



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

PROYECCIONES DEL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES EN CHILE CENTRO-SUR
BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

MARÍA JESÚS MARGARITA RAPANAGUE SEPÚLVEDA

PROFESOR GUÍA:
MAISA ROJAS CORRADI

PROFESOR CO-GUÍA:
MARTÍN JACQUES COPER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RENÉ GARREAUD SALAZAR
ANAHI URQUIZA GÓMEZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia
(CR)²

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA
POR: MARÍA JESÚS MARGARITA RAPANAGUE SEPÚLVEDA
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: MAISA ROJAS CORRADI

PROYECCIONES DEL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES EN CHILE CENTRO-SUR BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

En los últimos años, incendios forestales cada vez más extremos han devastado diversas regiones del mundo, con graves costos sociales, ambientales y económicos. Chile experimentó su peor temporada de incendios hasta la fecha en el verano de 2017, con más de 500.000 hectáreas quemadas. Las proyecciones de cambio climático sugieren un aumento general de la frecuencia, tamaño, intensidad, área quemada y duración de la temporada de incendios forestales. En particular, en algunas regiones con clima mediterráneo, como el oeste de Estados Unidos, el suroeste de Australia y el Mediterráneo, se espera que los incendios aumenten significativamente su frecuencia e intensidad en un mundo 2°C más cálido (en relación a la época preindustrial), que en un mundo 1.5°C más cálido y que el presente. En la zona centro-sur de Chile también hay presencia de clima mediterráneo en algunas regiones, pero hay pocos estudios del riesgo de incendios en Sudamérica para escenarios más optimistas de cambio climático como para evaluar su significancia. El objetivo principal de este trabajo es generar proyecciones del riesgo de incendios futuro en Chile centro-sur (29.5 - 43.75 °S, 74.25 - 70.25 °O, Valparaíso - Los Lagos) a 1.5°C y 2°C de calentamiento global. Para esto, se utilizó una base de datos de incendios forestales en Chile entre 1984 y 2021, que se comparó con distintas variables e índices meteorológicos para encontrar el mejor indicador indirecto para los incendios, a través del cálculo de correlaciones. El Fire Weather Index (FWI), un índice canadiense del peligro meteorológico de incendios, que depende solamente de la temperatura, humedad relativa, magnitud del viento y precipitación acumulada, fue validado como un buen indicador del área quemada durante el verano (extendido, promedio noviembre-abril), mientras que la temperatura media y máxima se relacionaron mejor con la ocurrencia de incendios, también para el verano extendido, y la humedad relativa tanto para el área quemada como para la ocurrencia. Los datos meteorológicos usados provienen del reanálisis ERA5, además el FWI fue calculado a partir de un código propio que también fue validado con datos de ERA5. Antes de calcular el riesgo futuro de incendios, se calculó el peligro a partir de los cambios en el FWI, la temperatura media y la humedad relativa de 8 modelos CMIP6, para los escenarios SSP126 (+2°C), SSP119 (+1.5°C) y presente (+1°C). Se obtuvieron aumentos significativos de la temperatura en todo Chile centro-sur y del FWI en la zona central, tanto a 1.5 °C como a 2 °C de calentamiento, con diferencias significativas entre ambos escenarios. Los cambios en la humedad relativa no fueron significativos. Por último, se calculó el cambio futuro en el riesgo de incendios en bosques nativos y plantaciones forestales, usando como peligro las diferencias en el FWI entre escenarios de cambio climático, y los datos de exposición y sensibilidad del proyecto ARCLIM. Los mayores cambios en el riesgo se concentran en la costa de la región de Valparaíso en el caso de los bosques nativos, y en la costa entre las regiones de O'higgins y el Biobío para las plantaciones forestales. Actualmente, la mayoría del presupuesto destinado al combate de incendios en Chile se destina a su detección y combate, sin embargo, las condiciones meteorológicas más extremas que se proyectan hacia el futuro podrían provocar grandes incendios que escapen a la capacidad de supresión, por lo que es importante transitar desde un enfoque reactivo a uno preventivo en la gestión de incendios forestales en Chile.

Nunca dudes que un pequeño grupo de ciudadanos comprometidos puede cambiar el mundo. De hecho, es lo único que lo ha logrado (Margaret Mead).

Agradecimientos

Son tantas las personas a quienes les quiero agradecer que si las nombrara una por una no me cabrían en una página, siento no nombrarles individualmente familia, amigas y amigos!

A mi familia, por su apoyo constante, y especialmente a mi mamá, por siempre estar ahí incondicionalmente para mí y nunca dejarme caer. Lo eres todo para mí.

A mi profesora guía, Maisa Rojas, por ser mi mentora y una gran referente durante todos estos años, por confiar en mi trabajo y darme un espacio o presionarme cuando era necesario. A mi co-guía, Martín Jacques, por ser siempre tan amable y verle lo bueno a mis avances en cada reunión, aunque no fueran tantos. Ambos son un ejemplo a seguir para mí.

A mis amigas y amigos que me dio el colegio, la sección 8 y geofísica. Gracias por estar ahí en las buenas y en malas en distintas etapas de mi vida y seguir acompañándome con su amistad hasta hoy, sobre todo en estos últimos meses tan estresantes.

También a mis amigas y amigos de CEUS Chile y RedLama, por mostrarme lo lindo del activismo, la educación ambiental y el trabajo interdisciplinario. Agradezco en especial al equipo de Contenido que tanto me ayudó a crecer, y a Isa y Maca por ser ejemplos del liderazgo femenino necesario para mejorar al mundo.

Agradezco a todo el Departamento de Geofísica (DGF): estudiantes, profesores y funcionarios, por ser un espacio acogedor en donde siempre hay alguien dispuesto a ayudarte. Gracias en particular al profesor Roberto Rondanelli, por darme la oportunidad de experimentar la docencia y el trabajo de investigación por primera vez.

Por último, gracias al Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 por los recursos para el desarrollo de mi tesis, a Alejandro Miranda y Marco Billi por su retroalimentación y enseñarme sobre el riesgo de incendios desde otras disciplinas, a Francesca Di Giuseppe del ECMWF por darse el tiempo de contestar todas las dudas sobre el cálculo del Fire Weather Index que le hice y que fueron invaluable para el desarrollo de este trabajo, y a cada persona que me ayudó de una manera u otra durante este tiempo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivos específicos	2
1.3. Hipótesis y preguntas de investigación	2
2. Marco teórico	4
2.1. Caracterización del régimen de incendios en Chile	4
2.2. Incendios forestales y cambio climático	7
2.3. Fire Weather Index (FWI)	8
2.4. Marco analítico de riesgos aplicado a incendios forestales	11
3. Datos y métodos	16
3.1. Base de datos de incendios forestales	16
3.2. Cálculo y validación del código Fire Weather Index	16
3.3. Búsqueda del mejor proxy de incendios	18
3.4. Proyecciones futuras del peligro de incendios usando modelos CMIP6	20
3.5. Cálculo del riesgo de incendios futuro usando ARCLIM	22
4. Resultados	24
4.1. Caracterización climatológica del régimen de incendios en Chile centro-sur	24
4.2. Validación código propio FWI	26

4.3. Búsqueda del mejor proxy de incendios	28
4.4. Proyecciones del peligro de incendios futuro	37
4.5. Proyecciones del riesgo de incendios futuro	41
5. Discusión	45
5.1. Recomendaciones de política pública	47
6. Conclusiones	50
6.1. Trabajo futuro	51
Bibliografía	52
Anexos	58
A. Código propio para calcular el Fire Weather Index	59
B. Tablas de correlaciones entre variables de incendios e índices meteorológicos	69
B.1. Área quemada	70
B.1.1. Verano extendido noviembre-abril	70
B.1.2. Verano extendido diciembre-marzo	74
B.1.3. Año completo	77
B.2. Número de incendios	80
B.2.1. Verano extendido noviembre-abril	80
B.2.2. Verano extendido diciembre-marzo	83
B.2.3. Año completo	87
C. Resultados por modelo CMIP6	90
C.1. CanESM5	90
C.2. CNRM-ESM2-1	95
C.3. EC-Earth3	100
C.4. EC-Earth3-Veg	105

C.5. EC-Earth3-Veg-LR	110
C.6. MIROC6	115
C.7. MIROC-ES2L	120
C.8. MRI-ESM2-0	125

Índice de Tablas

3.1. Variables necesarias para el cálculo del Fire Weather Index.	17
3.2. Lista de datos obtenidos desde el reanálisis ERA5, entre 1984 y 2021.	18
3.3. Lista de modelos CMIP6 utilizados en este trabajo de tesis.	21
3.4. Lista de variables obtenidas de los 8 modelos CMIP6 entre 1995-2014 y 2081-2100, con resolución temporal diaria (datos descargados de https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz/).	21
4.1. Comparación de los valores de prueba del cálculo de los índices del Fire Weather Index del modelo GEFM (Vitolo, Di Giuseppe, Krzeminski, y San-Miguel-Ayanz, 2019) versus los del código propio.	28
4.2. Correlaciones con el número de incendios por zona, usando el FWI modificado con valores promedios diarios, para los promedios estacionales entre noviembre y abril. Se destacan los valores de r mayores a 0.5.	29
4.3. Correlaciones con la ocurrencia de incendios, para los promedios estacionales entre noviembre y abril de toda la zona de estudio (Valparaíso - Los Lagos), con los índices del FWI calculados de 3 maneras distintas: calculado correctamente con datos meteorológicos al mediodía (FWI 12h), con datos promedios diarios (FWI promedios) y con datos promedios diarios más la temperatura máxima (FWI Tx). Se destacan los valores de r mayores a 0.5.	30
4.4. Correlaciones con el área quemada total por zona, usando el FWI modificado con valores promedios diarios, para los promedios estacionales entre noviembre y abril. Se destacan los valores de r mayores a 0.5.	31
4.5. Correlaciones con el área quemada total, excluyendo el 2017, para los promedios estacionales entre noviembre y abril de toda la zona de estudio (Valparaíso - Los Lagos), con los índices del FWI calculados de 3 maneras distintas: calculado correctamente con datos meteorológicos al mediodía (FWI 12h), con datos promedios diarios (FWI promedios) y con datos promedios diarios más la temperatura máxima (FWI Tx). Se destacan los valores de r mayores a 0.5.	33

4.6. Correlaciones con el área quemada total por zona, excluyendo el 2017, usando el FWI modificado con valores promedios diarios, para los promedios estacionales entre noviembre y abril. Se destacan los valores de r mayores a 0.5.	34
B.1. Correlaciones área quemada total, toda la zona de estudio, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido) de cada año.	70
B.2. Correlaciones área quemada, entre las regiones de Valparaíso y Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido).	70
B.3. Correlaciones área quemada, entre las regiones de O'higgins y Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido).	70
B.4. Correlaciones área quemada, entre las regiones del Ñuble y Los Lagos, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido).	71
B.5. Correlaciones área quemada, toda la zona de estudio, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios).	71
B.6. Correlaciones área quemada, Valparaíso - Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios).	71
B.7. Correlaciones área quemada, O'higgins - Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios).	72
B.8. Correlaciones área quemada, Ñuble - Los Lagos, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios).	72
B.9. Correlaciones área quemada, toda la zona de estudio, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios más temperatura máxima).	72
B.10. Correlaciones área quemada, Valparaíso - Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios más temperatura máxima).	73
B.11. Correlaciones área quemada, O'higgins - Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios más temperatura máxima).	73
B.12. Correlaciones área quemada, Ñuble - Los Lagos, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios más temperatura máxima).	73
B.13. Correlaciones área quemada total, toda la zona de estudio, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año.	74
B.14. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año.	74

B.15. Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año.	74
B.16. Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año.	75
B.17. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios). . .	75
B.18. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios). . .	75
B.19. Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios). . .	75
B.20. Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios). . .	76
B.21. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios y temperatura máxima).	76
B.22. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios y temperatura máxima).	76
B.23. Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios y temperatura máxima).	76
B.24. Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios y temperatura máxima).	77
B.25. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, todo el año.	77
B.26. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, todo el año.	77
B.27. Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, todo el año.	77
B.28. Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, todo el año.	78
B.29. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).	78
B.30. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).	78
B.31. Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).	78

B.32. Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).	79
B.33. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	79
B.34. Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	79
B.35. Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	79
B.36. Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	80
B.37. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año.	80
B.38. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año.	80
B.39. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año.	81
B.40. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año.	81
B.41. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).	81
B.42. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).	81
B.43. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).	82
B.44. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).	82
B.45. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	82
B.46. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	82
B.47. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	83

B.48. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	83
B.49. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año.	83
B.50. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año.	84
B.51. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año.	84
B.52. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año.	84
B.53. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).	84
B.54. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).	85
B.55. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).	85
B.56. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).	85
B.57. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	85
B.58. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	86
B.59. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	86
B.60. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	86
B.61. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, todo el año.	87
B.62. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, todo el año. .	87
B.63. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, todo el año. .	87
B.64. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, todo el año. .	87

B.65. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).	88
B.66. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).	88
B.67. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).	88
B.68. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).	88
B.69. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	89
B.70. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	89
B.71. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	89
B.72. Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).	89

Índice de Ilustraciones

2.1. Porcentaje de incendios forestales en Chile por región (1977-2021) y por mes (1985-2021). Fuente: CONAF, 2022.	5
2.2. Serie de tiempo de la ocurrencia y el área quemada anual de los incendios forestales en Chile entre 1964 y 2021. Fuente: CONAF, 2022.	5
2.3. Esquema del sistema del Fire Weather Index (FWI). Modificado de Canadian Wild-land Fire Information System (s.f.).	9
2.4. Esquema de los conceptos básicos asociados al riesgo de impactos climáticos (obte-nido de IPCC, 2014).	12
2.5. Esquema general para el cálculo del riesgo climático para bosques nativos y plan-taciones forestales. Los números representan las cadenas de impacto. El mapa de la derecha representa un ejemplo del riesgo final de cualquiera de esas cadenas de impacto (obtenido de Pica-Téllez et al., 2020).	13
2.6. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre el clima históri-co (1980-2010) y futuro (2035-2065 bajo el escenario RCP 8.5), utilizando como ame-naza la variación en la incidencia de temperaturas sobre 30°C. Fuente: Pica-Téllez et al. (2020).	14
2.7. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre el clima histórico (1980-2010) y futuro (2035-2065 bajo el escenario RCP 8.5), utilizando como amenaza la variación en la incidencia de temperaturas sobre 30°C. Fuente: Pica-Téllez et al. (2020).	14
3.1. Esquema de los principales forzantes climáticos del área quemada a lo largo de Chile centro-sur. La actividad de los incendios en cada región (mapa de la izquierda) se agrupó en áreas centro (cuadro rojo), centro-sur (azul) y sur (verde). El calendario a la derecha indica cuando un forzante dado (precipitación, temperatura máxima, ENSO o AAO) tiene su mayor impacto sobre la actividad de los incendios durante la temporada de incendios objetivo (obtenido de Urrutia-Jalabert, González, González-Reyes, Lara, y Garreaud, 2018).	19

4.1. Mapas (panel superior) y serie de tiempo (panel inferior) del área quemada (en hectáreas) y número de incendios total ocurridos desde octubre de 1984 hasta mayo de 2021 entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos.	25
4.2. Serie de tiempo de cada uno de los índices del FWI entre 1985 y mayo de 2021. En rojo se encuentran los datos descargados de ERA5, y en naranja los índices calculados con un código propio. Al lado de cada índice se muestra el valor del coeficiente de correlación de Pearson (r) entre ambos conjuntos de datos.	26
4.3. Gráfico de dispersión de cada uno de los índices del FWI, comparando los datos descargados de ERA5 (eje x) y los índices calculados con un código propio (eje y). Cada punto representa un valor diario entre 1985 y mayo de 2021. Al lado de cada índice se muestra el valor del coeficiente de correlación de Pearson (r) entre ambos conjuntos de datos.	27
4.4. Mapas de la diferencia porcentual entre los índices del FWI calculados y los basados en el reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020), promediados entre 1985 y mayo de 2021.	27
4.5. Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el número de incendios y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de toda la zona de estudio.	29
4.6. Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el número de incendios y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de la zona sur (Ñuble - Los Lagos).	30
4.7. Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el área quemada y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de toda la zona de estudio.	31
4.8. Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el área quemada y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de la zona sur (Ñuble - Los Lagos).	32
4.9. Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el área quemada y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de toda la zona de estudio, exceptuando el 2017.	33
4.10. Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el área quemada y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de la zona sur (Ñuble - Los Lagos), sin contar el 2017.	34
4.11. Serie de tiempo del promedio estacional (noviembre - abril) de todas las variables analizadas (incendios, índices del FWI y meteorológicas), para toda la zona de estudio.	35
4.12. Serie de tiempo del promedio estacional (noviembre - abril) de todas las variables analizadas (incendios, índices del FWI y meteorológicas), para la zona sur (Ñuble - Los Lagos).	36

4.13. Comparación del promedio histórico entre noviembre y abril (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa, entre el ensamble de modelos CMIP6 y los datos de ERA5.	38
4.14. Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126 del ensamble de modelos (promedio diciembre-marzo de cada año).	38
4.15. Mapas de la diferencia del FWI promedio entre noviembre y abril del ensamble de modelos CMIP6 entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha).	39
4.16. Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre noviembre y abril del ensamble de modelos CMIP6 entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha).	40
4.17. Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre noviembre y abril del ensamble de modelos CMIP6 entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha).	40
4.18. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014).	42
4.19. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C).	43
4.20. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014).	43
4.21. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C).	44
C.1. Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo CanESM5.	90
C.2. Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo CanESM5.	91
C.3. Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CanESM5.	91
C.4. Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CanESM5.	92
C.5. Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CanESM5.	92

C.6. Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CanESM5.	93
C.7. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo CanESM5.	93
C.8. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo CanESM5.	94
C.9. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo CanESM5.	94
C.10. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo CanESM5.	95
C.11. Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo CNRM-ES2M-1.	95
C.12. Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo CNRM-ESM2-1.	96
C.13. Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CNRM-ESM2-1.	96
C.14. Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CNRM-ESM2-1.	97
C.15. Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CNRM-ESM2-1.	97
C.16. Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CNRM-ESM2-1.	98
C.17. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo CNRM-ESM2-1.	98
C.18. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo CNRM-ESM2-1.	99
C.19. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo CNRM-ESM2-1.	99
C.20. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo CNRM-ESM2-1.	100
C.21. Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo EC-Earth3.	100

C.22.Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo EC-Earth3.	101
C.23.Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3.	101
C.24.Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3.	102
C.25.Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3.	102
C.26.Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3.	103
C.27.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3.	103
C.28.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3.	104
C.29.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3.	104
C.30.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3.	105
C.31.Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo EC-Earth3-Veg.	105
C.32.Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo EC-Earth3-Veg.	106
C.33.Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg.	106
C.34.Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg.	107
C.35.Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg.	107
C.36.Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg.	108

C.37. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3-Veg.	108
C.38. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3-Veg.	109
C.39. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3-Veg.	109
C.40. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3-Veg.	110
C.41. Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	110
C.42. Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	111
C.43. Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	111
C.44. Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	112
C.45. Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	112
C.46. Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	113
C.47. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	113
C.48. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	114
C.49. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	114
C.50. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.	115
C.51. Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo MIROC6.	115
C.52. Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo MIROC6.	116

C.53. Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC6.	116
C.54. Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC6.	117
C.55. Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC6.	117
C.56. Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC6.	118
C.57. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MIROC6.	118
C.58. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MIROC6.	119
C.59. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MIROC6.	119
C.60. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MIROC6.	120
C.61. Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo MIROC-ES2L.	120
C.62. Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo MIROC-ES2L.	121
C.63. Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC-ES2L.	121
C.64. Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC-ES2L.	122
C.65. Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC-ES2L.	122
C.66. Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC-ES2L.	123
C.67. Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MIROC-ES2L.	123

C.68.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MIROC-ES2L.	124
C.69.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MIROC-ES2L.	124
C.70.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MIROC-ES2L.	125
C.71.Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo MRI-ESM2-0.	125
C.72.Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo MRI-ESM2-0.	126
C.73.Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MRI-ESM2-0.	126
C.74.Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MRI-ESM2-0.	127
C.75.Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MRI-ESM2-0.	127
C.76.Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MRI-ESM2-0.	128
C.77.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MRI-ESM2-0.	128
C.78.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MRI-ESM2-0.	129
C.79.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MRI-ESM2-0.	129
C.80.Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MRI-ESM2-0.	130

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Durante los últimos años, incendios forestales cada vez más frecuentes y devastadores han afectado varias zonas alrededor del mundo, como los megaincendios en Australia (Nolan et al., 2020) y el Amazonas (Lizundia-Loiola, Pettinari, y Chuvieco, 2020) el 2019 y en California el 2020 (CALFIRE, 2020). En Chile, la temporada de incendios más catastrófica hasta la fecha fue la de 2017, donde se quemó un record de más de 500.000 hectáreas, generando graves daños en pérdida de vidas humanas y damnificados, infraestructura, degradación de ecosistemas nativos y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por incendios sin precedentes (González et al., 2020).

En el futuro, se espera una mayor ocurrencia, severidad y una temporada más larga de incendios forestales en gran parte del mundo debido al cambio climático, especialmente bajo escenarios donde las concentraciones de GEI siguen aumentando (Flannigan, Amiro, Logan, Stocks, y Wotton, 2006). Lo anterior podría provocar que los bosques comiencen a emitir más carbono del que absorben, considerado un punto de no retorno por las consecuencias catastróficas y prácticamente irreversibles asociadas (Nobre y Borma, 2009). Sin embargo, se proyecta que habrán grandes variaciones espaciales y temporales en la respuesta de los incendios forestales ante el cambio climático, teniendo regiones en las que las condiciones meteorológicas futuras aumentarán su riesgo de ocurrencia, y otras en las que disminuirá (Krawchuk, Moritz, Parisien, Van Dorn, y Hayhoe, 2009).

Evaluar el riesgo futuro de incendios forestales presenta varios desafíos, especialmente debido a que su origen suele ser antrópico. En Chile, más del 90% de los incendios son provocados por la actividad humana, ya sea intencional o accidental (CONAF, 2022). Sin embargo, una vez producida la ignición las condiciones atmosféricas influyen fuertemente sobre su propagación, por lo que igualmente existe una relación entre las condiciones atmosféricas e incendios forestales (González et al., 2020; McWethy, Garreaud, Holz, y Pederson, 2021; Urrutia-Jalabert et al., 2018). Un esfuerzo por calcular distintos riesgos para Chile es el proyecto ARCLIM, donde se calcula el riesgo de incendios en bosques nativos y plantaciones forestales bajo escenarios altos en emisiones (Pica-Téllez et al., 2020).

Uno de los índices más usados para pronosticar el peligro meteorológico de incendios es el Fire Weather Index (Van Wagner, 1987), que depende solamente de la humedad relativa, precipitación,

temperatura y magnitud del viento. Fue desarrollado inicialmente por el Servicio Forestal canadiense, pero es utilizado en varias regiones del mundo hoy en día, tanto para hacer pronósticos como para proyecciones de cambio climático.

De acuerdo a las recomendaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) el calentamiento global debe limitarse a menos de 2°C , apuntando a 1.5°C , para evitar los peores efectos del cambio climático (IPCC, 2018). En su informe especial sobre 1.5°C de calentamiento global se establece que existen diferencias significativas entre 1.5°C y 2°C de calentamiento en riesgos asociados al cambio climático. Específicamente, para los incendios forestales el riesgo aumenta significativamente en California, el Mediterráneo y el noreste de Australia, todas zonas con un clima mediterráneo, al igual que la zona central de Chile. Lamentablemente no existen estudios suficientes en Sudamérica, y en consecuencia tampoco en Chile, para evaluar la significancia de las diferencias asociadas a 0.5°C de calentamiento extra.

1.2. Objetivos

El objetivo general es realizar proyecciones futuras del riesgo de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile, bajo 2 escenarios de cambio climático que representan 1.5°C y 2°C de calentamiento global, utilizando un índice meteorológico del peligro de incendios.

1.2.1. Objetivos específicos

1. Obtener un indicador meteorológico indirecto (proxy) de la actividad (ocurrencia y área quemada) de incendios para la zona centro-sur de Chile, enfocándose en el verano, que corresponde a la temporada de incendios.
2. Utilizar salidas de modelos climáticos para calcular el peligro de incendios futuro, para un mundo que se calienta 1.5°C en promedio y uno que se calienta 2°C , con el fin de evaluar si existen diferencias significativas con el presente y entre ambos escenarios.
3. Calcular el riesgo de incendios forestales futuro, vinculando las proyecciones con recomendaciones de política pública.

1.3. Hipótesis y preguntas de investigación

La principal hipótesis de este estudio es que el Fire Weather Index es el mejor indicador indirecto de la actividad de incendios forestales en Chile centro-sur, debido a que integra a las principales variables meteorológicas que influyen sobre su ocurrencia y propagación. Al realizar proyecciones de cómo cambiarán estas variables en el futuro, se espera obtener que para fines de siglo en Chile centro-sur los incendios forestales ocurrirán de forma más frecuente y con mayor magnitud, observándose diferencias significativas para un escenario de calentamiento global de 1.5°C , en comparación con uno de 2°C .

Las preguntas de investigación son las siguientes:

- ¿Es capaz el Fire Weather Index de representar la dinámica de incendios forestales en Chile centro-sur?
- ¿Cómo cambiará el peligro y el riesgo de los incendios en el futuro? ¿Existen diferencias entre un mundo que se calienta 1.5°C para fines de siglo versus uno que se calienta 2°C ?
- ¿Qué políticas públicas deberían adoptarse para prevenir desastres futuros asociados a incendios forestales?

El presente trabajo está organizado de la siguiente forma. En el Capítulo 2 se encuentra el marco teórico. Los datos y métodos utilizados se describen en el Capítulo 3. Los resultados, en el Capítulo 4, se dividen en una caracterización del régimen de incendios en Chile centro-sur (Sección 4.1), la validación del código que calcula el Fire Weather Index (Sección 4.2), la búsqueda del mejor indicador meteorológico de la actividad de los incendios (Sección 4.3), el cálculo del peligro de incendios futuro (Sección 4.4) y del riesgo de incendios futuro (Sección 4.5). La discusión y recomendaciones de política pública se encuentran en el Capítulo 5. Las principales conclusiones y el trabajo futuro propuesto se presentan en el Capítulo 6. Por último, el material adicional se encuentra en los Anexos A, B y C.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Caracterización del régimen de incendios en Chile

De acuerdo con las estadísticas de la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2022), los incendios forestales en Chile ocurren principalmente entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos y entre noviembre y abril. Entre 1977 y 2021, el 93 % de los incendios y el 87 % de la superficie quemada ocurrieron en esa zona, y entre 1985 y 2021, el 90 % de los incendios y el 96 % del área quemada ocurrieron durante esos meses (Figura 2.1). Menos de un 1 % de los incendios se deben a causas naturales, siendo la actividad humana su principal causante, ya sea de manera accidental (50 %) o intencional (30 %), más un 10 % con causas desconocidas. Los grandes incendios (área quemada mayor a 200 ha) son solamente un 1 % del total, pero representan un 73 % del área quemada anual.

La zona centro-sur de Chile (32°-44° S, entre Valparaíso y Los Lagos) además de concentrar la mayoría de los incendios en Chile, también contiene cerca del 90 % de la población (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018). El clima de esta zona va desde el mediterráneo (centro) al temperado (sur) (Di Castri y Hajek, 1976), y presenta una gran variedad de ecosistemas nativos y especies endémicas (Armesto, 1995; Villagrán y Hinojosa, 1997). Sin embargo, durante las últimas décadas han habido grandes cambios en el uso de suelo, debido a las extensas plantaciones forestales de especies exóticas, principalmente pino radiata y eucaliptos (Nahuelhual, Carmona, Lara, Echeverría, y González, 2012), modificando la disponibilidad de combustible y flamabilidad de los bosques (Carmona, González, Nahuelhual, y Silva, 2012), dado que esas especies exóticas provienen de zonas donde los incendios forestales naturales son más comunes (Dowdy y Mills, 2012; Taylor, Trouet, Skinner, y Stephens, 2016), en consecuencia son mucho más flamables y resilientes al fuego (Ganteaume et al., 2009).

Durante los últimos años, el número de incendios ha aumentado y su temporada se ha alargado. Antes del 2010 los grandes incendios ocurrían entre fines de noviembre y abril del año siguiente, mientras que actualmente los comienzan a mediados de octubre y terminan a mediados de mayo del año siguiente (González, Gómez-González, Lara, Garreaud, y Díaz-Hormazábal, 2018). El número de incendios extremos o megaincendios también ha aumentado, entre 1985 y 2018 hubo 22 de estos eventos (16 en la última década), ubicados principalmente en la cordillera de la costa y entre las regiones de O'higgins y el Bío-Bío (González et al., 2020).

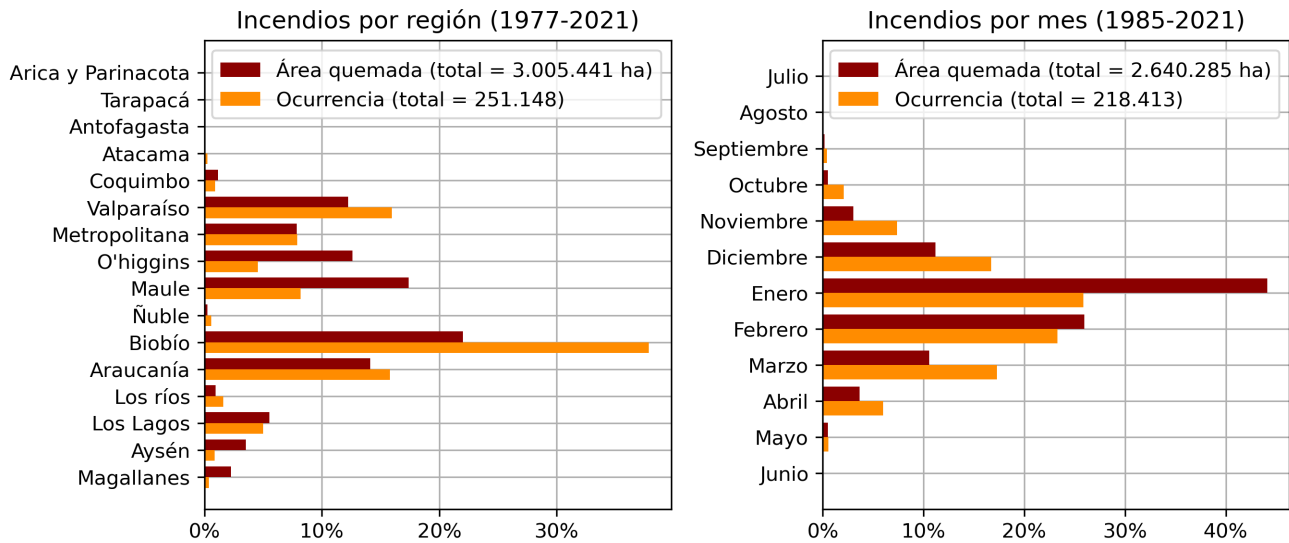


Figura 2.1: Porcentaje de incendios forestales en Chile por región (1977-2021) y por mes (1985-2021). Fuente: CONAF, 2022.

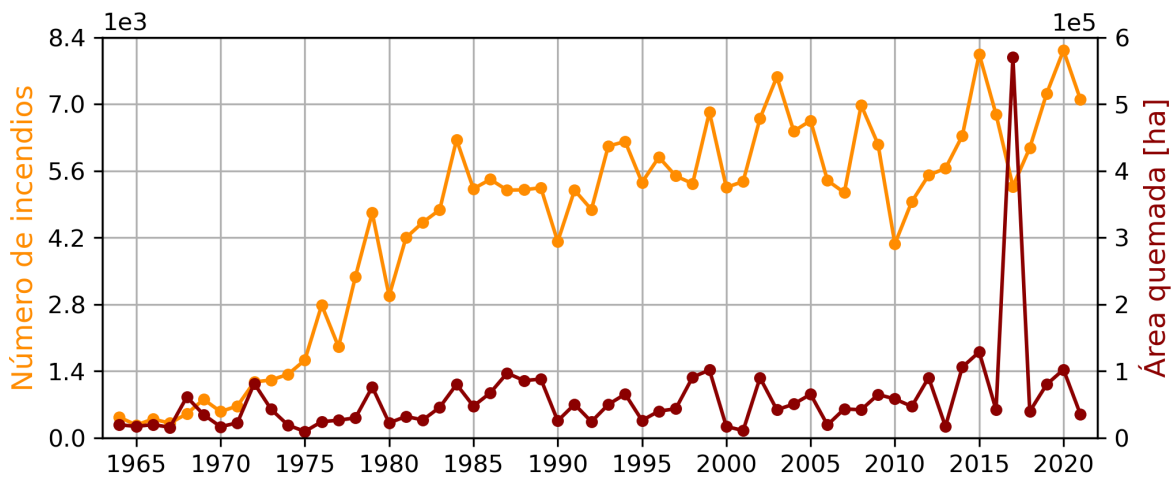


Figura 2.2: Serie de tiempo de la ocurrencia y el área quemada anual de los incendios forestales en Chile entre 1964 y 2021. Fuente: CONAF, 2022.

La temporada de incendios más destructiva hasta la fecha en Chile fue la del 2017, donde se quemó un área sin precedentes de más de 500.000 hectáreas (Figura 2.2), superando 10 veces el promedio histórico, que causó el fallecimiento de 11 personas, decenas de damnificados, pérdida de biodiversidad, infraestructura, enormes costos económicos (243 mil millones del Estado en supresión del fuego y reconstrucción) y emisiones de gases de efecto invernadero equivalentes al 90 % de todas las emisiones del 2016 (González et al., 2020).

Las causas de esta temporada de incendios tan extrema se atribuyen a la influencia humana, la cobertura forestal y condiciones meteorológicas extremas. Durante el verano de 2017, diez megaincendios (área quemada superior a 10.000 ha) quemaron cerca de 350.000 ha en tres semanas, ocho de ellos fueron causados por la actividad humana (4 intencionales, 4 accidentales). Los in-

cendios más intensos ocurrieron en plantaciones forestales, y dan cuenta del 63% de toda el área quemada durante la temporada. Finalmente, durante la última semana de enero se desarrolló una ola de calor extrema que rompió récords de temperatura máxima registradas en varias regiones del país, junto con un episodio de vaguada costera que intensificó los vientos del este y del sur, contribuyendo a la propagación de los megaincendios (Bowman et al., 2019; González et al., 2020).

Si bien la gran mayoría de los incendios forestales en Chile tienen un origen humano, el régimen de incendios de una región está limitado por su clima, ya sea por su contenido de humedad o la cantidad de combustible que hay en esa zona. Por ejemplo, el desierto de Atacama presenta un clima muy seco y altas temperaturas frecuentemente, pero no hay incendios forestales dado que la vegetación es mínima. Asimismo, las condiciones atmosféricas (temperatura, precipitación, humedad relativa y magnitud del viento) también ejercen una gran influencia sobre el régimen de incendios (González et al., 2020). Por ejemplo, las olas de calor en el verano favorecen la ocurrencia de grandes incendios, dado que se asocian a altas temperaturas (mayores a 30°C), baja humedad, fuertes vientos del sur en la costa y del este en la precordillera (Demortier, Bozkurt, y Jacques-Coper, 2021).

De acuerdo a McWethy et al. (2021), los meses con incendios forestales activos en Chile centro-sur se correlacionan positivamente con temperaturas superficiales altas, condiciones secas, persistencia de sistemas de altas presiones en el sureste del Pacífico (40°-60° S) y un aumento del viento este. A una escala espacial más amplia, los incendios también se asocian con la fase positiva de la Oscilación Antártica (SAM por su sigla en inglés). De manera similar, en Urrutia-Jalabert et al. (2018) se observa que la actividad de los incendios se relaciona positivamente con la temperatura máxima y la escasez de precipitaciones durante la misma temporada, condiciones secas y temperaturas máximas sobre lo normal entre invierno y primavera del mismo año (fase positiva de SAM), y precipitación sobre el promedio (condiciones tipo El Niño) durante el invierno del año previo. Estas correlaciones se vuelven más fuertes desde el centro hacia el sur de Chile, lo que implica que las condiciones atmosféricas tienen un mayor control sobre el régimen de incendios en la zona sur del país que en el centro.

Durante la Megasequía que afecta al país desde 2010 (Garreaud et al., 2017), el número, área quemada, simultaneidad y duración de los incendios de gran magnitud ha aumentado significativamente en comparación con las dos décadas previas, incluyendo la ocurrencia sin precedentes de incendios grandes en invierno. Aunque tanto la temperatura máxima como la precipitación son forzantes de los incendios, un análisis de atribución simple indica que el déficit sostenido de precipitación entre 2010 y 2015 fue el factor más crítico en el incremento de la actividad de incendios forestales (González et al., 2018).

En resumen, la mayoría de los incendios forestales en Chile se concentran en la zona centro-sur (entre Valparaíso y Los Lagos) y entre los meses de noviembre y abril. A pesar de que la gran mayoría de los incendios se originan por la actividad humana, las condiciones climáticas y meteorológicas ejercen un control sobre el régimen de incendios a distintas escalas temporales y espaciales.

2.2. Incendios forestales y cambio climático

En el futuro, bajo un clima más cálido, se esperan más incendios forestales, más severos y con una temporada más larga (Flannigan et al., 2006, 2013). Sin embargo, se proyecta que habrán grandes variaciones espaciales y temporales en la respuesta de los incendios forestales ante el cambio climático, teniendo regiones en las que el clima futuro aumentará su riesgo de ocurrencia, y otras en las que disminuirá (Krawchuk et al., 2009; Moritz et al., 2012).

En algunas regiones ya es posible observar un aumento en la actividad de incendios forestales debido al cambio climático (con un nivel de confianza medio): sur de Europa, norte de Eurasia, Estados Unidos y Australia. Hacia el 2050, para escenarios de reducción de emisiones medias a bajas (desde RCP4.5) se espera que las condiciones meteorológicas propicias para incendios aumenten en varias zonas de Sudamérica (incluyendo Chile), África, Asia, Europa, Norteamérica y Australia, con un alto nivel de confianza (e.g. Abatzoglou, Williams, y Barbero, 2019; Dupuy et al., 2020; Engelbrecht et al., 2015; IPCC, 2021)

En Sudamérica, las proyecciones indican que el Amazonas es una de las regiones del mundo donde más va a aumentar el riesgo de incendios para todos los escenarios de cambio climático. También se proyecta un aumento del riesgo en el suroeste de Sudamérica con un alto nivel de confianza (IPCC, 2021). En Chile, las proyecciones de cambio climático indican condiciones cada vez más secas y cálidas en la zona central, lo que haría más recurrentes sequías como la actual Megasequía (Boisier, Rondanelli, Garreaud, y Muñoz, 2016; Bozkurt, Rojas, Boisier, y Valdivieso, 2017), que podría resultar en un incremento del número y área quemada por incendios forestales de no tomarse medidas apropiadas para reducir su riesgo (González et al., 2018).

Uno de los mayores riesgos asociados al aumento de incendios debido al cambio climático es la posibilidad de que los bosques pasen de ser sumideros de carbono a fuentes del mismo, lo que sería un punto de no retorno que tendría como efectos un aumento adicional en las emisiones de gases de efecto invernadero, que no es considerado actualmente en los modelos climáticos, junto con una rápida degradación del suelo y pérdida de biodiversidad (IPCC, 2021). El ecosistema más amenazado actualmente por la posibilidad de alcanzar un punto de no retorno es el Amazonas, debido a la combinación de deforestación, sequía y grandes incendios forestales (Zemp, Schleussner, Barbosa, y Rammig, 2017).

De acuerdo al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por su sigla en inglés), el calentamiento global debería limitarse a 1.5°C para evitar riesgos adicionales debido al cambio climático. Según su informe especial sobre los 1.5°C de calentamiento global (IPCC, 2018), el riesgo de ocurrencia de incendios se incrementa si el calentamiento pasa de 1.5°C a 2°C , siendo particularmente alto para Estados Unidos, el Mediterráneo y Canadá, existiendo muy poca o ninguna información disponible para Centroamérica, Sudamérica y otras regiones. En su último informe (IPCC, 2021) se establece que, a nivel global, bajo 1.5°C de calentamiento la temporada de incendios duraría 6.2 días más que para el periodo 1981-2000, para 2°C 9.5 días más y a 4°C 50 días más. Una reducción de 0.5°C ayudaría a reducir hasta un 50 % la exposición a incendios forestales globalmente (Sun et al., 2019). No fue posible encontrar ningún estudio sobre las diferencias entre el riesgo de incendios asociado a 1.5°C y 2°C de calentamiento global enfocado en Chile, pero es esperable que hayan diferencias significativas, dado que la zona central tiene un clima mediterráneo al igual que la costa oeste de Estados Unidos y la zona mediterránea de Europa.

A pesar de que en los últimos años ha aumentado la cantidad de publicaciones sobre modelación climática en Sudamérica, permitiendo reducir incertidumbres (Ambrizzi, Reboita, da Rocha, y Llopart, 2019; Boulanger, Carril, y Sanchez, 2016; IPCC, 2021), la principal barrera para los estudios de cambio climático en la región es la ausencia o insuficiencia de series largas de observaciones, dado que la mayoría de las redes de observación nacionales se crearon entre las décadas de 1970 y 1980, impidiendo una mejor comprensión de tendencias a largo plazo (Condom et al., 2020).

En síntesis, se espera que el riesgo de incendios forestales aumente en varias regiones del mundo en el futuro debido al cambio climático, especialmente bajo escenarios de altas emisiones. Además, se espera una reducción significativa del riesgo a 1.5°C de calentamiento global en comparación con 2°C en el Mediterráneo, Estados Unidos y Canadá, existiendo una falta de estudios al respecto en Sudamérica, en particular en Chile.

2.3. Fire Weather Index (FWI)

El sistema del Fire Weather Index (FWI) es un conjunto de índices desarrollado por el Servicio Forestal de Canadá que busca pronosticar el peligro de incendios a partir de variables meteorológicas y la humedad de combustibles forestales. La descripción que se presenta a continuación se basa en la documentación realizada por Van Wagner (1987).

El FWI posee 6 componentes: 3 subíndices primarios que representan la humedad del combustible forestal, 2 subíndices intermedios que corresponden a la tasa de propagación y consumo de combustible, y un índice final que representa la tasa de emisión de energía por unidad de longitud del frente del incendio, similar a la intensidad (Figura 2.3). El combustible considerado es un tipo de pino estándar, pero es representativo de Canadá y puede ser modificado en función del tipo de vegetación local (si se cuenta con los datos de humedad). Estas 6 componentes son determinadas a diario a partir de mediciones meteorológicas realizadas al mediodía (hora local) de temperatura a 2 m, humedad relativa a 2 m, magnitud del viento a 10 m y precipitación acumulada durante las 24 horas previas. Sin embargo, cabe mencionar que el FWI representa el peligro de incendios a media tarde (16:00 aproximadamente). Sus componentes son las siguientes:

1. **Fine Fuel Moisture Code (FFMC):** representa el contenido de humedad de la hojarasca (hojas secas y materia orgánica muerta que cayó hace poco al suelo) en una capa con un peso seco alrededor de 0.25 kg/m².
2. **Duff Moisture Code (DMC):** se relaciona con el contenido de humedad de materia orgánica ligeramente compactada y en descomposición, con un peso seco de 5 kg/m² aproximadamente.
3. **Drought Code (DC):** corresponde al contenido de humedad para una capa profunda de materia orgánica compactada con un peso seco aproximado de 25 kg/m².

Tanto el DMC como el DC son de respuesta lenta, por lo que también dependen de los cambios en el largo del día a medida que las estaciones del año avanzan. Asimismo, para calcularlos se deben integrar los valores de las variables por varios días o semanas previos al día del pronóstico.

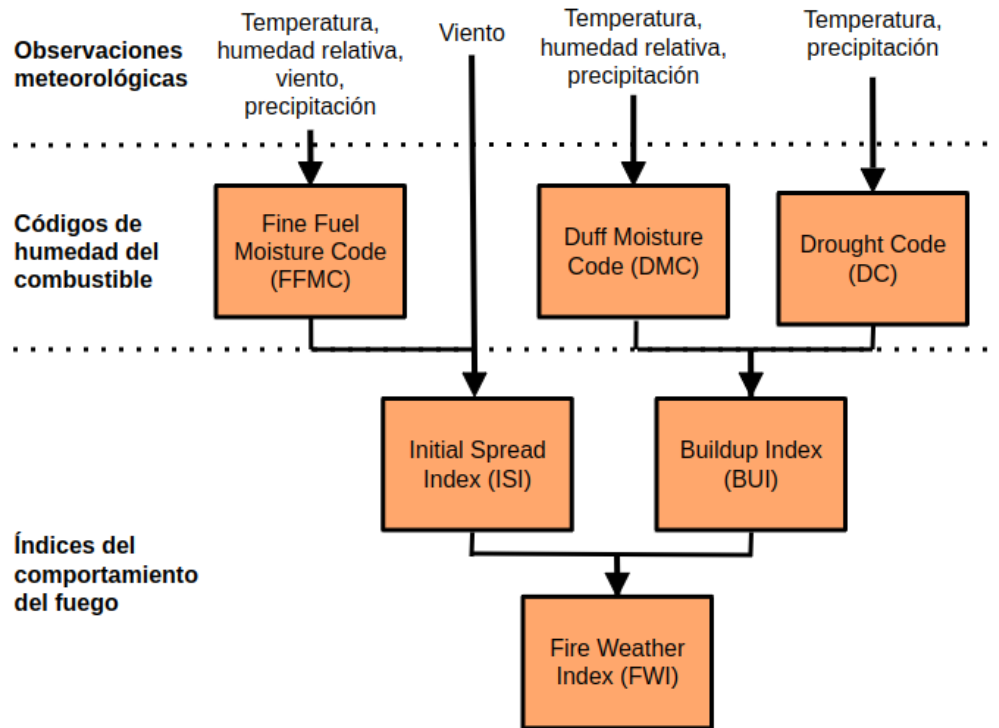


Figura 2.3: Esquema del sistema del Fire Weather Index (FWI). Modificado de Canadian Wildland Fire Information System (s.f.).

4. **Initial Spread Index (ISI):** combina la magnitud del viento y el FFMC, representa la tasa de propagación del fuego sin considerar la influencia de cantidades variables de combustible.
5. **Build Up Index (BUI):** combina el DMC y el DC, representando la cantidad total de combustible disponible para propagar el fuego.
6. **Fire Weather Index (FWI):** combinación del ISI y el BUI. Representa la intensidad de la propagación del fuego, como tasa de salida de energía por unidad de longitud del frente del incendio. Es aproximadamente proporcional al largo de las llamas.

Al correlacionar las componentes del FWI con estadísticas de tamaño y ocurrencia de incendios para calibrar los índices en distintas regiones de Canadá, se observó que el FWI es un buen indicador para la actividad de incendios en general ya que incluye todas las variables meteorológicas que influyen en la propagación de incendios forestales, por lo que además debiera ser un mejor indicador que las variables por separado. El BUI también es un buen indicador genérico, dado que la sequedad en profundidad contribuye sustancialmente al comportamiento del fuego, reforzando cualquier indicador primario. El FFMC se relaciona bien con la ocurrencia de incendios y el ISI con el área quemada. El tamaño de los incendios podría relacionarse negativamente con el DC, porque crece lentamente a lo largo de la primavera.

