratorio de Modelación Ecológica, Universidad de Chile (Ensayo)*. http://antar.ciencias.uchile.cl/wp-content/uploads/2016/09/Comentario_2.pdf
- DE LA BARRERA, F., BARRAZA, F., FAVIER, P., RUIZ, V., & QUENSE, J. (2018). Megafires in Chile 2017: Monitoring multiscale environmental impacts of burned ecosystems. *Science of the Total Environment*, 637–638, 1526–1536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.119>
- DEL HOYO, L. V., MARTÍN ISABEL, M. P., & MARTÍNEZ VEGA, J. (2008). Empleo de técnicas de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendio forestal a escala regional. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, (47), 5–29.

- DECRETO N° 276/1980 del Ministerio de Agricultura, Reglamento sobre roce a fuego. Diario Oficial de la República de Chile, 13 de mayo de 2016. Recuperado de <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1090321> en junio de 2020.
- DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA UNIVERSIDAD DE CHILE (DGF). (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. In Informe para CONAMA. 63 pp.
- DÍAZ-HORMAZÁBAL, I., & GONZÁLEZ, M. E. (2016). Spatio-temporal analyses of wildfires in the region of Maule, Chile. *Bosque*, 37(1), 147–158. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100014>
- DUPUY, J. LUC, FARGEON, H., MARTIN-STPAUL, N., PIMONT, F., RUFFAULT, J., GUIJARRO, M., HERNANDO, C., MADRIGAL, J., & FERNANDES, P. (2020). Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review. *Annals of Forest Science*, 77(2). <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5>
- ETXEBERRIA RAMÍREZ, P., BRAZAOLA ROJO, A., & EDESO FITO, J. M. (2002). Cartografía de peligro de incendios forestales mediante sistemas de información geográfica y modelos de propagación. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, 1–10.
- FARGEON, H., PIMONT, F., MARTIN-STPAUL, N., DE CACERES, M., RUFFAULT, J., BARBERO, R., & DUPUY, J. L. (2020). Projections of fire danger under climate change over France: where do the greatest uncertainties lie? *Climatic Change*, 160(3), 479–493. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02629-w>
- FERNÁNDEZ, A., SCHUMACHER, V., CIOCCA, I., RIFO, A., MUÑOZ, A., & JUSTINO, F. (2020). Validation of a 9-km WRF dynamical downscaling of temperature and precipitation for the period 1980-2005 over Central South Chile. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-020-03416-9>
- FUENZALIDA, H., VILLAGRAN, C., BERNAL, P., FUENTES, E., SANTIBAÑEZ, F., PEÑA, H., MONTECINO, V., HAJEK, E. & RUTLLANT, J. (1989). Cambio climático global y eventuales efectos en Chile. *Ambiente y Desarrollo*, V(2), 37–42.
- FUNTOWICZ, S. O., & RAVETZ, J. R. (1993). Science for the post-normal age. *Futures*, 25(7), 735–755.
- GARREAUD, R. D. (2011). Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro-INIA*, (93), 14. Retrieved from <http://www.dgf.uchile.cl/rene>