Por último, el sistema de índices del FWI no incluye la dependencia del riesgo de incendios de la presencia de agentes iniciadores del fuego, efectos de la topografía sobre el acceso o la dificultad de control general con respecto a tácticas de combate de incendios, por lo que es normal que las correlaciones no sean tan altas, debido a que existen otros factores determinantes en la actividad

de incendios que no son considerados. Es decir, el FWI no busca pronosticar la localización exacta de un incendio, si no servir como indicador de su actividad potencial.

Con el fin de servir como una guía de interpretación de las salidas del FWI, el trabajo de Wotton (2009) revisa varios estudios estadísticos que relacionan el FWI con incendios forestales en distintas regiones de Canadá. A nivel general, el ISI y el FWI explican alrededor del 35 % de la varianza del área quemada, pero si se realiza la comparación con el percentil 99 del FWI, la varianza explicada aumenta a un 55 %. Secuencias de días secos con baja humedad relativa y las temperaturas (media o máxima) también son buenos indicadores. Se destacan algunas dificultades que producen que la varianza explicada no sea tan alta, ya que pueden haber días con condiciones extremas, pero ninguna ignición, o varios incendios bajo condiciones meteorológicas desfavorables, dado que en el cálculo de los índices no se considera el factor humano, topográfico, entre otros.

El FWI no solo puede ser utilizado para pronosticar el peligro de incendios en Canadá, también se ha evaluado su potencial en otras regiones del mundo, como en la Patagonia argentina (Bianchi y Defosse, 2014) distintas zonas del Mediterráneo (Dimitrakopoulos, Bemmerzouk, y Mitsopoulos, 2011; Fox et al., 2018; Palheiro, Fernandes, y Cruz, 2006), Indonesia y Malasia (Groot, Field, Brady, Roswintarti, y Mohamad, 2007) y el noreste de China (Tian et al., 2011), por nombrar algunos ejemplos. Asimismo, se han hecho esfuerzos por calcular el FWI a nivel global en base a diferentes reanálisis (Field, 2020; Vitolo et al., 2020, 2019) y modelos de pronóstico del tiempo (Giuseppe et al., 2016). En general, se han encontrado buenas relaciones entre el FWI y la ocurrencia y/o área quemada de los incendios forestales en varias regiones, como el Mediterráneo, la costa oeste de Estados Unidos y los bosques tropicales de Sudamérica, pero se destaca que la validación del FWI (o alguno de sus subíndices) como proxy de incendios debe realizarse localmente, de acuerdo a las características propias de cada lugar.

En el caso de Chile, en Di Giuseppe et al. (2020) se estudió el pronóstico del FWI 10 días previos a grandes incendios del 2017 en Portugal, California y Chile. Mientras que para los incendios de Portugal y California el pronóstico logró acertar el máximo en la actividad de los incendios, para Chile no logró capturar el máximo de incendios del 26 de enero (Bowman et al., 2019), pero sí se pronosticó un alto peligro de incendios para la segunda mitad de enero. Fuera de este estudio no fue posible encontrar otros donde se compare el FWI directamente con incendios forestales en Chile.

El FWI también se usa para realizar proyecciones del peligro de incendios futuro debido al cambio climático antropogénico. Por ejemplo, en Abatzoglou et al. (2019) estudian distintas métricas basadas en el FWI para identificar dónde y cuándo las condiciones meteorológicas propicias para incendios exceden la variabilidad natural, encontrando que eso ya está ocurriendo en el sur de Europa y el Amazonas, y que las zonas afectadas bajo 3°C de calentamiento global son el doble que a 2°C (33-62 % del suelo global a mediados de siglo). También en Bedia, Herrera, Camia, Moreno, y Gutiérrez (2014) concluyen que índices asociados al FWI para el Mediterráneo tienden a aumentar en el futuro, lo que implicaría una mayor ocurrencia de incendios forestales en la zona.

En síntesis, el FWI y sus índices se relacionan bien con la actividad de los incendios forestales (especialmente la ocurrencia y el área quemada) en varias regiones del mundo, debido a la influencia de las condiciones atmosféricas sobre ellos, a pesar de que el FWI no considera factores determinantes en su ocurrencia y propagación (actividad humana, topografía, recursos disponibles, entre otros), por lo que también podría ser un buen indicador para los incendios en Chile centro-sur. En

general, el FWI es un mejor indicador que las variables meteorológicas por sí mismas, dado que integra de manera conjunta los efectos de la temperatura, humedad relativa, magnitud del viento y precipitación en su cálculo.

2.4. Marco analítico de riesgos aplicado a incendios forestales

Existen múltiples definiciones y marcos conceptuales que sistematizan riesgos en el contexto del cambio climático, que muchas veces se sobreponen entre sí. Con el fin de generar un marco integral y único que sea de utilidad para todas las disciplinas, en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014) se instauró el concepto de **riesgo de los impactos del cambio climático**. Este marco analítico combina los ámbitos de adaptación al cambio climático con el de reducción de riesgo de desastres, definiendo riesgo climático como **la probabilidad e intensidad esperada de impactos negativos sobre un territorio, los sistemas sociales y comunidades humanas que lo habitan, que resulta de sucesos o tendencias de naturaleza climática**. A menudo, el riesgo se representa como la probabilidad de la ocurrencia de sucesos o tendencias peligrosas multiplicada por las consecuencias en caso de que ocurran tales sucesos. Los riesgos resultan de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro o amenaza (Figura 2.4). Los conceptos clave que deben evaluarse para estimar el riesgo climático son los siguientes (definiciones tomadas de GIZ y EURAC (2017); IPCC (2014)):

- **Peligro o amenaza:** ocurrencia potencial de un suceso o tendencia físico de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios y recursos ambientales. El término peligro se refiere generalmente a sucesos o tendencias físicos relacionados con el clima o los impactos físicos de este.
- **Exposición:** la presencia de personas, medios de subsistencia, especies o ecosistemas, servicios y recursos ambientales, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente.
- **Vulnerabilidad:** propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos que incluyen la **sensibilidad** o susceptibilidad al daño y la falta de **capacidad de respuesta y adaptación**.
- **Sensibilidad:** está determinada por aquellos factores que afectan directamente las consecuencias de un peligro. La sensibilidad puede incluir atributos físicos (por ejemplo, material de construcción de casas, tipo de suelo agrícola), sociales, económicos y culturales de un sistema.
- **Capacidad:** se refiere a la habilidad de sociedades y comunidades para prepararse y responder a impactos climáticos actuales y futuros. Lo anterior comprende la **capacidad de respuesta**, que consiste en la capacidad de las personas, instituciones, organizaciones y sistemas, utilizando las habilidades, valores, creencias, recursos y oportunidades disponibles,

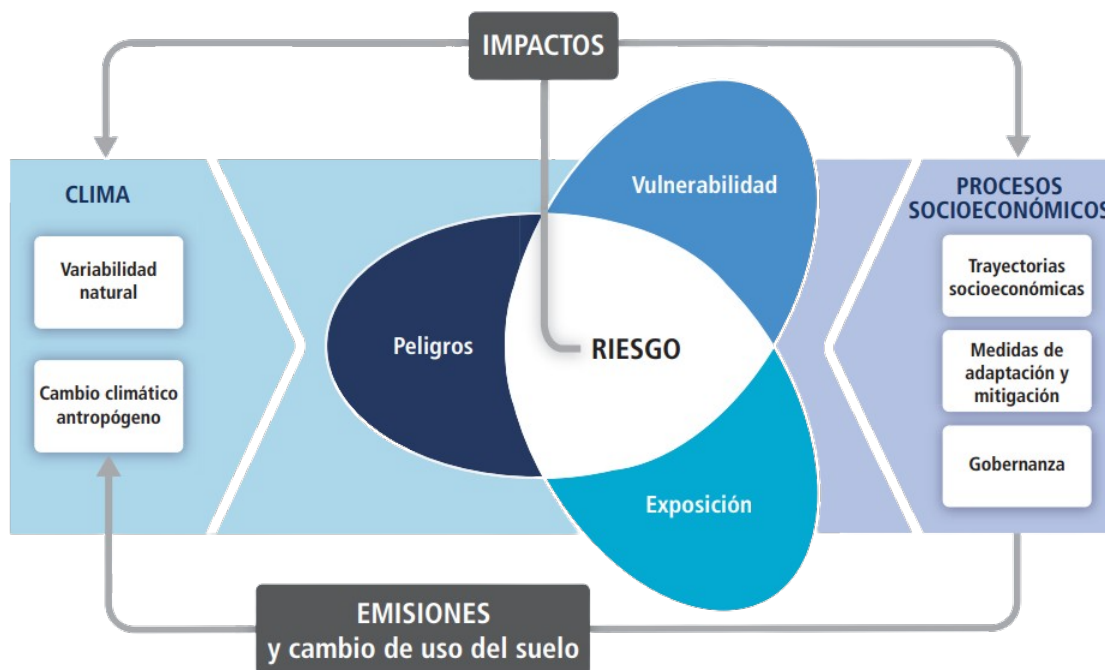


Figura 2.4: Esquema de los conceptos básicos asociados al riesgo de impactos climáticos (obtenido de IPCC, 2014).

para abordar, gestionar y superar condiciones adversas en el corto o mediano plazo (por ejemplo, sistemas de alerta temprana implementados); y la **capacidad adaptativa**, que es la capacidad de los sistemas, instituciones, seres humanos y otros organismos para adaptarse al daño potencial, aprovechar oportunidades o responder a las consecuencias (por ejemplo, el conocimiento para introducir nuevos métodos de cultivo).

La evaluación del riesgo se realiza mediante **cadena de impacto**, que son herramientas analíticas que ayudan a comprender, sistematizar y priorizar mejor los factores que llevan al riesgo en el sistema de interés. Los impactos se entienden como los bloques básicos para la elaboración de cadenas de causa-efecto desde el peligro hasta el riesgo, en consecuencia, las cadenas de impacto representan un hilo conductor que une todos los elementos básicos hasta culminar en el riesgo (GIZ y EURAC, 2017).

Bajo este marco, la potencial ocurrencia de incendios forestales debido a condiciones meteorológicas extremas se considera como un peligro, mientras que el riesgo depende además de la exposición (por ejemplo, la presencia de bosque nativo) y de la vulnerabilidad (cercanía de poblaciones urbanas, tipo de vegetación, dificultad de acceso al terreno, etc).

El proyecto Atlas de Riesgo Climático para Chile (ARCLIM) analiza 55 cadenas de impacto organizadas en 12 sistemas o sectores de interés a nivel nacional, como la agricultura, bosques nativos, salud y bienestar humano, recursos hídricos, entre otros (Pica-Téllez et al., 2020). Si bien no representa una evaluación final de los riesgos climáticos para Chile, la plataforma ARCLIM¹ es un primer paso y un hito significativo para mejorar la comprensión de los desafíos del cambio

¹Disponible en <https://arclim.mma.gob.cl/>

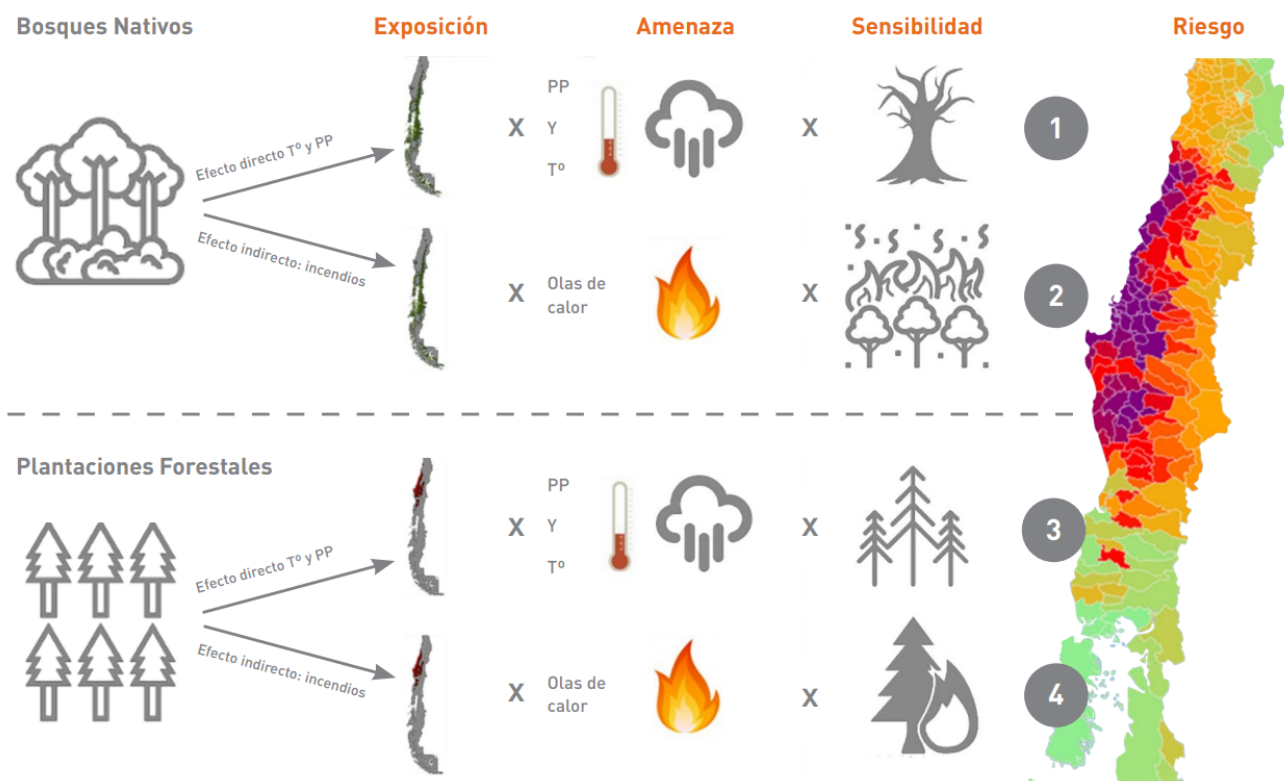


Figura 2.5: Esquema general para el cálculo del riesgo climático para bosques nativos y plantaciones forestales. Los números representan las cadenas de impacto. El mapa de la derecha representa un ejemplo del riesgo final de cualquiera de esas cadenas de impacto (obtenido de Pica-Téllez et al., 2020).

climático en el país, y puede ser un insumo relevante para las capacidades nacionales, territoriales y sectoriales de adaptación al cambio climático.

En ARCLIM, para caracterizar las amenazas/peligros (A) se generaron bases de datos climáticas comunes, mediante un downscaling estadístico de modelos de circulación general (GCM en inglés) a una resolución de 5 x 5 km, que representan distintas realizaciones del clima histórico reciente (1980-2010) y futuro (2035-2065), este último bajo un escenario de cambio climático pesimista (RCP8.5). La exposición (E) se caracterizó mediante la distribución de cada subsistema de interés, por ejemplo, el sector forestal se dividió en cubierta de bosque nativo y plantaciones forestales. Por último, la vulnerabilidad se redujo al cálculo de la sensibilidad (S) en la mayoría de los casos, siendo uno de los aspectos más difíciles de evaluar (Pica-Téllez et al., 2020). Cada índice se normalizó para finalmente calcular el riesgo (R) histórico y futuro de la forma $R = A \times E \times S$. Pueden encontrarse mapas de amenaza, exposición, sensibilidad y riesgo para cada cadena de impacto, con datos por comuna, en su plataforma.

Respecto a incendios forestales, hay 2 cadenas de impactos en ARCLIM que analizan el riesgo de incendios, en bosque nativo y plantaciones forestales respectivamente (Figura 2.5). En ambas, el peligro (amenaza en ARCLIM) se mide a partir de un índice de olas de calor (promedio de días con temperatura mayor a 30°C entre octubre y marzo) normalizado, asignando un 1 a la comuna con máxima amenaza y 0 a la ausencia de días sobre 30°C. La exposición se calcula y normaliza a partir de la superficie comunal cubierta por bosques nativos o plantaciones forestales.

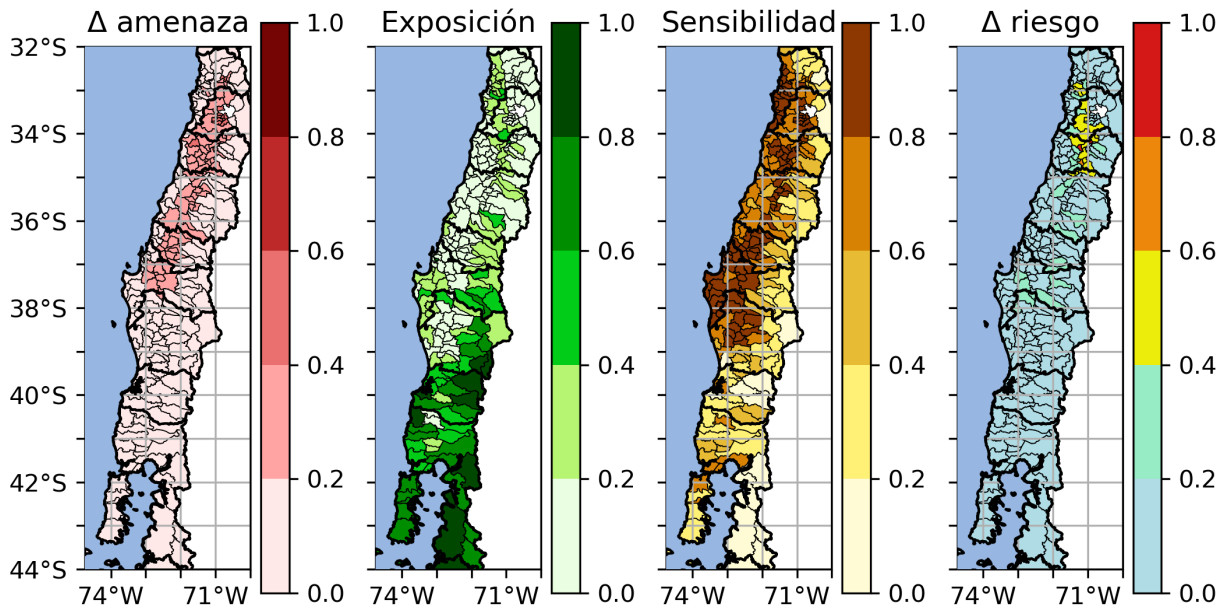


Figura 2.6: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre el clima histórico (1980-2010) y futuro (2035-2065 bajo el escenario RCP 8.5), utilizando como amenaza la variación en la incidencia de temperaturas sobre 30°C. Fuente: Pica-Téllez et al. (2020).

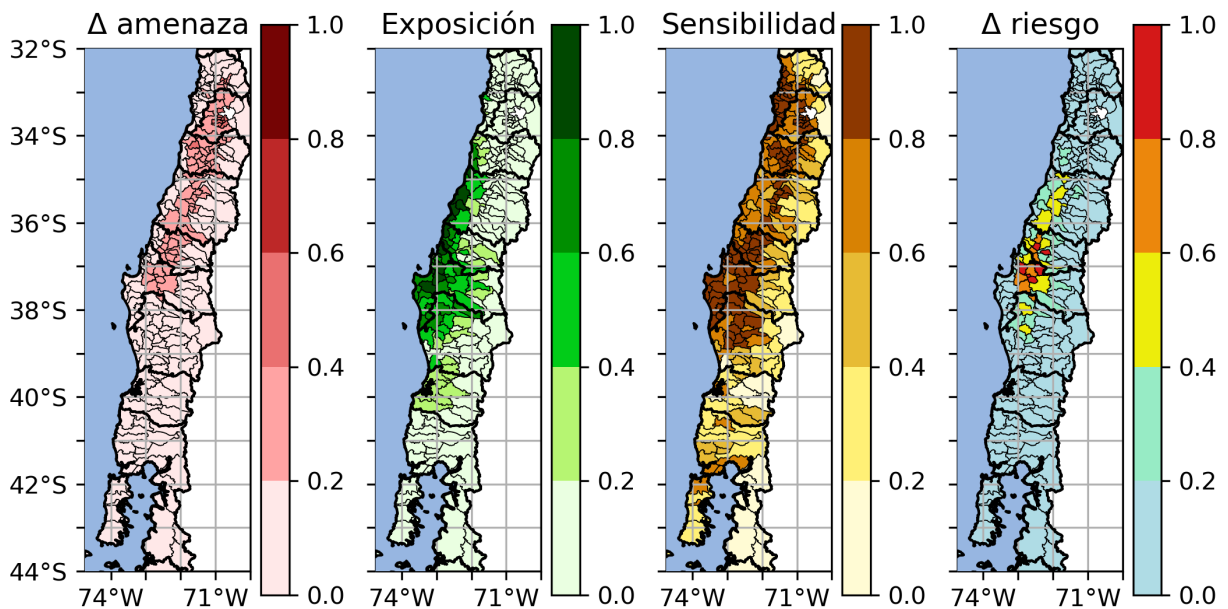


Figura 2.7: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre el clima histórico (1980-2010) y futuro (2035-2065 bajo el escenario RCP 8.5), utilizando como amenaza la variación en la incidencia de temperaturas sobre 30°C. Fuente: Pica-Téllez et al. (2020).

La sensibilidad depende de la probabilidad de ocurrencia de incendios, que fue modelada a partir de variables relacionadas con la actividad humana, topografía y cobertura del suelo. Finalmente, el riesgo se calcula multiplicando A, E y S (Pica-Téllez et al., 2020).

Por un lado, para las plantaciones forestales (Figura 2.7²), el riesgo histórico es mayor entre los valles de las regiones del Maule y de la Araucanía, donde se encuentran la mayoría de las plantaciones, mientras que hacia el futuro el riesgo aumenta principalmente entre el Ñuble y la Araucanía, con un aumento considerable en esta última región. Por otro lado, para el bosque nativo (Figura 2.6³) el riesgo histórico es mayor en los valles centrales de la Región Metropolitana y de O’higgins, donde hay presencia de bosque nativo esclerófilo, y hacia el futuro aumenta mayormente en la misma zona.

En resumen, el riesgo climático se calcula a partir del peligro, la exposición y la vulnerabilidad de un sistema. En Chile, el proyecto ARCLIM busca calcular el riesgo climático histórico (1980-2010) y futuro (2035-2065, escenario de altas emisiones) para distintos sectores de interés nacional. Específicamente, para incendios forestales se analiza el riesgo en bosques nativos y plantaciones forestales. Para el bosque nativo, el riesgo aumenta principalmente en los valles de las regiones Metropolitana y de O’higgins, mientras que para las plantaciones forestales el riesgo futuro se incrementa en mayor medida en la Araucanía.

²Ver imágenes originales en https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/incendios_plantaciones_forestales/

³Ver imágenes originales en https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/incendios_bosques_nativos/

Capítulo 3

Datos y métodos

La zona de estudio de este trabajo comprende Chile centro-sur, específicamente entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos (32° - 44° S, 70° - 74.5° O), enfocándose entre los meses de noviembre y abril (verano extendido) de todos los años analizados, dado que en esa zona y periodo ocurren más del 90% de los incendios en Chile (CONAF, 2022), y además se concentra la mayoría de la población del país (INE, 2018). A continuación se presentan los datos utilizados y métodos seguidos para cumplir con los objetivos principales de este trabajo: validar el Fire Weather Index (FWI) como proxy de incendios para Chile, encontrar el mejor proxy entre el FWI, alguno de sus subíndices o variables meteorológicas, y calcular el riesgo de incendios futuro en la zona.

3.1. Base de datos de incendios forestales

Dada la necesidad de contar con datos de ocurrencia y área quemada de incendios en la zona de estudio, se solicitó a CONAF los datos de incendios individuales disponibles. La base recibida (en formato de planilla Excel) cuenta con todos los incendios ocurridos entre octubre de 1984 y mayo de 2021, detallando la ubicación, fecha de inicio y extinción, duración y área quemada (total y por tipo de vegetación) de cada incendio. Posteriormente, esta base fue grillada a una resolución espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (~ 30 km) y a escala diaria, considerando la fecha de inicio y el área quemada total de cada evento, eliminando únicamente los incendios que no tenían información sobre las coordenadas geográficas ni fecha de inicio, o que quemaron un área menor a 0.01 ha. De esta forma, los datos grillados de incendios utilizados contienen en cada punto de grilla la cantidad de incendios y el área total quemada diaria, en formato NetCDF, siendo una contribución original de este trabajo.

3.2. Cálculo y validación del código Fire Weather Index

Para poder calcular el FWI para Chile, se contó con un código en Python (ver Anexo A) que calcula el FWI y todos sus subíndices (ISI, BUI, DMC, DC y FFMC) para matrices en 2 dimensiones, a partir de la humedad relativa, temperatura, precipitación y magnitud del viento

Tabla 3.1: Variables necesarias para el cálculo del Fire Weather Index.

Variable	Condición	Unidades
Temperatura superficial	Al mediodía	°C
Humedad relativa	Al mediodía	%
Magnitud del viento	Al mediodía	km/h
Precipitación acumulada	las 24 h previas al mediodía	mm

a las 12 hora local (Tabla 3.1). El código originalmente se encuentra escrito en inglés, su autor o autores son desconocidos, pero fue modificado en este trabajo de tesis para su validación.

Primero, para validar que el código efectivamente calcula correctamente todos los índices, se compararon las ecuaciones con las del modelo original desarrollado por Van Wagner y Pickett (1985), y las actualizaciones modernas de Wang, Anderson, y Suddaby (2015) y Vitolo et al. (2020).

Luego de comprobar que el código es capaz de pasar todas las pruebas de los 3 modelos, como validación final del mismo se procedió a calcular el FWI y sus subíndices para la zona de estudio entre octubre de 1984 y mayo de 2021, siguiendo los lineamientos del modelo GEFF¹ (Global ECMWF Fire Forecast) descrito en Vitolo et al. (2020), y comparar los resultados obtenidos con los datos del FWI basados en el reanálisis ERA5², disponibles para todo el mundo a una resolución de 0.25° x 0.25°, entre 1979 y el presente (con un desfase de días a semanas) a escala diaria. El reanálisis ERA5 es el último reanálisis del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Mediano Plazo (ECMWF por su sigla en inglés), que asimila grandes cantidades de observaciones históricas en estimaciones globales, utilizando sistemas de modelamiento y asimilación de datos avanzados (C3S, 2017; Hersbach et al., 2020).

Para calcular el FWI, se utilizaron los datos diarios de temperatura, temperatura de rocío (para el cálculo de la humedad relativa), componentes zonal y meridional del viento en superficie a las 18 UTC (15 hora local en Chile en verano), y precipitación total horaria (para calcular el acumulado diario respecto a las 18 UTC) de ERA5 entre 1984 y 2021 (Tabla 3.2), que además fueron enmascarados para cubrir solamente el área correspondiente a la zona de estudio. A pesar de que el FWI debería calcularse con datos al mediodía local (Van Wagner, 1987), el FWI basado en ERA5 utiliza los datos de las 18 UTC para Chile (comunicación personal con Francesca Di Giuseppe, líder del departamento de pronóstico de incendios en el ECMWF), por lo que se descargó esa hora para comparar adecuadamente los resultados. Tras descargar los datos, se calculó la humedad relativa, la magnitud del viento y la precipitación total acumulada durante las 24 horas previas con respecto a las 18 UTC de cada día de la misma forma que en Vitolo et al. (2019). Además, se convirtieron las unidades de la temperatura de K a °C, del viento de m/s a km/h y de la precipitación de m a mm, dado que el FWI se debe calcular con las variables meteorológicas en esas unidades (Tabla 3.1). Una vez calculado el FWI, se eliminó el primer año (1984) para ignorar posibles errores derivados de la inicialización (fase de spin-up) del modelo (Vitolo et al., 2020).

Finalmente, la validación final del código se realizó mediante la comparación de las series de tiempo y mapas del FWI y sus subíndices calculados, versus los basados en ERA5 descargados, a

¹Disponible en <https://git.ecmwf.int/projects/CEMSF/repos/geff/browse>

²Los datos pueden descargarse en <https://doi.org/10.24381/cds.0e89c522>

Tabla 3.2: Lista de datos obtenidos desde el reanálisis ERA5, entre 1984 y 2021.

Variable	Abreviatura	Resolución	Unidades
Temperatura a 2m	t2m	Horaria	K
Temperatura de rocío a 2m	d2m	Horaria	K
Componente zonal del viento	u	Horaria	m/s
Componente meridional de viento	v	Horaria	m/s
Precipitación total	tp	Horaria	m
Fire Weather Index	FWI	Diaria	-
Initial Spread Index	ISI	Diaria	-
Build Up Index	BUI	Diaria	-
Duff Moisture Code	DMC	Diaria	-
Drought Code	DC	Diaria	-
Fine Fuel Moisture Code	FFMC	Diaria	-

partir del análisis de las diferencias y correlaciones entre ambos conjuntos de datos.

3.3. Búsqueda del mejor proxy de incendios

Para encontrar el mejor indicador indirecto de la actividad de incendios forestales en Chile centro-sur, se correlacionaron, usando los datos en resolución diaria, el área quemada y el número de incendios con el FWI, sus subíndices, la temperatura, humedad relativa, magnitud del viento y precipitación acumulada. A diferencia de la parte anterior, en donde lo importante era validar el cálculo del FWI, aquí se calculó correctamente utilizando los datos meteorológicos al mediodía (15 UTC, horario de verano en Chile). Adicionalmente, se calcularon 2 FWI modificados, el primero utilizando los promedios diarios de las variables meteorológicas, y el segundo también con valores medios excepto por la temperatura máxima en vez de media. Se decidió probar el rendimiento de los FWI modificados debido a que la mayoría de los modelos climáticos utilizados posteriormente para calcular el riesgo futuro de incendios no tienen resolución horaria, por lo que era importante comparar si los FWI modificados dan resultados similares al original.

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre el área quemada y número de incendios total con todas las variables antes mencionadas, para series de tiempo diarias (con el ciclo anual removido mediante la función `seasonal_decompose` en Python, que calcula la estacionalidad a partir del cálculo de medias móviles a lo largo de la serie de tiempo), además de promedios secuenciales (sin traslape) cada 5, 7 y 10 días, mensuales y estacionales cada 3 meses (verano de diciembre a febrero), 4 meses (diciembre a marzo) y 6 meses (noviembre a abril), buscando la agregación temporal que diera la mejor correlación, ya que en otros estudios se utilizan periodos similares (González et al., 2020; McWethy et al., 2021; Urrutia-Jalabert et al., 2018). Luego, se seleccionaron solamente los meses donde ocurren la mayoría de incendios, entre noviembre y abril, también se probó entre diciembre y marzo, y se volvieron a calcular las correlaciones para todas las series de tiempo, esperando que las correlaciones fueran mejores.

Además de calcular las correlaciones para toda la zona de estudio, se buscó reproducir los resultados de Urrutia-Jalabert et al. (2018), donde se subdivide la zona en centro (Valparaíso a

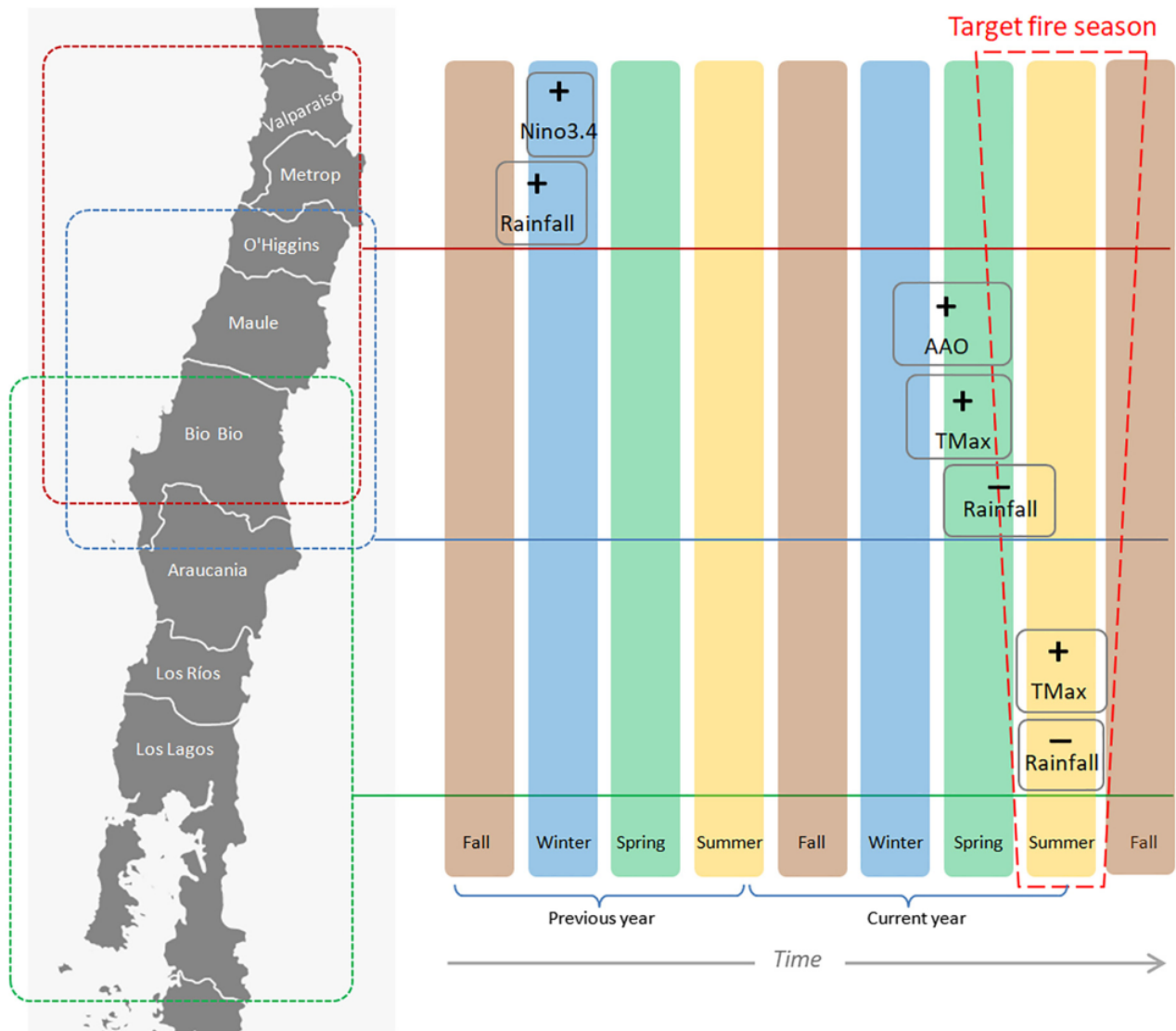


Figura 3.1: Esquema de los principales forzantes climáticos del área quemada a lo largo de Chile centro-sur. La actividad de los incendios en cada región (mapa de la izquierda) se agrupó en áreas centro (cuadro rojo), centro-sur (azul) y sur (verde). El calendario a la derecha indica cuando un forzante dado (precipitación, temperatura máxima, ENSO o AAO) tiene su mayor impacto sobre la actividad de los incendios durante la temporada de incendios objetivo (obtenido de Urrutia-Jalabert et al., 2018).

Biobío), centro-sur (O'higgins a Biobío) y sur (Ñuble a Los Lagos), calculando las correlaciones entre la ocurrencia y el área quemada de los incendios con observaciones mensuales entre 1976 y 2013 de temperatura máxima, precipitación, El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por su sigla en inglés) y Oscilación Antártica (AAO, ídem) para cada subregión. Esta división responde a los tipos de clima de esas zonas: mediterráneo entre Valparaíso y el Maule, transición entre Ñuble y el Biobío y templado de la Araucanía a Los Lagos (Di Castri y Hajek, 1976). Se encontró que los incendios se relacionan más fuertemente con las condiciones climáticas hacia el sur (Figura 3.1).

Más específicamente, la actividad de los incendios en Chile central se asocia principalmente con precipitación sobre el promedio durante el invierno del año anterior a la temporada de incendios,

posiblemente debido a que el combustible fino acumulado durante la temporada de lluvias puede quemarse hasta un año y medio después en la siguiente temporada de incendios, y con condiciones secas entre primavera y verano del mismo año (Figura 3.1), dado que una baja precipitación reduce la humedad del combustible, incrementando la probabilidad de ignición. La temperatura máxima tiene una relación positiva significativa con el área quemada en toda la región de estudio, siendo más fuerte hacia el sur, (Urrutia-Jalabert et al., 2018). La temperatura máxima entre primavera y verano comúnmente ha sido asociada con la actividad de los incendios forestales en el Mediterráneo y otras regiones del mundo (Dennison, Brewer, Arnold, y Moritz, 2014; Koutsias et al., 2012; Piñol, Terradas, y Lloret, 1998; Turco, Llasat, von Hardenberg, y Provenzale, 2013).

Finalmente, para obtener una relación aproximada entre las condiciones meteorológicas y la actividad de los incendios forestales, se realizó una regresión lineal simple a los diagramas de dispersión de los mejores proxies en comparación con el área quemada y el número de incendios respectivamente, de esta forma se calculó cuánto varían estas variables de acuerdo a cambios en las condiciones meteorológicas.

En síntesis, para encontrar el mejor proxy de la actividad de los incendios forestales en Chile centro-sur, se realizaron los siguientes cálculos:

1. Correlaciones entre número de incendios y todos los subíndices del FWI y datos meteorológicos, tanto al mediodía como con valores medios y valores medios más temperatura máxima, para series de tiempo diarias, cada 5, 7 y 10 días, mensuales y estacionales, y tanto a escala anual como seleccionando solo el verano extendido (diciembre-marzo y noviembre-abril).
2. Lo mismo que en 1., pero para el área quemada.
3. Lo mismo que en 1. y 2., pero para las 3 subdivisiones de la zona de estudio mencionadas previamente (Valparaíso - Biobío, O'higgins - Biobío y Ñuble - Los Lagos).

3.4. Proyecciones futuras del peligro de incendios usando modelos CMIP6

Para el cálculo de las proyecciones futuras del peligro de incendios se utilizaron los promedios estacionales entre noviembre y abril del FWI, la humedad relativa y la temperatura media, de acuerdo con los resultados obtenidos que se muestran en el Capítulo 4. Si bien la temperatura máxima se correlacionaba mejor que la temperatura media con los incendios, no se contó con datos de proyecciones futuras de temperatura máxima en este estudio.

Se utilizaron los datos de 8 modelos CMIP6 para hacer las proyecciones (Tabla 3.3). El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por su sigla en inglés) fue establecido en 1995 para estudiar e intercomparar simulaciones climáticas realizadas con modelos climáticos globales (GCMs en inglés) y modelos océano-atmósfera-criósfera-tierra acoplados, en 2 fases: la primera para estudiar la habilidad de los modelos para simular el clima actual, y la segunda para realizar simulaciones bajo distintos escenarios de cambio climático (Meehl, Boer, Covey, Latif, y Stouffer, 2000). Con el tiempo, el proyecto se ha vuelto uno de los elementos fundacionales de las ciencias del clima, que actualmente se encuentra culminando su sexta fase (CMIP6), en la que se busca

evaluar cómo la Tierra responde a distintos forzamientos, cuáles son las causas y los efectos de los sesgos en los modelos, y cómo se pueden evaluar cambios futuros en el clima dada la variabilidad climática interna, la predictabilidad y la incertidumbre en los escenarios (Eyring et al., 2016).

Tabla 3.3: Lista de modelos CMIP6 utilizados en este trabajo de tesis.

Modelo	Institución	Resolución	Realización	Referencia
CanESM5	CCCMA	$\sim 2.8^\circ$	r1i1p1f1	Swart et al. (2019)
CNRM-ESM2-1	CNRM-CERFACS	$\sim 1^\circ$	r1i1p1f2	Séférián et al. (2019)
EC-Earth3	EC-Earth-Consortium	80 km	r4i1p1f1	Döscher et al. (2021)
EC-Earth3-Veg	EC-Earth-Consortium	80 km	r1i1p1f1	Döscher et al. (2021)
EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth-Consortium	125 km	r1i1p1f1	Döscher et al. (2021)
MIROC6	MIROC	$\sim 1.4^\circ$	r1i1p1f1	Tatebe et al. (2019)
MIROC-ES2L	MIROC	$\sim 2.8^\circ$	r1i1p1f2	Hajima et al. (2020)
MRI-ESM2-0	MRI	100 km	r1i1p1f1	Yukimoto et al. (2019)

Tabla 3.4: Lista de variables obtenidas de los 8 modelos CMIP6 entre 1995-2014 y 2081-2100, con resolución temporal diaria (datos descargados de <https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz/>).

Variable	Abreviatura	Unidades
Temperatura superficial	tas	K
Humedad relativa en superficie	rh	%
Magnitud del viento	sfcWind	m/s
Precipitación total	pr	kg m ⁻² s ⁻¹

En particular, se usaron 3 tipos de simulaciones: las **históricas (hist)**, que van desde 1850 al 2014 (Eyring et al., 2016), y las **SSP119** (cercana a un calentamiento global de 1.5°C) y **SSP126** (compatible con un calentamiento de 2°C), disponibles entre 2015 y 2100 (O'Neill et al., 2016). Las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por Shared Socioeconomic Pathways) son trayectorias que describen posibles tendencias en la evolución de la sociedad y los ecosistemas de aquí a fines de siglo, siendo la SSP1 la más optimista, que se refiere a un escenario de sustentabilidad (O'Neill et al., 2014; Riahi et al., 2017). En el último informe del IPCC, las SSPs se combinan con las Trayectorias Representativas de Camino (RCP por Representative Concentration Pathways) que se basaban exclusivamente en el forzamiento radiativo hacia el 2100, de aquí salen las SSP119 (SSP1, 1.9 W/m^2) y SSP126 (SSP1, 2.6 W/m^2). Además, utilizan el periodo 1995-2014 como histórico y 2081-2100 para las proyecciones futuras (IPCC, 2021). Esos mismos periodos fueron utilizados en este trabajo.

Existen cerca de 40 modelos³ CMIP6 de diferentes instituciones, que se utilizaron en distintos experimentos. Todos los datos son de libre acceso a través de la plataforma ESGF, por Earth System Grid Federation (Cinquini et al., 2014). Para este trabajo se utilizaron solo 8 modelos, debido a que eran los únicos que contaban con la temperatura media, humedad relativa, precipitación y magnitud del viento a escala diaria, necesarias para el cálculo del FWI (Tabla 3.4), y para los escenarios históricos, SSP119 y SSP126. De cada uno de ellos se descargó la primera realización

³Ver documentación en <https://search.es-doc.org/?project=cmip6&documentType=cim.2.designing.Project&client=esdoc-url-rewrite>

disponible que tuviera todas las variables requeridas. La lista de modelos y realizaciones utilizados se encuentra en la Tabla 3.3.

Una vez obtenidos todos los datos, se procedió a calcular el FWI para cada escenario y modelo, siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 3.2. Luego, se hizo un **promedio multi-modelo o ensemble** del FWI, la humedad relativa y la temperatura media para los 3 escenarios (histórico, SSP119 y SSP126), debido a que en los promedios multimodelos la incertidumbre asociada suele ser menor que para las simulaciones de modelos individuales (e.g. Giorgi y Mearns, 2002; Her et al., 2016; Pierce, Barnett, Santer, y Gleckler, 2009; Tegegne, Kim, y Lee, 2019). Antes de realizar este promedio, todos los modelos fueron regrillados, utilizando un regrillado conservativo (**remapcon** en CDO⁴) a la misma grilla que los modelos con mejor resolución (80 km, de EC-Earth3 y EC-Earth3-Veg, ver Tabla 3.3).

Posteriormente, se realizaron los siguientes pasos para el FWI, la humedad relativa y la temperatura media, tanto para cada modelo con su resolución original como para el promedio multimodelo:

1. Realización de mapas del promedio del periodo histórico (1995-2014), comparando la simulación histórica de CMIP6 con los datos del reanálisis ERA5.
2. Mapas de diferencias entre escenarios: SSP119 - hist, SSP126 - hist y SSP126 - SSP119. De esta forma se obtienen las proyecciones futuras del peligro de incendios para escenarios de cambio climático con un calentamiento global aproximado de 1.5°C y 2 °C.

Finalmente, con el fin de evaluar la significancia de las proyecciones futuras, se siguió la metodología B del sexto informe de evaluación del IPCC, donde se considera que los cambios son significativos si al menos un 80 % de los modelos acuerdan en el signo del cambio (IPCC, 2021), en este caso, 7 de los 8 modelos utilizados.

3.5. Cálculo del riesgo de incendios futuro usando ARCLIM

El último paso de este trabajo de tesis fue calcular el riesgo de incendios futuro. Para esto, se utilizaron los datos de exposición y sensibilidad por comuna para incendios en plantaciones forestales y bosques nativos de ARCLIM (Pica-Téllez et al., 2020). Uno de los supuestos de ARCLIM es que la exposición y la sensibilidad se mantienen constantes hacia el futuro (2035-2065 bajo el escenario RCP 8.5). En el caso de la amenaza o peligro, se modificó el índice usado en ARCLIM, es decir, en vez de utilizar un índice normalizado de olas de calor (número de días sobre 30°C entre octubre y marzo de cada año), se normalizó el FWI a 1 para los periodos históricos y a 2 para los escenarios futuros del ensemble (interpolado a un valor por comuna utilizando QGIS⁵), calculando el cambio en el riesgo a partir de las diferencias entre escenarios, al igual que en la sección anterior. La razón de normalizar a 2 la amenaza futura es para que la diferencia tenga valores entre 0 y 1. Una vez obtenidas las proyecciones del riesgo, se tomaron como base para realizar recomendaciones

⁴<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/wiki/Tutorial>

⁵<https://qgis.org/es/site/>

de política pública en torno a la gestión del riesgo de incendios forestales en Chile, basadas en los resultados de este trabajo y otros estudios previos. Cabe mencionar que a la hora de hacer los gráficos, se decidió cambiar la escala del riesgo de 0-1 a 0-0.5, para que las diferencias fueran más claras y así poder comunicar los resultados de mejor forma.

Capítulo 4

Resultados

En este trabajo se estudia la relación entre los incendios forestales en Chile centro-sur (Valparaíso - Los Lagos) y las condiciones meteorológicas que favorecen su propagación (temperatura, humedad relativa, viento, precipitación, más el sistema de índices del Fire Weather Index), buscando generar proyecciones futuras del peligro y del riesgo de incendios en la zona.

A continuación se presentan los resultados de esta investigación, comenzando por una caracterización climatológica del régimen de incendios (ocurrencia y área quemada) en la zona de estudio. Posteriormente, se presenta la validación de un código que calcula el FWI, seguido del cálculo del FWI original y 2 FWI modificados para la zona de estudio, que luego se comparan junto a la temperatura, humedad relativa, viento y precipitación con la ocurrencia y área quemada de los incendios, a través del cálculo de correlaciones entre variables para series de tiempo con distintas agregaciones temporales y espaciales, con el objetivo de buscar el mejor indicador meteorológico de la actividad de incendios. Por último, se muestra el cálculo del peligro y riesgo futuro de incendios forestales en Chile centro-sur a partir de los mejores indicadores encontrados.

4.1. Caracterización climatológica del régimen de incendios en Chile centro-sur

La cantidad de incendios ocurridos y el área quemada total desde octubre de 1984 hasta mayo de 2021, entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos se encuentra en la Figura 4.1. Cada punto de grilla tiene una resolución de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (25 km aproximadamente). Se observa una mayor concentración de incendios en los valles y la costa de las regiones de Valparaíso, Metropolitana, Ñuble, Biobío y Araucanía. Por otra parte, también se observa una mayor área quemada en esas zonas, pero distribuida de manera más homogénea. En el caso de las series de tiempo, el año con mayor área quemada por lejos es el 2017, seguido del 2015, mientras que los años donde ocurrieron más incendios son el 2020, 2019 y 2003.

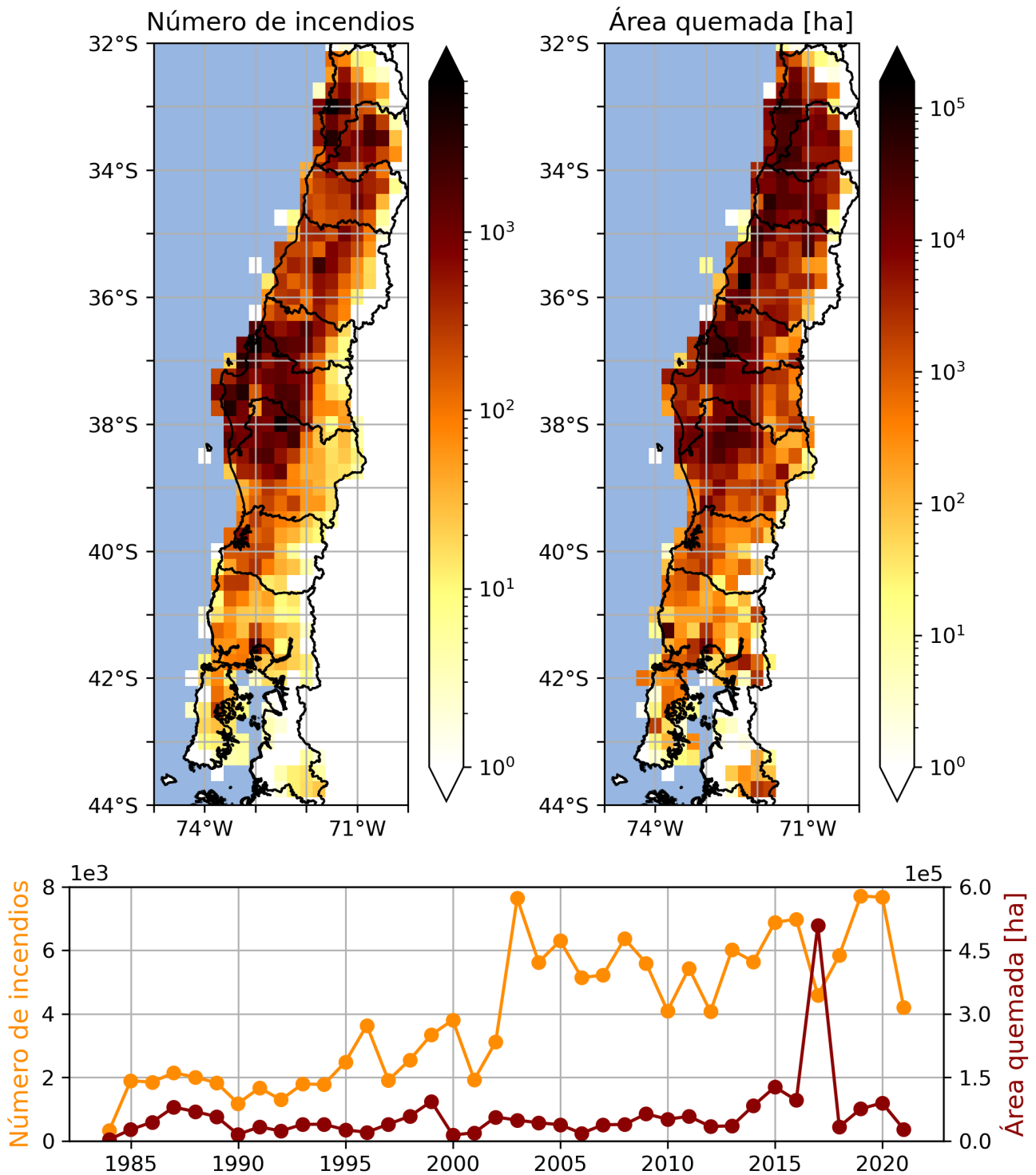


Figura 4.1: Mapas (panel superior) y serie de tiempo (panel inferior) del área quemada (en hectáreas) y número de incendios total ocurridos desde octubre de 1984 hasta mayo de 2021 entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos.

4.2. Validación código propio FWI

Para validar el código (Anexo A) que calcula el FWI y sus subíndices (ISI, BUI, DMC, DC y FFMC), se probó el código con los valores de prueba de Wang et al. (2015) y los del modelo GEF¹ (Vitolo et al., 2019), posteriormente se compararon las salidas del código con el FWI basado en el reanálisis ERA5, entre 1985 y mayo del 2021. Cabe recordar que si bien el FWI debería calcularse solo con datos al mediodía local, para la validación se utilizaron datos meteorológicos a las 18 UTC (15-16 hora local en verano) debido a que es esa hora la que se utiliza para calcular el FWI basado en ERA5 (comunicación personal con Francesca Di Giuseppe, líder del departamento de pronóstico de incendios del ECMWF).

En la Tabla 4.1 se encuentran los resultados de los índices del FWI al usar como valores de prueba los del modelo GEF¹ del ECMWF (Vitolo et al., 2019). Las pruebas del modelo de Wang et al. (2015) no se muestran debido a que se utiliza un archivo de prueba con varios valores de salida, pero se obtuvieron exactamente los mismos resultados que se pueden ver en la Tabla 7 de ese estudio.

En las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se encuentran las series de tiempo, los gráficos de dispersión y

¹Código disponible en <https://git.ecmwf.int/projects/CEMSF/repos/geff/browse/src/geff.f90>

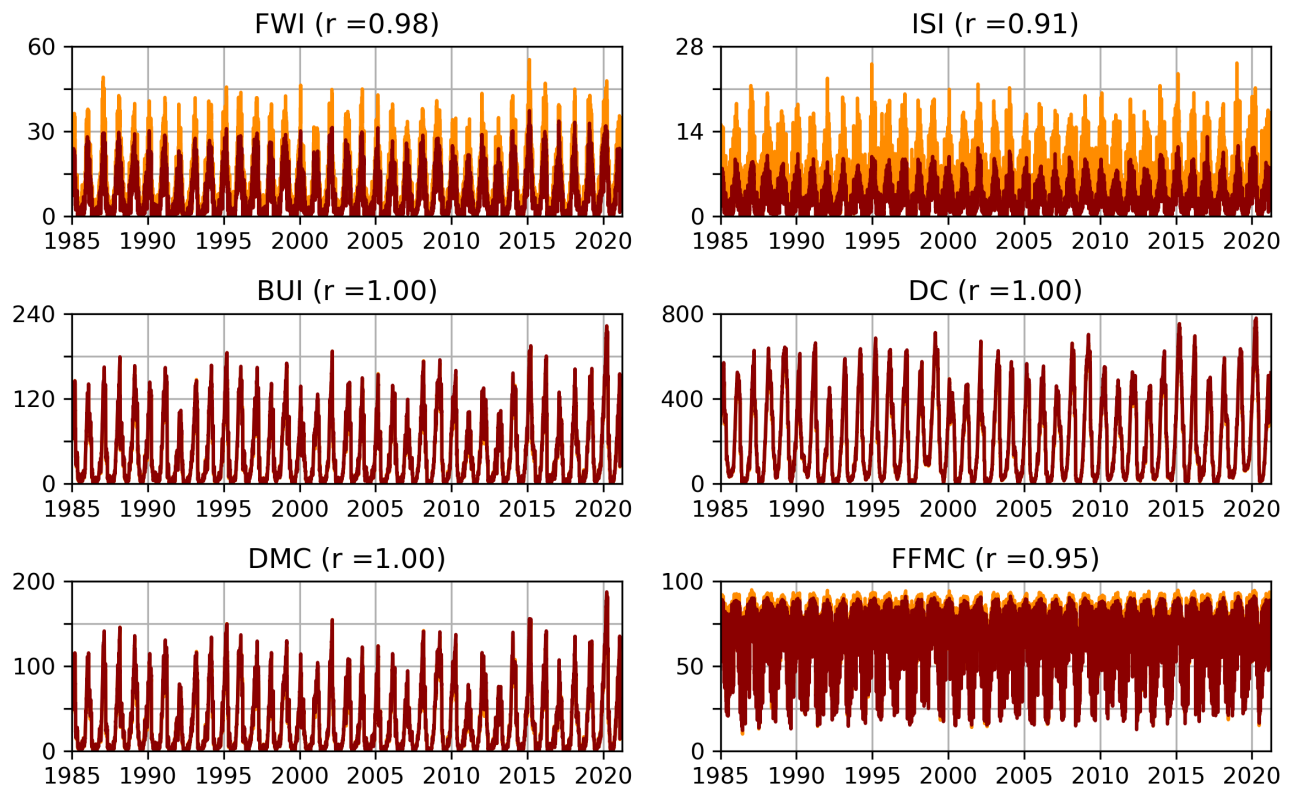


Figura 4.2: Serie de tiempo de cada uno de los índices del FWI entre 1985 y mayo de 2021. En rojo se encuentran los datos descargados de ERA5, y en naranja los índices calculados con un código propio. Al lado de cada índice se muestra el valor del coeficiente de correlación de Pearson (r) entre ambos conjuntos de datos.

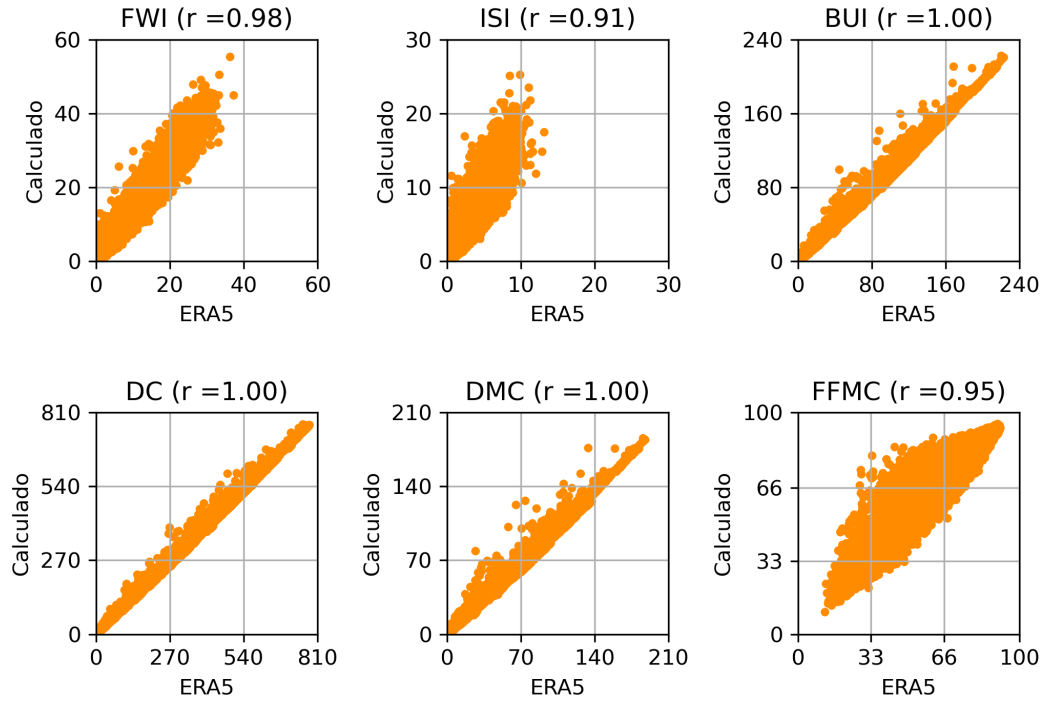


Figura 4.3: Gráfico de dispersión de cada uno de los índices del FWI, comparando los datos descargados de ERA5 (eje x) y los índices calculados con un código propio (eje y). Cada punto representa un valor diario entre 1985 y mayo de 2021. Al lado de cada índice se muestra el valor del coeficiente de correlación de Pearson (r) entre ambos conjuntos de datos.

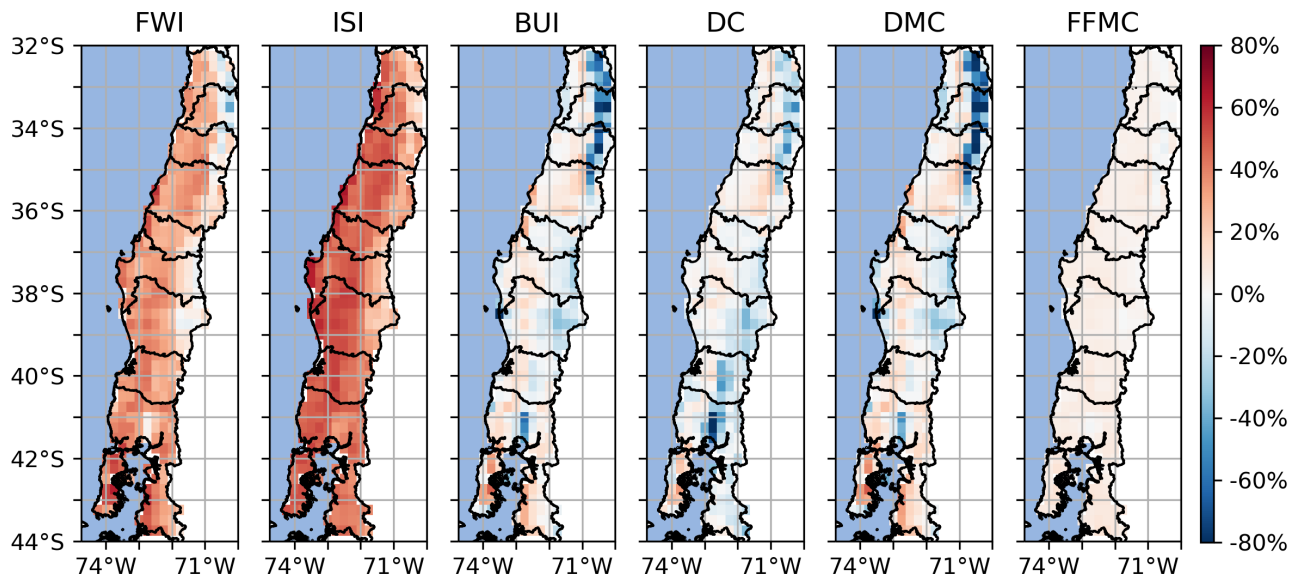


Figura 4.4: Mapas de la diferencia porcentual entre los índices del FWI calculados y los basados en el reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020), promediados entre 1985 y mayo de 2021.

Tabla 4.1: Comparación de los valores de prueba del cálculo de los índices del Fire Weather Index del modelo GEFF (Vitolo et al., 2019) versus los del código propio.

Resultado de prueba	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC
GEFF	10.096	10.854	8.49	8.545	19.014	87.693
Código propio	10.096	10.853	8.49	8.545	19.014	87.693

un mapa de diferencias respectivamente de ambos conjuntos de datos. Además, en las 2 primeras figuras se encuentra el valor del coeficiente de correlación de Pearson (r) calculado para cada índice.

Los valores de prueba obtenidos para cada índice son prácticamente idénticos a los que deberían ser de acuerdo al modelo GEFF (Tabla 4.1), excepto por una diferencia de una milésima para el valor de prueba del ISI, por lo que el código propio debería calcular adecuadamente todos los índices del FWI.

A partir de las series de tiempo (Figura 4.2) es claro que los índices BUI, DC y DMC calculados son prácticamente idénticos a los descargados de ERA5, lo cual se refuerza debido a que el coeficiente de correlación es 1. Este resultado es seguido de cerca por el FFMC, con $r=0.95$, donde se observa que el FFMC calculado presenta máximos un poco mayores al descargado. Sin embargo, existen grandes diferencias en la magnitud del FWI y del ISI, a pesar de que también tienen r altos (0.98 y 0.91 respectivamente).

Los resultados anteriores se ven reforzados por los gráficos de dispersión (Figura 4.3), donde se observan grandes similitudes entre BUI, DC y DMC, con más dispersión para el FFMC, ISI y FWI. En estos 2 últimos se puede ver que los valores calculados tienden a ser mayores que los de ERA5, llegando incluso a duplicarlos en algunos casos.

Respecto a los mapas de diferencia (Figura 4.4), se observan prácticamente nulas diferencias espaciales para el FFMC, valores calculados menores (-60 % aproximadamente en promedio) que los de ERA5 hacia la cordillera de la zona central para el BUI, DC y DMC, y valores consistentemente mayores para el ISI y el FWI (+20 % a +40 %), excepto por valores un poco menores del FWI (-20 % máximo) hacia el este en algunas regiones.

A pesar de que los valores de prueba calculados son iguales a los del modelo GEFF, se observan grandes diferencias en la magnitud del FWI y del ISI para la zona de estudio con respecto a los datos descargados. Los motivos que explican esto se deben principalmente a diferencias en los datos de entrada para el cálculo del FWI, que se mencionan con más detalle en la Discusión.

4.3. Búsqueda del mejor proxy de incendios

Una vez validado el código propio que calcula el FWI, se volvió a calcular el FWI pero de manera correcta, con datos al mediodía (15 UTC, horario de verano Chile). Además, se calcularon dos FWI modificados, unos con valores diarios medios (temperatura, viento y humedad relativa medios, más la precipitación acumulada diaria), y el otro con valores medios y temperatura máxima diaria, dado que los modelos que se utilizaron posteriormente para calcular el riesgo futuro de incendios forestales no tienen resolución horaria, entonces era importante evaluar las diferencias entre el FWI

original (Van Wagner y Pickett, 1985) y el modificado que se utilizaría posteriormente.

Para encontrar el mejor indicador meteorológico de los incendios forestales en la zona de estudio, se calcularon las correlaciones entre número de incendios y área quemada, desde 1984 hasta 2021, con todos los índices del FWI, la humedad relativa, la magnitud del viento, la temperatura media y máxima, y la precipitación acumulada, tanto al mediodía como con valores medios y valores medios más temperatura máxima (FWI modificados), para series de tiempo diarias, cada 5, 7 y 10

Tabla 4.2: Correlaciones con el número de incendios por zona, usando el FWI modificado con valores promedios diarios, para los promedios estacionales entre noviembre y abril. Se destacan los valores de r mayores a 0.5.

	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Todo	0,32	0,37	0,26	0,26	0,16	0,45	-0,46	-0,10	0,39	0,48	-0,38
Centro	0,26	0,28	0,22	0,23	0,08	0,35	-0,40	-0,04	0,36	0,36	-0,38
Centro-sur	0,38	0,37	0,36	0,38	0,22	0,45	-0,53	-0,05	0,50	0,55	-0,46
Sur	0,44	0,46	0,44	0,44	0,37	0,56	-0,55	-0,10	0,48	0,63	-0,48

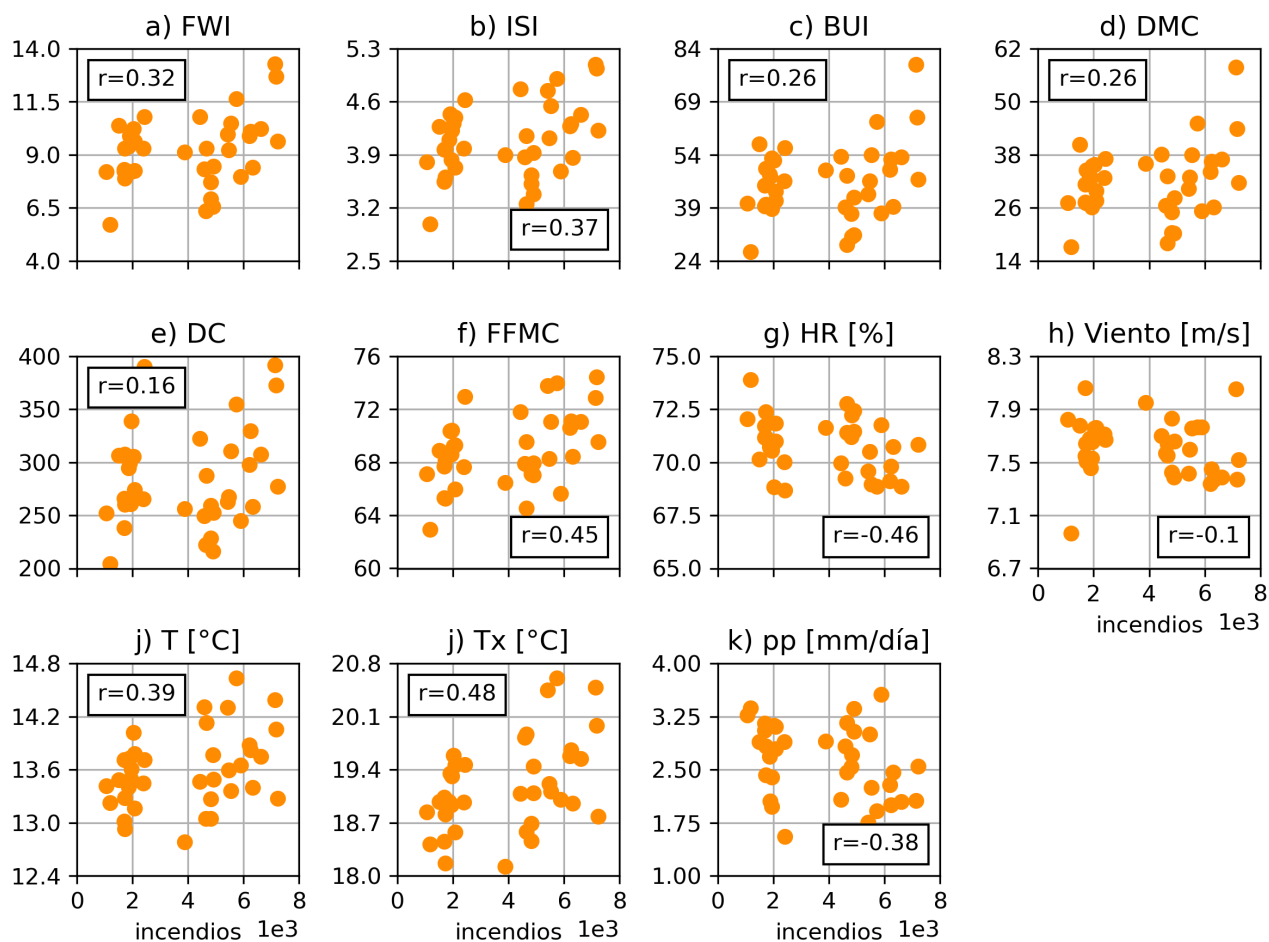


Figura 4.5: Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el número de incendios y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de toda la zona de estudio.

Tabla 4.3: Correlaciones con la ocurrencia de incendios, para los promedios estacionales entre noviembre y abril de toda la zona de estudio (Valparaíso - Los Lagos), con los índices del FWI calculados de 3 maneras distintas: calculado correctamente con datos meteorológicos al mediodía (FWI 12h), con datos promedios diarios (FWI promedios) y con datos promedios diarios más la temperatura máxima (FWI Tx). Se destacan los valores de r mayores a 0.5.

	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
FWI 12h	0,32	0,39	0,24	0,24	0,16	0,48	-0,43	-0,05	0,28	0,48	-0,38
FWI promedios	0,32	0,37	0,26	0,26	0,16	0,45	-0,46	-0,10	0,39	0,48	-0,38
FWI Tx	0,34	0,39	0,26	0,27	0,18	0,47	-0,46	-0,10	0,39	0,48	-0,38

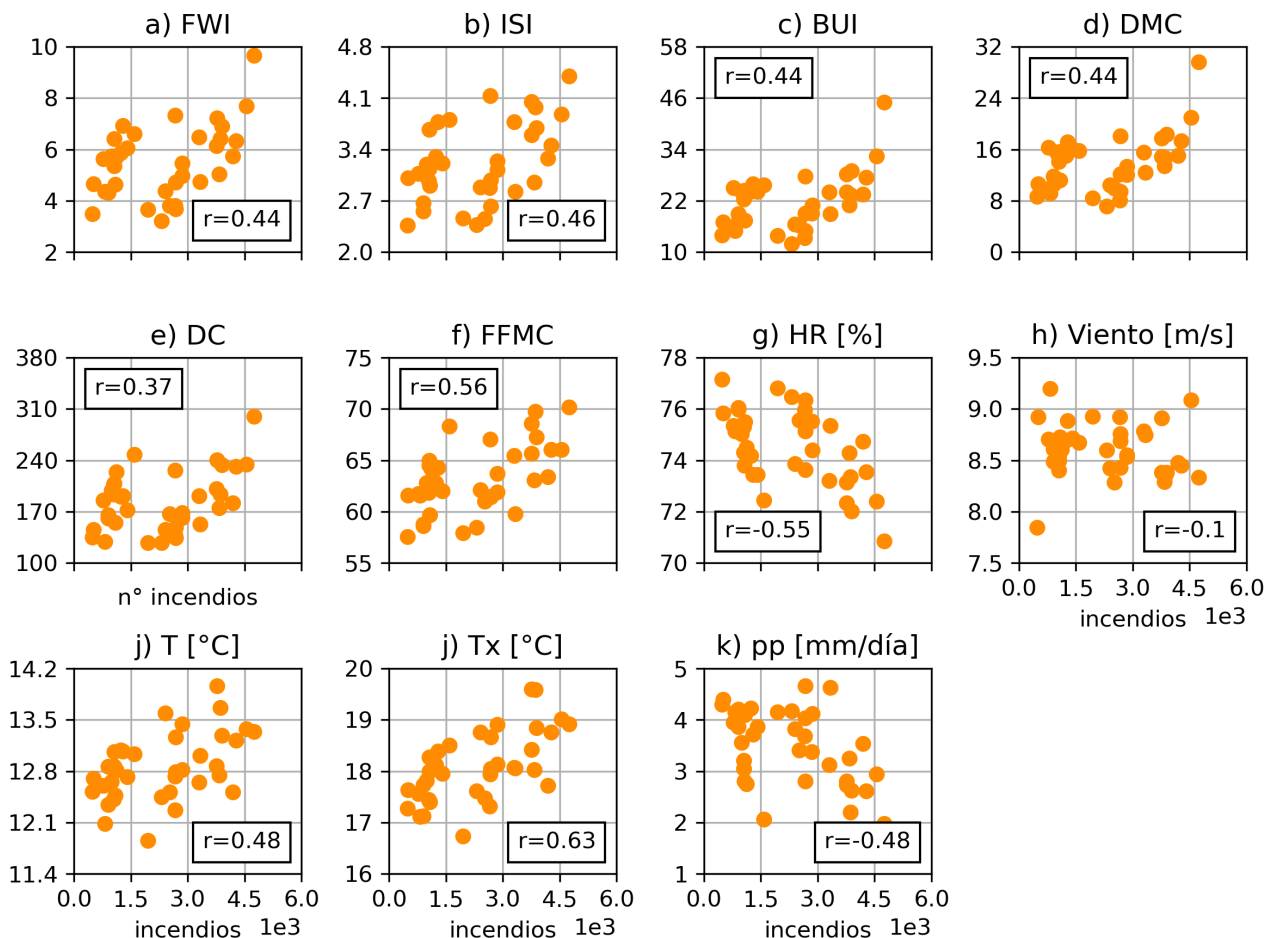


Figura 4.6: Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el número de incendios y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de la zona sur (Ñuble - Los Lagos).

días, mensuales y estacionales, a escala anual y también seleccionando solamente el verano extendido (diciembre-marzo y noviembre-abril). Además, la zona de estudio se dividió en otras 3 regiones: centro (Valparaíso - Biobío), centro-sur (O'higgins - Biobío) y sur (Ñuble - Los Lagos), para las cuales también se calcularon todas las correlaciones antes mencionadas. La idea era encontrar a qué escala temporal y espacial existe una mejor relación entre las condiciones atmosféricas y la actividad de los incendios forestales. La división de la región en subregiones es la misma que la de

Urrutia-Jalabert et al. (2018), que responde a tipos de clima (mediterráneo, transición y templado), donde se encuentra que la relación es mejor hacia el sur.

Las mejores correlaciones obtenidas, tanto para el área quemada como para la ocurrencia de incendios, fueron a escala estacional, calculadas para el verano extendido entre noviembre y abril, sin observarse mayores diferencias entre el FWI original (Van Wagner y Pickett, 1985) calculado y

Tabla 4.4: Correlaciones con el área quemada total por zona, usando el FWI modificado con valores promedios diarios, para los promedios estacionales entre noviembre y abril. Se destacan los valores de r mayores a 0.5.

	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Todo	0,11	0,12	0,07	0,06	0,05	0,12	-0,34	0,03	0,41	0,33	-0,12
Centro	0,05	0,07	0,00	-0,01	0,03	0,04	-0,29	0,17	0,34	0,27	-0,13
Centro-sur	0,07	0,10	0,03	0,02	0,08	0,07	-0,31	0,15	0,38	0,32	-0,15
Sur	0,47	0,46	0,44	0,45	0,37	0,46	-0,63	0,01	0,55	0,52	-0,38

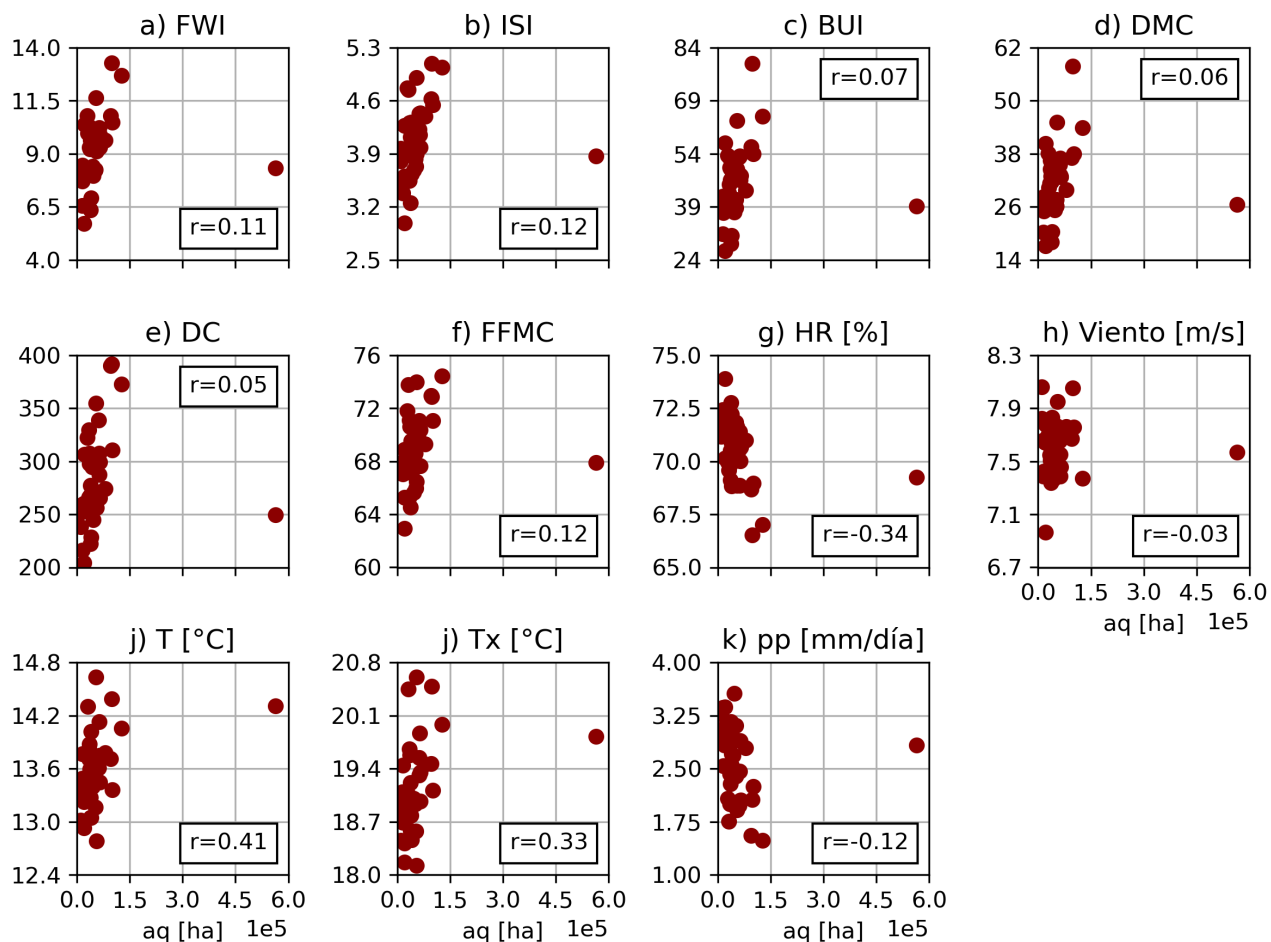


Figura 4.7: Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el área quemada y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de toda la zona de estudio.

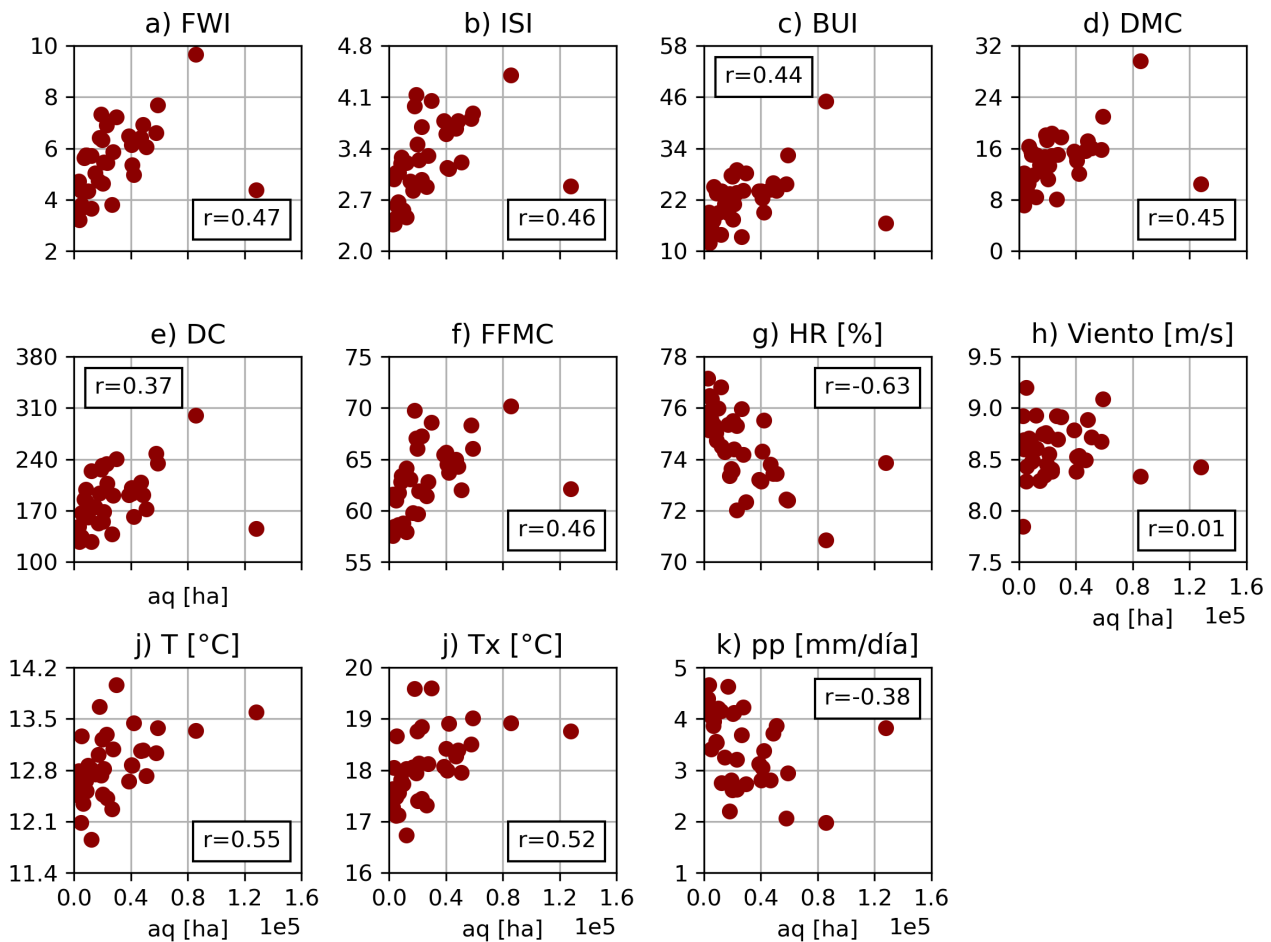


Figura 4.8: Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el área quemada y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de la zona sur (Ñuble - Los Lagos).

los 2 modificados. Efectivamente se encontraron mejores correlaciones hacia el sur, al igual que en Urrutia-Jalabert et al. (2018). A continuación se presentan algunas tablas y figuras de las correlaciones más altas, sin embargo, todas las correlaciones calculadas se encuentran en las tablas del Anexo B.

En el caso del número de incendios, las variables con las correlaciones mayores son la temperatura máxima, la humedad relativa y el FFMFC, seguidas de cerca por la temperatura media y la precipitación acumulada (Tabla 4.2), sin observarse mayores diferencias entre el FWI original y los 2 modificados (Tabla 4.3 y Anexo B). Para la zona de estudio completa, las máximas correlaciones varían entre 0.45 y 0.48 (Figura 4.5), por lo que las variables recién mencionadas explicarían aproximadamente un 20% de la varianza del número de incendios. En la zona sur (4.6), los r máximos son de entre 0.55 y 0.63, explicando entre un 30% y 40% de la varianza. En la zona centro-sur varían entre 0.45 y 0.55, explicando entre un 20% y 30% de la varianza, dependiendo de la variable. Finalmente, en la zona centro las correlaciones son más bajas, siendo como máximo de 0.4 (16% de varianza explicada).

En las Figuras 4.5 y 4.6 se observan los gráficos de dispersión entre la ocurrencia de incendios

y las demás variables, para toda la zona de estudio y la zona sur respectivamente, donde es posible observar una dispersión alta en la mayoría de las variables, especialmente para la zona de estudio completa, incluso en las variables con correlaciones más altas. Respecto al área quemada, las correlaciones más altas encontradas inicialmente fueron para la humedad relativa, temperatura media y máxima (Tabla 4.4), siendo más bajas en general que para la ocurrencia de incendios. Sin

Tabla 4.5: Correlaciones con el área quemada total, excluyendo el 2017, para los promedios estacionales entre noviembre y abril de toda la zona de estudio (Valparaíso - Los Lagos), con los índices del FWI calculados de 3 maneras distintas: calculado correctamente con datos meteorológicos al mediodía (FWI 12h), con datos promedios diarios (FWI promedios) y con datos promedios diarios más la temperatura máxima (FWI Tx). Se destacan los valores de r mayores a 0.5.

	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
FWI 12h	0,54	0,48	0,53	0,49	0,61	0,47	-0,35	-0,01	0,18	0,48	-0,6
FWI promedios	0,66	0,63	0,6	0,58	0,65	0,59	-0,67	0,14	0,42	0,48	-0,6
FWI Tx	0,66	0,62	0,6	0,57	0,64	0,58	-0,67	0,14	0,42	0,48	-0,6

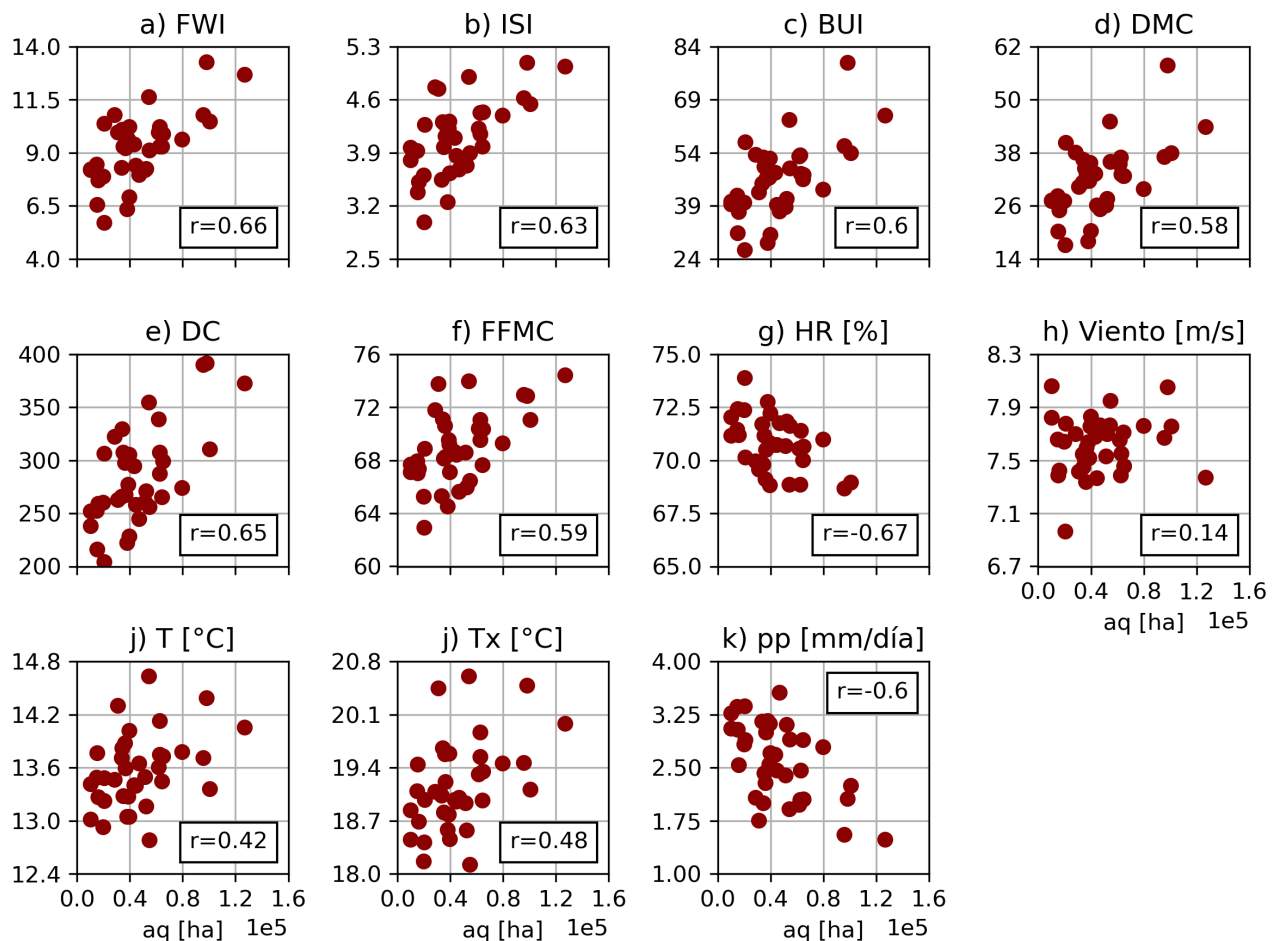


Figura 4.9: Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el área quemada y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de toda la zona de estudio, exceptuando el 2017.

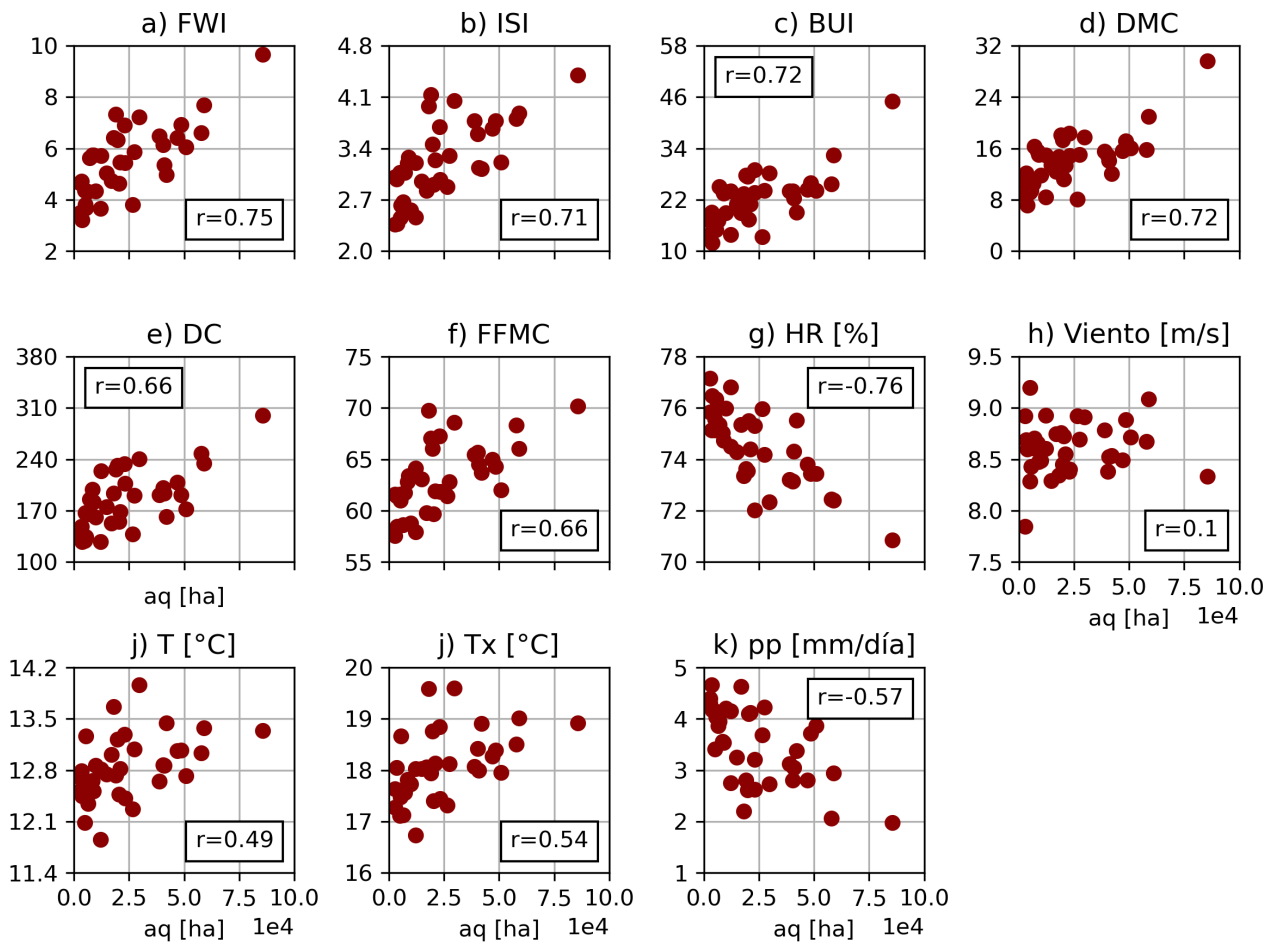


Figura 4.10: Gráfico de dispersión de las correlaciones entre el área quemada y los índices del FWI y variables meteorológicas analizadas, para los promedios estacionales (noviembre - abril) de la zona sur (Ñuble - Los Lagos), sin contar el 2017.

Tabla 4.6: Correlaciones con el área quemada total por zona, excluyendo el 2017, usando el FWI modificado con valores promedios diarios, para los promedios estacionales entre noviembre y abril. Se destacan los valores de r mayores a 0.5.