- GARREAUD, R. D., ALVAREZ-GARRETON, C., BARICHIVICH, J., PABLO BOISIER, J., CHRISTIE, D., GALLEGUILLOS, M., LEQUESNE, C., MCPHEE, J. & ZAMBRANO-BIGIARINI, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- GILGIO, L., SCHROEDER, W., HALL, J. V. & JUSTICE, C. O. (2018). MODIS Collection 6 active fire product user's guide revision B. NASA. 64 p. <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/c6-mcd14d1>
- GÓMEZ-GONZÁLEZ, S., OJEDA, F., & FERNANDES, P. M. (2018). Portugal and Chile: Longing for sustainable forestry while rising from the ashes. *Environmental Science and Policy*, Vol. 81, pp. 104–107. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.006>
- GÓMEZ-GONZÁLEZ, S., GONZÁLEZ, M. E., PAULA, S., DÍAZ-HORMAZÁBAL, I., LARA, A., & DELGADO-BAQUERIZO, M. (2019). Temperature and agriculture are largely associated with fire activity in Central Chile across different temporal periods. *Forest Ecology and Management*, 433, 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.041>
- GONZÁLEZ, M. E., LARA, A., URRUTIA, R., & BOSNICH, J. (2011). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42°S). *Bosque*, 32(3), 215–219. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300002>
- GONZÁLEZ, M. E., GÓMEZ-GONZÁLEZ, S., LARA, A., GARREAUD, R., & DÍAZ-HORMAZÁBAL, I. (2018). The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(8), 1–17. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2300>
- GONZÁLEZ, M.E., SAPIAINS, R., GÓMEZ-GONZÁLEZ, S., GARREAUD, R., MIRANDA, A., GALLEGUILLOS, M., JACQUES, M., PAUCHARD, A., HOYOS, J., CORDERO, L., VÁSQUEZ, F., LARA, A., ALDUNCE, P., DELGADO, V., ARRIAGADA, UGARTE, A.M., SEPÚLVEDA, A., FARÍAS, L., GARCÍA, R., RONDANELLI, R. J., PONCE, R., VARGAS, F., ROJAS, M., BOISIER, J.P., C., CARRASCO, LITTLE, C., OSSES, M., ZAMORANO, C., DÍAZ-HORMAZÁBAL, I., CEBALLOS, A., GUERRA, E., MONCADA, M. & CASTILLO, I. (2020). Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile. www.cr2.cl/incendios

- GONZÁLEZ-REYES, Á., MCPHEE, J., CHRISTIE, D. A., QUESNE, C. LE, SZEJNER, P., MASIOKAS, M. H., VILLALBA, R., MUÑOZ, A., CRESPO, S. (2017). Spatiotemporal variations in hydroclimate across the Mediterranean Andes (30°-37°S) since the early twentieth century. *Journal of Hydrometeorology*, 18(7), 1929–1942. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0004.1>
- HEILMAYR, R., ECHEVERRÍA, C., FUENTES, R., & LAMBIN, E. F. (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, 75, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.014>
- HURTEAU, M. D., BRADFORD, J. B., FULÉ, P. Z., TAYLOR, A. H., & MARTIN, K. L. (2014). Climate change, fire management, and ecological services in the southwestern US. *Forest Ecology and Management*, 327, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.007>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). (2018). Síntesis de resultados Censo 2017. 27 pp.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland.
- IPCC. (2020). About the IPCC. Recuperado de www.ipcc.ch/about/
- JULIO, G. (1990). Diseño de índices de riesgo de incendios forestales para Chile. *Bosque*, 11(2), 59–72. <https://doi.org/10.4206/bosque.1990.v11n2-06>
- JUSTINO, F., DE MÉLO, A. S., SETZER, A., SISMANOGLU, R., SEDIYAMA, G. C., RIBEIRO, G. A., MACHADO, J. P. & STERL, A. (2011). Greenhouse gas induced changes in the fire risk in Brazil in ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. *Climatic Change*, 106, 285–302. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9902-x>
- LI, H., ZHANG, H., MAMTIMIN, A., FAN, S., & JU, C. (2020). A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model.
- MANN, M. L., BATLLORI, E., MORITZ, M. A., WALLER, E. K., BERCK, P., FLINT, A. L., FLINT, L. E. & DOLFI, E. (2016). Incorporating anthropogenic influences into fire probability models: Effects of human activity and climate change on fire activity in California. *PLoS ONE*, 11(4), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153589>
- MANDEL, J., BEEZLEY, J. D., & KOCHANSKI, A. K. (2011). Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF 3.3 and SFIRE 2011.