	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Todo	0,66	0,63	0,6	0,58	0,65	0,59	-0,67	0,14	0,42	0,48	-0,6
Centro	0,5	0,47	0,48	0,44	0,58	0,49	-0,47	0,31	0,31	0,36	-0,53
Centro-sur	0,54	0,51	0,51	0,49	0,6	0,54	-0,55	0,24	0,43	0,48	-0,55
Sur	0,75	0,71	0,72	0,72	0,66	0,66	-0,76	0,1	0,49	0,54	-0,57

embargo, al observar los gráficos de dispersión de cada variable (Figura 4.7 para toda la zona de estudio y Figura 4.8 para la zona sur) es claro que existe un valor extremo o *outlier* que se escapa de la tendencia del resto, este valor corresponde al área quemada de 2017, que tiene un área quemada récord bajo condiciones climáticas promedio. Si bien es conocido que el 2017 tuvo un área quemada de más de 5 veces el máximo previo (Figura 2.2), los motivos que explican que haya sido una temporada tan destructiva se encuentran en el Marco teórico y se comentan nuevamente en la Discusión.

Al eliminar el 2017 del cálculo de las correlaciones, estas mejoran considerablemente. Se observan valores de r mayores a 0.5 incluso en la zona centro, y de hasta 0.76 en la zona sur (Tabla 4.6). Las variables con las mayores correlaciones en este caso son el FWI y la humedad relativa, aunque todos los subíndices del FWI y la precipitación también presentan correlaciones altas. Al analizar la zona de estudio completa, las correlaciones más altas corresponden a la humedad relativa ($r = -0.67$) y al FWI ($r = 0.66$), con lo que se tiene que las condiciones climáticas explicarían alrededor de un 45% de la varianza del área quemada en Chile centro-sur, mientras que para la zona sur alcanzan valores de -0.76 y 0.75 respectivamente, explicando cerca del 57% de la varianza, siendo similares a las encontradas en Urrutia-Jalabert et al. (2018) para la temperatura máxima y la

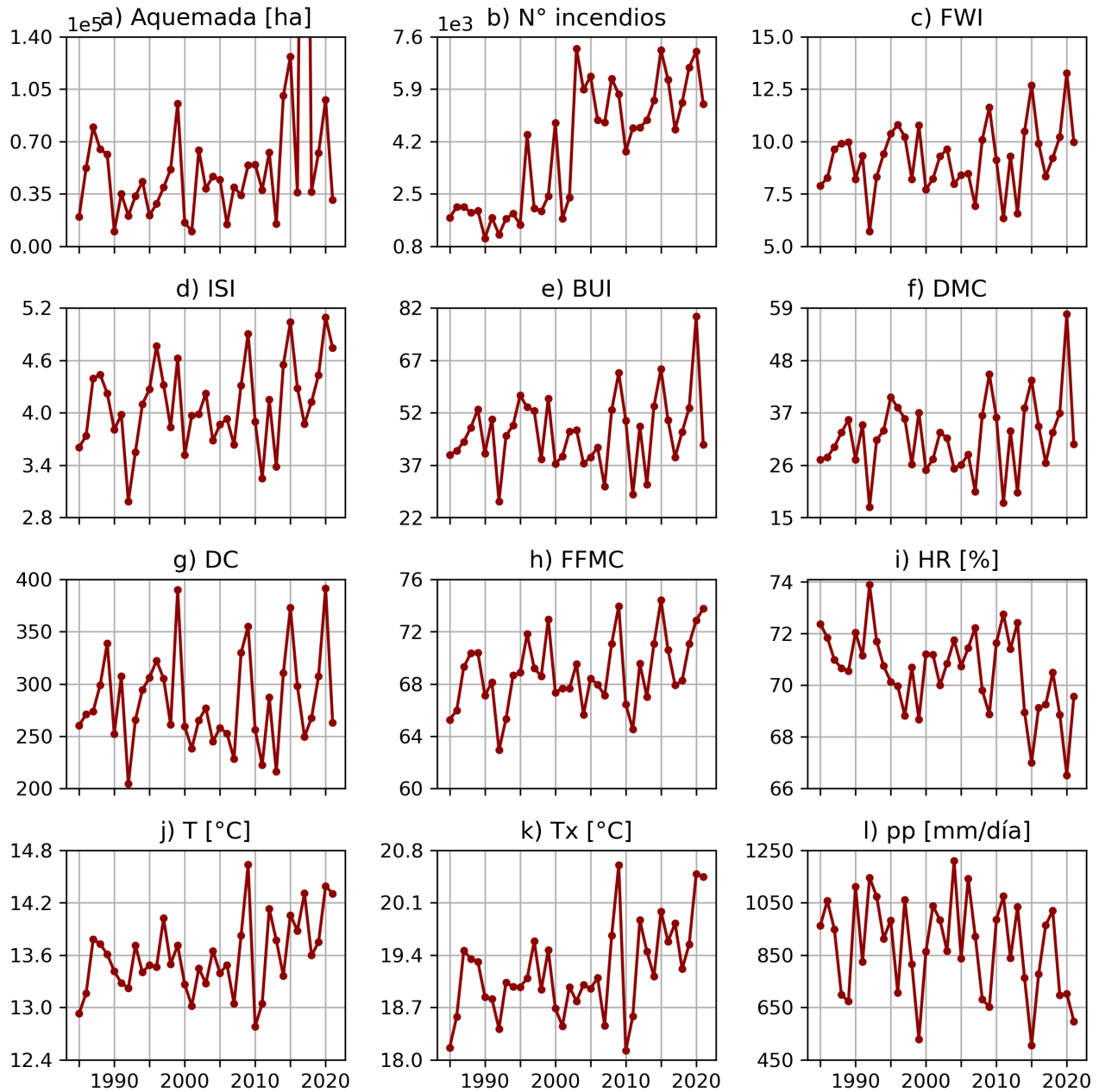


Figura 4.11: Serie de tiempo del promedio estacional (noviembre - abril) de todas las variables analizadas (incendios, índices del FWI y meteorológicas), para toda la zona de estudio.

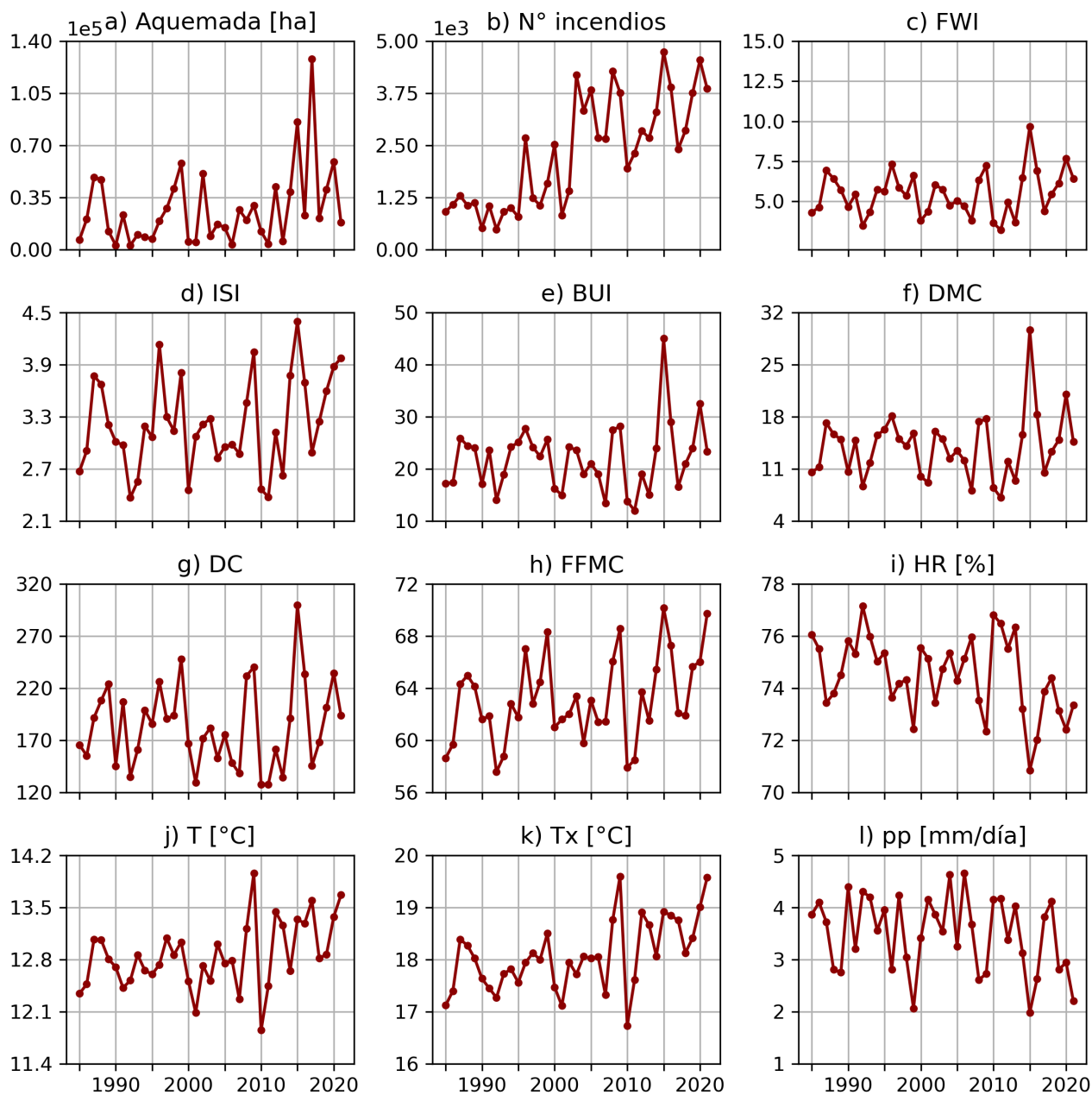


Figura 4.12: Serie de tiempo del promedio estacional (noviembre - abril) de todas las variables analizadas (incendios, índices del FWI y meteorológicas), para la zona sur (Ñuble - Los Lagos).

precipitación, exceptuando la zona sur, donde las correlaciones son ~ 0.1 más altas en este estudio (0.67 vs 0.75).

A diferencia del número de incendios, para el área quemada (excluyendo el 2017) se observa una menor dispersión (Figuras 4.9 y 4.10), especialmente para las variables con correlaciones más altas. Una similitud es que tampoco se observan diferencias respecto del FWI original con los modificados (Tabla 4.5).

Por último, se muestran las series de tiempo de los promedios entre noviembre y abril de todas

las variables, para todo Chile centro-sur (Figura 4.11) y la zona sur definida (Figura 4.12). Cabe destacar que en la serie del área quemada de la Figura 4.11 se hizo un acercamiento para que se pueda observar mejor la serie, por lo que no se ve el máximo del 2017. A partir de estas series se puede ver que los índices del FWI son más similares a la serie del área quemada, las temperaturas a la del número de incendios, y la humedad relativa comparte similitudes con ambas variables.

Uno de los resultados de Urrutia-Jalabert et al. (2018) es que en las zonas centro-sur y centro las correlaciones mejoran al calcularlas con un desfase de tiempo, por ejemplo, con el invierno o verano anterior. Se intentó reproducir los mismos resultados utilizando desfases hasta 2 años previos a la temporada de incendios de interés para las series mensuales (paso de tiempo de 1 mes) y estacionales (paso de tiempo de 4 y 6 meses), pero en ningún caso las correlaciones mejoraban respecto a las calculadas con la misma temporada de incendios. Las posibles explicaciones de lo anterior se encuentran en la Discusión.

En síntesis, se tiene que los mejores proxies encontrados de la actividad de incendios son el FWI para el área quemada, la temperatura máxima para la ocurrencia de incendios y la humedad relativa para ambas variables, a escala estacional (promediando entre noviembre y abril, donde ocurren la mayoría de incendios por temporada), con correlaciones máxima que varían entre 0.5 y 0.76. Mientras más al sur, mayor es la influencia de las condiciones climáticas sobre la actividad de los incendios forestales en Chile centro-sur.

4.4. Proyecciones del peligro de incendios futuro

Se utilizó la temperatura media, humedad relativa, rapidez del viento y precipitación diaria de 8 modelos CMIP6 para calcular el FWI futuro y luego proyectar el aumento en el peligro de incendios a 1.5 °C y 2 °C de calentamiento global. Las simulaciones utilizadas para representar estos escenarios fueron las SSP119 (+1.5 °C) y SSP126 (+2 °C) entre 2081 y 2100, y el escenario histórico entre 1995 y 2014. Las variables analizadas para calcular el peligro de incendios futuro fueron el FWI, la humedad relativa y la temperatura media (ya que no hubo datos de temperatura máxima disponibles al momento de hacer este estudio), ya que fueron las variables mejor relacionadas con la ocurrencia y especialmente el área quemada de los incendios. Las figuras presentadas a continuación corresponden al ensemble o promedio multimodelo de los 8 modelos. Las figuras por modelo se pueden ver en el Anexo C.

En primer lugar, se comparó el escenario histórico con los datos de ERA5 en verano (extendido, noviembre-abril) para comprobar si los modelos logran reproducir los datos históricos (Figura 4.13). Se observa que el ensamble CMIP6 reproduce bien la distribución espacial de las 3 variables, pero sobreestima el FWI y la temperatura media, y subestima la humedad relativa, principalmente en la zona central. El sesgo es de 3 aproximadamente para el FWI, 2 °C para la temperatura y -5 % para la humedad relativa.

En segundo lugar, se graficó la distribución de las 3 variables para los 3 escenarios (Figura 4.14), promediando entre diciembre y marzo de cada año por consideraciones de visualización (si se grafica todo el año o noviembre-abril el FWI presenta muchos valores nulos, por lo que no se observa bien el periodo donde los valores son más altos). En el caso de la temperatura, se aprecia claramente que la distribución se desplaza hacia la derecha en los escenarios futuros, siendo evidente

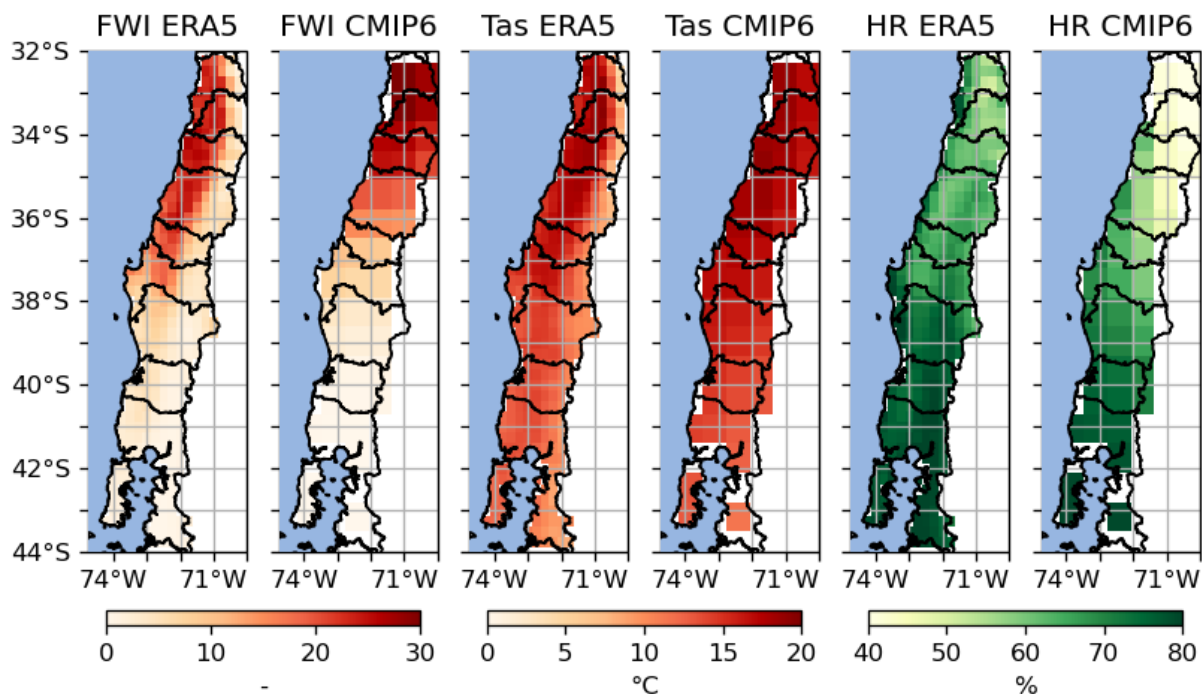


Figura 4.13: Comparación del promedio histórico entre noviembre y abril (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa, entre el ensamble de modelos CMIP6 y los datos de ERA5.

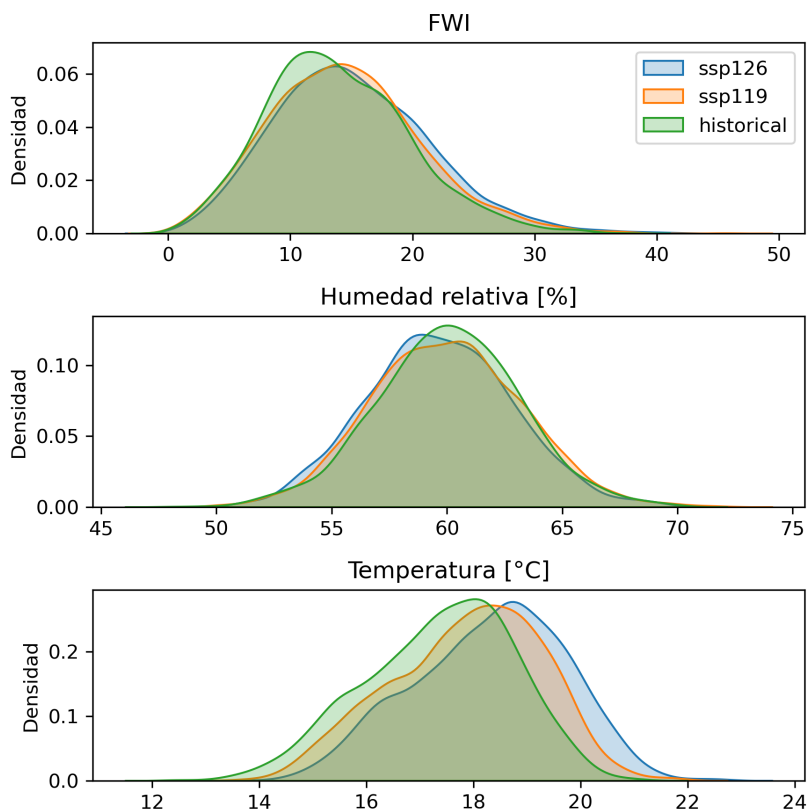


Figura 4.14: Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126 del ensamble de modelos (promedio diciembre-marzo de cada año).

la diferencia entre el escenario histórico, SSP119 y SSP126. En el caso del FWI y la humedad relativa la diferencia no es tan notoria, pero igualmente se aprecia un desplazamiento hacia valores más extremos en los escenarios futuros del FWI, y hacia condiciones más secas (izquierda) para la humedad relativa.

En tercer lugar, se calcularon las diferencias entre los escenarios futuros e históricos para cada variable, que sería el peligro futuro de incendios propiamente tal. Para el FWI (Figura 4.15), se observa un aumento del FWI futuro entre 1 y 2.5 para ambos escenarios, principalmente entre Valparaíso y Biobío (considerada zona centro en la búsqueda del proxy de incendios), con un aumento adicional de 0.5 aproximadamente al pasar del escenario SSP119 al SSP126. Es decir, existe un aumento adicional del FWI bajo 0.5 °C extra de calentamiento global. En el caso de la humedad relativa (Figura 4.16) las proyecciones entre escenarios difieren, ya que en la SSP119 se ve una disminución de 0.5-1% entre Valparaíso y el Maule, cambios casi nulos entre Ñuble y el Biobío, y un aumento de 0.5% aproximadamente entre la Araucanía y Los Lagos, mientras que en la SSP126 hay un secamiento en la mayoría de las regiones, exceptuando Los Lagos. Aquí 0.5°C de calentamiento adicional se asocian a un secamiento extra en casi todas las regiones. Por último, para la temperatura media (Figura 4.17) se observa un calentamiento relativamente homogéneo en todas las regiones, de 0.5°C en el caso de la SSP119, y de 1°C para la SSP126, esto era esperable ya que es el cambio de temperatura que representan estos escenarios respecto al histórico, que simboliza 1°C de calentamiento global, es decir, que el calentamiento proyectado en Chile es similar al global.

Para evaluar la significancia de los resultados, se utilizó la metodología B de IPCC (2021), en

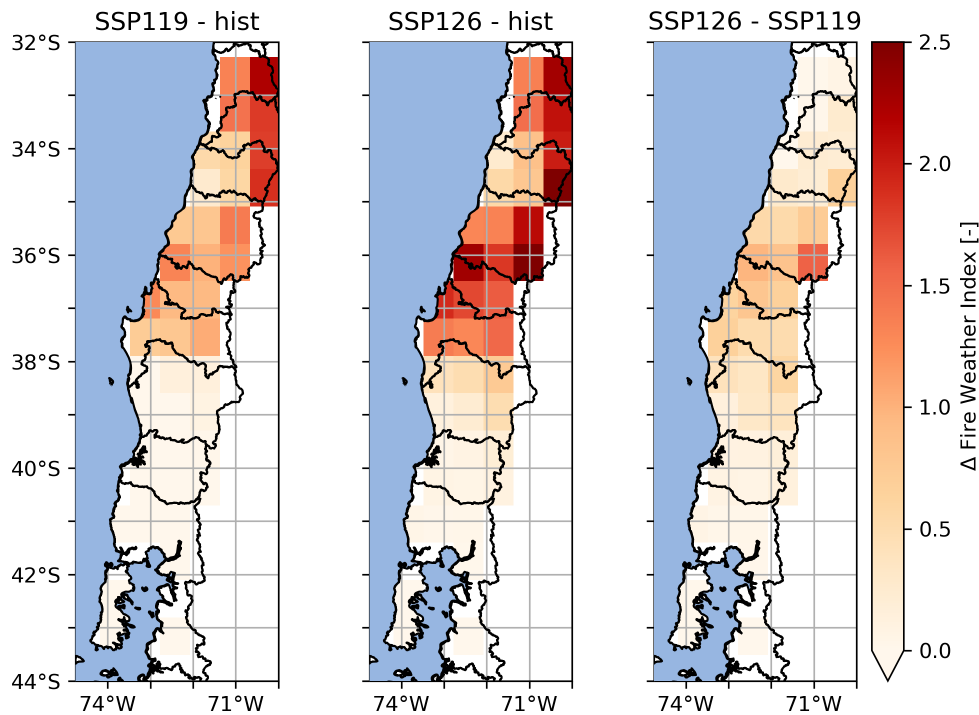


Figura 4.15: Mapas de la diferencia del FWI promedio entre noviembre y abril del ensemble de modelos CMIP6 entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha).

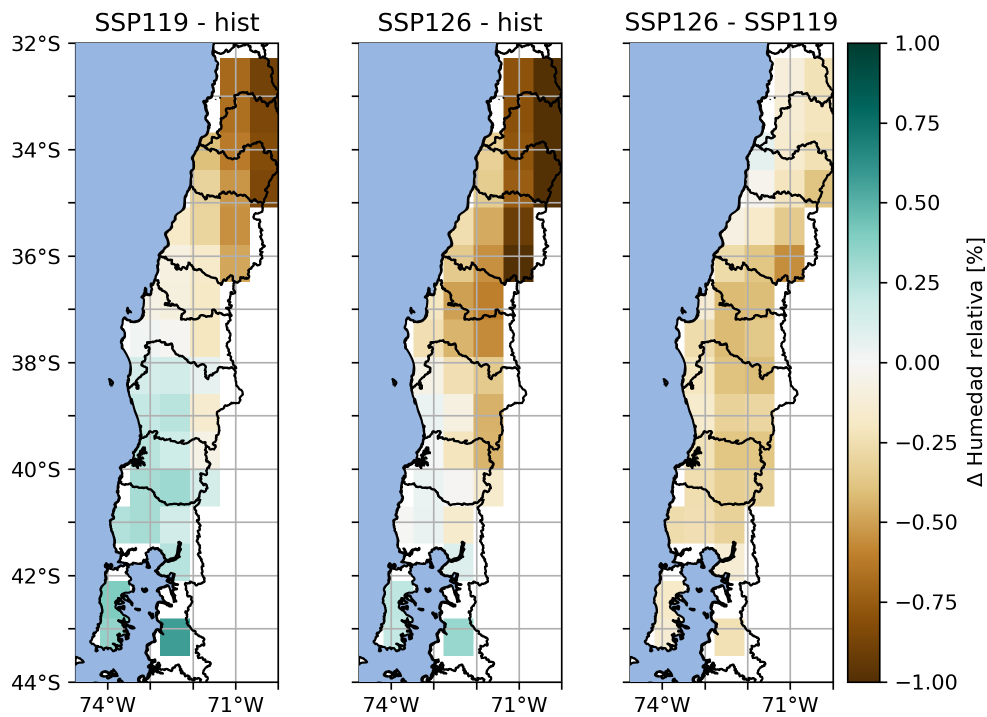


Figura 4.16: Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre noviembre y abril del ensemble de modelos CMIP6 entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha).

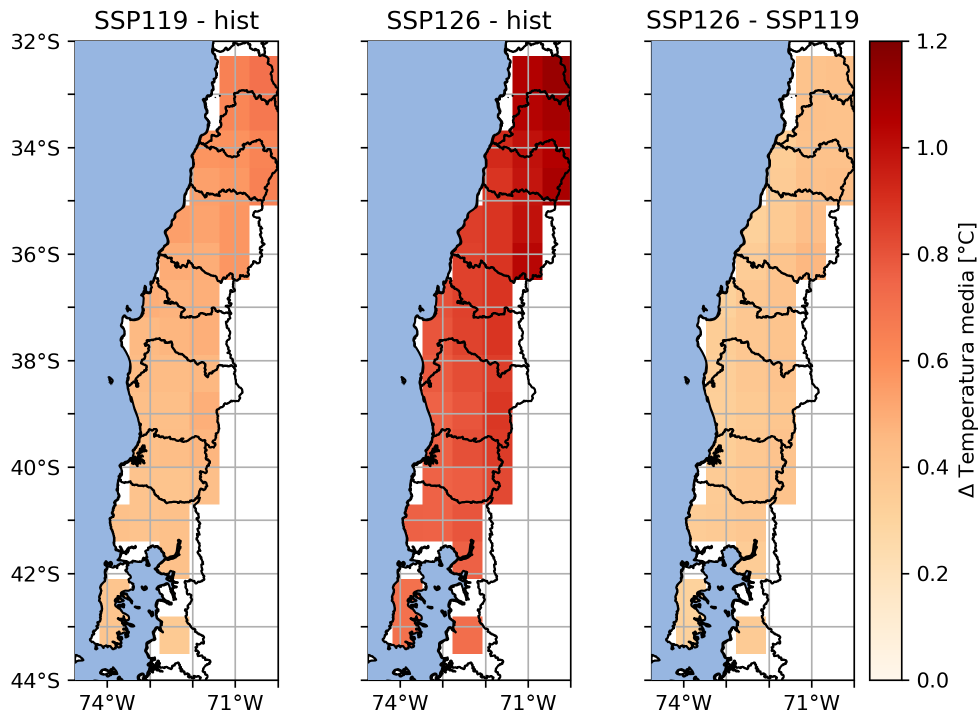


Figura 4.17: Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre noviembre y abril del ensemble de modelos CMIP6 entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha).

donde se considera que los cambios son significativos si al menos el 80 % de los modelos acuerdan en el signo del cambio. De aquí se concluye que el aumento proyectado del FWI y la temperatura media es significativo, ya que se observa un aumento de ambas variables en todos los modelos y escenarios, no así para la humedad relativa, donde los resultados variaban fuertemente por modelo y escenario, sin haber regiones con un claro secamiento o humedecimiento (Anexo C).

Por último, considerando la significancia de las proyecciones, se calculó cuánto aumentaría el número de incendios y el área quemada a partir de aumentos en el FWI, mediante una regresión lineal simple aplicada a los diagramas de dispersión. Para el área quemada (Figuras 4.7), se tiene que por cada aumento de 1 en el FWI promedio habrían aproximadamente 20.000 ha quemadas más por año, considerando toda la zona de estudio. Si se analiza solo la zona centro definida para este trabajo (Valparaíso - Biobío), en donde se encuentra el aumento más importante del FWI, se obtiene que por cada unidad de aumento del FWI el área quemada anual aumenta en 8000 ha. En el caso de la ocurrencia de incendios (Figura 4.5), un aumento de 1 °C en la temperatura promedio se asocia a 4000 incendios más al año en promedio. En consecuencia, de acuerdo con los resultados obtenidos, bajo 1.5 °C de calentamiento se esperarían 10.400 ha quemadas y 2000 incendios más por año en promedio respecto al presente, y bajo 2 °C 2.400 (12.800 en total) ha y 2000 (4000 en total) incendios extras anualmente.

En resumen, de acuerdo a los resultados se espera que en el futuro aumente el peligro de incendios forestales, tanto en ocurrencia como en área quemada, bajo los 2 escenarios de cambio climático analizados (+1.5 °C y 2 °C), encontrándose un aumento adicional del peligro con medio grado extra de calentamiento. Se obtuvieron aumentos significativos del FWI y la temperatura media para ambos escenarios, y cambios en ambos sentidos (no significativos) de la humedad relativa.

4.5. Proyecciones del riesgo de incendios futuro

El último paso de este trabajo de tesis era calcular el riesgo de incendios futuro a 1.5°C y 2°C de calentamiento global, a partir de los resultados del cambio en el peligro que se muestran en la sección anterior. Para esto, se utilizaron los datos de exposición y sensibilidad de ARCLIM (Pica-Téllez et al., 2020), interpolados a valores por comuna. En ARCLIM se calcula el riesgo de incendios en bosques nativos y en plantaciones forestales, para un escenario de emisiones altas (RCP8.5) en el futuro a mediano plazo (2035 - 2065), suponiendo que la sensibilidad y la exposición se mantienen constantes en el futuro. Para el peligro (amenaza en ARCLIM), se utiliza un índice

calculado como el número de días por mes (entre octubre y marzo de cada año) donde se superan los 30 °C de temperatura máxima. Para el cálculo del riesgo como tal, la amenaza histórica, exposición y sensibilidad se normalizan entre 0 y 1, y la amenaza futura entre 0 y 2, del valor mínimo al máximo de cada índice, y el riesgo se calcula como $\Delta \text{Riesgo} = \Delta \text{Amenaza}_{\text{futura-histórica}} * \text{Exposición} * \text{Sensibilidad}$, con lo que también toma valores entre 0 y 1. Más detalles del cálculo del riesgo en ARCLIM se encuentra en el Capítulo 3 y en Pica-Téllez et al. (2020). Los valores entre 0 y 0.2 se asocian a un cambio muy bajo en el riesgo o la amenaza, 0.2 - 0.4 corresponde a bajo, 0.4 - 0.6 a medio, 0.6 - 0.8 alto, y 0.8 - 1 a muy alto.

En este caso, el peligro o amenaza se obtuvo normalizando entre 0 y 1 el FWI promedio entre

noviembre y abril para el escenario histórico, y entre 0 y 2 para los escenarios futuros (SSP119 y SSP126). No se calculó el riesgo a partir de la humedad relativa porque los cambios futuros no fueron significativos, ni tampoco se utilizó la temperatura media porque ARCLIM calcula el riesgo usando un índice de temperatura máxima para la amenaza que tiene una resolución comunal. El riesgo se graficó considerando solamente los valores entre 0 y 0.5, para una mejor comunicación de los resultados. A continuación se presentan los gráficos del cambio de riesgo y amenaza entre los escenarios SSP126, SSP119 e histórico, para bosques nativos y plantaciones forestales.

Para bosques nativos, se muestran los cambios en el riesgo y el peligro de incendios entre la SSP119 y el escenario histórico (Figura 4.18), y la diferencia entre SSPs (Figura 4.19). Por un lado, se observa que existe un aumento muy alto de la amenaza en ambos casos en las regiones de Valparaíso y Metropolitana, alto entre O’ Higgins y el Maule, bajo entre el Ñuble y Biobío, y muy bajo desde la Araucanía a Los Lagos. Dado que la exposición es mayor en las zonas donde el cambio en la amenaza es mínimo, y es casi nula hacia la zona central, el aumento en el riesgo de incendios en bosques nativos a 1.5 °C de calentamiento global, y de 1.5°C a 2°C, resulta ser muy bajo en la mayor parte de la zona de estudio, excepto en la costa de la región de Valparaíso, dado que ahí la sensibilidad es muy alta y hay presencia de bosque nativo esclerófilo.

De manera similar, la amenaza aumenta exactamente de la misma forma para las plantaciones forestales, ya que aquí el cambio en el riesgo está dado por la exposición y la sensibilidad. La mayor cantidad de plantaciones forestales está cerca de la costa y en los valles desde el Maule hasta la Araucanía, donde también hay una alta sensibilidad y cambio en la amenaza alto a bajo, por lo que a diferencia de los bosques nativos, se observan zonas cerca de la costa donde hay un mayor aumento en el riesgo a 1.5 °C (Figura 4.20), y de 1.5°C a 2°C (Figura 4.21) de calentamiento, en

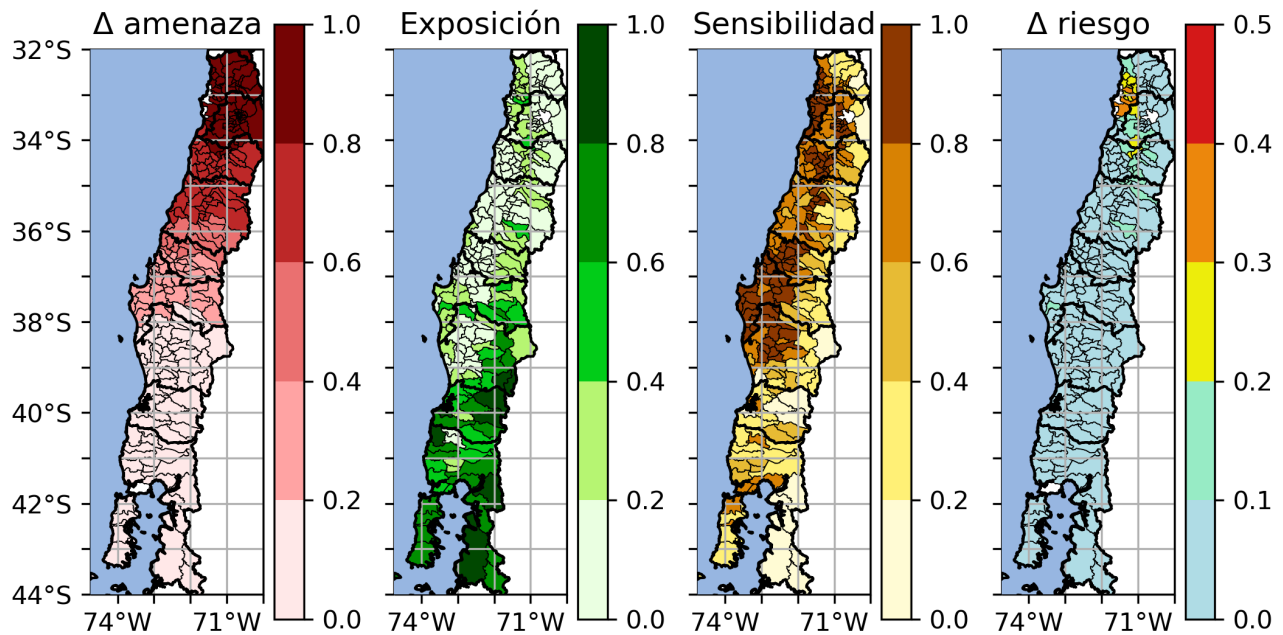


Figura 4.18: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014).

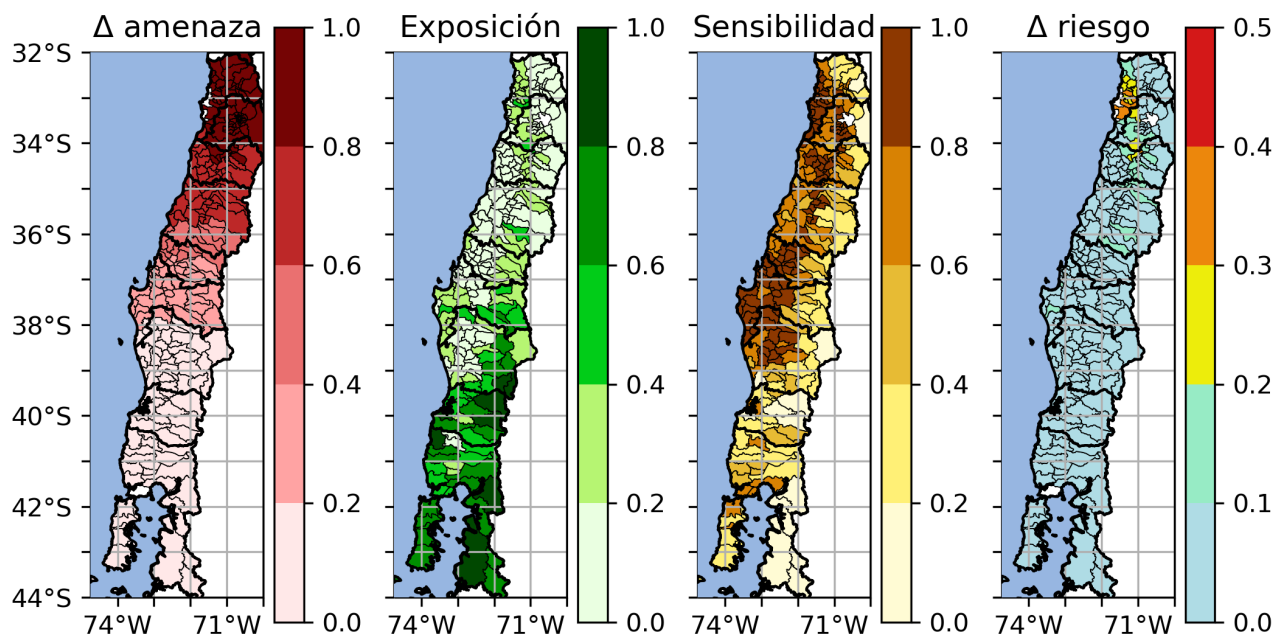


Figura 4.19: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C).

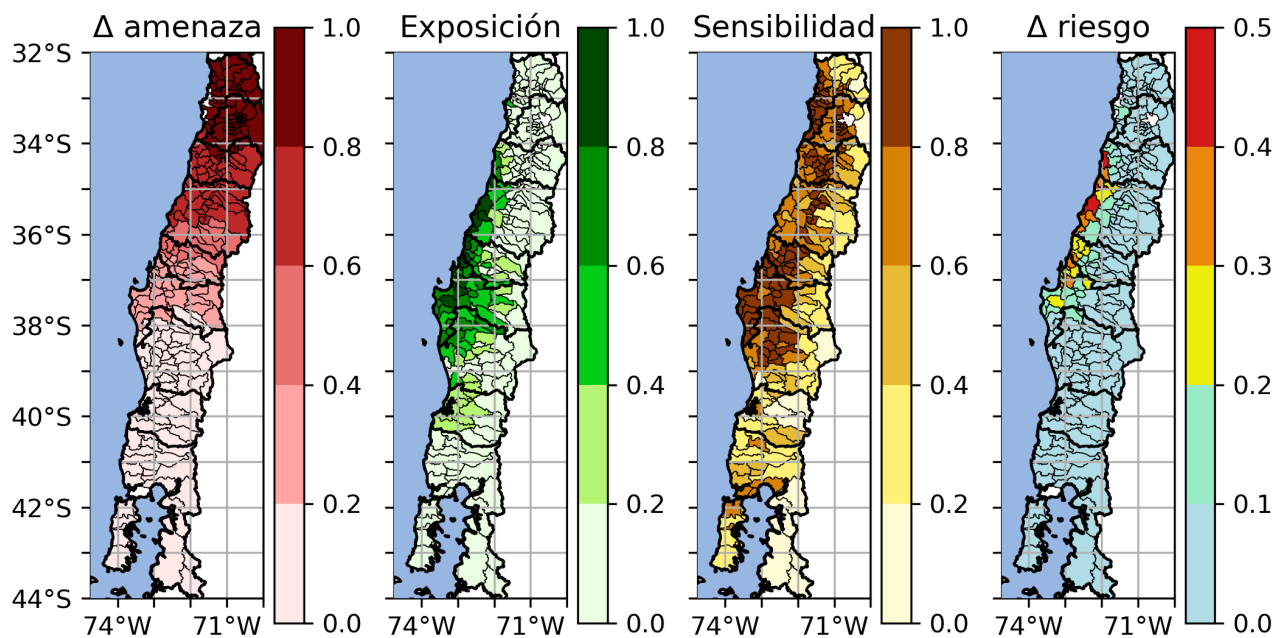


Figura 4.20: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014).

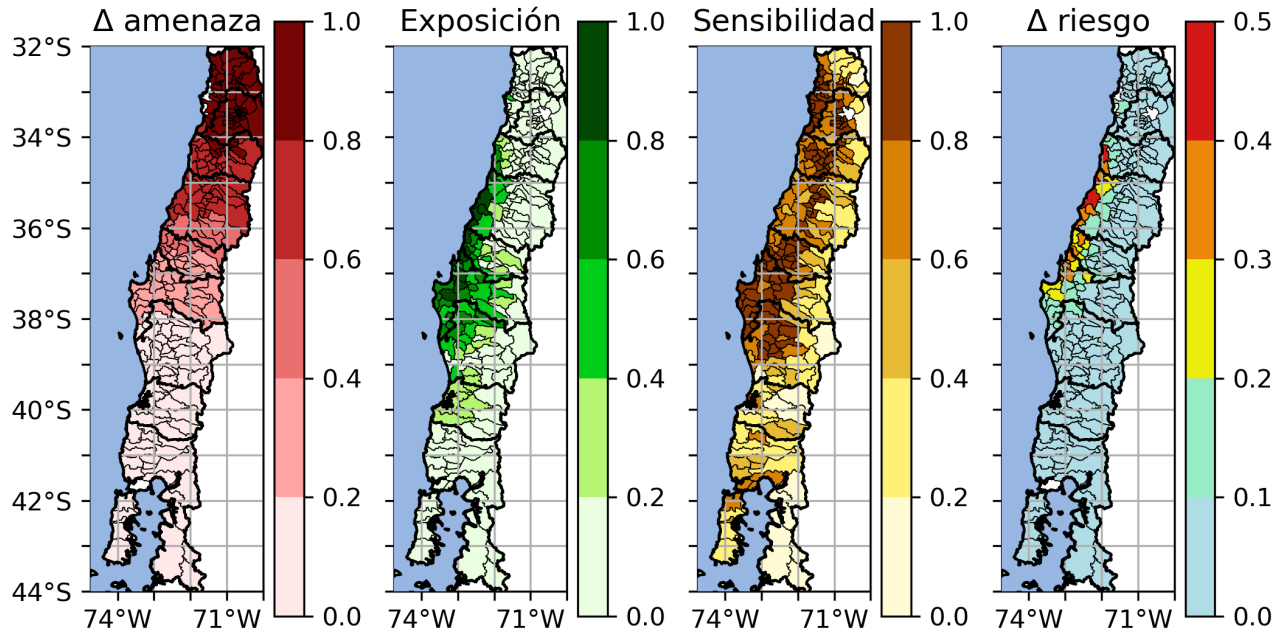


Figura 4.21: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C).

la costa entre las regiones de O'higgins y el Biobío.

En síntesis, el cambio en el riesgo futuro de incendios forestales, tanto para bosques nativos como plantaciones forestales, comparando tanto el escenario histórico con 1.5°C de calentamiento global, y la diferencia entre 1.5°C y 2°C de calentamiento, es muy bajo en gran parte de la zona de estudio. Sin embargo, hay un aumento del riesgo mayor en la costa de Valparaíso para los bosques nativos, y en la costa entre las regiones de O'higgins y el Ñuble para las plantaciones forestales. Cabe destacar que un fuerte supuesto de ARCLIM, que también se utilizó en este trabajo, es que la exposición y la sensibilidad se mantienen constantes en el futuro, lo cual no es cierto necesariamente.

Capítulo 5

Discusión

La caracterización del régimen de incendios en la zona de estudio (Valparaíso - Los Lagos), hecha a partir de series de tiempo y mapas de área quemada y cantidad de incendios acumulada entre octubre de 1984 y mayo de 2021 es similar a la caracterización nacional que se encuentra en el Marco Teórico, lo cual era de esperarse ya que en esta zona cerca del 90 % de todos los incendios y el área quemada a nivel nacional (CONAF, 2022). Se observa una mayor concentración de incendios en los valles y la costa de las regiones de Valparaíso, Metropolitana, Ñuble, Biobío y Araucanía, que coinciden con la zona donde hay mayor presencia de bosque nativo esclerófilo (Di Castri y Hajek, 1976) y plantaciones forestales (Nahuelhual et al., 2012) respectivamente, además de zonas de interfaz urbano-rural (González et al., 2020).

Respecto a la validación del código propio que calcula el Fire Weather Index (Apéndice A), llama la atención que se obtengan valores distintos para el ISI y el FWI respecto a los datos descargados de ERA5, puesto que a priori tienen los mismos valores de entrada. Sin embargo, el FWI basado en ERA5 del ECMWF no utiliza directamente las variables meteorológicas de ERA5, ya que utiliza interpolaciones. Estas diferencias en los datos de entrada deberían explicar la discrepancia en los resultados obtenidos en comparación con los descargados (comunicación personal con Francesca Di Giuseppe, líder del departamento de pronóstico de incendios en el ECMWF), dado que no se encontró ningún error en las ecuaciones del código y era capaz de reproducir casi exactamente los valores de prueba del modelo GEF (Tabla 4.1). Por lo tanto, a pesar de las diferencias entre el FWI y el ISI calculado con los descargados, el código se considera validado. La importancia de contar con un código que se pueda modificar, es que podría utilizarse para estudiar el potencial del Fire Weather Index para pronosticar el peligro meteorológico de incendios en Chile operacionalmente, dado que algunos parámetros deberían ajustarse de acuerdo al tipo de combustible de cada lugar (Van Wagner, 1987), pero en este trabajo se asumieron los mismos que se utilizan a nivel global en el modelo GEF del ECMWF (Vitolo et al., 2020).

De acuerdo con estudios previos, era esperable que la temperatura máxima fuera un buen indicador de la actividad de los incendios forestales en Chile centro-sur (McWethy et al., 2021; Urrutia-Jalabert et al., 2018). Una de las hipótesis de este trabajo de tesis era que el FWI sería un mejor indicador, dado que integra más variables meteorológicas que solo la temperatura, siendo más representativo de las condiciones atmosféricas o climáticas que influyen sobre la ocurrencia y propagación de los incendios. Efectivamente, se comprobó que el FWI medio entre noviembre y

abril (verano extendido) es un mejor proxy que la temperatura máxima para el área quemada, no así el número de incendios donde la temperatura máxima sigue siendo mejor indicador. Un resultado sorprendente es que la humedad relativa resultó ser aún mejor proxy que el FWI para el área quemada, e igual de bueno que la temperatura máxima para la ocurrencia de incendios. Este resultado no se había encontrado en estudios previos, ya que derechamente no analizaban la humedad relativa, debido a que los registros de observaciones meteorológicas más completos suelen ser de precipitación y temperatura solamente (Urrutia-Jalabert et al., 2018), por lo que sería interesante que se incorpore la humedad relativa en estudios futuros, especialmente con observaciones, para ver si es posible observar la misma relación.

Otro resultado que se destacó fue que la relación entre el área quemada y todas las variables aumentaba considerablemente al eliminar la temporada de incendios del 2017 del cálculo de las correlaciones, ya que en ese periodo hubo un área quemada récord, pero sin tantos incendios ni ser un verano extremadamente cálido o seco en promedio. A pesar de que ese verano no tuvo condiciones meteorológicas tan extremas en promedio, sí hubo varias olas de calor, especialmente una a fines de enero que batió los récords de temperatura máxima registrada en varias ciudades de Chile centro-sur hasta esa fecha, que coincidió con el periodo de más actividad de incendios forestales (Bowman et al., 2019; Demortier et al., 2021; McWethy et al., 2021). Además, en los medios de comunicación se publicaron varias noticias respecto a la intencionalidad de los incendios durante el verano de 2017 (e.g., Biobío Chile, 2017; El Mostrador, 2017), donde hubo más de 40 detenidos por provocar incendios intencionalmente. De aquí se desprende que no es necesario que las condiciones meteorológicas sean extremas durante todo el verano para que hayan grandes incendios, si no que basta con algunos periodos de condiciones extremas, donde se vuelve fundamental la influencia de la actividad humana para que hayan o no más incendios, lo que dificulta cuantificar la relación entre incendios forestales y condiciones climáticas.

Uno de los resultados de Urrutia-Jalabert et al. (2018) que se esperaba reproducir era que para las zonas centro y centro-sur la relación entre la actividad de incendios y las variables meteorológicas mejora al analizar las condiciones previas a la temporada de incendios de interés, como el invierno o verano anterior. Sin embargo, al calcular las correlaciones con distintos desfases (mensuales o estacionales de manera secuencial), en ningún caso eran mejores que al comparar con las condiciones atmosféricas de la misma temporada. Esta discrepancia puede deberse a las diferencias entre el tipo de datos usados, que son observaciones meteorológicas en el caso de Urrutia-Jalabert et al. (2018) y reanálisis en este trabajo, además de la escala espacial de los datos. Las estaciones meteorológicas representan las condiciones cercanas al lugar donde se encuentran, y en Chile la red de estaciones no es densa, mientras que los reanálisis son productos grillados que contienen información en cada punto de grilla, y ERA5 es un reanálisis con buena resolución (30 km aproximadamente). En consecuencia, podría ser que la señal climática bajo agregaciones espaciales mayores (por ejemplo todo Chile centro-sur) sea mejor siempre al comparar con el mismo periodo de tiempo.

Sobre las proyecciones futuras del peligro de incendios, se tiene que el FWI y la temperatura media aumentan consistentemente para todos los modelos y en ambos escenarios futuros, por lo que se consideran cambios significativos, no así la humedad relativa que presentaba cambios disímiles según el modelo (Anexo C). De acuerdo con los cambios en la temperatura, el peligro de incendios aumenta de manera casi homogénea en Chile centro-sur, 0.5 °C al pasar del escenario histórico al SSP119, y otro medio grado adicional de la SSP119 a la SSP126 (Figura 4.17, lo cual era esperable ya que las SSPs representan aproximadamente calentamientos de 1.5 °C y 2 °C con respecto a la época preindustrial (O'Neill et al., 2014). En el caso del FWI, el principal aumento se observa

en la zona central, entre Valparaíso y el Biobío aproximadamente (Figura 4.15), con un aumento promedio de 1.3 para el escenario de 1.5 °C de calentamiento (SSP119) y de 1.6 para 2 °C más.

Una de las preguntas que se esperaba resolver en este trabajo de tesis era en cuánto podría aumentar el número de incendios y el área quemada a partir de los cambios en el peligro de incendios. Recordando la sección de Resultados, se calculó que por cada aumento de 1 en el FWI promedio habrían aproximadamente 20.000 ha quemadas más por año en toda la zona de estudio, 8000 ha de ellas entre Valparaíso y el Biobío. Para la ocurrencia de incendios, un aumento de 1 °C en la temperatura promedio se asocia a 4000 incendios más al año en promedio. En consecuencia, a 1.5 °C de calentamiento global se esperarían 10.400 ha quemadas y 2000 incendios más al año que en el presente, y a 2 °C 12.800 (2.400 ha más que a 1.5°C) ha y 4000 (2000 más) incendios extras. Si bien esta es una aproximación simple, la gran mayoría de los incendios forestales en Chile se originan por efecto de la actividad humana, por lo que los efectos reales del aumento esperado en las condiciones atmosféricas propicias para el desarrollo de incendios en el país debido al cambio climático dependerán en la práctica de los esfuerzos de prevención y supresión que se realicen. Por lo tanto, el objetivo principal de estos resultados es servir de orientación para políticas públicas asociadas a la gestión de incendios forestales en el país.

Respecto al cálculo del riesgo futuro, se obtuvo que los cambios esperados para ambos escenarios estudiados son muy bajos en la mayoría de la zona de estudio, excepto por la costa de Valparaíso para bosques nativos, y la costa entre las regiones de O’ Higgins y el Biobío, donde se observó un aumento mayor en el riesgo. Lo anterior no implica necesariamente que el riesgo futuro de incendios forestales no vaya a aumentar en otras zonas, ya que sí se observan cambios considerables en la amenaza de incendios para la zona central de Chile, lo que implica que incluso en los escenarios de cambio climático más optimistas las condiciones meteorológicas óptimas para el desarrollo de incendios forestales serán más frecuentes que en la actualidad. Además, uno de los supuestos más fuertes de ARCLIM es que la exposición y la sensibilidad se mantienen constantes en el futuro (Pica-Téllez et al., 2020), lo cual no es tan realista. Por ejemplo, de acuerdo con la Contribución Determinada a nivel Nacional de Chile (NDC, por su sigla en inglés) Chile se comprometió a forestar más de 100.000 ha, priorizando especies nativas (MMA, 2015), lo que aumentaría la exposición de los bosques nativos. Por lo tanto, sería útil volver a calcular el riesgo futuro considerando diferentes escenarios futuros de la exposición y la sensibilidad, para así obtener resultados más concluyentes.

5.1. Recomendaciones de política pública

Actualmente, la gobernanza climática de los incendios en Chile se caracteriza por un enfoque principalmente reactivo, con poca planificación, prevención y coordinación entre instituciones, quedando especialmente desamparadas las zonas de interfaz urbano-rural y los territorios donde no operan industrias forestales (Billi et al., 2021).

Después de los megaincendios del 2017, la CONAF y empresas forestales privadas aumentaron considerablemente los recursos destinados a la detección y control de los incendios (más de 150 millones de dólares en total). Esta inversión resultó en que durante la temporada de incendios del 2019-2020, a pesar de que las condiciones meteorológicas medias fueron más extremas que las del 2017 (Figura 4.11), se quemaron solo 100.000 ha aproximadamente (Figura 2.2), un valor sobre el promedio pero dentro de la variabilidad histórica. Es decir, el aumento en los esfuerzos

de supresión del fuego previene mayores aumentos del área quemada de lo esperado bajo un clima más cálido. Lo anterior destaca la fuerte influencia humana, tanto sobre la ocurrencia como sobre la propagación de incendios forestales, si se tienen cambios de patrones en la actividad humana y en el manejo de incendios más rápidos que los del clima, para bien o para mal. Si se consideran además cambios en el uso de suelo, como disminuir el área de plantaciones y reforestar con especies nativas (o lo contrario), el impacto podría ser aún mayor (McWethy et al., 2021).

De acuerdo a Sun et al. (2019), a nivel global, una disminución de 0.5 °C en el calentamiento global (de 2 °C a 1.5 °C) ayudaría a disminuir hasta un 50 % de la exposición a incendios forestales, aunque es probable que los países desarrollados estén aún más expuestos a eventos de calor extremo.

A pesar de que los cambios obtenidos en el riesgo futuros de incendios forestales en Chile centro-sur son muy bajos en su mayoría, sí existe un aumento notorio en el riesgo futuro en la costa de Valparaíso para los bosques nativos, y en la costa entre O'higgins y el Biobío para las plantaciones forestales, y un aumento significativo del peligro entre las regiones de Valparaíso y el Biobío, por lo que se espera que las condiciones atmosféricas propicias para el desarrollo de grandes incendios sean más frecuentes en el futuro. Incluso si se tomaran todas las medidas necesarias para limitar el calentamiento global a 1.5 °C o menos de 2 °C, es altamente probable que se sobrepasen los 1.5 °C durante la década del 2030 debido a variabilidad natural (IPCC, 2021). En consecuencia, las políticas en torno a la gestión del riesgo de incendios forestales en el país deben actualizarse en el corto plazo para prevenir futuros desastres socionaturales.

La siguiente lista contiene una síntesis de recomendaciones en torno a la gestión del riesgo de incendios forestales en Chile ya realizadas en estudios previos, y que se ven reforzadas por los resultados de esta investigación:

- Es necesario ampliar y reforzar las acciones en torno a la prevención de los incendios, fortalecer las capacidades y recursos de municipios y comunidades locales, y generar procedimientos para acceder e integrar evidencia científica (Billi et al., 2021). Esto es clave además para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a grandes incendios (González et al., 2020).
- Asimismo, se requiere un mayor presupuesto para el combate de incendios y la respuesta temprana, reconocimiento de la duración de la temporada de incendios y su monitoreo, y regularidad en la coordinación de instituciones locales (Billi et al., 2021).
- En un escenario de cambio climático que favorecerá la mayor frecuencia, extensión e intensidad de los incendios, la expansión de la vegetación exótica puede exacerbar los impactos en los ecosistemas naturales y en el bienestar humano. Por lo tanto, resulta de gran importancia la generación de políticas y acciones de manejo destinadas al control de las especies exóticas invasoras y la restauración de ecosistemas nativos para disminuir la probabilidad de eventos catastróficos (Billi et al., 2021).
- En particular, a partir de esta investigación se desprende un aumento significativo en el peligro de incendios forestales en la zona central de Chile, donde hay una alta presencia de bosque nativo esclerófilo, endemismo y biodiversidad propia de climas mediterráneos (Di Castri y Hajek, 1976), por lo que enfatiza que se requieren más esfuerzos de conservación y reforestación de la vegetación nativa en la zona.

- La mayor proporción de pérdida de vidas humanas e infraestructura se encuentra en la interfaz urbano-rural, donde además se concentra el gasto en combate y recuperación post incendios. En este sentido, es importante mejorar el ordenamiento territorial y la diversificación del paisaje, estableciendo un perímetro de seguridad en torno a las viviendas y áreas urbanas, y normar y limitar la expansión de viviendas y barrios a zonas rurales cubiertas de plantaciones forestales y bosques nativos (González et al., 2020).
- El mayor aumento en el riesgo calculado para ambos escenarios futuros se encuentra en la costa de la región de Valparaíso en el caso de los bosques nativos, y en la costa de las regiones del Maule al Biobío para plantaciones forestales, por lo que se debiera poner especial cuidado en estas zonas.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo de tesis se abordan los cambios en el riesgo futuro de incendios forestales en Chile centro-sur (Valparaíso - Los Lagos) bajo escenarios optimistas de cambio climático (+1.5 °C y +2 °C). El objetivo principal era evaluar si el riesgo de incendios cambia significativamente en comparación con el presente, y para una diferencia de 0.5 °C de calentamiento global. Para esto, se utilizó una base de datos de incendios, más datos del reanálisis ERA5 de los índices del Fire Weather Index, la temperatura media, humedad relativa, rapidez del viento y precipitación, junto con datos de las mismas variables meteorológicas de 8 modelos CMIP6 para los escenarios histórico (presente), SSP119 (+1.5 °C) y SSP126 (+2 °C).

En primer lugar, se validó un código propio que calcula el Fire Weather Index y sus índices (Anexo A), comparando sus salidas con el FWI basado en ERA5 que se puede descargar para todo el mundo. Este código fue validado exitosamente, con lo que se obtuvo un código que puede calcular el FWI y sus índices para cualquier tipo de datos grillados en 2 dimensiones, en particular para archivos NetCDF, que son ampliamente utilizados en análisis de datos meteorológicos y climáticos.

Posteriormente, se buscó el mejor indicador de la actividad de los incendios forestales en la zona de estudio, entre los índices del FWI, las variables meteorológicas que se requieren para calcularlo y la temperatura máxima. Se calcularon correlaciones a distintas agregaciones espaciales y temporales entre las variables y el área quemada y el número de incendios. Además, se probaron 2 FWI modificados además del original, utilizando valores medios diarios y valores medios más temperatura máxima en vez de datos al mediodía. Los mejores indicadores obtenidos fueron el FWI para el área quemada, la temperatura máxima y media para el número de incendios, y la humedad relativa para ambos parámetros, siendo máxima la relación al correlacionar los promedios estacionales entre noviembre y abril de cada año (durante estos meses se concentra la mayor cantidad de incendios y área quemada). Además, la relación se hace más fuerte de norte a sur, sin observarse prácticamente cambios entre el FWI original y los 2 modificados.

Una vez obtenidos los mejores indicadores meteorológicos de la actividad de los incendios en la zona de estudio, se calcularon los cambios en el peligro de incendios a partir de los cambios en la humedad relativa, FWI y temperatura media durante el verano extendido (noviembre-abril) de 8 modelos CMIP6, para los escenarios histórico (1995 - 2014), SSP119 (2081 - 2100, +1.5 °C) y SSP126 (+2 °C). Los cambios en la humedad relativa no fueron significativos, debido a que el signo de los cambios difería considerablemente entre modelos, pero sí se observaron aumentos

significativos del FWI entre Valparaíso y el Biobío y de la temperatura en toda la zona de estudio bajo 1.5 °C de calentamiento, con aumentos adicionales bajo 2 °C de calentamiento. Estos cambios se traducen en un posible aumento de hasta ~13.000 hectáreas quemadas y 4000 incendios más al año en promedio, en comparación con el presente.

Por último, se calculó el riesgo de incendios futuro a partir de los cambios en el peligro o amenaza, utilizando los datos de exposición y sensibilidad para bosques nativos y plantaciones forestales de ARCLIM. Se obtuvieron cambios muy bajos en el riesgo en todos casos. Sin embargo, es posible que la baja resolución de los datos esté enmascarando pequeñas zonas donde el aumento en el riesgo sea mayor.

A pesar de que el cambio en el riesgo futuro de incendios forestales fue muy bajo en general, sí se obtuvieron aumentos importantes del peligro en Chile central, lo que implica que se espera que las condiciones meteorológicas propicias para el desarrollo de grandes incendios sean más frecuentes, incluso bajo escenarios de cambio climático optimistas, que podrían sobrepasar la capacidad de combate de incendios, como los megaincendios del 2017. Ante esto, se recomienda cambiar el enfoque de la gestión del riesgo de incendios forestales en Chile hacia uno preventivo en vez de combativo, reforzando igualmente los recursos destinados al combate y la detección del fuego. Dentro de las medidas orientadas a la prevención que se sugiere adoptar o reforzar se encuentran mejorar el ordenamiento territorial y la diversificación del paisaje, incorporando el riesgo de incendios, normar y limitar la expansión de asentamientos humanos a zonas rurales cubiertas de plantaciones forestales o bosques nativos, controlar las especies exóticas invasoras y restaurar ecosistemas nativos, especialmente en las zonas mediterráneas (Chile central) donde el aumento esperado en el peligro de incendios forestales es de mayor magnitud.

6.1. Trabajo futuro

Como trabajo futuro, se podría ajustar el código del Fire Weather Index para parámetros particulares de Chile, y luego estudiar el potencial operacional del FWI como índice del peligro meteorológico de incendios en el país, lo que además podría mejorar las correlaciones con el área quemada y la ocurrencia de incendios a escala estacional. Otra mejora sería calcular las correlaciones para otro tipo de subregiones, separando por tipo de vegetación por ejemplo, o por topografía (valle-cordillera). También se recomienda replicar los mismos análisis utilizando datos con mejor resolución, para poder calcular el peligro y el riesgo futuro de incendios a una escala espacial más fina, siendo un mayor aporte a la hora de hacer recomendaciones de política pública. Adicionalmente, se podrían replicar los cálculos del peligro y del riesgo futuro utilizando más modelos según su disponibilidad, para así obtener resultados más robustos. Por último, se sugiere calcular el FWI con datos de observaciones de estaciones meteorológicas, y comprobar si efectivamente el FWI y la humedad relativa son mejores indicadores del peligro de incendios que la temperatura máxima a escala estacional.

Bibliografía

- Abatzoglou, J. T., Williams, A. P., y Barbero, R. (2019). Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices. *Geophysical Research Letters*, 46(1), 326–336.
- Abatzoglou, J. T., Williams, A. P., Boschetti, L., Zubkova, M., y Kolden, C. A. (2018). Global patterns of interannual climate–fire relationships. *Global change biology*, 24(11), 5164–5175.
- Ambrizzi, T., Reboita, M. S., da Rocha, R. P., y Llopart, M. (2019). The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in south america. *Annals of the new york academy of sciences*, 1436(1), 98–120.
- Armesto, J. J. (1995). Los bosques templados del sur de chile y argentina: una isla biogeográfica. *Ecología de los bosques nativos de Chile*, 23–28.
- Bedia, J., Herrera, S., Camia, A., Moreno, J. M., y Gutiérrez, J. M. (2014). Forest fire danger projections in the mediterranean using ensembles regional climate change scenarios. *Climatic Change*, 122(1), 185–199.
- Bianchi, L. O., y Defosse, G. E. (2014). Ignition probability of fine dead surface fuels in native patagonia forests of argentina. *Forest Systems*, 23(1), 129–138.
- Billi, M., Moraga, P., Aliste, E., Maillet, A., O’Ryan, R., Sapiains, R., ... Ugarte, A. (2021). Gobernanza climática de los elementos. hacia una gobernanza climática del agua, el aire, el fuego y la tierra en chile, integrada, anticipatoria, socio-ecosistémica y fundada en evidencia. *Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDAP/15110009)*.
- Biobío Chile. (2017). *Detienen a 7 subcontratistas de CGE por incendio de 4 mil hectáreas en Curepto*. Descargado de <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/chile/2017/02/01/detienen-a-7-trabajadores-contratistas-por-incendio-de-4-mil-hectareas-en-curepto.shtml>
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., y Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the southeast pacific precipitation decline and recent megadrought in central chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421.
- Boulanger, J.-P., Carril, A. F., y Sanchez, E. (2016). Claris-la plata basin: regional hydroclimate variability, uncertainties and climate change scenarios. *Climate Research*, 68(2-3), 93–94.
- Bowman, D. M., Moreira-Muñoz, A., Kolden, C. A., Chávez, R. O., Muñoz, A. A., Salinas, F., ... others (2019). Human–environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 chilean fires. *Ambio*, 48(4), 350–362.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., y Valdivieso, J. (2017, 01). Climate change impacts on hydroclimatic regimes and extremes over andean basins in central chile. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. doi: 10.5194/hess-2016-690
- California Department of Forestry and Fire Protection. (2020). *2020 incident archive*. Descargado 2020-10-7, de <https://www.fire.ca.gov/incidents/2020/>
- Canadian Wildland Fire Information System. (s.f.). *Canadian forest fire weather index (fwi)*

- system*. Descargado de <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi>
- Carmona, A., González, M. E., Nahuelhual, L., y Silva, J. (2012). Spatio-temporal effects of human drivers on fire danger in mediterranean chile. *Bosque*, 33(3), 321–328.
- Cinquini, L., Crichton, D., Mattmann, C., Harney, J., Shipman, G., Wang, F., ... Schweitzer, R. (2014). The earth system grid federation: An open infrastructure for access to distributed geospatial data. *Future Generation Computer Systems*, 36, 400–417. (Special Section: Intelligent Big Data Processing Special Section: Behavior Data Security Issues in Network Information Propagation Special Section: Energy-efficiency in Large Distributed Computing Architectures Special Section: eScience Infrastructure and Applications)
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J. D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J. J., ... Villacis, M. (2020). Climatological and hydrological observations for the south american andes: in situ stations, satellite, and reanalysis data sets. *Frontiers in Earth Science*, 8, 92.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). Era5: Fifth generation of ecmwf atmospheric reanalyses of the global climate. *Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS)*, 15(2), 2020.
- Corporación Nacional Forestal. (2022). *Estadísticas históricas*. Descargado de <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>
- De Groot, W. J. (1998). Interpreting the canadian forest fire weather index (fwi) system. En *Proc. of the fourth central region fire weather committee scientific and technical seminar*.
- Demortier, A., Bozkurt, D., y Jacques-Coper, M. (2021). Identifying key driving mechanisms of heat waves in central chile. *Climate Dynamics*, 57(9), 2415–2432.
- Dennison, P. E., Brewer, S. C., Arnold, J. D., y Moritz, M. A. (2014). Large wildfire trends in the western united states, 1984–2011. *Geophysical Research Letters*, 41(8), 2928–2933.
- Di Castri, F., y Hajek, E. R. (1976). *Bioclimatología de chile* (Vol. 128). Vicerrectoría Académica de la Universidad Católica de Chile Santiago.
- Di Giuseppe, F., Vitolo, C., Krzeminski, B., Barnard, C., Maciel, P., y San-Miguel, J. (2020). Fire weather index: the skill provided by the european centre for medium-range weather forecasts ensemble prediction system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2365–2378. doi: 10.5194/nhess-20-2365-2020
- Dimitrakopoulos, A., Bemmerzouk, A., y Mitsopoulos, I. (2011). Evaluation of the canadian fire weather index system in an eastern mediterranean environment. *Meteorological Applications*, 18(1), 83–93.
- Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arneth, A., Arsouze, T., ... others (2021). The ec-earth3 earth system model for the climate model intercomparison project 6. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1–90.
- Dowdy, A. J., y Mills, G. A. (2012). Atmospheric and fuel moisture characteristics associated with lightning-attributed fires. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(11), 2025–2037.
- Dupuy, J.-l., Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., ... Fernandes, P. (2020). Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern europe: a review. *Annals of Forest Science*, 77(2), 1–24.
- El Mostrador. (2017). *Al menos 34 personas procesadas por ocasionar incendios forestales - El Mostrador*. Descargado de <https://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2017/01/29/al-menos-34-personas-procesadas-por-ocasionar-incendios-forestales/>
- Engelbrecht, F., Adegoke, J., Bopape, M.-J., Naidoo, M., Garland, R., Thatcher, M., ... others (2015). Projections of rapidly rising surface temperatures over africa under low mitigation.

- Environmental Research Letters*, 10(8), 085004.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., y Taylor, K. E. (2016). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (cmip6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958.
- Field, R. D. (2020). Evaluation of global fire weather database reanalysis and short-term forecast products. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(4), 1123–1147. doi: 10.5194/nhess-20-1123-2020
- Flannigan, M., Amiro, B. D., Logan, K. A., Stocks, B. J., y Wotton, B. M. (2006). Forest fires and climate change in the 21 st century. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 11(4), 847–859.
- Flannigan, M., Cantin, A. S., De Groot, W. J., Wotton, M., Newbery, A., y Gowman, L. M. (2013). Global wildland fire season severity in the 21st century. *Forest Ecology and Management*, 294, 54–61.
- Fox, D., Carrega, P., Ren, Y., Caillouet, P., Bouillon, C., y Robert, S. (2018). How wildfire risk is related to urban planning and fire weather index in se france (1990–2013). *Science of the total environment*, 621, 120–129.
- Ganteaume, A., Lampin-Maillet, C., Guijarro, M., Hernando, C., Jappiot, M., Fonturbel, T., ... Vega, J. A. (2009). Spot fires: fuel bed flammability and capability of firebrands to ignite fuel beds. *International Journal of Wildland Fire*, 18(8), 951–969.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., ... Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307–6327.
- Giorgi, F., y Mearns, L. O. (2002). Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from aogcm simulations via the “reliability ensemble averaging” (rea) method. *Journal of climate*, 15(10), 1141–1158.
- Giuseppe, F. D., Pappenberger, F., Wetterhall, F., Krzeminski, B., Camia, A., Libertá, G., y Miguel, J. S. (2016). The potential predictability of fire danger provided by numerical weather prediction. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(11), 2469 - 2491. doi: 10.1175/JAMC-D-15-0297.1
- GIZ, y EURAC. (2014). The vulnerability sourcebook. *Concept and guidelines for standardized vulnerability assessments*.
- GIZ, y EURAC. (2017). Risk supplement to the vulnerability sourcebook. *Guidance on How to Apply the Vulnerability Sourcebook’s Approach with the New IPCC AR5 Concept of Climate Risk*.
- González, M. E., Gómez-González, S., Lara, A., Garreaud, R., y Díaz-Hormazábal, I. (2018). The 2010–2015 megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central chile. *Ecosphere*, 9(8), e02300.
- González, M., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, 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*.
- Groot, W. J. d., Field, R. D., Brady, M. A., Roswintiarti, O., y Mohamad, M. (2007). Development of the indonesian and malaysian fire danger rating systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(1), 165–180.
- Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M. A., Abe, M., ... others (2020). Development of the miroc-es2l earth system model and the evaluation of biogeochemical

- processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development*, 13(5), 2197–2244.
- Her, Y., Yoo, S.-H., Seong, C., Jeong, J., Cho, J., y Hwang, S. (2016). Comparison of uncertainty in multi-parameter and multi-model ensemble hydrologic analysis of climate change. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–44.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... others (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). Síntesis de resultados. censo 2017. *INE*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (C. Field et al., Eds.). Cambridge University Press.
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press.
- Koutsias, N., Xanthopoulos, G., Founda, D., Xystrakis, F., Nioti, F., Pleniou, M., ... Arianoutsou, M. (2012). On the relationships between forest fires and weather conditions in greece from long-term national observations (1894–2010). *International Journal of Wildland Fire*, 22(4), 493–507.
- Krawchuk, M. A., Moritz, M. A., Parisien, M.-A., Van Dorn, J., y Hayhoe, K. (2009). Global pyrogeography: the current and future distribution of wildfire. *PloS one*, 4(4), e5102.
- Leone, V., Lovreglio, R., Martín, M. P., Martínez, J., y Vilar, L. (2009). Human factors of fire occurrence in the mediterranean. En *Earth observation of wildland fires in mediterranean ecosystems* (pp. 149–170). Springer.
- Lizundia-Loiola, J., Pettinari, M. L., y Chuvieco, E. (2020). Temporal anomalies in burned area trends: Satellite estimations of the amazonian 2019 fire crisis. *Remote Sensing*, 12(1), 151.
- McWethy, D. B., Garreaud, R. D., Holz, A., y Pederson, G. T. (2021). Broad-scale surface and atmospheric conditions during large fires in south-central chile. *Fire*, 4(2). doi: 10.3390/fire4020028
- Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M., y Stouffer, R. J. (2000). The coupled model intercomparison project (cmip). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(2), 313–318.
- Miller, J. D., Skinner, C., Safford, H., Knapp, E. E., y Ramirez, C. (2012). Trends and causes of severity, size, and number of fires in northwestern california, usa. *Ecological Applications*, 22(1), 184–203.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2015). *CONTRIBUCIÓN NACIONAL TENTATIVA DE CHILE (INDC) PARA EL ACUERDO CLIMÁTICO PARÍS 2015* (Inf. Téc.). Santiago, Chile: Gobierno de Chile.
- Moritz, M. A., Parisien, M.-A., Batllori, E., Krawchuk, M. A., Van Dorn, J., Ganz, D. J., y Hayhoe, K. (2012). Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere*, 3(6), 1–22.
- Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., y González, M. E. (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-

- central chile. *Landscape and urban planning*, 107(1), 12–20.
- Nobre, C. A., y Borma, L. D. S. (2009). ‘tipping points’ for the amazon forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1), 28–36.
- Nolan, R. H., Boer, M. M., Collins, L., Resco de Dios, V., Clarke, H. G., Jenkins, M., ... Bradstock, R. A. (2020). Causes and consequences of eastern australia’s 2019-20 season of mega-fires. *Global change biology*.
- O’Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... others (2016). The scenario model intercomparison project (scenariomip) for cmip6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482.
- Oppenheimer, M., Campos, M., Warren, R., Birkmann, J., Luber, G., O’Neill, B., y Takahashi, K. (2015). Emergent risks and key vulnerabilities. En V. Field C.B. and Barros et al. (Eds.), *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. part a: Global and sectoral aspects. contribution of working group ii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 1039–1100). Cambridge University Press.
- O’Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., ... van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic change*, 122(3), 387–400.
- Palheiro, P. M., Fernandes, P., y Cruz, M. G. (2006). A fire behaviour-based fire danger classification for maritime pine stands: Comparison of two approaches. *Forest Ecology and Management*, 234, S54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.075>
- Pica-Téllez, A., Garreaud, R., Meza, F., Bustos, S., Falvey, M., Ibarra, M., ... Silva, I. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile* (Inf. Téc.). Santiago, Chile: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Pierce, D. W., Barnett, T. P., Santer, B. D., y Gleckler, P. J. (2009). Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(21), 8441–8446.
- Piñol, J., Terradas, J., y Lloret, F. (1998). Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern spain. *Climatic change*, 38(3), 345–357.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’neill, B. C., Fujimori, S., ... others (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global environmental change*, 42, 153–168.
- Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voltaire, A., Colin, J., ... others (2019). Evaluation of cnrm earth system model, cnrm-esm2-1: Role of earth system processes in present-day and future climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12), 4182–4227.
- Sun, Q., Miao, C., Hanel, M., Borthwick, A. G., Duan, Q., Ji, D., y Li, H. (2019). Global heat stress on health, wildfires, and agricultural crops under different levels of climate warming. *Environment international*, 128, 125–136.
- Swart, N. C., Cole, J. N., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., ... others (2019). The canadian earth system model version 5 (canesm5. 0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4823–4873.
- Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., ... others (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in miroc6. *Geoscientific Model Development*, 12(7), 2727–2765.
- Taylor, A. H., Trouet, V., Skinner, C. N., y Stephens, S. (2016). Socioecological transitions trigger

- fire regime shifts and modulate fire–climate interactions in the sierra nevada, usa, 1600–2015 ce. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(48), 13684–13689.
- Teegne, G., Kim, Y.-O., y Lee, J.-K. (2019). Spatiotemporal reliability ensemble averaging of multimodel simulations. *Geophysical Research Letters*, 46(21), 12321–12330.
- Tian, X., McRae, D. J., Jin, J., Shu, L., Zhao, F., y Wang, M. (2011). Wildfires and the canadian forest fire weather index system for the daxing’anling region of china. *International Journal of Wildland Fire*, 20(8), 963–973.
- Turco, M., Llasat, M. C., von Hardenberg, J., y Provenzale, A. (2013). Impact of climate variability on summer fires in a mediterranean environment (northeastern iberian peninsula). *Climatic Change*, 116(3), 665–678.
- Urrutia-Jalabert, R., González, M. E., González-Reyes, Á., Lara, A., y Garreaud, R. (2018). Climate variability and forest fires in central and south-central chile. *Ecosphere*, 9(4), e02171.
- Van Wagner, C. (1987). Development and structure of the canadian forest fire weather index system. *Canadian Forestry Service*.
- Van Wagner, C., y Pickett, T. (1985). *Equations and fortran program for the canadian forest fire weather index system* (Vol. 33).
- Villagrán, C., y Hinojosa, L. F. (1997). Historia de los bosques del sur de sudamérica, ii: Análisis fitogeográfico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 70(2), 1–267.
- Vitolo, C., Di Giuseppe, F., Barnard, C., Coughlan, R., San-Miguel-Ayanz, J., Libertá, G., y Krzeminski, B. (2020). Era5-based global meteorological wildfire danger maps. *Scientific data*, 7(1), 1–11.
- Vitolo, C., Di Giuseppe, F., Krzeminski, B., y San-Miguel-Ayanz, J. (2019). A 1980–2018 global fire danger re-analysis dataset for the canadian fire weather indices. *Scientific data*, 6(1), 1–10.
- Wang, Y., Anderson, K. R., y Suddaby, R. M. (2015). *Updated source code for calculating fire danger indices in the canadian forest fire weather index system*. Canadian Forest Service.
- Wotton, B. M. (2009). Interpreting and using outputs from the canadian forest fire danger rating system in research applications. *Environmental and Ecological Statistics*, 16(2), 107–131.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., . . . others (2019). The meteorological research institute earth system model version 2.0, mri-esm2. 0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*.
- Zemp, D., Schleussner, C.-F., Barbosa, H., y Rammig, A. (2017). Deforestation effects on amazon forest resilience. *Geophysical Research Letters*, 44(12), 6182–6190.

Anexos

Anexo A

Código propio para calcular el Fire Weather Index

```
# This is a collection of functions, including functions for the Canadian Fire  
# Weather Index as well as 5 equations from Lawson et al. (1997) necessary to  
# convert the Duff Moisture Code to an actual moisture percent value.  
# Based on Van Wagner and Pickett (1985). Equations and FORTRAN Program for the  
# Canadian Forest Fire Weather Index System, and Wang, Anderson and Suddaby  
# (2015). Updated source code for calculating fire danger indices in the  
# Canadian FWI System.  
# Working on 2d arrays.  
# Includes a test for every function in the comments, based on the open source  
# model GEFM v3.1 (https://git.ecmwf.int/projects/CEMSF/repos/geff) to  
# calculate the FWI System equations and others Systems using ERA5 data, made  
# by the European Forest Fire Information System (EFFIS) and the Global  
# Wildfire Information System (GWIS).  
# Authors unkwon  
# Modified by María Jesús Rapanague - Feb 2021  
# Department of Geophysics, University of Chile.
```



```
# FWI Functions:  
# All the meteorological parameters must be taken at 12:00 LT (local time).  
# Units are degrees celsius for temperatura, % for relative humidity, km/h for  
# windspeed and mm for rainfall.  
# FFMC - takes air temperature, relative humidity, wind speed, rainfall and a  
# previous ffmc value to produce the current ffmc value.  
# DMC - takes air temperature, relative humidity, rainfall, previous dmc  
# value, latitude, and current month to produce the current dmc value.  
# DC - takes air temperature, rainfall, the previous dc value, latitude, and  
# current month to produce the current dc value.  
# ISI - takes the wind speed and current ffmc value to produce the current  
# isi value.  
# BUI - takes the current dmc and dc values to produce the current bui value.
```

```

# FWI - takes the current isi and bui values to produce the current fwi value.
# FWIcalc - this function returns the current FWI value given all of the input
# values: month, air temperature, relative humidity, wind speed, rainfall,
# previous ffmc, dmc, dc, and latitude.

```

```
import numpy as np
```

```
class Invalidlat(Exception):
```

```
    """Exception to handle variables not covered by DataDict"""
```

```
    def __init__(self, value):
```

```
        self.value = value
```

```
    def __str__(self):
```

```
        return repr(self.value) + " is not a valid lat."
```

```
def FFMCCalc(tair_np, rh_np, wind_np, rain_np, ffmc_prev):
```

```
    '''
```

```
    Calculates today's Fine Fuel Moisture Code. Parameters:
```

```
    tair_np: 2d array. 12:00 LT air temperature in degrees Celsius.
```

```
    rh_np: 2d array. 12:00 LT relative humidity in %.
```

```
    wind_np: 2d array. 12:00 LT wind speed in km/h.
```

```
    rain_np: 2d array. 24-hour accumulated rainfall in mm, taken at 12:00 LT.
```

```
    ffmc_prev: 2d array. Previous day's FFMC.
```

```
    EFFIS/ GWIS test:
```

```
    test ffmc should be 87.692980092774448 if
```

```
    tair_np = 17.
```

```
    rh_np = 42.
```

```
    wind_np = 6.944 * 3.6 (converts m/s to km/h)
```

```
    rain_np = 0.
```

```
    ffmc_prev = 85.
```

```
    '''
```

```
rain_np[rain_np < 0.] = 0.
```

```
rh_np[rh_np > 100.] = 100.
```

```
mo = 147.2 * (101.0 - ffmc_prev) / (59.5 + ffmc_prev) # Eq. 1
```

```
# Create boolean array where rain_np > 0.5, mo <= 150 or mo > 150.
```

```
RAIN_TRUE = (rain_np > 0.5)
```

```
RAIN_MO_LE = (mo <= 150.) & RAIN_TRUE
```

```
RAIN_MO_GT = (mo > 150.) & RAIN_TRUE
```

```
rf = np.zeros_like(rain_np)
```

```
mr = np.zeros_like(rain_np)
```

```

# If rain_np < 0.5, pass to Eq. 4.
rf[RAIN_TRUE] = rain_np[RAIN_TRUE] - 0.5 # Eq. 2

mr[RAIN_MO_LE] = mo[RAIN_MO_LE] \
    + 42.5 * rf[RAIN_MO_LE] * np.exp(-100. / (251. - mo[RAIN_MO_LE])) \
    * (1. - np.exp(-6.93 / rf[RAIN_MO_LE])) # Eq. 3a

mr[RAIN_MO_GT] = mo[RAIN_MO_GT] \
    + 42.5 * rf[RAIN_MO_GT] * np.exp(-100. / (251. - mo[RAIN_MO_GT])) \
    * (1. - np.exp(-6.93 / rf[RAIN_MO_GT])) \
    + 0.0015 * np.power(mo[RAIN_MO_GT]-150., 2.) \
    * np.power(rf[RAIN_MO_GT], .5) # Eq. 3b

# mr can't be greater than 250.
mr[(mr > 250.) & RAIN_TRUE] = 250.

# mr becomes the new mo.
mo[RAIN_TRUE] = mr[RAIN_TRUE]

# Calculate Ed by Eq. 4.
ed = 0.942 * np.power(rh_np, 0.679) \
    + 11. * np.exp((rh_np - 100.) / 10.) \
    + 0.18 * (21.1 - tair_np) * (1. - np.exp(-0.115 * rh_np)) # Eq. 4

MO_GT_ED = (mo > ed)
MO_LT_ED = (mo < ed)

kd = np.zeros_like(rh_np)
m = np.zeros_like(rh_np)

# If mo > Ed, calculate kd by equations 6a and 6b.
ko = 0.424 * (1. - np.power(rh_np[MO_GT_ED] / 100., 1.7)) \
    + 0.0694 * np.power(wind_np[MO_GT_ED], .5) \
    * (1. - np.power((rh_np[MO_GT_ED] / 100.), 8.)) # Eq. 6a

kd = ko * 0.581 * np.exp(0.0365 * tair_np[MO_GT_ED]) # Eq. 6b
# Calculate m by equation 8.
m[MO_GT_ED] = ed[MO_GT_ED] + (mo[MO_GT_ED] - ed[MO_GT_ED]) \
    * np.power(10., -kd) # Eq. 8

# If mo < Ed, calculate ew by eq. 5
ew = np.zeros_like(rh_np)
ew[MO_LT_ED] = 0.618 * np.power(rh_np[MO_LT_ED], 0.753) \
    + 10. * np.exp((rh_np[MO_LT_ED] - 100.) / 10.) \
    + 0.18 * (21.1 - tair_np[MO_LT_ED]) \
    * (1. - np.exp(-0.115 * rh_np[MO_LT_ED])) # Eq. 5

```



```

# If mo < Ew, calculate kw by Equations 7a and 7b.
MO_LT_EW = (mo < ew) & MO_LT_ED

k1 = 0.424 * (1. - np.power((100. - rh_np[MO_LT_EW]) / 100., 1.7)) \
    + 0.0694 * np.power(wind_np[MO_LT_EW], .5) \
    * (1. - np.power((100. - rh_np[MO_LT_EW]) / 100., 8.)) # Eq. 7a

kw = k1 * 0.581 * np.exp(0.0365 * tair_np[MO_LT_EW]) # Eq. 7b

# Calculate m by Equation 9.
m[MO_LT_EW] = ew[MO_LT_EW] - (ew[MO_LT_EW] - mo[MO_LT_EW]) \
    * np.power(10., -kw) # Eq. 9

# If Ed >= mo >= Ew, let m = mo.
m[(mo == ed)] = mo[(mo == ed)]
m[(mo == ew)] = mo[(mo == ew)]

# Calculate today's FFMC by Equation 10.
ffmc = 59.5 * (250. - m) / (147.2 + m) # Eq. 10

ffmc[(ffmc > 101.)] = 101.
ffmc[(ffmc <= 2.)] = 2.

return ffmc

def DMCcalc(tair_np, rh_np, rain_np, dmc_prev, lat, month):
    '''
    Calculates today's Duff Moisture Code. Parameters:
    tair_np: 2d array. 12:00 LT air temperature in degrees Celsius.
    rh_np: 2d array. 12:00 LT relative humidity in %.
    rain_np: 2d array. 24-hour accumulated rainfall in mm, taken at 12:00 LT.
    dmc_prev: 2d array. Previous day's dmc.
    lat: 2d array. Is the latitude in decimal degrees of the location for which
    calculations are being made. One value per grid point.
    month: int. Is the month of year (1-12) for current day's calculations.

    EFFIS/ GWIS test:
    Test dmc should be 8.545051135999997 if
    tair_np = 17.
    rh_np = 42.
    rain_np = 0.
    dmc_prev = 6.
    lat = 45.98
    month = 4
    '''
    b = np.zeros_like(rain_np)

```

```

pr = np.zeros_like(rain_np)
k = np.zeros_like(rain_np)

# Relative humidity cannot be greater than 100 %.
rh_np[rh_np > 100.] = 100.
# Rain cannot be less than 0 mm.
rain_np[rain_np < 0.] = 0.

# If ro (rain) > 1.5, calculate re
RAIN_GT = rain_np > 1.5

re = 0.92 * rain_np[RAIN_GT] - 1.27 # Eq. 11
mo = 20. + np.exp(5.6348 - dmc_prev[RAIN_GT] / 43.43) # Eq. 12
# mo =20.0 + 280.0/np.exp(0.023*dmc_prev[RAIN_GT]) #Eq.12*#

# dmc_prev less than 33
dmcpl_le_33 = (dmc_prev <= 33.) & RAIN_GT
# dmc_prev between 33 and 65
dmcpl_le_65 = (dmc_prev > 33.) & (dmc_prev <= 65.) & RAIN_GT
dmcpl_gt_65 = (dmc_prev >65.) & RAIN_GT

# Calculate b according to dmc_prev value
# dmc_prev less than 33
b[dmcpl_le_33] = 100. / (0.5 + 0.3 * dmc_prev[dmcpl_le_33]) # Eq. 13a
# dmc_prev between 33 and 65
b[dmcpl_le_65] = 14.0 - 1.3 * np.log(dmc_prev[dmcpl_le_65]) # Eq. 13b
# if dmc_prev greater than 65
b[dmcpl_gt_65] = 6.2 * np.log(dmc_prev[dmcpl_gt_65]) - 17.2 # Eq. 13c

# Calculate mr
mr = mo + 1000. * re / (48.77 + b[RAIN_GT] * re) # Eq. 14
# Convert mr to pr, pr becomes new dmc_prev
pr[RAIN_GT] = 244.72 - 43.43 * np.log(mr - 20.) # Eq. 15
# pr[RAIN_GT] = 43.43 * (5.6348 - np.log(mr-20.0)) #Eq.15*#

PR_GT = pr > 0.
dmc_prev[RAIN_GT] = 0.
dmc_prev[PR_GT] = pr[PR_GT]

# Calculate effective day length
d1 = DayLength(lat, month)

# If tair < -1.1 set tair = -1.1, but with this k will be zero, and it is
# defined already as zero, so there is no need to do that.
TAIR_GT = tair_np > -1.1
k[TAIR_GT] = 1.894 * (tair_np[TAIR_GT] + 1.1) \
    * (100. - rh_np[TAIR_GT]) * d1[TAIR_GT] * 1e-6 # Eq. 16

```

```

dmc = dmc_prev + 100. * k # Eq. 17

return dmc

def DCcalc(tair_np, rain_np, dc_prev, lat, month):
    '''
    Calculates today's Drought Code. Parameters:
    tair_np: 2d array. 12:00 LT air temperature in degrees Celsius.
    rain_np: 2d array. 24-hour accumulated rainfall in mm, taken at 12:00 LT.
    dc_prev: 2d array. Previous day's dc.
    lat: 2d array. Is the latitude in decimal degrees of the location for which
    calculations are being made. One value per grid point.
    month: int. Is the month of year (1-12) for current day's calculations.

    EFFIS/ GWIS test:
    test dc should be 19.013999999999999 if
    tair_np = 17.
    rain_np = 0.
    dc_prev = 15.
    lat = 45.98
    month = 4
    '''

    # Rain cannot be less than 0 mm.
    rain_np[rain_np < 0.] = 0.

    V = np.full_like(rain_np, np.nan)
    Dr = np.full_like(rain_np, np.nan)

    # If rain > 2.8
    RAIN_GT = rain_np > 2.8
    # Calculate rd, Qo, Qr y Dr
    rd = 0.83 * rain_np[RAIN_GT] - 1.27 # Eq. 18
    Qo = 800. * np.exp(-dc_prev[RAIN_GT] / 400.) # Eq. 19
    Qr = Qo + 3.937 * rd # Eq. 20
    Dr[RAIN_GT] = 400. * np.log(800. / Qr) # Eq. 21
    # Dr can also be calculated equivalently from the following equation
    # Dr[RAIN_LT] = dc_prev[RAIN_LT] - 400. * np.log( 1. + (3.937*rd/Qo))

    # Dr (or new dc_prev) cannot be less than zero.
    dc_prev[RAIN_GT] = 0.
    dc_prev[RAIN_GT & (Dr > 0)] = Dr[RAIN_GT & (Dr > 0)]

    # Calculate day-length factor
    Lf = DryingFactor(lat, month)

```

```

# Air temperature must be greater than -2.8
TAIR_GT = tair_np > -2.8
V = np.copy(Lf)/2.
V[TAIR_GT] = (0.36 * (tair_np[TAIR_GT]+2.8) + Lf[TAIR_GT])/2. # Eq. 22

# V cannot be negative
V[V < 0.0] = 0.0

dc = dc_prev + V # Eq. 23

return dc

def ISIcalc(wind_np, ffmc):
    '''
    Calculates today's Initial Spread Index. Parameters:
    wind_np: 2d array. 12:00 LT wind speed in km/h.
    ffmc: 2d array. Current day's FFMC.

    EFFIS/ GWIS test:
    test ISI should be 10.853661073655068 if
    wind_np = 6.944 * 3.6 (converts m/s to km/h)
    ffmc = 87.692980092774448
    *This test results in 10.852786043359362 in this code, slightly different.
    '''

    fw = np.exp(0.05039 * wind_np) # Eq. 24
    mo = 147.2 * (101. - ffmc) / (59.5 + ffmc) # Eq. 1
    # Eq. 25
    ff = 91.9 * np.exp(-0.1386 * mo) * (1. + np.power(mo, 5.31) / 49300000.)
    # Eq. 26.
    isi = 0.208 * fw * ff
    # Wang et al.'s code has an approximation, 91.9*0.208~19.115 instead of
    # 19.1152, so it's slightly different.
    # ff = 19.115*np.exp(mo*-0.1386) * (1.0+(mo**5.31)/49300000.0)*Eq.25*#
    # isi = ff * np.exp(0.05039*wind_np) #Eq.26*#

    return isi

def BUlcalc(dmc, dc):
    '''
    Calculates today's Buildup Index. Parameters:
    dmc: 2d array. Current day's Duff Moisture Code.
    dc: 2d array. Current day's Drought Code.