- Geoscientific Model Development, 4, 591–610.
<https://doi.org/10.5194/gmd-4-591-2011>
- MANDEL, J., AMRAM, S., BEEZLEY, J. D., KELMAN, G., KOCHANOSKI, A. K., KONDRATENKO, V. Y., LYNN, B. H., REGEV, B. & VEJMEKKA, M. (2014). Recent advances and applications of WRF-SFIRE. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 2829–2845. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2829-2014>
- MCWETHY, D. B., PAUCHARD, A., GARCÍA, R. A., HOLZ, A., GONZÁLEZ, M. E., VEULEN, T. T., STAHL, J. & CURREY, B. (2018). Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in south-central Chile. *PLoS ONE*, Vol. 13, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201195>
- MILLAR, C. I., STEPHENSON, N. L., & STEPHENS, S. L. (2007). Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications*, 17(8), 2145–2151.
- MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL (MDS). (2017). Informe de Desarrollo Social 2017. Recuperado de http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/pdf/upload/IDS2017_2.pdf en julio de 2020.
- MORAGA PERALTA, J. C. (2010). Evaluación del riesgo ante incendios forestales en la cuenca del Río Tempisque. *Revista Geográfica de América Central*, 2(45), 33–64. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451744669002%0A>
- MOREIRA, F., ASCOLI, D., SAFFORD, H., ADAMS, M. A., MORENO, J. M., PEREIRA, J. M. C., CATRY, F. X., BOND, W., GONZÁLEZ, M. E., CURT, T., KOUTSIAS, N., McCAW, L., PRICE, O., PAUSAS, J. G., RIGOLOT, E., STEPHENS, S., TAVSANOGLU, C., VALLEJO, R., VAN WILGEN, B. W., XANTHOPOULOS, G. & FERNANDES, P. M. (2020). Wildfire management in Mediterranean-type regions: Paradigm change needed. *Environmental Research Letters*, 15(1), 011001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab541e>
- MORITZ, M. A., PARIEN, M.-A., BATLLORI, E., KRAWCHUK, M. A., VAN DORN, J., GANZ, D. J., & HAYHOE, K. (2012). Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere*, 3(6), art49. <https://doi.org/10.1890/es11-00345.1>
- NACIONES UNIDAS. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Recuperado de <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>

- PALOMINO-LEMUS, R. (2015). Proyecciones de cambio climático para la precipitación en América tropical mediante técnicas de downscaling estadístico. Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Física, Universidad de Granada, Departamento de Física Aplicada. 216 pp. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10481/41555>
- PAUSAS, J. G., & KEELEY, J. E. (2009). A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life. *BioScience*, 59(7), 593–601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>
- PEREIRA, M. G., PARENTE, J., AMRAOUI, M., OLIVEIRA, A., & FERNANDES, P. M. (2020). The role of weather and climate conditions on extreme wildfires. In *Extreme Wildfire Events and Disasters* (pp. 55–72). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815721-3.00003-5>
- RESUMEN.CL. (2017). Megaincendio año nuevo Quillón 2012. Recuperado de <https://resumen.cl/articulos/a-6-anos-megaincendio-ano-nuevo-quillon-2012>
- SARRICOLEA, P., HERRERA-OSSANDON, M., & MESEGUER-RUIZ, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- SERTEL, E., ROBOCK, A., & ORMECI, C. (2009). Impacts of land cover data quality on regional climate simulations. *International Journal of Climatology*, 30(13), 1942–1953. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/joc.2036>
- SILVA, A. S. DA (2019). Aplicação do risco potencial de fogo da vegetação em escala global. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de Doctor Scientiae. 135 pp.
- SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., DUDHIA, J., GILL, D. O., BARKER, D. M., DUDA, M. G., HUANG, X., WANG, W., POWERS, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3.
- TORRES-ROJO, J. M., MAGAÑA-TORRES, O. S., & RAMÍREZ-FUENTES, G. A. (2007). Índice De Peligro De Incendios Forestales De Largo Plazo. *Agrociencia*, 41(6), 663–674.
- ÚBEDA, X., & SARRICOLEA, P. (2016). Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change*, Vol. 146, pp. 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.004>
- URRUTIA-JALABERT, R., GONZÁLEZ, M. E., GONZÁLEZ-REYES, Á., LARA, A., & GARREAUD, R. (2018). Climate variability and forest fires in central

and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(4).
<https://doi.org/10.1002/ecs2.2171>

VILCHIS-FRANCÉS, A. Y., DÍAZ-DELGADO, C., MAGAÑA-LONA, D., BÂ, K. M., & GÓMEZ-ALBORES, M. (2015). Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del Río Balsas. *Agrociencia*, 49, 803–820.