```

```

test BUI should be 8.4904265358371838 if
dmc = 8.5450511359999997
dc = 19.013999999999999
'''
bui = np.zeros_like(dmc)

# DMC_TRUE = dmc > 0.
DMC_LE = (dmc > 0.) & (dmc <= (0.4*dc))
# DMC_LE = dmc <= (0.4*dc)
DMC_GT = dmc > (0.4*dc)

# Eq. 27a
bui[DMC_LE] = 0.8 * dmc[DMC_LE] * dc[DMC_LE] / \
    (dmc[DMC_LE] + 0.4 * dc[DMC_LE])
bui[DMC_GT] = dmc[DMC_GT] \
    - (1.0 - 0.8 * dc[DMC_GT] / (dmc[DMC_GT] + 0.4 * dc[DMC_GT])) \
    * (0.92 + np.power(0.0114 * dmc[DMC_GT], 1.7)) # Eq. 27b

bui[bui < 0.0] = 0.0

return bui

def FWIcalc(isi, bui):
    '''
    Calculates today's Fire Weather Index. Parameters:
    isi: 2d array. Current day's isi.
    bui: 2d array. Current day's bui.

    FWI should be 10.096371392382368 if
    isi = 10.853661073655068
    bui = 8.4904265358371838
    '''

    fD = np.full_like(isi, np.nan)
    fwi = np.full_like(isi, np.nan)
    # Eq. 28b
    fD[bui > 80.] = 1000. / (25. + 108.64 * np.exp(-0.023 * bui[bui > 80.]))
    fD[bui <= 80.] = 0.626 * np.power(bui[bui <= 80.], 0.809) + 2. # Eq. 28a

    fwi = 0.1 * isi * fD # Eq. 29
    # Eqs. 30a and 30b
    fwi[fwi > 1.] = np.exp(2.72 * np.power(0.434 * np.log(fwi[fwi > 1.]),
        0.647))

    return fwi

```

```

def DryingFactor(lat, month):

    LfN = [-1.6, -1.6, -1.6, 0.9, 3.8, 5.8, 6.4, 5.0, 2.4, 0.4, -1.6, -1.6]
    LfS = [6.4, 5.0, 2.4, 0.4, -1.6, -1.6, -1.6, -1.6, -1.6, 0.9, 3.8, 5.8]

    df = np.full_like(lat, np.nan)
    # df[lat > 0] = LfN[Month-1]
    # df[lat < 0] = LfS[Month-1]
    # GEFF v3.1 implementation
    df[lat >= 10.] = LfN[month-1]
    df[(lat < 10.) & (lat > -10.)] = 1.39
    df[lat <= -10.] = LfS[month-1]

    return df

def DayLength(lat, month):
    '''Approximates the length of the day given month and latitude'''
    # possible to improve this by calculating daylength per grid point

    retVal = np.full_like(lat, np.nan)

    # Original implementation (Van Wagner 1989)
    # daylength46N = [6.5, 7.5, 9.0, 12.8, 13.9, 13.9, 12.4, 10.9, 9.4, 8.0, \
    #                 7.0, 6.0]
    # daylength20N = [7.9, 8.4, 8.9, 9.5, 9.9, 10.2, 10.1, 9.7, 9.1, 8.6, \
    #                 8.1, 7.8]
    # daylength20S = [10.1, 9.6, 9.1, 8.5, 8.1, 7.8, 7.9, 8.3, 8.9, 9.4, \
    #                 9.9, 10.2]
    # daylength40S = [11.5, 10.5, 9.2, 7.9, 6.8, 6.2, 6.5, 7.4, 8.7, 10.0, \
    #                 11.2, 11.8]

    # retVal[(lat<=90.) & (lat>33.) ] = daylength46N[month-1]
    # retVal[(lat<=33.) & (lat>0.0) ] = daylength20N[month-1]
    # retVal[(lat<=0.) & (lat>-30.)] = daylength20S[month-1]
    # retVal[(lat<=-30.) & (lat>-90.)] = daylength40S[month-1]

    # EFFIS/GWIS implementation
    daylength_ge_30N = [6.5, 7.5, 9.0, 12.8, 13.9, 13.9, 12.4, 10.9, 9.4, 8.0,
                       7.0, 6.0]
    daylength_ge_10N_lt_30N = [7.9, 8.4, 8.9, 9.5, 9.9, 10.2, 10.1, 9.7, 9.1,
                               8.6, 8.1, 7.8]
    daylength_ge_10S_lt_10N = [9.0, 9.0, 9.0, 9.0, 9.0, 9.0, 9.0, 9.0, 9.0,
                               9.0, 9.0, 9.0]
    daylength_ge_30S_lt_10S = [10.1, 9.6, 9.1, 8.5, 8.1, 7.8, 7.9, 8.3, 8.9,
                               9.4, 9.9, 10.2]

```

```
daylength_lt_30S = [11.5, 10.5, 9.2, 7.9, 6.8, 6.2, 6.5, 7.4, 8.7, 10.0,  
                   11.2, 11.8]
```

```
retVal[(lat >= 30.) & (lat <= 90.)] = daylength_ge_30N[month-1]  
retVal[(lat >= 10.) & (lat < 30.0)] = daylength_ge_10N_lt_30N[month-1]  
retVal[(lat >= -10.) & (lat < 10.0)] = daylength_ge_10S_lt_10N[month-1]  
retVal[(lat >= -30.) & (lat < -10.0)] = daylength_ge_30S_lt_10S[month-1]  
retVal[(lat >= -90.) & (lat < -30.0)] = daylength_lt_30S[month-1]
```

```
return retVal
```

```
def calcFWI(tair_np, rh_np, wind_np, rain_np, ffmc_prev, dmc_prev, dc_prev,  
           lat, month):
```

```
'''
```

```
Calculates today's FWI and all of the others subindexes. Parameters:
```

```
tair_np: 2d array. 12:00 LT air temperature in degrees Celsius.
```

```
rh_np: 2d array. 12:00 LT relative humidity in %.
```

```
wind_np: 2d array. 12:00 LT wind speed in km/h.
```

```
rain_np: 2d array. 24-hour accumulated rainfall in mm, taken at 12:00 LT.
```

```
ffmc_prev: 2d array. Previous day's ffmc.
```

```
dmc_prev: 2d array. Previous day's dmc.
```

```
dc_prev: 2d array. Previous day's dc.
```

```
lat: 2d array. Is the latitude in decimal degrees of the location for which  
calculations are being made. One value per grid point.
```

```
month: int. Is the month of year (1-12) for current day's calculations.
```

```
'''
```

```
ffmc = FFMCCalc(tair_np, rh_np, wind_np, rain_np, ffmc_prev)
```

```
dmc = DMCcalc(tair_np, rh_np, rain_np, dmc_prev, lat, month)
```

```
dc = DCcalc(tair_np, rain_np, dc_prev, lat, month)
```

```
isi = ISICalc(wind_np, ffmc)
```

```
bui = BUICalc(dmc, dc)
```

```
fwi = FWICalc(isi, bui)
```

```
return fwi, ffmc, dmc, dc, isi, bui
```

Anexo B

Tablas de correlaciones entre variables de incendios e índices meteorológicos

En este anexo se muestran los coeficientes de correlación de Pearson (r) calculados entre el número de incendios y área quemada entre 1984 y 2021 con todos los subíndices del FWI, la humedad relativa, la magnitud del viento, la temperatura media y máxima, y la precipitación acumulada, con el FWI calculado correctamente, y modificado con valores medios y valores medios más temperatura máxima, para series de tiempo diarias, cada 5, 7 y 10 días, mensuales y estacionales, tanto a escala anual como para veranos extendidos (diciembre-marzo y noviembre-abril). También se presentan las correlaciones para las subregiones: centro (Valparaíso - Biobío), centro-sur (O'higgins - Biobío) y sur (Ñuble - Los Lagos), para las cuales también se calcularon todas las correlaciones antes mencionadas. En el caso del área quemada, se presenta además la correlación estacional calculada sin considerar el año 2017 para las tablas asociadas a las correlaciones entre noviembre y abril.

Las abreviaciones de las variables son las siguientes:

- FWI: Fire Weather Index
- ISI: Initial Spread Index
- BUI: Build Up Index
- DMC: Duff Moisture Code
- DC: Drought Code
- FFMC: Fine Fuel Moisture Code
- HR: humedad relativa
- V: magnitud del viento
- T: temperatura
- Tx: temperatura máxima

- PP: precipitación acumulada

B.1. Área quemada

B.1.1. Verano extendido noviembre-abril

FWI con datos al mediodía (UTC-3)

Tabla B.1: Correlaciones área quemada total, toda la zona de estudio, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido) de cada año.

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,08	0,08	0,01	0,01	0,01	0,02	-0,08	0,03	0,05	0,03	-0,01
5 días	0,12	0,13	0,02	0,02	0,01	0,05	-0,13	0,05	0,08	0,08	-0,03
7 días	0,13	0,14	0,03	0,02	0,02	0,06	-0,14	0,05	0,10	0,10	-0,04
10 días	0,12	0,14	0,02	0,02	0,02	0,06	-0,14	0,06	0,09	0,11	-0,04
Mensual	0,11	0,14	0,03	0,02	0,03	0,05	-0,15	0,07	0,10	0,14	-0,01
Estacional	0,04	0,08	0,00	-0,02	0,03	0,08	-0,14	-0,05	0,13	0,33	-0,12
Est. s/2017	0,54	0,48	0,53	0,49	0,61	0,47	-0,35	-0,01	0,18	0,48	-0,6

Tabla B.2: Correlaciones área quemada, entre las regiones de Valparaíso y Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,08	0,09	0,00	-0,01	0,00	0,03	-0,08	0,06	0,06	0,04	-0,01
5 días	0,11	0,15	0,00	-0,01	0,00	0,05	-0,13	0,11	0,10	0,11	-0,02
7 días	0,12	0,16	0,00	-0,01	0,00	0,06	-0,14	0,12	0,11	0,13	-0,03
10 días	0,11	0,17	-0,01	-0,02	-0,01	0,06	-0,15	0,12	0,11	0,14	-0,03
Mensual	0,09	0,18	-0,02	-0,03	-0,01	0,07	-0,16	0,14	0,12	0,17	-0,03
Estacional	0,00	0,04	-0,05	-0,07	0,02	0,04	-0,14	0,11	0,08	0,27	-0,13
Est. s/2017	0,44	0,38	0,44	0,39	0,57	0,46	-0,31	0,24	0,17	0,36	-0,52

Tabla B.3: Correlaciones área quemada, entre las regiones de O'higgins y Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,07	0,09	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,07	0,06	0,06	0,04	-0,01
5 días	0,11	0,15	0,01	0,00	0,00	0,05	-0,13	0,10	0,10	0,11	-0,02
7 días	0,12	0,16	0,01	0,00	0,01	0,06	-0,13	0,11	0,11	0,13	-0,03
10 días	0,11	0,17	0,00	0,00	0,00	0,06	-0,14	0,12	0,11	0,14	-0,03
Mensual	0,10	0,19	0,00	-0,01	0,01	0,07	-0,16	0,14	0,12	0,18	-0,03
Estacional	0,03	0,07	-0,02	-0,04	0,06	0,07	-0,16	0,13	0,12	0,32	-0,15
Est. s/2017	0,50	0,46	0,48	0,44	0,59	0,52	-0,40	0,15	0,28	0,48	-0,55

Tabla B.4: Correlaciones área quemada, entre las regiones del Ñuble y Los Lagos, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	T _x	PP
Diaria	0,14	0,11	0,09	0,09	0,07	0,06	-0,12	0,04	0,10	0,05	-0,04
5 días	0,23	0,21	0,16	0,16	0,12	0,13	-0,22	0,04	0,16	0,15	-0,09
7 días	0,25	0,22	0,17	0,17	0,14	0,13	-0,21	0,03	0,17	0,17	-0,10
10 días	0,29	0,26	0,22	0,22	0,17	0,17	-0,25	0,03	0,19	0,23	-0,12
Mensual	0,29	0,25	0,27	0,26	0,23	0,16	-0,26	0,05	0,19	0,24	-0,09
Estacional	0,39	0,40	0,37	0,37	0,35	0,37	-0,33	-0,13	0,27	0,52	-0,41
Est. s/2017	0,66	0,61	0,65	0,65	0,63	0,55	-0,43	-0,09	0,28	0,54	-0,61

FWI calculado con valores promedios diarios

Tabla B.5: Correlaciones área quemada, toda la zona de estudio, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	T _x	PP
Diaria	0,06	0,06	0,02	0,02	0,01	0,02	-0,06	0,03	0,02	0,03	-0,01
5 días	0,11	0,11	0,03	0,03	0,02	0,05	-0,15	0,06	0,06	0,08	-0,03
7 días	0,13	0,13	0,04	0,04	0,02	0,07	-0,19	0,07	0,09	0,10	-0,04
10 días	0,12	0,12	0,03	0,03	0,02	0,06	-0,19	0,06	0,10	0,11	-0,04
Mensual	0,13	0,14	0,05	0,04	0,03	0,07	-0,22	0,09	0,15	0,14	-0,01
Estacional	0,11	0,12	0,07	0,06	0,05	0,12	-0,34	0,03	0,41	0,33	-0,12
Est. s/2017	0,66	0,63	0,6	0,58	0,65	0,59	-0,67	0,14	0,42	0,48	-0,6

Tabla B.6: Correlaciones área quemada, Valparaíso - Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	T _x	PP
Diaria	0,06	0,07	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,06	0,05	0,03	0,04	-0,01
5 días	0,10	0,13	0,00	0,00	0,00	0,05	-0,15	0,11	0,09	0,11	-0,02
7 días	0,12	0,15	0,01	0,00	0,00	0,06	-0,18	0,14	0,11	0,13	-0,03
10 días	0,10	0,14	0,00	0,00	0,00	0,07	-0,18	0,13	0,12	0,14	-0,03
Mensual	0,10	0,17	0,00	-0,01	-0,01	0,08	-0,21	0,17	0,17	0,17	-0,03
Estacional	0,05	0,07	0,00	-0,01	0,03	0,04	-0,29	0,17	0,34	0,27	-0,13
Est. s/2017	0,5	0,47	0,48	0,44	0,58	0,49	-0,47	0,31	0,31	0,36	-0,53

Tabla B.7: Correlaciones área quemada, O'higgins - Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,07	0,01	0,00	0,00	0,03	-0,06	0,04	0,03	0,04	-0,01
5 días	0,10	0,12	0,01	0,01	0,01	0,05	-0,15	0,11	0,09	0,11	-0,02
7 días	0,12	0,15	0,02	0,01	0,01	0,06	-0,17	0,12	0,12	0,13	-0,03
10 días	0,10	0,13	0,01	0,01	0,01	0,06	-0,17	0,12	0,12	0,14	-0,03
Mensual	0,10	0,17	0,01	0,01	0,01	0,08	-0,21	0,17	0,18	0,18	-0,03
Estacional	0,07	0,10	0,03	0,02	0,08	0,07	-0,31	0,15	0,38	0,32	-0,15
Est. s/2017	0,54	0,51	0,51	0,49	0,6	0,54	-0,55	0,24	0,43	0,48	-0,55

Tabla B.8: Correlaciones área quemada, Ñuble - Los Lagos, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,11	0,08	0,09	0,09	0,07	0,06	-0,08	0,04	0,04	0,05	-0,04
5 días	0,25	0,21	0,17	0,17	0,13	0,14	-0,24	0,08	0,12	0,15	-0,09
7 días	0,25	0,21	0,18	0,19	0,14	0,15	-0,26	0,07	0,13	0,17	-0,10
10 días	0,31	0,27	0,24	0,24	0,17	0,19	-0,33	0,06	0,20	0,23	-0,12
Mensual	0,32	0,26	0,29	0,29	0,24	0,19	-0,36	0,09	0,23	0,24	-0,08
Estacional	0,47	0,46	0,44	0,45	0,37	0,46	-0,63	0,01	0,55	0,52	-0,38
Est. s/2017	0,75	0,71	0,72	0,72	0,66	0,66	-0,76	0,1	0,49	0,54	-0,57

FWI calculado con valores promedios diarios y temperatura máxima

Tabla B.9: Correlaciones área quemada, toda la zona de estudio, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios más temperatura máxima).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,06	0,02	0,02	0,01	0,02	-0,06	0,03	0,02	0,03	-0,01
5 días	0,11	0,11	0,03	0,03	0,02	0,05	-0,15	0,06	0,06	0,08	-0,03
7 días	0,14	0,14	0,04	0,04	0,03	0,06	-0,19	0,07	0,09	0,10	-0,04
10 días	0,12	0,12	0,03	0,03	0,02	0,06	-0,19	0,06	0,10	0,11	-0,04
Mensual	0,13	0,14	0,05	0,04	0,04	0,06	-0,22	0,09	0,15	0,14	-0,01
Estacional	0,12	0,15	0,05	0,04	0,07	0,13	-0,34	0,03	0,41	0,33	-0,12
Est. s/2017	0,66	0,62	0,6	0,57	0,64	0,58	-0,67	0,14	0,42	0,48	-0,6

Tabla B.10: Correlaciones área quemada, Valparaíso - Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios más temperatura máxima).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,06	0,05	0,03	0,04	-0,01
5 días	0,11	0,13	0,00	0,00	0,00	0,05	-0,15	0,11	0,09	0,11	-0,02
7 días	0,12	0,15	0,01	0,00	0,00	0,06	-0,18	0,14	0,11	0,13	-0,03
10 días	0,11	0,15	0,00	-0,01	0,00	0,07	-0,18	0,13	0,12	0,14	-0,03
Mensual	0,10	0,18	0,00	-0,01	0,00	0,08	-0,21	0,17	0,17	0,17	-0,03
Estacional	0,07	0,12	-0,01	-0,02	0,05	0,06	-0,29	0,17	0,34	0,27	-0,13
Est. s/2017	0,5	0,46	0,47	0,43	0,59	0,5	-0,47	0,3	0,31	0,36	-0,53

Tabla B.11: Correlaciones área quemada, O'higgins - Biobío, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios más temperatura máxima).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,06	0,01	0,00	0,01	0,02	-0,06	0,04	0,03	0,04	-0,01
5 días	0,11	0,13	0,01	0,01	0,01	0,05	-0,15	0,11	0,09	0,11	-0,02
7 días	0,13	0,15	0,02	0,01	0,01	0,06	-0,17	0,12	0,12	0,13	-0,03
10 días	0,11	0,14	0,01	0,01	0,01	0,06	-0,17	0,12	0,12	0,14	-0,03
Mensual	0,11	0,18	0,01	0,01	0,02	0,08	-0,21	0,17	0,18	0,18	-0,03
Estacional	0,10	0,16	0,02	0,00	0,10	0,09	-0,31	0,15	0,38	0,32	-0,15
Est. s/2017	0,55	0,52	0,51	0,48	0,62	0,55	-0,55	0,24	0,43	0,48	-0,55

Tabla B.12: Correlaciones área quemada, Ñuble - Los Lagos, seleccionando el periodo entre noviembre y abril (verano extendido). FWI modificado (promedios diarios más temperatura máxima).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,11	0,08	0,09	0,09	0,07	0,06	-0,08	0,04	0,04	0,05	-0,04
5 días	0,24	0,21	0,17	0,17	0,13	0,13	-0,24	0,08	0,12	0,15	-0,09
7 días	0,25	0,22	0,18	0,19	0,14	0,14	-0,26	0,07	0,13	0,17	-0,10
10 días	0,31	0,26	0,24	0,24	0,17	0,18	-0,33	0,06	0,20	0,23	-0,12
Mensual	0,32	0,26	0,29	0,29	0,24	0,18	-0,36	0,09	0,23	0,24	-0,09
Estacional	0,48	0,48	0,44	0,44	0,38	0,46	-0,63	0,01	0,55	0,52	-0,41
Est. s/2017	0,75	0,7	0,72	0,72	0,65	0,65	-0,76	0,1	0,49	0,54	-0,61

B.1.2. Verano extendido diciembre-marzo

FWI con datos al mediodía (UTC-3)

Tabla B.13: Correlaciones área quemada total, toda la zona de estudio, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año.

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,09	0,09	0,01	0,01	0,01	0,03	-0,09	0,04	0,06	0,03	-0,02
5 días	0,13	0,15	0,02	0,01	0,01	0,06	-0,16	0,06	0,10	0,09	-0,04
7 días	0,14	0,17	0,03	0,02	0,01	0,07	-0,17	0,07	0,11	0,12	-0,05
10 días	0,13	0,17	0,02	0,01	0,01	0,07	-0,17	0,08	0,10	0,13	-0,05
Mensual	0,12	0,16	0,02	0,01	0,02	0,06	-0,18	0,08	0,11	0,16	-0,02
Estacional	0,01	0,06	-0,04	-0,06	-0,02	0,05	-0,10	-0,01	0,08	0,28	-0,05

Tabla B.14: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año.

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,09	0,09	0,01	0,01	0,01	0,03	-0,09	0,04	0,06	0,03	-0,02
5 días	0,13	0,15	0,02	0,01	0,01	0,06	-0,16	0,06	0,10	0,09	-0,04
7 días	0,14	0,17	0,03	0,02	0,01	0,07	-0,17	0,07	0,11	0,12	-0,05
10 días	0,13	0,17	0,02	0,01	0,01	0,07	-0,17	0,08	0,10	0,13	-0,05
Mensual	0,12	0,16	0,02	0,01	0,02	0,06	-0,18	0,08	0,11	0,16	-0,02
Estacional	0,01	0,06	-0,04	-0,06	-0,02	0,05	-0,10	-0,01	0,08	0,28	-0,05

Tabla B.15: Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año.

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,08	0,10	0,00	0,00	0,00	0,04	-0,08	0,07	0,07	0,05	-0,01
5 días	0,13	0,18	0,00	-0,01	0,00	0,07	-0,16	0,12	0,12	0,13	-0,03
7 días	0,14	0,19	0,00	0,00	0,00	0,08	-0,17	0,13	0,14	0,16	-0,04
10 días	0,13	0,20	0,00	-0,01	0,00	0,09	-0,18	0,14	0,14	0,17	-0,05
Mensual	0,12	0,24	-0,01	-0,02	0,00	0,11	-0,21	0,16	0,15	0,22	-0,05
Estacional	-0,01	0,06	-0,06	-0,08	0,00	-0,02	-0,12	0,21	0,09	0,28	-0,02

Tabla B.16: Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año.

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,14	0,12	0,09	0,09	0,08	0,07	-0,13	0,05	0,12	0,06	-0,04
5 días	0,25	0,23	0,16	0,16	0,14	0,16	-0,25	0,05	0,18	0,18	-0,11
7 días	0,26	0,24	0,17	0,17	0,15	0,16	-0,24	0,05	0,19	0,19	-0,12
10 días	0,31	0,29	0,23	0,23	0,19	0,21	-0,29	0,04	0,22	0,26	-0,15
Mensual	0,30	0,26	0,27	0,26	0,25	0,20	-0,30	0,05	0,20	0,27	-0,13
Estacional	0,38	0,41	0,33	0,34	0,31	0,38	-0,35	-0,06	0,25	0,49	-0,36

FWI calculado con valores promedios diarios

Tabla B.17: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,07	0,06	0,02	0,02	0,01	0,03	-0,06	0,04	0,03	0,03	-0,02
5 días	0,12	0,12	0,03	0,02	0,01	0,06	-0,17	0,07	0,08	0,09	-0,04
7 días	0,14	0,15	0,04	0,03	0,02	0,08	-0,21	0,08	0,10	0,12	-0,05
10 días	0,13	0,13	0,03	0,03	0,02	0,08	-0,22	0,07	0,11	0,13	-0,05
Mensual	0,14	0,16	0,04	0,04	0,03	0,08	-0,25	0,11	0,17	0,16	-0,02
Estacional	0,08	0,08	0,02	0,02	0,00	0,08	-0,27	0,05	0,36	0,28	-0,05

Tabla B.18: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,07	0,00	0,00	-0,01	0,04	-0,07	0,06	0,04	0,05	-0,01
5 días	0,11	0,15	0,00	-0,01	-0,01	0,07	-0,18	0,13	0,11	0,13	-0,03
7 días	0,13	0,17	0,00	0,00	-0,01	0,09	-0,21	0,16	0,14	0,16	-0,04
10 días	0,11	0,16	-0,01	-0,01	-0,01	0,09	-0,21	0,15	0,15	0,17	-0,05
Mensual	0,11	0,20	-0,02	-0,02	-0,02	0,11	-0,24	0,20	0,21	0,22	-0,06
Estacional	0,00	0,04	-0,05	-0,06	-0,03	-0,03	-0,22	0,20	0,32	0,24	0,00

Tabla B.19: Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,07	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,06	0,05	0,04	0,05	-0,01
5 días	0,11	0,14	0,00	0,00	0,00	0,07	-0,17	0,12	0,11	0,13	-0,03
7 días	0,13	0,17	0,01	0,01	0,00	0,08	-0,20	0,15	0,14	0,16	-0,04
10 días	0,11	0,16	0,01	0,00	0,00	0,08	-0,21	0,15	0,15	0,17	-0,05
Mensual	0,11	0,20	0,00	0,00	0,00	0,11	-0,26	0,19	0,21	0,22	-0,05
Estacional	0,03	0,06	-0,01	-0,02	0,02	-0,01	-0,26	0,20	0,36	0,28	-0,02

Tabla B.20: Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,11	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	-0,09	0,04	0,05	0,06	-0,04
5 días	0,25	0,23	0,17	0,17	0,14	0,16	-0,28	0,10	0,14	0,18	-0,11
7 días	0,26	0,23	0,19	0,19	0,15	0,17	-0,29	0,09	0,16	0,19	-0,12
10 días	0,32	0,29	0,25	0,25	0,19	0,22	-0,37	0,07	0,23	0,26	-0,15
Mensual	0,32	0,27	0,30	0,30	0,26	0,22	-0,40	0,10	0,25	0,27	-0,12
Estacional	0,44	0,42	0,40	0,41	0,33	0,43	-0,56	0,08	0,51	0,49	-0,36

FWI calculado con valores promedios diarios y temperatura máxima

Tabla B.21: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios y temperatura máxima).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,06	0,02	0,02	0,01	0,03	-0,06	0,04	0,03	0,03	-0,02
5 días	0,12	0,12	0,03	0,02	0,02	0,06	-0,17	0,07	0,08	0,09	-0,04
7 días	0,15	0,15	0,04	0,03	0,03	0,08	-0,21	0,08	0,10	0,12	-0,05
10 días	0,13	0,14	0,03	0,03	0,03	0,08	-0,22	0,07	0,11	0,13	-0,05
Mensual	0,14	0,15	0,04	0,04	0,04	0,07	-0,25	0,11	0,17	0,16	-0,02
Estacional	0,09	0,11	0,01	0,00	0,02	0,08	-0,27	0,05	0,36	0,28	-0,05

Tabla B.22: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios y temperatura máxima).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,07	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,07	0,06	0,04	0,05	-0,01
5 días	0,12	0,15	0,00	-0,01	0,00	0,07	-0,18	0,13	0,11	0,13	-0,03
7 días	0,14	0,18	0,00	0,00	0,00	0,09	-0,21	0,16	0,14	0,16	-0,04
10 días	0,12	0,17	0,00	-0,01	0,00	0,09	-0,21	0,15	0,15	0,17	-0,05
Mensual	0,12	0,21	-0,01	-0,02	-0,01	0,12	-0,24	0,20	0,21	0,22	-0,06
Estacional	0,02	0,08	-0,06	-0,08	0,00	-0,02	-0,22	0,20	0,32	0,24	0,00

Tabla B.23: Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios y temperatura máxima).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,07	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,06	0,05	0,04	0,05	-0,01
5 días	0,12	0,15	0,01	0,00	0,01	0,07	-0,17	0,12	0,11	0,13	-0,03
7 días	0,14	0,18	0,01	0,01	0,01	0,08	-0,20	0,15	0,14	0,16	-0,04
10 días	0,12	0,16	0,01	0,00	0,01	0,09	-0,21	0,15	0,15	0,17	-0,05
Mensual	0,13	0,22	0,00	0,00	0,01	0,11	-0,26	0,19	0,21	0,22	-0,05
Estacional	0,05	0,12	-0,02	-0,03	0,04	0,00	-0,26	0,20	0,36	0,28	-0,02

Tabla B.24: Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, periodo entre diciembre y marzo (verano extendido) de cada año. FWI modificado (valores medios diarios y temperatura máxima).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,11	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	-0,09	0,04	0,05	0,06	-0,04
5 días	0,25	0,23	0,17	0,17	0,14	0,16	-0,28	0,10	0,14	0,18	-0,11
7 días	0,26	0,23	0,19	0,19	0,16	0,17	-0,29	0,09	0,16	0,19	-0,12
10 días	0,32	0,28	0,25	0,25	0,20	0,22	-0,37	0,07	0,23	0,26	-0,15
Mensual	0,33	0,28	0,30	0,29	0,27	0,22	-0,40	0,10	0,25	0,27	-0,13
Estacional	0,45	0,45	0,40	0,40	0,34	0,44	-0,56	0,08	0,51	0,49	-0,36

B.1.3. Año completo

FWI con datos al mediodía (UTC-3)

Tabla B.25: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, todo el año.

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,08	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,06	0,02	0,04	0,02	-0,01
5 días	0,11	0,11	0,02	0,02	0,01	0,03	-0,10	0,03	0,06	0,06	-0,02
7 días	0,12	0,12	0,03	0,02	0,01	0,03	-0,10	0,03	0,08	0,08	-0,02
10 días	0,11	0,12	0,02	0,02	0,01	0,03	-0,10	0,04	0,07	0,08	-0,02
Mensual	0,11	0,12	0,03	0,02	0,02	0,03	-0,12	0,04	0,08	0,11	-0,01
Estacional	0,06	0,07	0,02	0,00	0,03	0,04	-0,09	0,04	0,08	0,15	-0,02

Tabla B.26: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, todo el año.

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,07	0,08	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,05	0,04	0,05	0,03	0,00
5 días	0,10	0,12	0,00	-0,01	0,00	0,02	-0,10	0,06	0,08	0,07	-0,01
7 días	0,11	0,13	0,00	-0,01	0,00	0,03	-0,10	0,07	0,09	0,09	-0,01
10 días	0,10	0,14	-0,01	-0,02	0,00	0,03	-0,11	0,07	0,09	0,10	-0,01
Mensual	0,09	0,15	-0,02	-0,03	-0,01	0,03	-0,12	0,08	0,10	0,13	-0,01
Estacional	0,03	0,06	-0,02	-0,04	0,00	0,02	-0,07	0,09	0,06	0,14	-0,01

Tabla B.27: Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, todo el año.

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,05	0,03	0,05	0,03	0,00
5 días	0,11	0,12	0,01	0,00	0,00	0,02	-0,09	0,06	0,08	0,08	-0,01
7 días	0,12	0,13	0,01	0,01	0,01	0,03	-0,10	0,06	0,09	0,09	-0,01
10 días	0,11	0,14	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,11	0,07	0,09	0,10	-0,01
Mensual	0,10	0,16	0,00	-0,01	0,01	0,03	-0,13	0,08	0,10	0,14	-0,01
Estacional	0,05	0,09	0,00	-0,01	0,02	0,02	-0,09	0,11	0,08	0,16	-0,01

Tabla B.28: Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, todo el año.

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,13	0,10	0,09	0,09	0,06	0,04	-0,09	0,03	0,08	0,04	-0,02
5 días	0,23	0,18	0,16	0,16	0,11	0,08	-0,16	0,03	0,12	0,12	-0,04
7 días	0,24	0,19	0,17	0,17	0,13	0,09	-0,16	0,02	0,13	0,13	-0,05
10 días	0,28	0,23	0,22	0,22	0,16	0,11	-0,19	0,02	0,15	0,18	-0,06
Mensual	0,29	0,22	0,27	0,26	0,21	0,10	-0,20	0,03	0,15	0,20	-0,05
Estacional	0,33	0,28	0,31	0,30	0,27	0,17	-0,22	0,00	0,19	0,29	-0,12

FWI calculado con valores promedios diarios

Tabla B.29: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,04	0,02	0,01	0,02	-0,01
5 días	0,11	0,10	0,03	0,03	0,01	0,03	-0,11	0,03	0,04	0,06	-0,02
7 días	0,13	0,11	0,04	0,04	0,02	0,04	-0,14	0,04	0,06	0,08	-0,02
10 días	0,11	0,10	0,03	0,03	0,02	0,04	-0,14	0,03	0,07	0,08	-0,02
Mensual	0,12	0,13	0,04	0,04	0,03	0,04	-0,18	0,05	0,11	0,11	-0,01
Estacional	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,05	-0,21	0,03	0,17	0,15	-0,02

Tabla B.30: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,05	0,06	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,04	0,03	0,02	0,03	0,00
5 días	0,10	0,11	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,11	0,07	0,06	0,07	-0,01
7 días	0,11	0,12	0,01	0,00	0,00	0,03	-0,13	0,08	0,07	0,09	-0,01
10 días	0,09	0,11	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,13	0,07	0,08	0,10	-0,01
Mensual	0,09	0,14	0,00	-0,01	0,00	0,04	-0,16	0,10	0,12	0,13	-0,01
Estacional	0,05	0,07	0,01	0,00	0,01	0,02	-0,17	0,09	0,16	0,14	-0,01

Tabla B.31: Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,06	0,01	0,00	0,00	0,01	-0,04	0,03	0,02	0,03	0,00
5 días	0,10	0,11	0,01	0,01	0,00	0,03	-0,11	0,06	0,06	0,08	-0,01
7 días	0,11	0,12	0,02	0,01	0,01	0,03	-0,13	0,07	0,08	0,09	-0,01
10 días	0,10	0,11	0,01	0,01	0,01	0,03	-0,13	0,07	0,08	0,10	-0,01
Mensual	0,10	0,15	0,01	0,01	0,01	0,04	-0,18	0,10	0,13	0,14	-0,01
Estacional	0,07	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03	-0,19	0,10	0,17	0,16	-0,01

Tabla B.32: Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,11	0,08	0,09	0,09	0,07	0,04	-0,06	0,02	0,03	0,04	-0,02
5 días	0,24	0,20	0,17	0,17	0,12	0,09	-0,18	0,05	0,09	0,12	-0,04
7 días	0,51	0,43	0,44	0,44	0,34	0,32	-0,42	-0,01	0,22	0,34	-0,19
10 días	0,31	0,24	0,23	0,24	0,16	0,13	-0,25	0,03	0,15	0,18	-0,06
Mensual	0,32	0,24	0,29	0,29	0,22	0,13	-0,30	0,05	0,18	0,20	-0,04
Estacional	0,37	0,29	0,35	0,35	0,28	0,21	-0,42	0,02	0,28	0,29	-0,11

FWI calculado con valores promedios diarios y temperatura máxima

Tabla B.33: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,06	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,04	0,02	0,01	0,02	-0,01
5 días	0,11	0,10	0,03	0,03	0,02	0,03	-0,11	0,03	0,04	0,06	-0,02
7 días	0,13	0,11	0,04	0,04	0,02	0,04	-0,14	0,04	0,06	0,08	-0,02
10 días	0,11	0,10	0,03	0,03	0,02	0,04	-0,14	0,03	0,07	0,08	-0,02
Mensual	0,12	0,12	0,04	0,04	0,03	0,04	-0,18	0,05	0,11	0,11	-0,01
Estacional	0,10	0,09	0,05	0,04	0,05	0,05	-0,21	0,03	0,17	0,15	-0,02

Tabla B.34: Correlaciones área quemada total, Valparaíso - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,04	0,03	0,02	0,03	0,00
5 días	0,10	0,11	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,11	0,07	0,06	0,07	-0,01
7 días	0,11	0,12	0,01	0,00	0,00	0,03	-0,13	0,08	0,07	0,09	-0,01
10 días	0,10	0,11	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,13	0,07	0,08	0,10	-0,01
Mensual	0,10	0,14	0,00	-0,01	0,00	0,04	-0,16	0,10	0,12	0,13	-0,01
Estacional	0,06	0,09	0,00	-0,01	0,02	0,02	-0,17	0,09	0,16	0,14	-0,01

Tabla B.35: Correlaciones área quemada total, O'higgins - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,05	0,05	0,01	0,00	0,01	0,01	-0,04	0,03	0,02	0,03	0,00
5 días	0,10	0,11	0,01	0,01	0,01	0,03	-0,11	0,06	0,06	0,08	-0,01
7 días	0,12	0,13	0,02	0,01	0,01	0,03	-0,13	0,07	0,08	0,09	-0,01
10 días	0,10	0,11	0,01	0,01	0,01	0,03	-0,13	0,07	0,08	0,10	-0,01
Mensual	0,11	0,15	0,01	0,01	0,02	0,04	-0,18	0,10	0,13	0,14	-0,01
Estacional	0,09	0,12	0,03	0,02	0,04	0,03	-0,19	0,10	0,17	0,16	-0,01

Tabla B.36: Correlaciones área quemada total, Ñuble - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,11	0,08	0,09	0,09	0,07	0,04	-0,06	0,02	0,03	0,04	-0,02
5 días	0,24	0,19	0,17	0,17	0,12	0,09	-0,18	0,05	0,09	0,12	-0,04
7 días	0,25	0,20	0,18	0,19	0,13	0,10	-0,20	0,04	0,10	0,13	-0,05
10 días	0,30	0,23	0,24	0,24	0,16	0,12	-0,25	0,03	0,15	0,18	-0,06
Mensual	0,31	0,24	0,29	0,29	0,22	0,13	-0,30	0,05	0,18	0,20	-0,05
Estacional	0,38	0,31	0,35	0,35	0,28	0,20	-0,42	0,02	0,28	0,29	-0,12

B.2. Número de incendios

B.2.1. Verano extendido noviembre-abril

FWI con datos al mediodía (UTC-3)

Tabla B.37: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año.

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,39	0,33	0,23	0,23	0,17	0,28	-0,42	0,00	0,26	0,18	-0,19
5 días	0,42	0,38	0,26	0,26	0,19	0,33	-0,44	-0,03	0,27	0,30	-0,25
7 días	0,41	0,38	0,27	0,26	0,19	0,32	-0,43	-0,03	0,26	0,30	-0,25
10 días	0,40	0,37	0,27	0,26	0,20	0,33	-0,42	-0,03	0,27	0,32	-0,25
Mensual	0,36	0,36	0,25	0,25	0,19	0,35	-0,43	-0,05	0,27	0,36	-0,27
Estacional	0,32	0,39	0,24	0,24	0,16	0,48	-0,43	-0,05	0,28	0,48	-0,38

Tabla B.38: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año.

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,33	0,31	0,15	0,15	0,08	0,23	-0,40	0,11	0,24	0,14	-0,13
5 días	0,34	0,34	0,18	0,18	0,10	0,27	-0,39	0,10	0,23	0,26	-0,19
7 días	0,34	0,33	0,18	0,18	0,10	0,27	-0,38	0,10	0,22	0,26	-0,20
10 días	0,32	0,33	0,18	0,18	0,10	0,27	-0,37	0,09	0,22	0,27	-0,21
Mensual	0,28	0,30	0,17	0,17	0,09	0,27	-0,35	0,07	0,19	0,28	-0,22
Estacional	0,25	0,31	0,19	0,19	0,07	0,39	-0,37	0,06	0,19	0,36	-0,38

Tabla B.39: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año.

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,39	0,34	0,24	0,25	0,17	0,28	-0,42	0,08	0,30	0,23	-0,15
5 días	0,43	0,39	0,28	0,29	0,19	0,33	-0,44	0,05	0,31	0,37	-0,22
7 días	0,42	0,39	0,29	0,30	0,20	0,33	-0,43	0,04	0,30	0,38	-0,24
10 días	0,41	0,38	0,29	0,30	0,20	0,33	-0,42	0,03	0,30	0,39	-0,24
Mensual	0,37	0,36	0,29	0,29	0,20	0,34	-0,41	0,01	0,29	0,42	-0,26
Estacional	0,34	0,36	0,32	0,33	0,20	0,47	-0,42	-0,02	0,27	0,55	-0,46

Tabla B.40: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año.

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,49	0,40	0,39	0,39	0,31	0,37	-0,46	-0,04	0,35	0,27	-0,25
5 días	0,55	0,48	0,45	0,45	0,36	0,44	-0,52	-0,09	0,38	0,41	-0,34
7 días	0,55	0,48	0,46	0,45	0,36	0,43	-0,52	-0,10	0,38	0,42	-0,34
10 días	0,54	0,47	0,47	0,46	0,37	0,43	-0,52	-0,11	0,39	0,44	-0,34
Mensual	0,50	0,45	0,46	0,46	0,38	0,45	-0,53	-0,13	0,41	0,49	-0,36
Estacional	0,46	0,49	0,44	0,43	0,37	0,58	-0,52	-0,14	0,42	0,63	-0,48

FWI calculado con valores promedios diarios

Tabla B.41: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,33	0,28	0,23	0,23	0,17	0,26	-0,31	0,04	0,11	0,18	-0,19
5 días	0,39	0,36	0,26	0,26	0,19	0,33	-0,44	0,01	0,21	0,30	-0,25
7 días	0,40	0,36	0,27	0,26	0,20	0,33	-0,45	0,00	0,22	0,30	-0,25
10 días	0,39	0,35	0,27	0,27	0,20	0,33	-0,45	-0,02	0,24	0,32	-0,25
Mensual	0,36	0,34	0,26	0,26	0,20	0,34	-0,45	-0,04	0,29	0,36	-0,27
Estacional	0,32	0,37	0,26	0,26	0,16	0,45	-0,46	-0,10	0,39	0,48	-0,38

Tabla B.42: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,26	0,23	0,15	0,16	0,09	0,20	-0,27	0,13	0,10	0,14	-0,13
5 días	0,33	0,31	0,18	0,19	0,10	0,27	-0,39	0,13	0,19	0,26	-0,19
7 días	0,33	0,31	0,19	0,19	0,10	0,27	-0,40	0,12	0,20	0,26	-0,20
10 días	0,32	0,31	0,19	0,19	0,11	0,27	-0,39	0,09	0,22	0,27	-0,21
Mensual	0,28	0,28	0,19	0,19	0,10	0,27	-0,39	0,05	0,25	0,28	-0,22
Estacional	0,26	0,28	0,22	0,23	0,08	0,35	-0,40	-0,04	0,36	0,36	-0,38

Tabla B.43: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,33	0,27	0,25	0,26	0,17	0,25	-0,32	0,11	0,18	0,23	-0,15
5 días	0,42	0,38	0,29	0,30	0,20	0,33	-0,47	0,11	0,29	0,37	-0,22
7 días	0,42	0,38	0,30	0,31	0,20	0,34	-0,48	0,10	0,30	0,38	-0,24
10 días	0,42	0,38	0,31	0,31	0,21	0,34	-0,48	0,07	0,31	0,39	-0,24
Mensual	0,38	0,35	0,30	0,31	0,21	0,34	-0,49	0,03	0,37	0,42	-0,26
Estacional	0,38	0,37	0,36	0,38	0,22	0,45	-0,53	-0,05	0,50	0,55	-0,46

Tabla B.44: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,41	0,34	0,38	0,37	0,31	0,35	-0,37	0,02	0,18	0,27	-0,25
5 días	0,52	0,45	0,44	0,43	0,35	0,44	-0,52	-0,01	0,29	0,41	-0,34
7 días	0,52	0,45	0,45	0,44	0,36	0,44	-0,53	-0,02	0,30	0,42	-0,34
10 días	0,51	0,44	0,46	0,45	0,36	0,44	-0,53	-0,05	0,33	0,44	-0,34
Mensual	0,48	0,43	0,45	0,45	0,38	0,45	-0,54	-0,07	0,39	0,49	-0,35
Estacional	0,44	0,46	0,44	0,44	0,37	0,56	-0,55	-0,10	0,48	0,63	-0,48

FWI calculado con valores promedios diarios y temperatura máxima

Tabla B.45: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,33	0,27	0,23	0,23	0,18	0,25	-0,31	0,04	0,11	0,18	-0,19
5 días	0,41	0,36	0,27	0,27	0,20	0,32	-0,44	0,01	0,21	0,30	-0,25
7 días	0,41	0,37	0,27	0,27	0,21	0,33	-0,45	0,00	0,22	0,30	-0,25
10 días	0,40	0,36	0,28	0,27	0,21	0,33	-0,45	-0,02	0,24	0,32	-0,25
Mensual	0,37	0,36	0,27	0,26	0,21	0,35	-0,45	-0,04	0,29	0,36	-0,27
Estacional	0,34	0,39	0,26	0,27	0,18	0,47	-0,46	-0,10	0,39	0,48	-0,38

Tabla B.46: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,27	0,23	0,16	0,16	0,10	0,19	-0,27	0,13	0,10	0,14	-0,13
5 días	0,34	0,32	0,19	0,19	0,11	0,27	-0,39	0,13	0,19	0,26	-0,19
7 días	0,34	0,32	0,19	0,20	0,12	0,27	-0,40	0,12	0,20	0,26	-0,20
10 días	0,33	0,32	0,19	0,20	0,12	0,27	-0,39	0,09	0,22	0,27	-0,21
Mensual	0,29	0,29	0,19	0,19	0,11	0,27	-0,39	0,05	0,25	0,28	-0,22
Estacional	0,27	0,31	0,21	0,22	0,10	0,37	-0,40	-0,04	0,36	0,36	-0,38

Tabla B.47: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,30	0,25	0,19	0,20	0,10	0,24	-0,31	0,13	0,18	0,23	-0,16
5 días	0,40	0,37	0,23	0,24	0,12	0,34	-0,47	0,13	0,29	0,37	-0,26
7 días	0,39	0,37	0,23	0,24	0,12	0,34	-0,47	0,11	0,30	0,38	-0,27
10 días	0,39	0,37	0,25	0,26	0,14	0,34	-0,47	0,09	0,32	0,39	-0,28
Mensual	0,33	0,32	0,22	0,24	0,10	0,31	-0,47	0,05	0,35	0,40	-0,23
Estacional	0,28	0,31	0,21	0,25	0,04	0,32	-0,49	-0,05	0,46	0,48	-0,28

Tabla B.48: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo noviembre a abril de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,42	0,34	0,38	0,38	0,32	0,35	-0,37	0,02	0,18	0,27	-0,25
5 días	0,53	0,46	0,45	0,44	0,37	0,44	-0,52	-0,01	0,29	0,41	-0,34
7 días	0,53	0,46	0,46	0,45	0,37	0,44	-0,53	-0,02	0,30	0,42	-0,34
10 días	0,52	0,45	0,47	0,46	0,38	0,44	-0,53	-0,05	0,33	0,44	-0,34
Mensual	0,50	0,44	0,46	0,46	0,39	0,45	-0,54	-0,07	0,39	0,49	-0,36
Estacional	0,46	0,49	0,45	0,45	0,39	0,58	-0,55	-0,10	0,48	0,63	-0,48

B.2.2. Verano extendido diciembre-marzo

FWI con datos al mediodía (UTC-3)

Tabla B.49: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año.

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,37	0,33	0,18	0,18	0,12	0,29	-0,44	0,01	0,27	0,18	-0,21
5 días	0,40	0,38	0,21	0,21	0,13	0,35	-0,46	-0,02	0,28	0,31	-0,28
7 días	0,39	0,38	0,21	0,21	0,13	0,34	-0,45	-0,01	0,27	0,31	-0,28
10 días	0,39	0,37	0,22	0,22	0,15	0,34	-0,44	-0,03	0,28	0,33	-0,27
Mensual	0,33	0,34	0,19	0,19	0,11	0,34	-0,43	-0,03	0,26	0,34	-0,27
Estacional	0,24	0,32	0,11	0,12	0,02	0,39	-0,40	0,00	0,27	0,43	-0,33

Tabla B.50: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año.

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,30	0,30	0,07	0,08	-0,02	0,24	-0,41	0,13	0,24	0,13	-0,13
5 días	0,31	0,33	0,09	0,10	-0,01	0,28	-0,39	0,12	0,21	0,24	-0,22
7 días	0,30	0,32	0,09	0,10	-0,02	0,28	-0,37	0,12	0,20	0,24	-0,22
10 días	0,29	0,31	0,11	0,12	0,00	0,28	-0,36	0,12	0,20	0,25	-0,23
Mensual	0,21	0,26	0,07	0,08	-0,05	0,24	-0,33	0,09	0,15	0,23	-0,18
Estacional	0,13	0,20	0,01	0,04	-0,12	0,24	-0,31	0,07	0,13	0,26	-0,21

Tabla B.51: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año.

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,36	0,33	0,17	0,19	0,08	0,29	-0,43	0,09	0,30	0,23	-0,16
5 días	0,39	0,38	0,21	0,22	0,10	0,35	-0,44	0,06	0,30	0,37	-0,26
7 días	0,38	0,37	0,21	0,22	0,10	0,34	-0,43	0,06	0,30	0,38	-0,27
10 días	0,38	0,37	0,23	0,24	0,12	0,35	-0,42	0,06	0,29	0,39	-0,28
Mensual	0,30	0,31	0,19	0,21	0,08	0,31	-0,40	0,03	0,26	0,40	-0,23
Estacional	0,23	0,26	0,16	0,20	0,01	0,33	-0,38	0,01	0,23	0,48	-0,28

Tabla B.52: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año.

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,48	0,41	0,37	0,36	0,29	0,40	-0,49	-0,03	0,37	0,28	-0,28
5 días	0,55	0,49	0,43	0,42	0,34	0,47	-0,56	-0,09	0,41	0,43	-0,39
7 días	0,54	0,48	0,44	0,43	0,34	0,46	-0,55	-0,09	0,40	0,43	-0,38
10 días	0,53	0,47	0,45	0,44	0,36	0,46	-0,55	-0,11	0,41	0,46	-0,38
Mensual	0,48	0,43	0,43	0,43	0,35	0,45	-0,55	-0,12	0,41	0,49	-0,38
Estacional	0,42	0,44	0,38	0,38	0,29	0,53	-0,52	-0,09	0,44	0,61	-0,46

FWI calculado con valores promedios diarios

Tabla B.53: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,31	0,26	0,18	0,18	0,12	0,26	-0,31	0,05	0,11	0,18	-0,21
5 días	0,38	0,35	0,21	0,21	0,14	0,34	-0,45	0,02	0,22	0,31	-0,28
7 días	0,38	0,36	0,21	0,21	0,14	0,34	-0,45	0,02	0,23	0,31	-0,28
10 días	0,37	0,35	0,22	0,22	0,15	0,34	-0,45	-0,01	0,25	0,33	-0,27
Mensual	0,32	0,32	0,19	0,19	0,12	0,32	-0,45	-0,02	0,28	0,34	-0,27
Estacional	0,24	0,30	0,12	0,14	0,02	0,35	-0,41	-0,06	0,37	0,43	-0,33

Tabla B.54: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso -Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,23	0,22	0,08	0,09	-0,02	0,18	-0,25	0,14	0,09	0,13	-0,13
5 días	0,29	0,30	0,10	0,11	-0,01	0,26	-0,38	0,15	0,19	0,24	-0,22
7 días	0,29	0,30	0,10	0,11	-0,01	0,26	-0,38	0,14	0,19	0,24	-0,22
10 días	0,29	0,29	0,12	0,13	0,00	0,26	-0,38	0,12	0,21	0,25	-0,23
Mensual	0,21	0,24	0,08	0,10	-0,04	0,22	-0,36	0,07	0,21	0,23	-0,18
Estacional	0,14	0,18	0,04	0,07	-0,11	0,20	-0,34	-0,05	0,29	0,26	-0,21

Tabla B.55: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,30	0,25	0,18	0,19	0,09	0,24	-0,31	0,13	0,18	0,23	-0,16
5 días	0,39	0,37	0,22	0,23	0,11	0,34	-0,47	0,13	0,29	0,37	-0,26
7 días	0,38	0,36	0,22	0,24	0,11	0,34	-0,47	0,11	0,30	0,38	-0,27
10 días	0,38	0,36	0,24	0,25	0,12	0,34	-0,47	0,09	0,32	0,39	-0,28
Mensual	0,32	0,31	0,21	0,23	0,09	0,29	-0,47	0,05	0,35	0,40	-0,23
Estacional	0,26	0,27	0,20	0,24	0,03	0,29	-0,49	-0,05	0,46	0,48	-0,28

Tabla B.56: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,40	0,33	0,35	0,35	0,29	0,37	-0,39	0,04	0,19	0,28	-0,28
5 días	0,51	0,45	0,41	0,41	0,33	0,47	-0,55	0,01	0,32	0,43	-0,39
7 días	0,51	0,45	0,42	0,42	0,34	0,46	-0,55	0,00	0,32	0,43	-0,38
10 días	0,50	0,44	0,44	0,44	0,35	0,46	-0,56	-0,05	0,36	0,46	-0,38
Mensual	0,46	0,41	0,42	0,42	0,35	0,44	-0,55	-0,04	0,40	0,49	-0,37
Estacional	0,40	0,41	0,38	0,39	0,28	0,49	-0,52	-0,05	0,51	0,61	-0,45

FWI calculado con valores promedios diarios y temperatura máxima

Tabla B.57: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,31	0,26	0,19	0,18	0,13	0,25	-0,31	0,05	0,11	0,18	-0,21
5 días	0,39	0,36	0,22	0,22	0,15	0,34	-0,45	0,02	0,22	0,31	-0,28
7 días	0,39	0,36	0,22	0,22	0,15	0,34	-0,45	0,02	0,23	0,31	-0,28
10 días	0,38	0,36	0,23	0,23	0,16	0,34	-0,45	-0,01	0,25	0,33	-0,27
Mensual	0,33	0,33	0,20	0,20	0,13	0,33	-0,45	-0,02	0,28	0,34	-0,27
Estacional	0,26	0,32	0,13	0,14	0,03	0,37	-0,41	-0,06	0,37	0,43	-0,33

Tabla B.58: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,23	0,21	0,08	0,09	-0,01	0,18	-0,25	0,14	0,09	0,13	-0,13
5 días	0,30	0,31	0,11	0,12	0,00	0,27	-0,38	0,15	0,19	0,24	-0,22
7 días	0,30	0,30	0,11	0,12	0,00	0,26	-0,38	0,14	0,19	0,24	-0,22
10 días	0,29	0,30	0,12	0,13	0,01	0,27	-0,38	0,12	0,21	0,25	-0,23
Mensual	0,23	0,25	0,09	0,10	-0,03	0,23	-0,36	0,07	0,21	0,23	-0,18
Estacional	0,15	0,21	0,04	0,07	-0,10	0,21	-0,34	-0,05	0,29	0,26	-0,21

Tabla B.59: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,30	0,25	0,19	0,20	0,10	0,24	-0,31	0,13	0,18	0,23	-0,16
5 días	0,40	0,37	0,23	0,24	0,12	0,34	-0,47	0,13	0,29	0,37	-0,26
7 días	0,39	0,37	0,23	0,24	0,12	0,34	-0,47	0,11	0,30	0,38	-0,27
10 días	0,39	0,37	0,25	0,26	0,14	0,34	-0,47	0,09	0,32	0,39	-0,28
Mensual	0,33	0,32	0,22	0,24	0,10	0,31	-0,47	0,05	0,35	0,40	-0,23
Estacional	0,28	0,31	0,21	0,25	0,04	0,32	-0,49	-0,05	0,46	0,48	-0,28

Tabla B.60: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, periodo diciembre a marzo de cada año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,41	0,34	0,36	0,36	0,30	0,36	-0,39	0,04	0,19	0,28	-0,28
5 días	0,52	0,46	0,42	0,42	0,35	0,47	-0,55	0,01	0,32	0,43	-0,39
7 días	0,52	0,46	0,43	0,43	0,35	0,46	-0,55	0,00	0,32	0,43	-0,38
10 días	0,52	0,45	0,45	0,44	0,37	0,46	-0,56	-0,05	0,36	0,46	-0,38
Mensual	0,47	0,42	0,43	0,43	0,36	0,45	-0,55	-0,04	0,40	0,49	-0,38
Estacional	0,42	0,43	0,39	0,40	0,30	0,51	-0,52	-0,05	0,51	0,61	-0,46

B.2.3. Año completo

FWI con datos al mediodía (UTC-3)

Tabla B.61: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, todo el año.

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,38	0,29	0,23	0,23	0,15	0,17	-0,32	0,00	0,22	0,14	-0,10
5 días	0,41	0,33	0,26	0,26	0,17	0,20	-0,33	-0,02	0,22	0,23	-0,13
7 días	0,40	0,33	0,27	0,26	0,17	0,20	-0,33	-0,02	0,21	0,24	-0,13
10 días	0,39	0,32	0,27	0,26	0,18	0,20	-0,33	-0,02	0,22	0,26	-0,13
Mensual	0,36	0,32	0,25	0,25	0,17	0,21	-0,35	-0,04	0,23	0,29	-0,14
Estacional	0,31	0,29	0,25	0,24	0,20	0,26	-0,35	-0,08	0,22	0,31	-0,18

Tabla B.62: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, todo el año.

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,32	0,27	0,15	0,15	0,08	0,12	-0,30	0,07	0,20	0,11	-0,05
5 días	0,34	0,29	0,18	0,18	0,09	0,14	-0,30	0,06	0,18	0,19	-0,08
7 días	0,33	0,29	0,18	0,19	0,10	0,14	-0,29	0,06	0,18	0,20	-0,08
10 días	0,32	0,28	0,18	0,19	0,10	0,14	-0,29	0,05	0,18	0,21	-0,08
Mensual	0,28	0,26	0,18	0,18	0,09	0,15	-0,29	0,04	0,16	0,22	-0,09
Estacional	0,24	0,23	0,18	0,19	0,14	0,20	-0,30	-0,01	0,13	0,22	-0,14

Tabla B.63: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, todo el año.

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,38	0,30	0,24	0,25	0,14	0,14	-0,31	0,05	0,24	0,18	-0,06
5 días	0,42	0,34	0,28	0,29	0,17	0,16	-0,33	0,03	0,25	0,28	-0,09
7 días	0,41	0,34	0,29	0,30	0,17	0,17	-0,33	0,02	0,24	0,29	-0,09
10 días	0,40	0,33	0,29	0,30	0,17	0,17	-0,33	0,02	0,24	0,30	-0,09
Mensual	0,36	0,31	0,29	0,29	0,18	0,17	-0,34	0,00	0,24	0,33	-0,10
Estacional	0,30	0,26	0,27	0,28	0,22	0,22	-0,33	-0,05	0,20	0,34	-0,16

Tabla B.64: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, todo el año.

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,48	0,36	0,39	0,38	0,29	0,25	-0,36	-0,02	0,28	0,23	-0,14
5 días	0,54	0,44	0,45	0,44	0,33	0,29	-0,40	-0,06	0,31	0,34	-0,18
7 días	0,54	0,43	0,46	0,45	0,34	0,29	-0,40	-0,06	0,30	0,34	-0,19
10 días	0,53	0,42	0,47	0,46	0,35	0,29	-0,41	-0,07	0,32	0,36	-0,19
Mensual	0,49	0,41	0,46	0,45	0,36	0,30	-0,43	-0,08	0,34	0,40	-0,20
Estacional	0,43	0,38	0,42	0,41	0,36	0,34	-0,42	-0,13	0,34	0,43	-0,24

FWI calculado con valores promedios diarios

Tabla B.65: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,32	0,25	0,23	0,22	0,15	0,17	-0,24	0,02	0,07	0,14	-0,10
5 días	0,39	0,32	0,26	0,26	0,17	0,22	-0,33	0,00	0,15	0,23	-0,13
7 días	0,39	0,33	0,26	0,26	0,17	0,22	-0,35	0,00	0,15	0,24	-0,13
10 días	0,38	0,32	0,27	0,27	0,18	0,22	-0,35	-0,02	0,17	0,26	-0,13
Mensual	0,35	0,31	0,26	0,26	0,17	0,23	-0,38	-0,03	0,21	0,29	-0,14
Estacional	0,31	0,29	0,26	0,26	0,20	0,27	-0,40	-0,11	0,24	0,31	-0,18

Tabla B.66: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,26	0,21	0,16	0,16	0,08	0,12	-0,20	0,07	0,07	0,11	-0,05
5 días	0,32	0,27	0,19	0,19	0,10	0,16	-0,30	0,08	0,13	0,19	-0,08
7 días	0,32	0,27	0,19	0,20	0,10	0,16	-0,31	0,07	0,14	0,20	-0,08
10 días	0,32	0,27	0,19	0,20	0,10	0,16	-0,31	0,05	0,15	0,21	-0,08
Mensual	0,28	0,25	0,19	0,20	0,10	0,17	-0,33	0,02	0,18	0,22	-0,09
Estacional	0,25	0,23	0,20	0,21	0,14	0,21	-0,35	-0,07	0,20	0,22	-0,14

Tabla B.67: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,33	0,25	0,25	0,25	0,15	0,15	-0,25	0,07	0,12	0,18	-0,06
5 días	0,42	0,34	0,29	0,30	0,17	0,19	-0,36	0,06	0,19	0,28	-0,09
7 días	0,42	0,34	0,30	0,31	0,17	0,20	-0,38	0,06	0,20	0,29	-0,09
10 días	0,41	0,33	0,30	0,31	0,18	0,20	-0,38	0,04	0,22	0,30	-0,09
Mensual	0,38	0,32	0,30	0,31	0,18	0,20	-0,41	0,01	0,27	0,33	-0,10
Estacional	0,33	0,27	0,30	0,31	0,23	0,24	-0,44	-0,08	0,28	0,34	-0,16

Tabla B.68: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,41	0,32	0,37	0,37	0,29	0,26	-0,29	0,01	0,13	0,23	-0,14
5 días	0,51	0,42	0,44	0,43	0,33	0,32	-0,40	-0,01	0,21	0,34	-0,18
7 días	0,51	0,43	0,44	0,44	0,34	0,32	-0,42	-0,01	0,22	0,34	-0,19
10 días	0,51	0,42	0,46	0,45	0,34	0,32	-0,42	-0,03	0,24	0,36	-0,19
Mensual	0,48	0,40	0,45	0,45	0,35	0,33	-0,46	-0,04	0,29	0,40	-0,19
Estacional	0,41	0,37	0,41	0,41	0,35	0,35	-0,47	-0,12	0,31	0,43	-0,24

FWI calculado con valores promedios diarios y temperatura máxima

Tabla B.69: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Todos	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,32	0,25	0,23	0,23	0,16	0,16	-0,24	0,02	0,07	0,14	-0,10
5 días	0,39	0,32	0,27	0,27	0,18	0,21	-0,33	0,00	0,15	0,23	-0,13
7 días	0,40	0,32	0,27	0,27	0,19	0,21	-0,35	0,00	0,15	0,24	-0,13
10 días	0,39	0,32	0,28	0,27	0,19	0,22	-0,35	-0,02	0,17	0,26	-0,13
Mensual	0,36	0,32	0,27	0,27	0,19	0,23	-0,38	-0,03	0,21	0,29	-0,14
Estacional	0,32	0,30	0,26	0,26	0,21	0,27	-0,40	-0,11	0,24	0,31	-0,18

Tabla B.70: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Valparaíso - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Centro	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,26	0,20	0,16	0,16	0,09	0,11	-0,20	0,07	0,07	0,11	-0,05
5 días	0,33	0,27	0,19	0,20	0,11	0,15	-0,30	0,08	0,13	0,19	-0,08
7 días	0,33	0,27	0,20	0,20	0,11	0,15	-0,31	0,07	0,14	0,20	-0,08
10 días	0,32	0,27	0,20	0,20	0,11	0,15	-0,31	0,05	0,15	0,21	-0,08
Mensual	0,29	0,26	0,19	0,20	0,11	0,16	-0,33	0,02	0,18	0,22	-0,09
Estacional	0,26	0,24	0,20	0,21	0,15	0,20	-0,35	-0,07	0,20	0,22	-0,14

Tabla B.71: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, O'higgins - Biobío, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Centro-sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,32	0,24	0,25	0,26	0,16	0,14	-0,25	0,07	0,12	0,18	-0,06
5 días	0,42	0,33	0,30	0,31	0,18	0,18	-0,36	0,06	0,19	0,28	-0,09
7 días	0,42	0,33	0,30	0,31	0,19	0,19	-0,38	0,06	0,20	0,29	-0,09
10 días	0,41	0,33	0,31	0,32	0,19	0,19	-0,38	0,04	0,22	0,30	-0,09
Mensual	0,38	0,32	0,31	0,32	0,19	0,19	-0,41	0,01	0,27	0,33	-0,10
Estacional	0,34	0,29	0,30	0,32	0,24	0,23	-0,44	-0,08	0,28	0,34	-0,16

Tabla B.72: Correlaciones ocurrencia de incendios acumulada, Ñuble - Los Lagos, todo el año. FWI modificado (valores promedios diarios más temperatura máxima).

Sur	FWI	ISI	BUI	DMC	DC	FFMC	HR	V	T	Tx	PP
Diaria	0,32	0,24	0,25	0,26	0,16	0,14	-0,25	0,07	0,12	0,18	-0,06
5 días	0,42	0,33	0,30	0,31	0,18	0,18	-0,36	0,06	0,19	0,28	-0,09
7 días	0,42	0,33	0,30	0,31	0,19	0,19	-0,38	0,06	0,20	0,29	-0,09
10 días	0,41	0,33	0,31	0,32	0,19	0,19	-0,38	0,04	0,22	0,30	-0,09
Mensual	0,38	0,32	0,31	0,32	0,19	0,19	-0,41	0,01	0,27	0,33	-0,10
Estacional	0,34	0,29	0,30	0,32	0,24	0,23	-0,44	-0,08	0,28	0,34	-0,16

Anexo C

Resultados por modelo CMIP6

En este anexo se presentan las mismas figuras mostradas en el Capítulo 4 para el ensamble de modelos, agregando la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios.

C.1. CanESM5

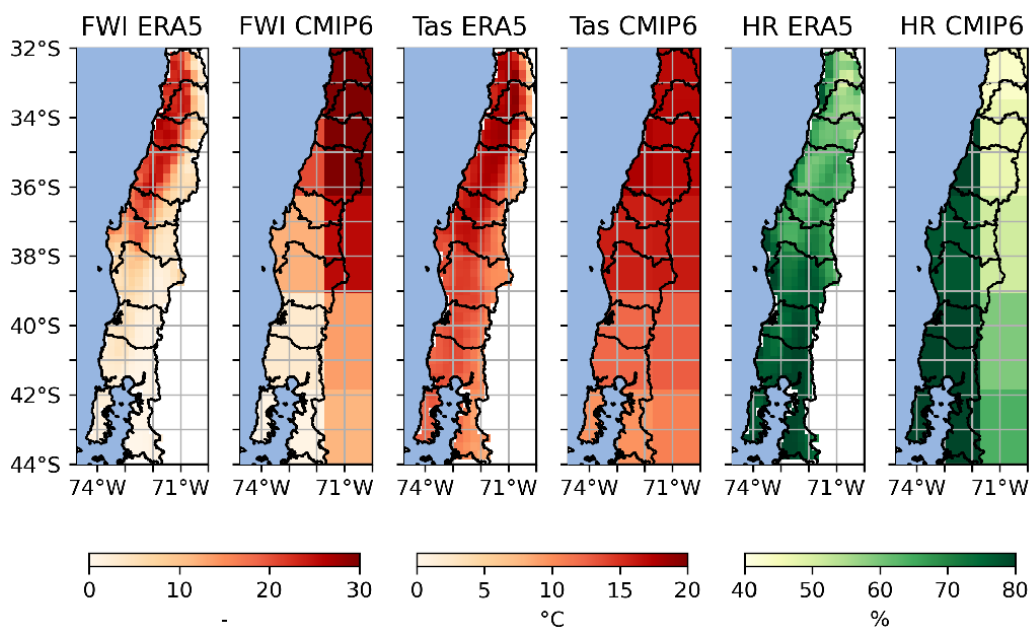


Figura C.1: Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo CanESM5.

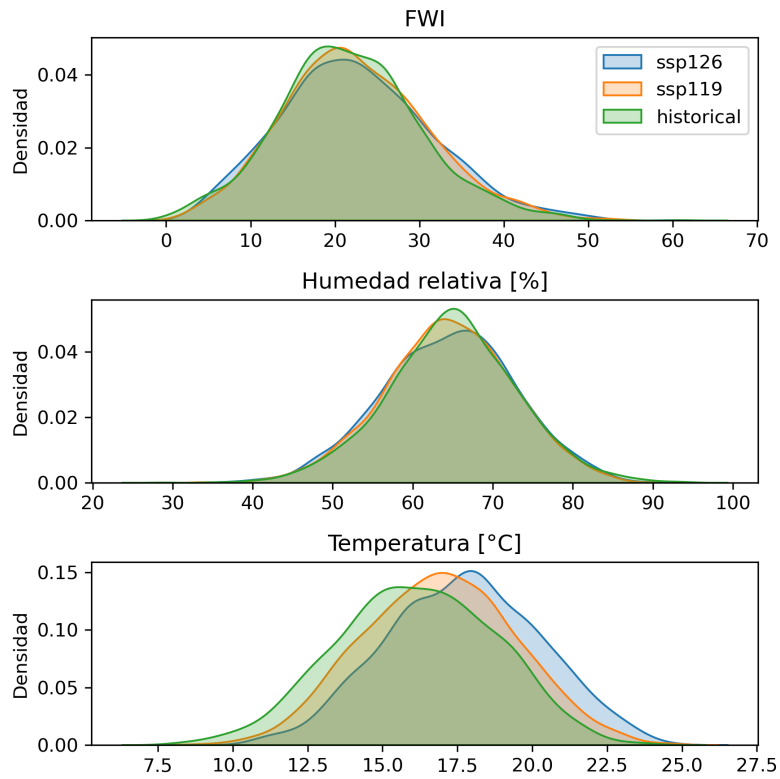


Figura C.2: Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo CanESM5.

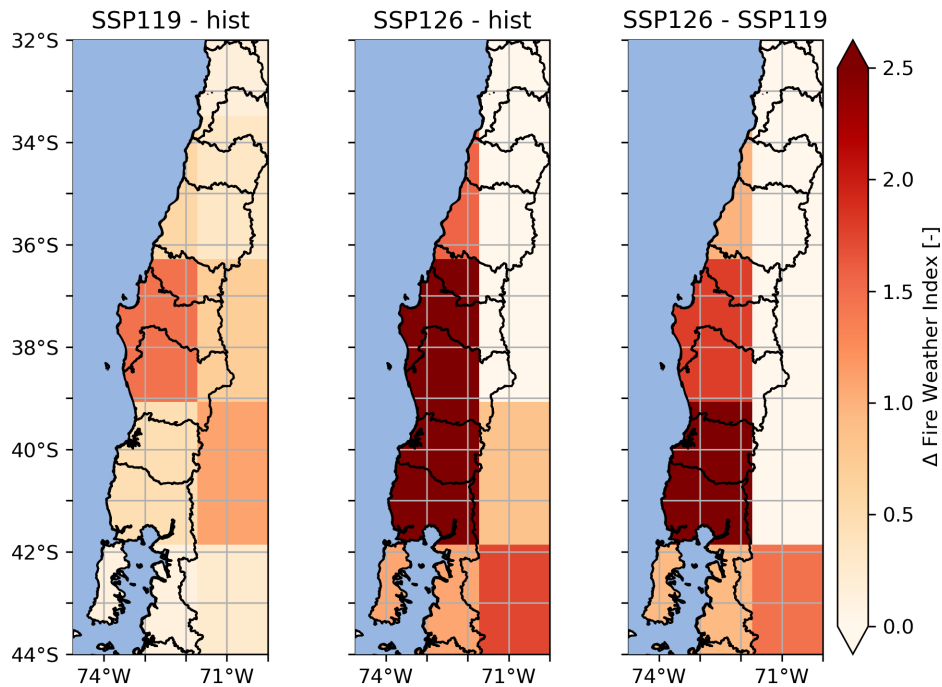


Figura C.3: Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CanESM5.

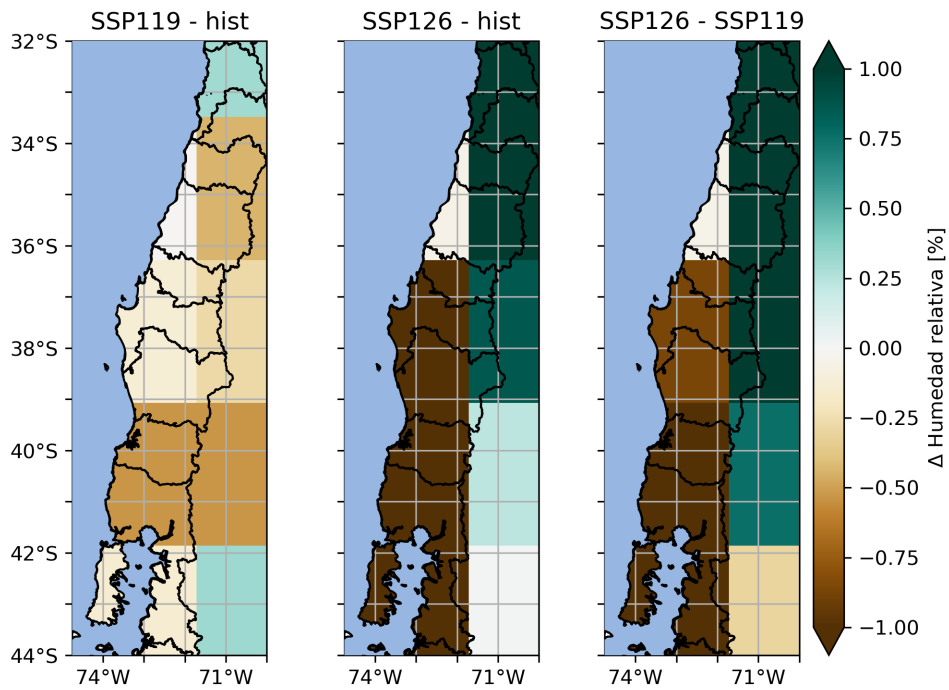


Figura C.4: Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CanESM5.

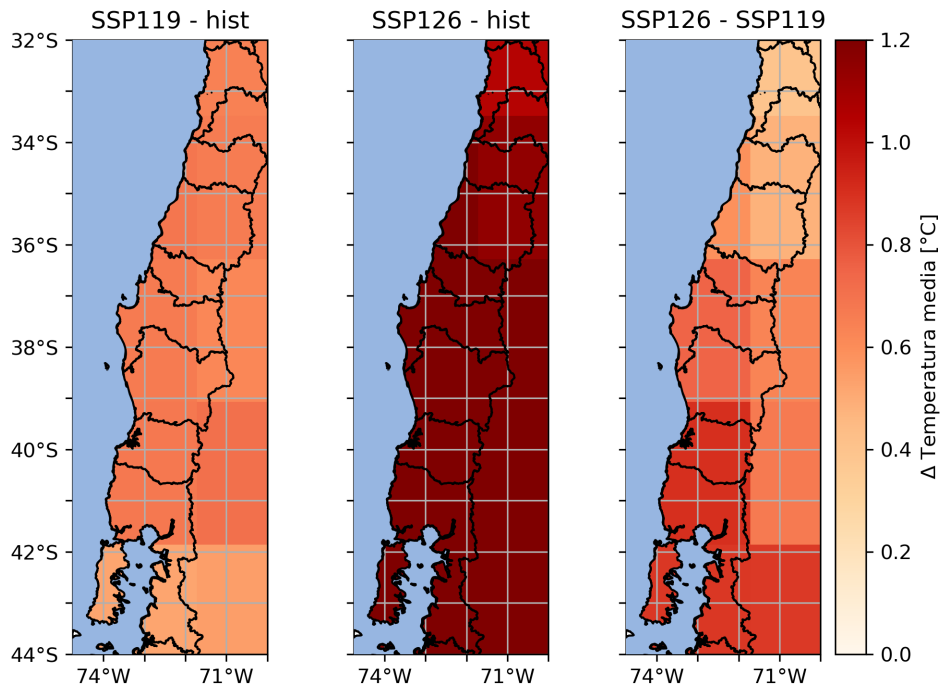


Figura C.5: Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CanESM5.

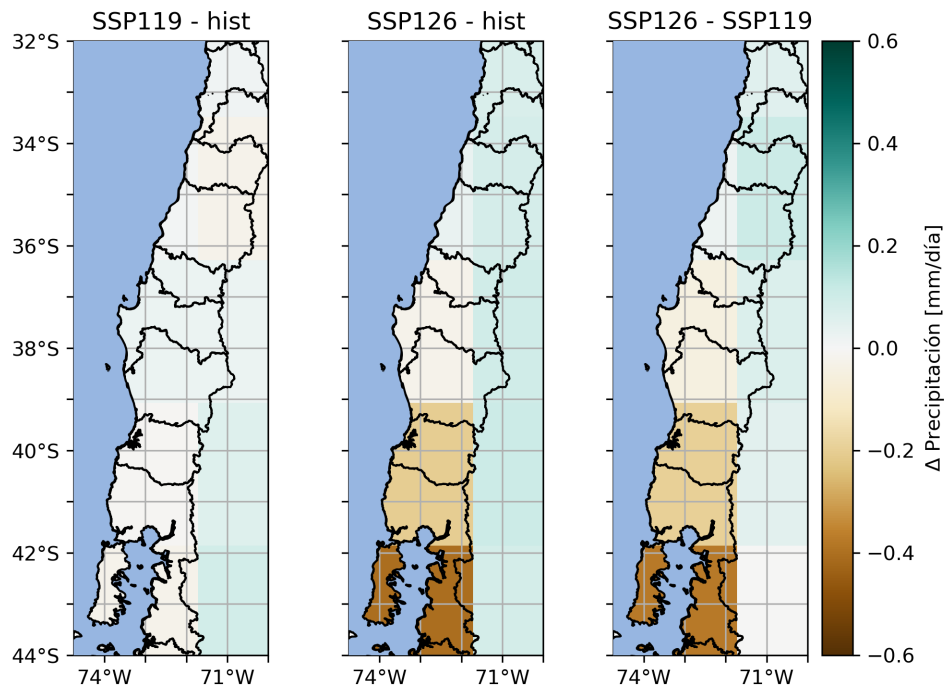


Figura C.6: Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CanESM5.

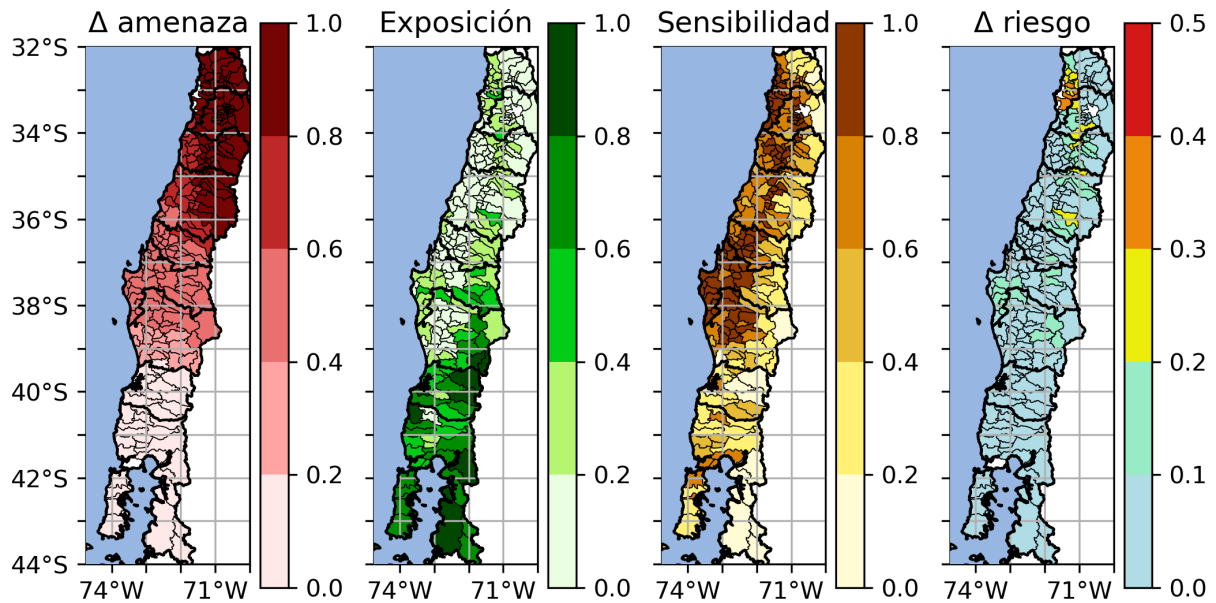


Figura C.7: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo CanESM5.

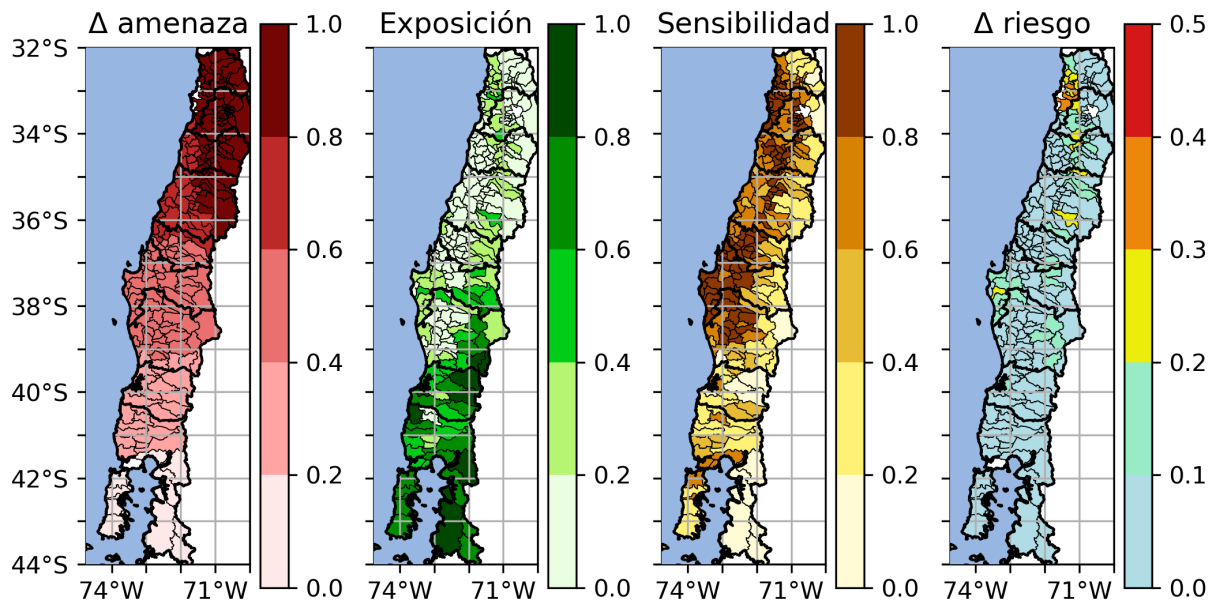


Figura C.8: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo CanESM5.

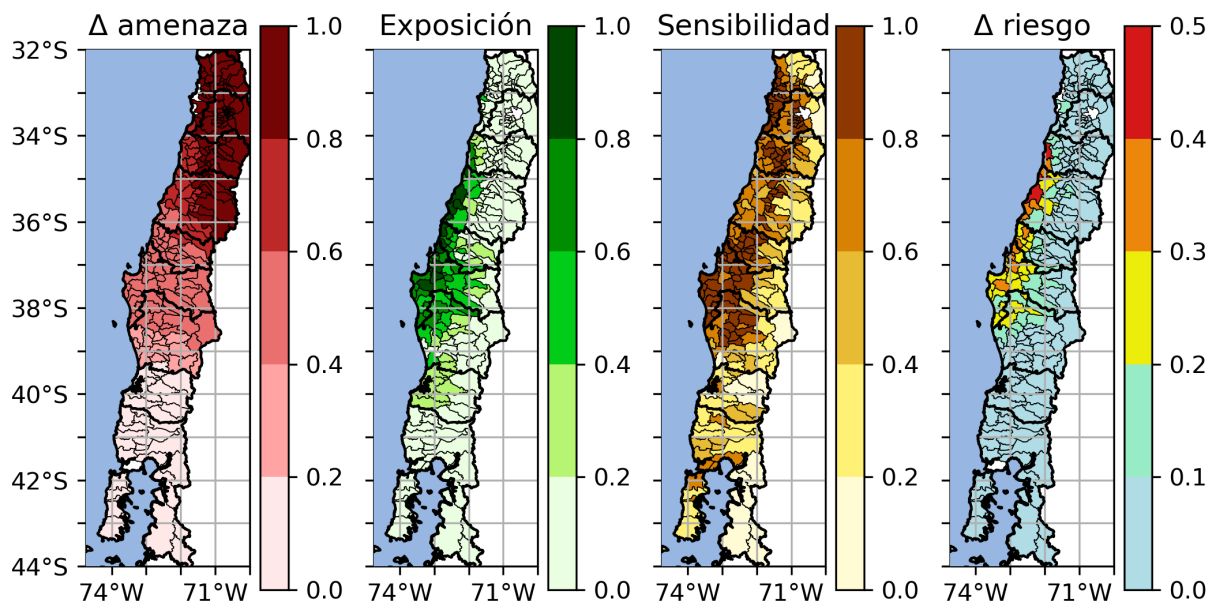


Figura C.9: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo CanESM5.

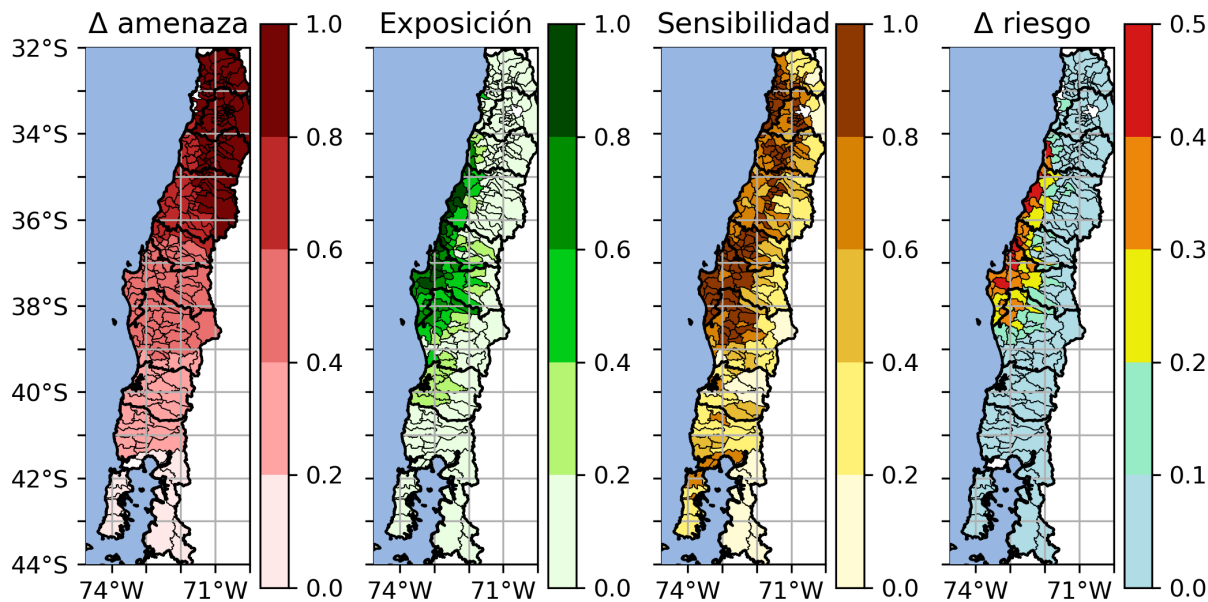


Figura C.10: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo CanESM5.

C.2. CNRM-ESM2-1

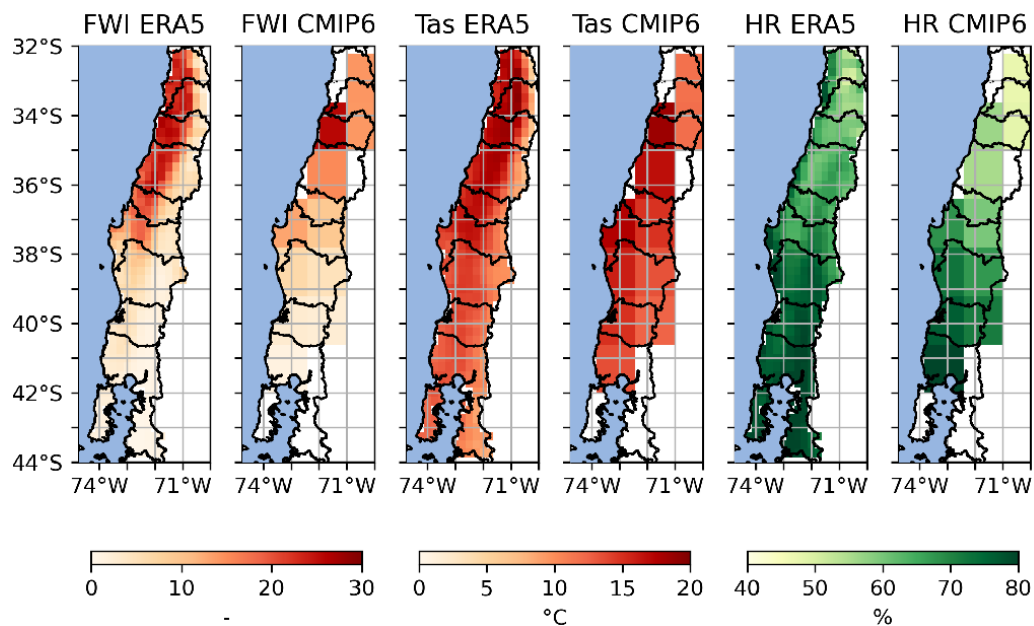


Figura C.11: Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo CNRM-ES2M-1.

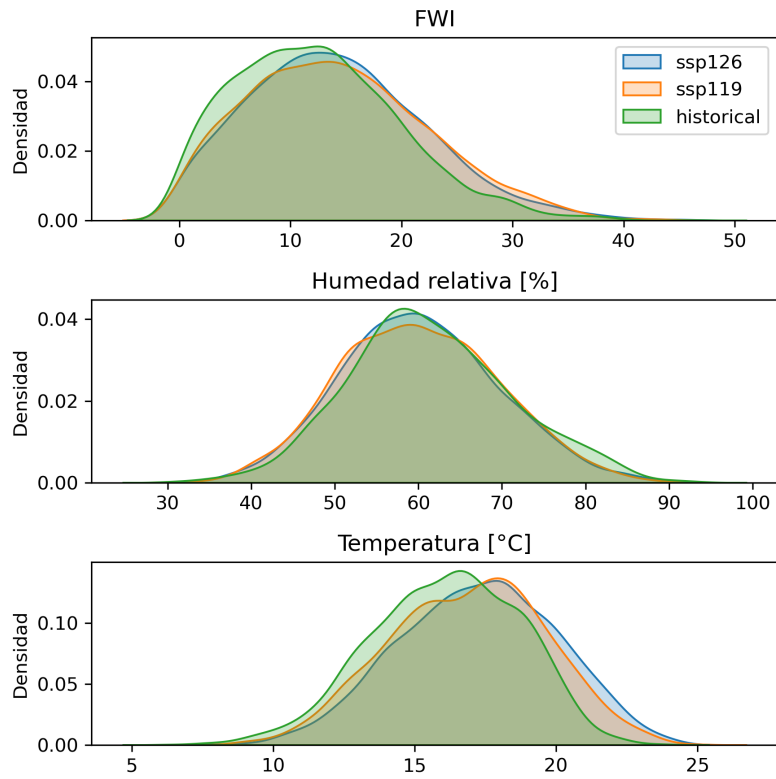


Figura C.12: Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo CNRM-ESM2-1.

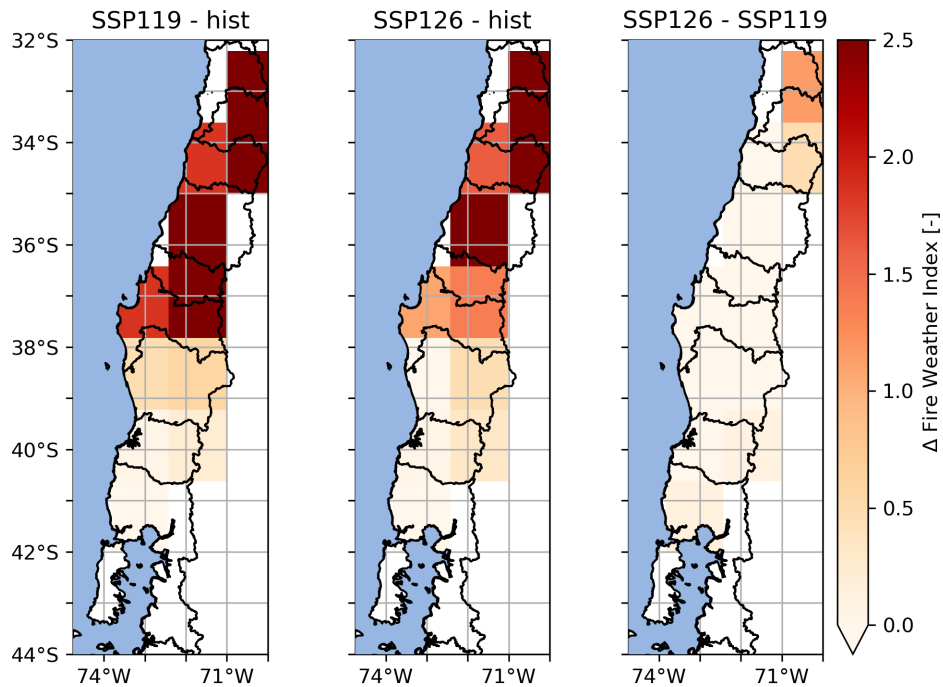


Figura C.13: Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CNRM-ESM2-1.