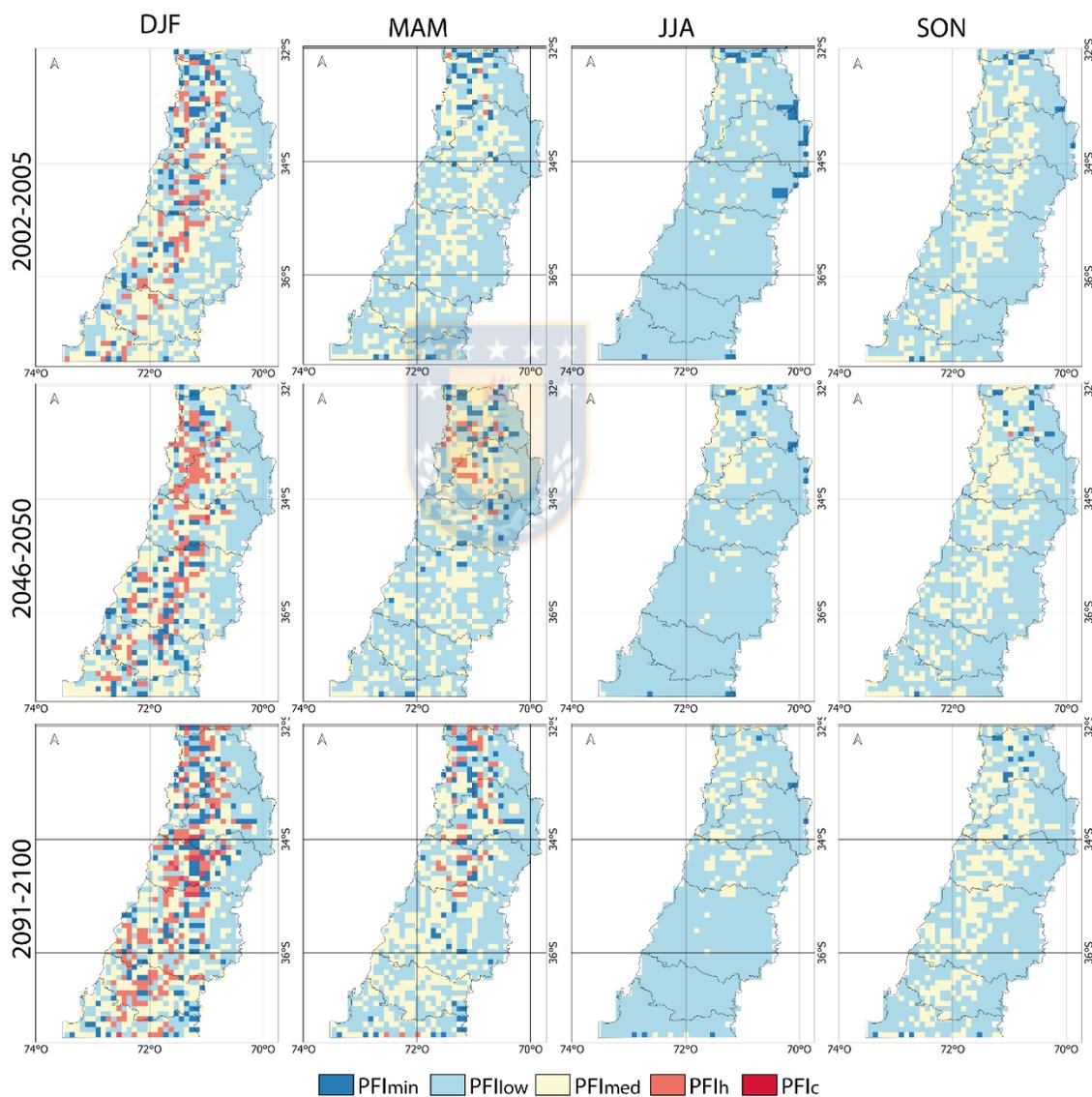
WAINGORT SETZER, A., AGOP SISMANOGLU, R., & MARTINS DOS SANTOS, J. G. (2019). Método do cálculo do risco de fogo do programa do inpe - versão 11, junho/2019. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 31 pp. Recuperado de <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UEDKUB>

WILBY, R. L., & WIGLEY, T. M. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21(4), 530–548.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1177/030913339702100403>



9. ANEXO

PFI estacional para verano (DJF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON), para los tres períodos en estudio.



Variación altitudinal de PFI estacional para los tres períodos en estudio.