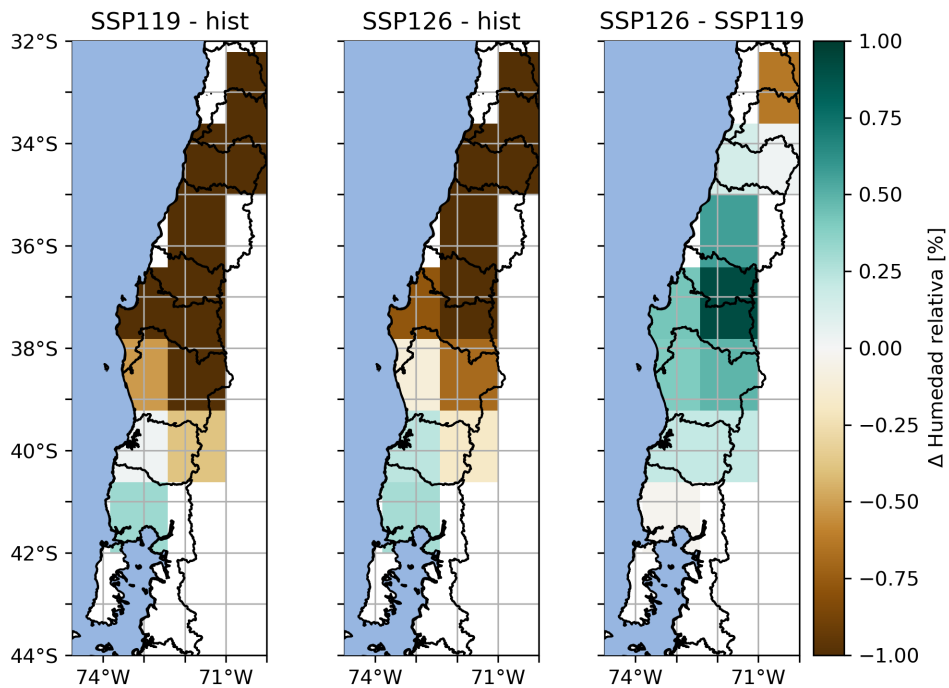


Figura C.14: Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CNRM-ESM2-1.

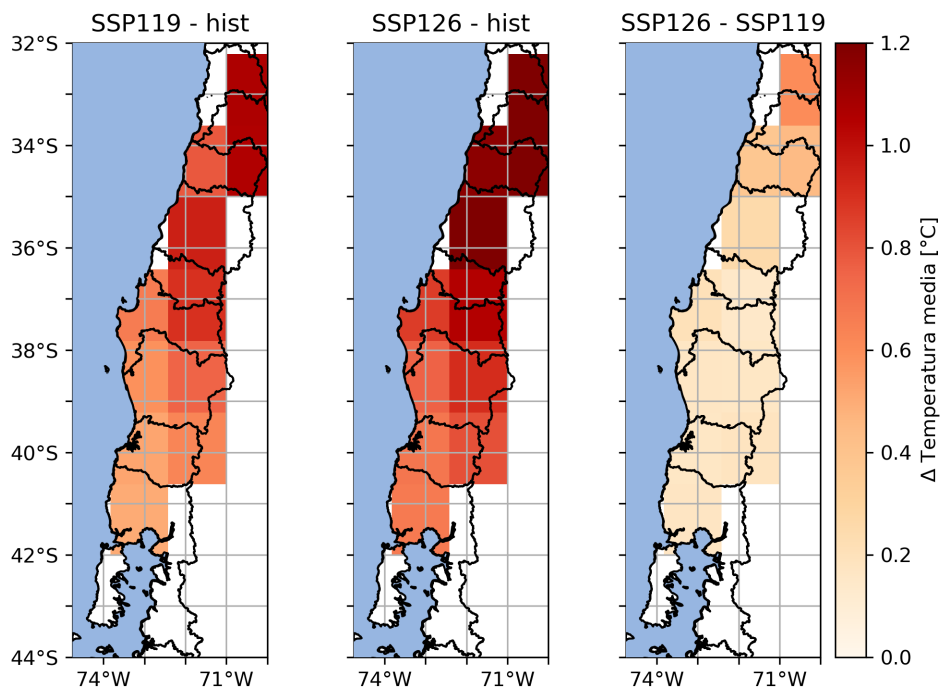


Figura C.15: Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CNRM-ESM2-1.

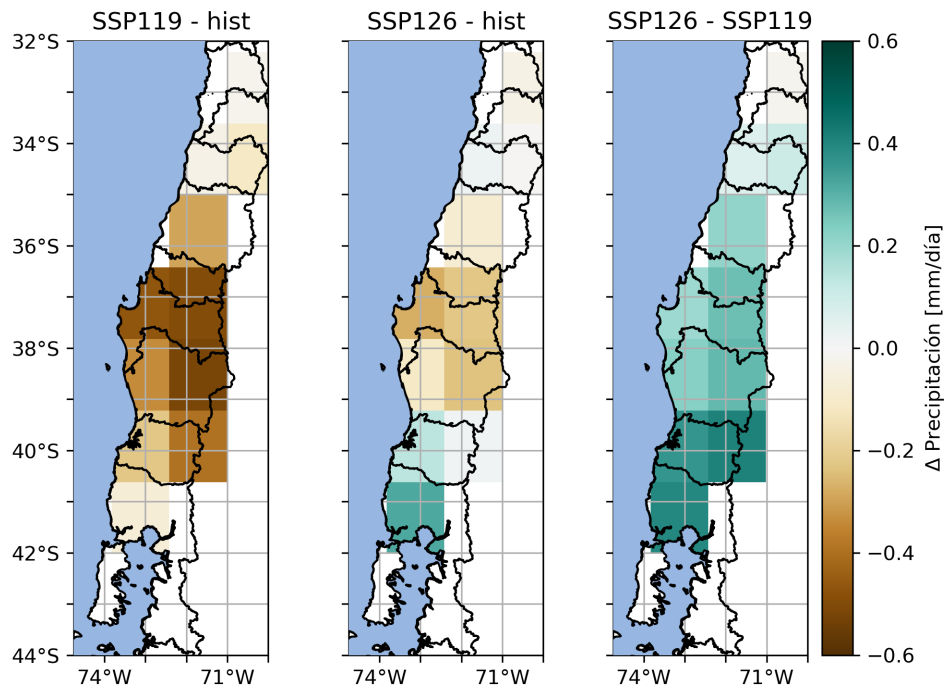


Figura C.16: Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo CNRM-ESM2-1.

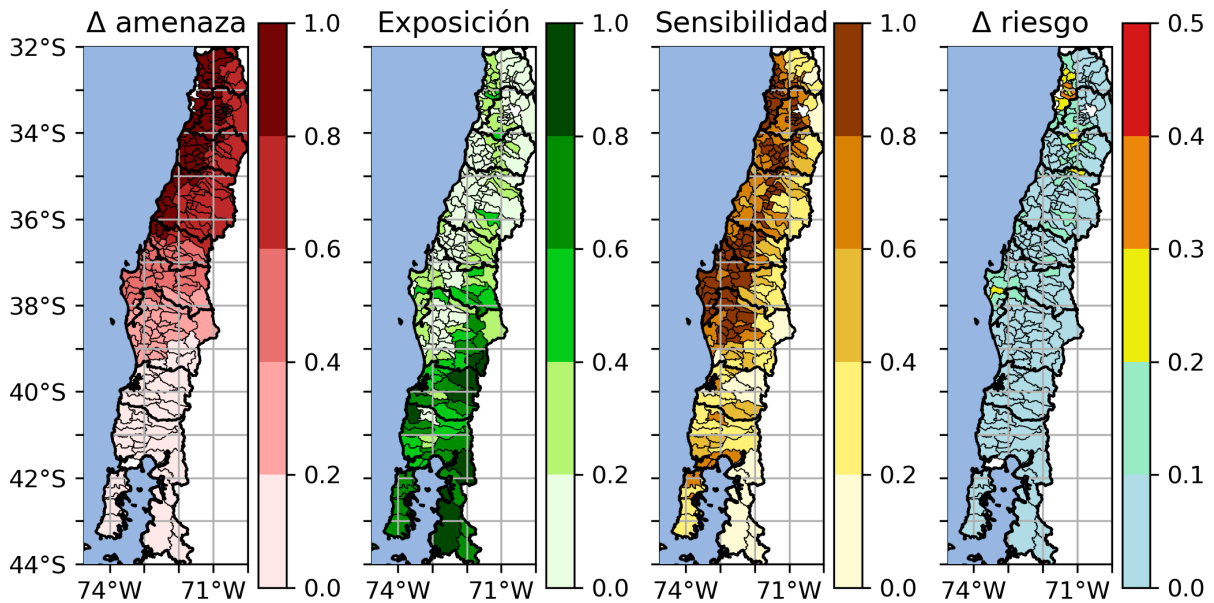


Figura C.17: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo CNRM-ESM2-1.

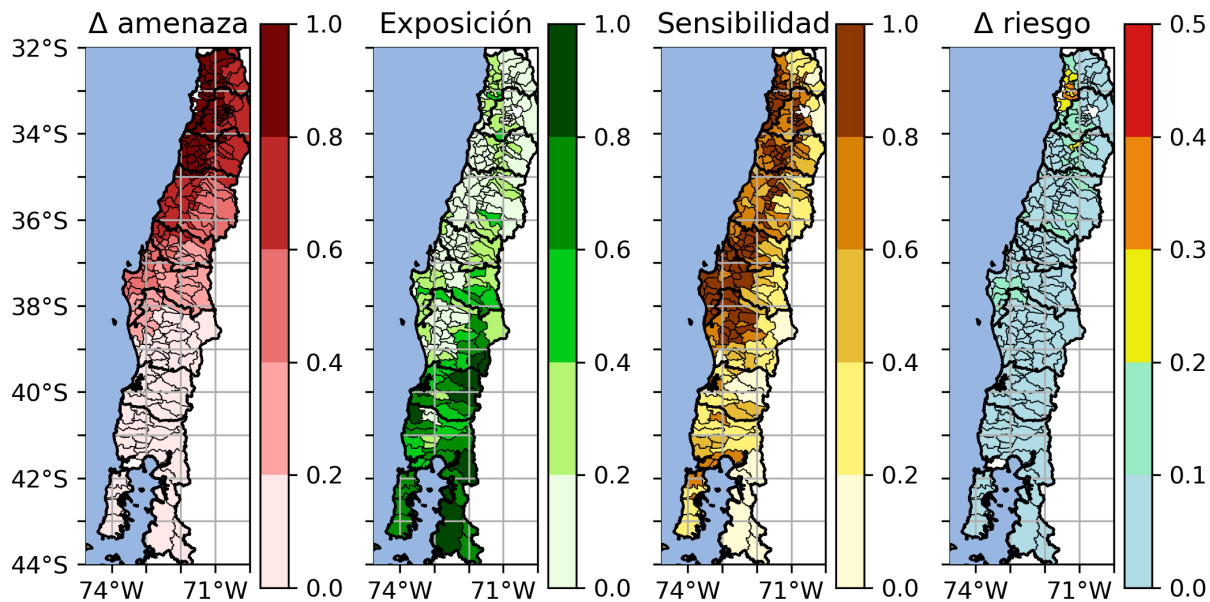


Figura C.18: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo CNRM-ESM2-1.

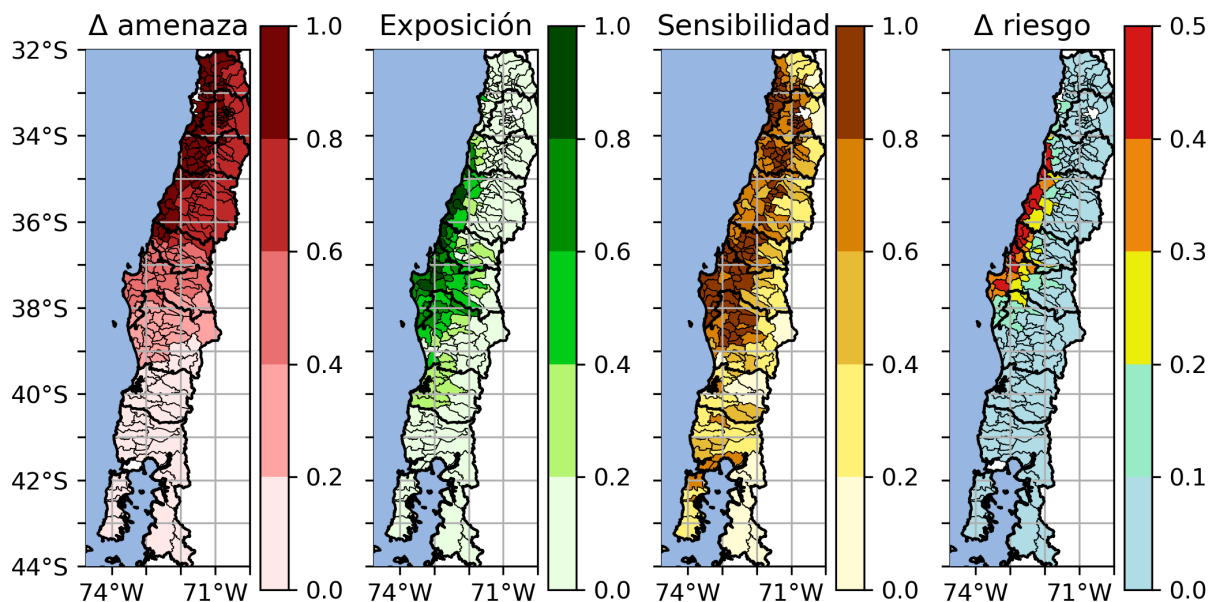


Figura C.19: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo CNRM-ESM2-1.

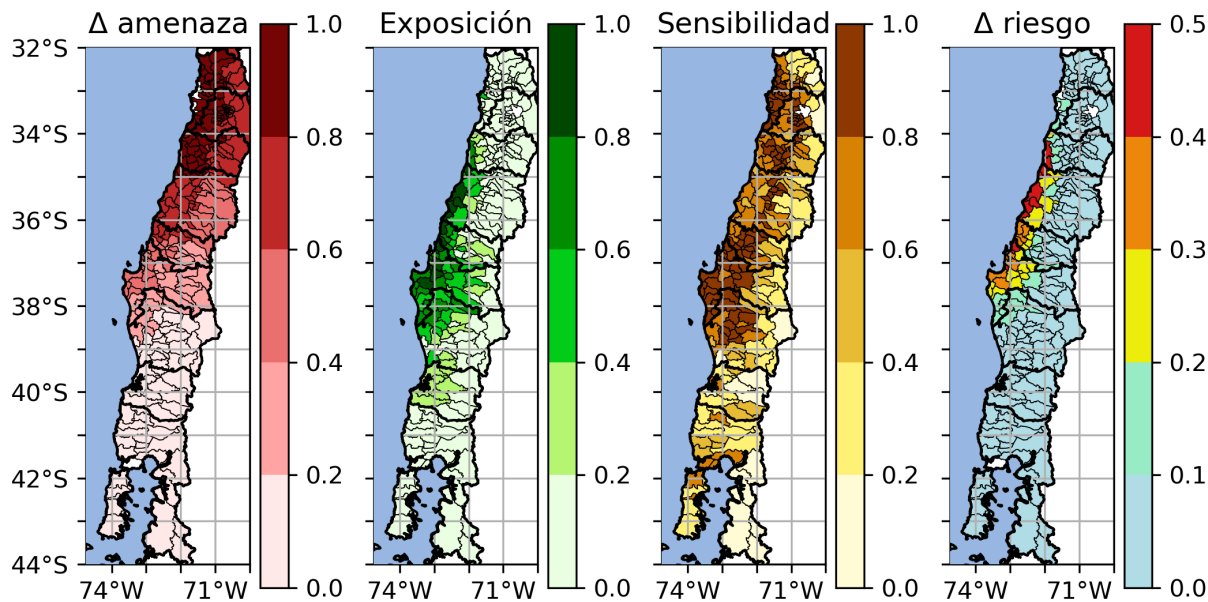


Figura C.20: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo CNRM-ESM2-1.

C.3. EC-Earth3

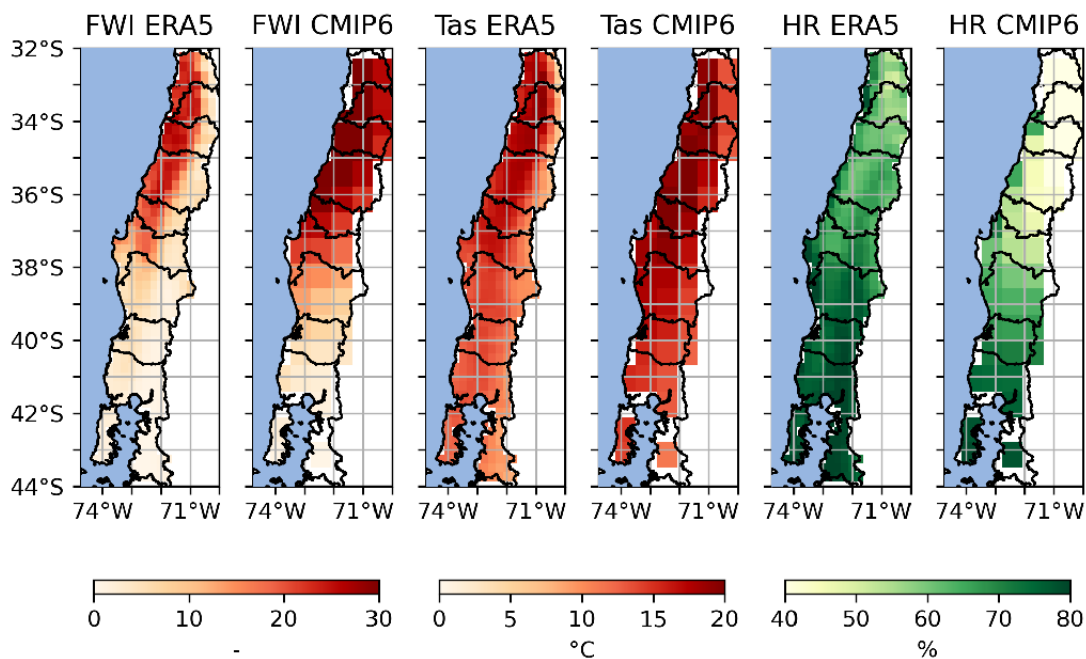


Figura C.21: Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo EC-Earth3.

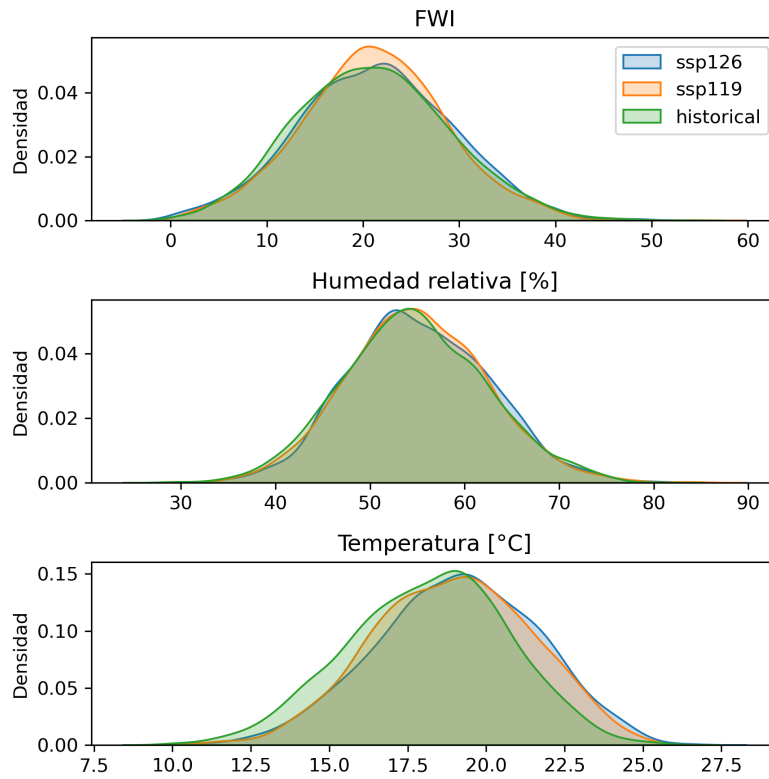


Figura C.22: Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo EC-Earth3.

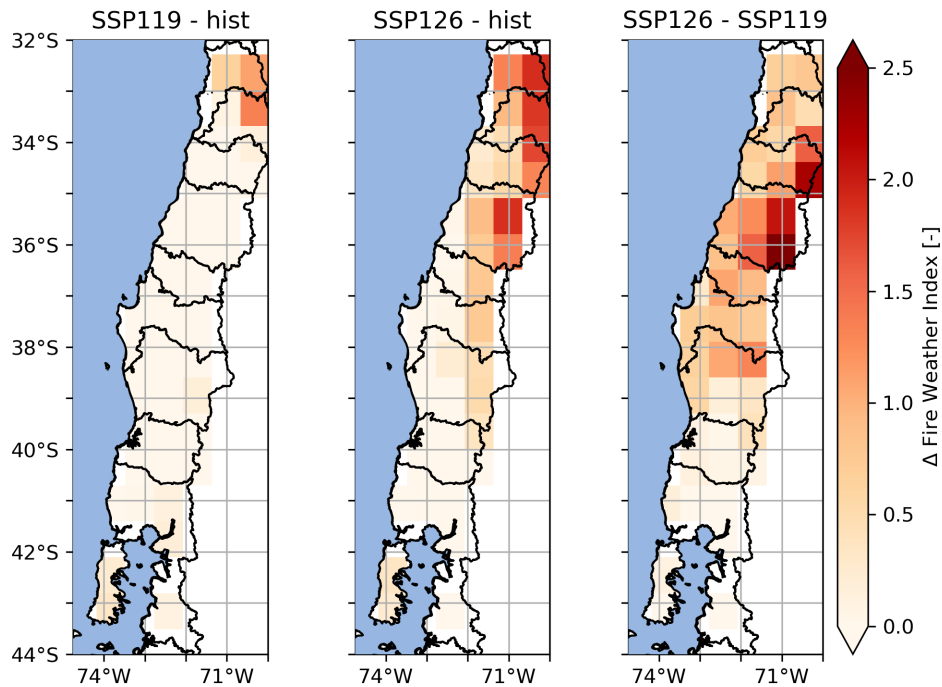


Figura C.23: Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3.

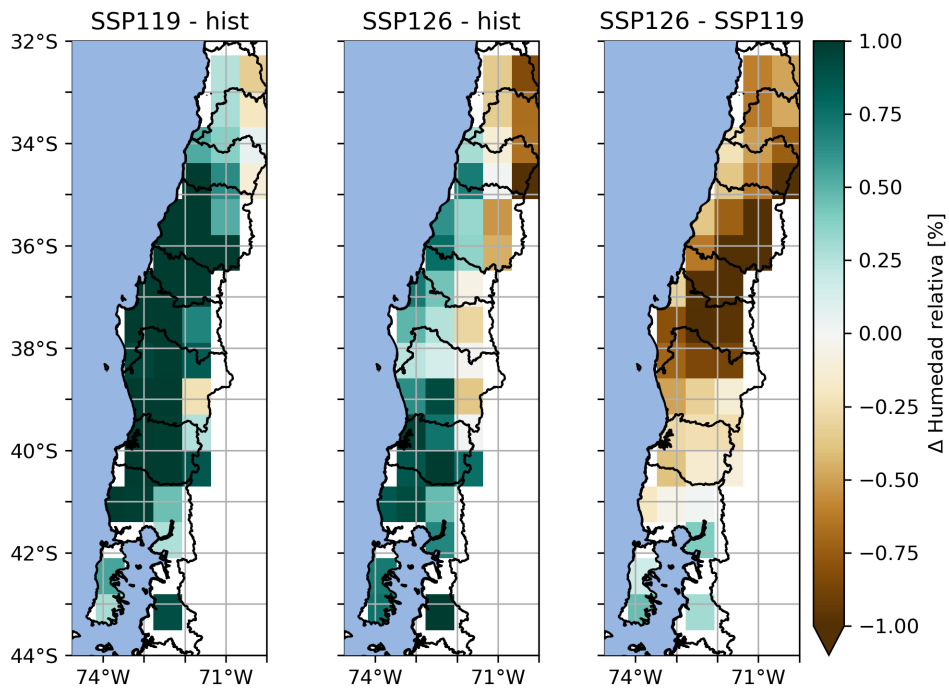


Figura C.24: Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3.

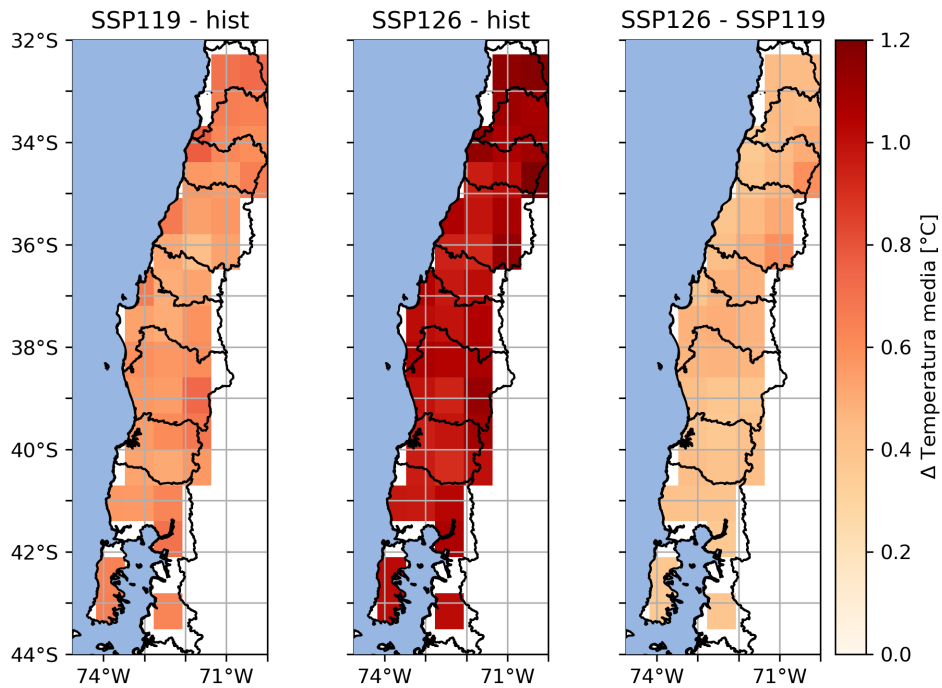


Figura C.25: Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3.

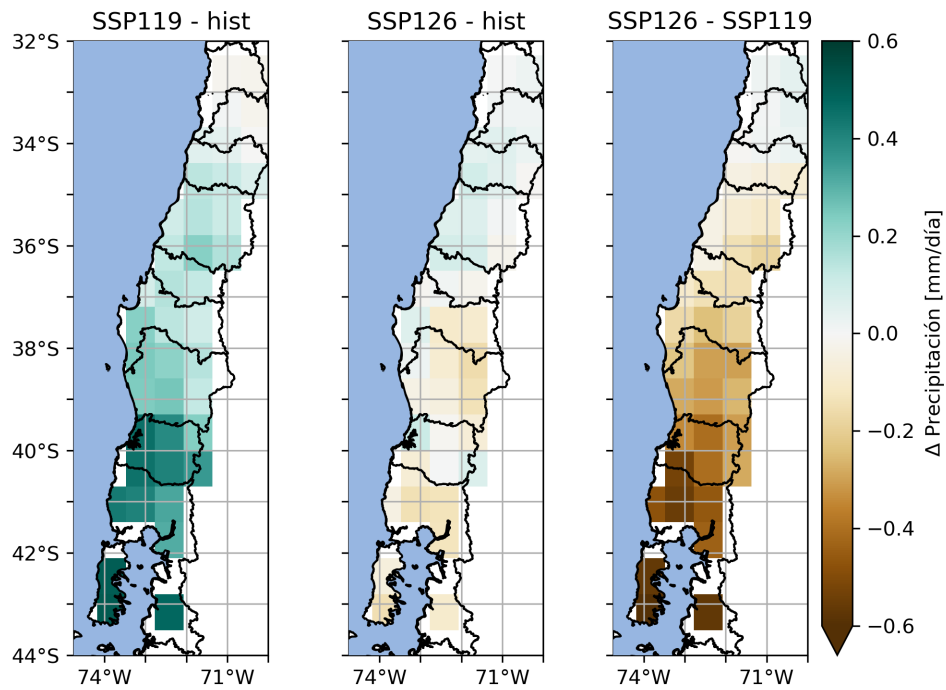


Figura C.26: Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3.

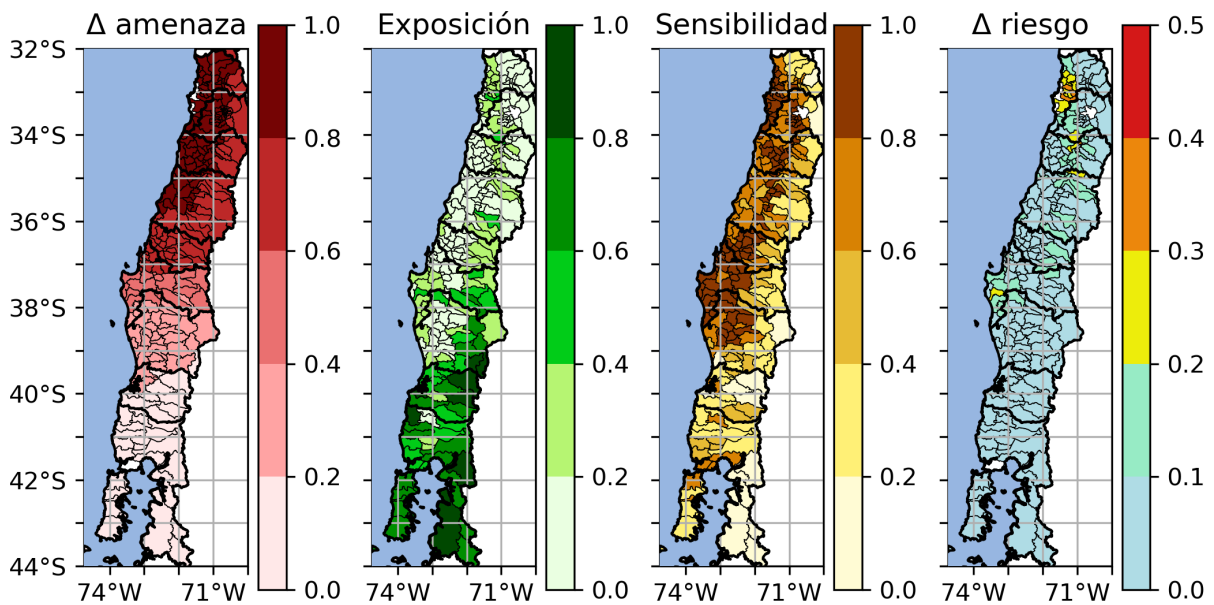


Figura C.27: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3.

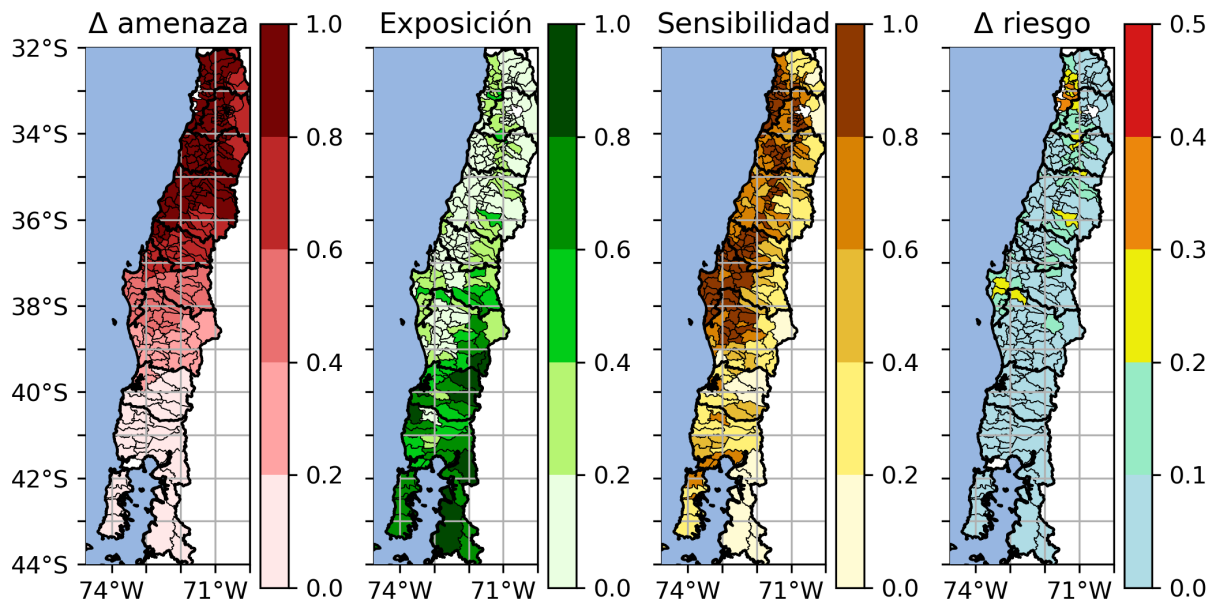


Figura C.28: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3.

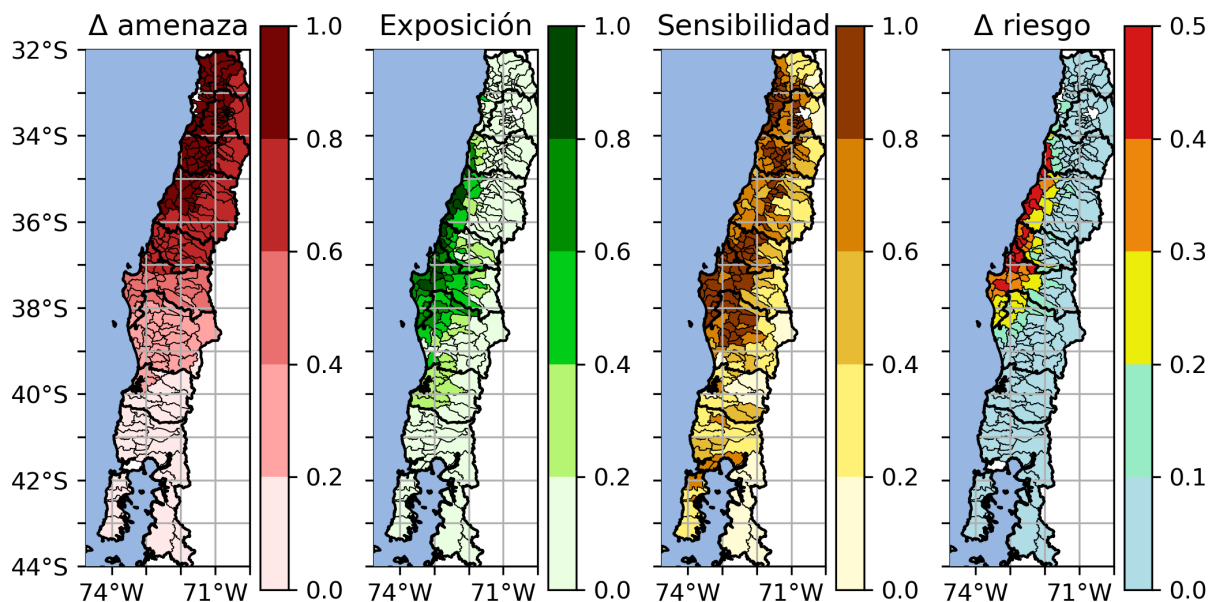


Figura C.29: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3.

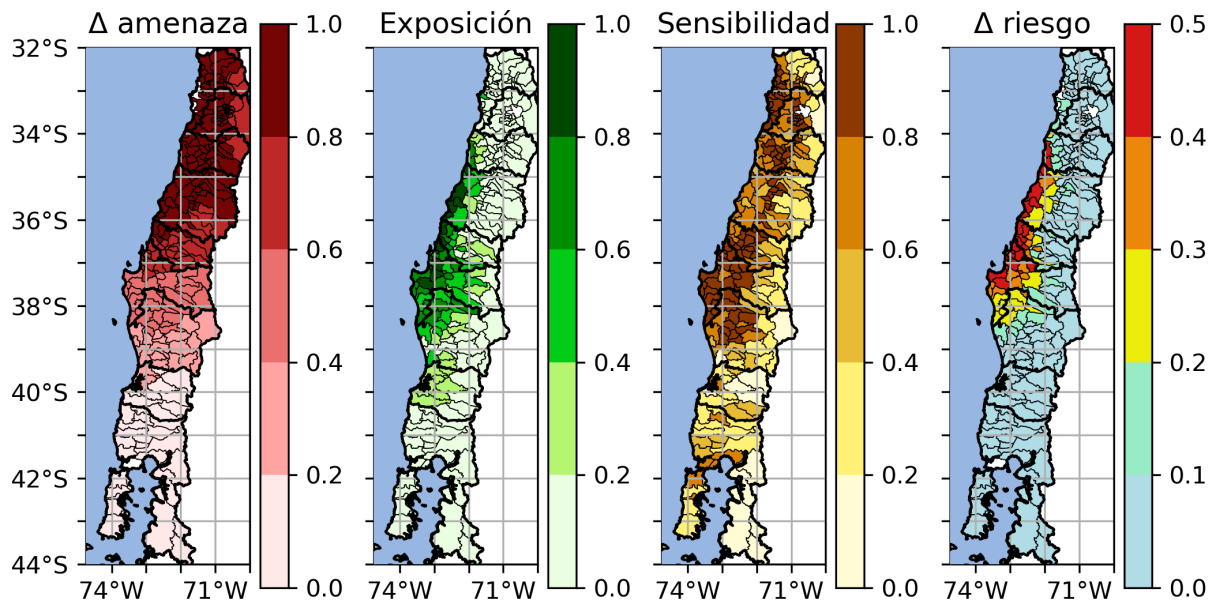


Figura C.30: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3.

C.4. EC-Earth3-Veg

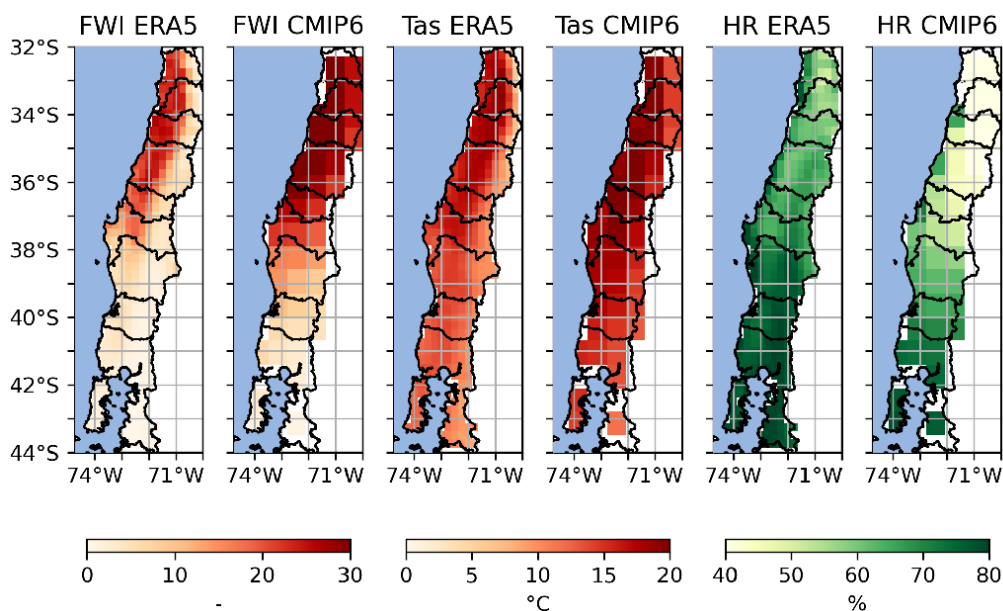


Figura C.31: Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo EC-Earth3-Veg.

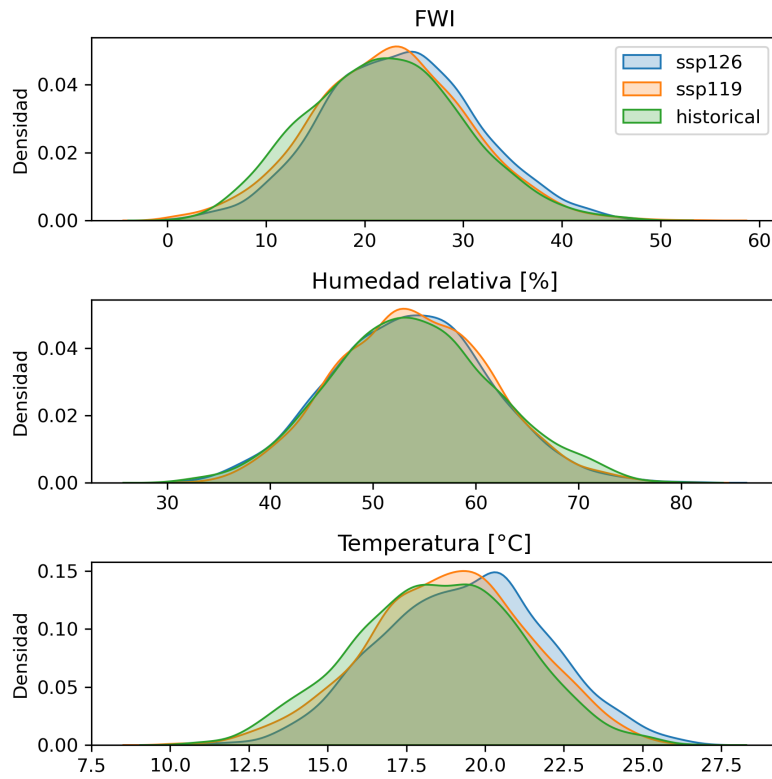


Figura C.32: Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo EC-Earth3-Veg.

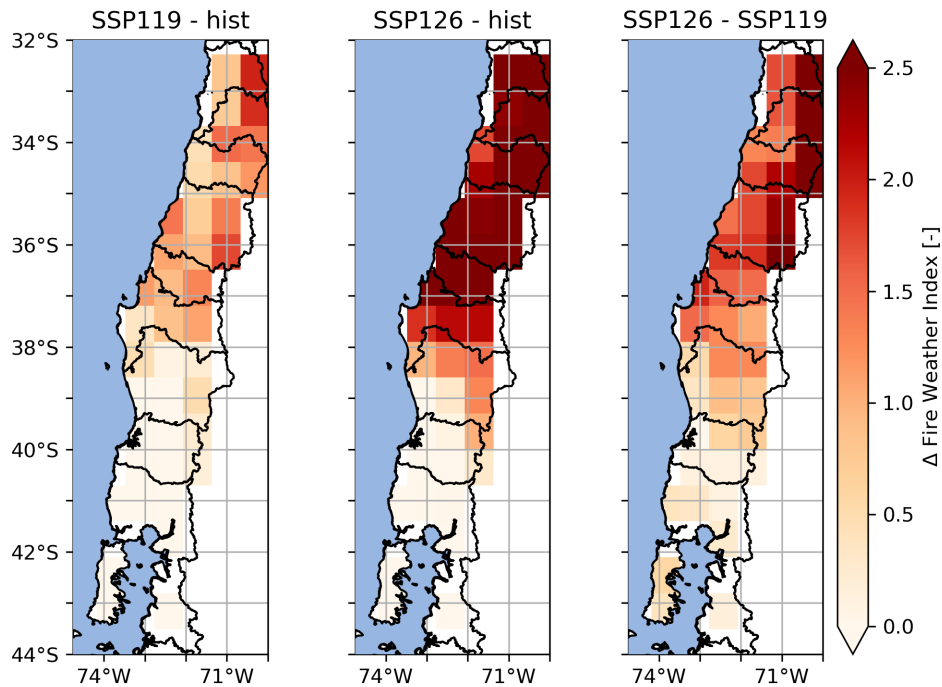


Figura C.33: Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg.

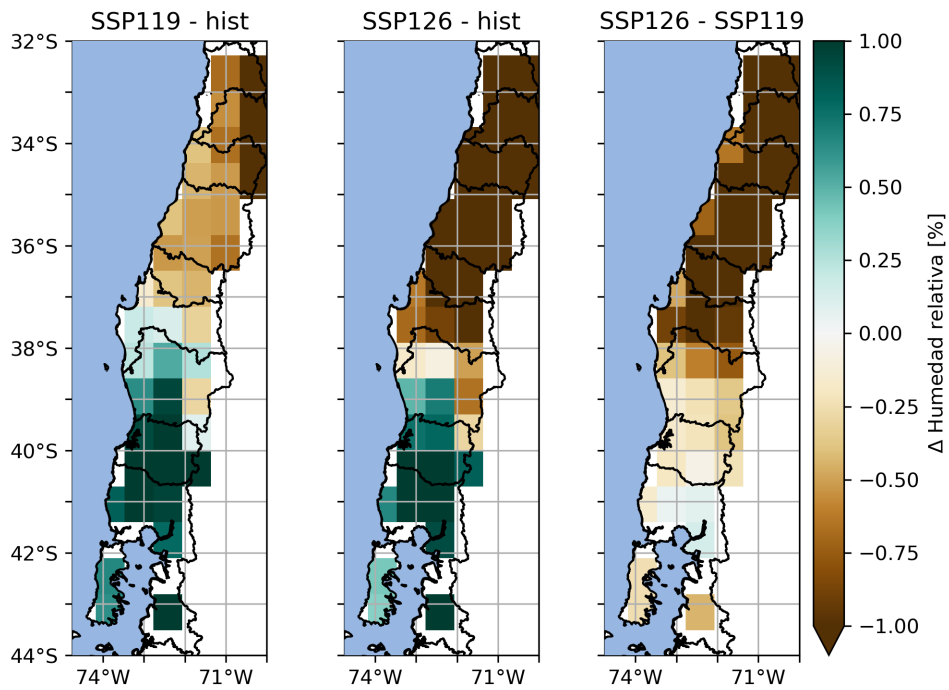


Figura C.34: Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg.

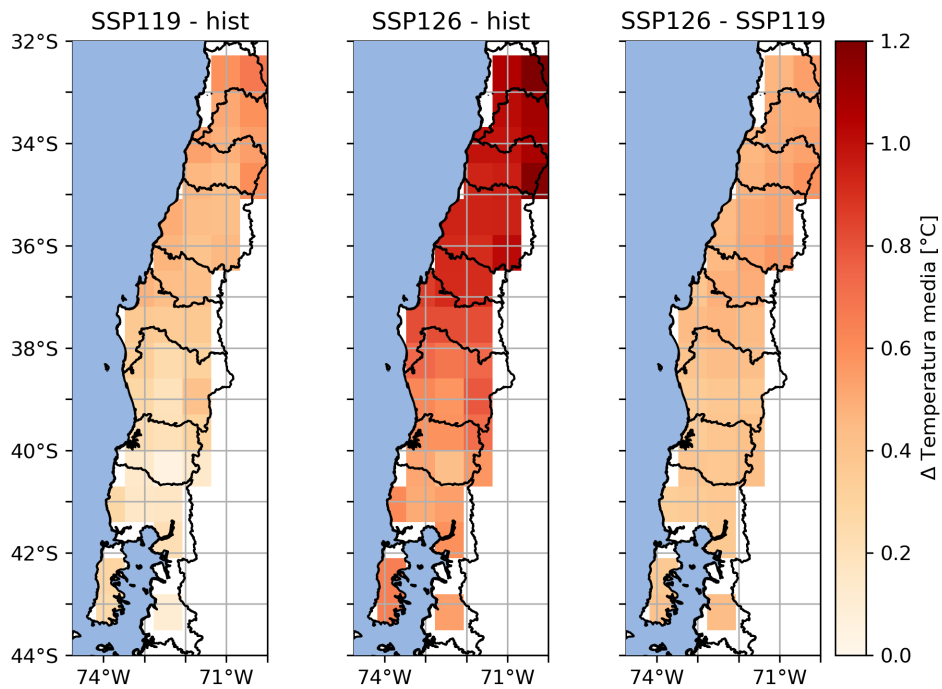


Figura C.35: Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg.

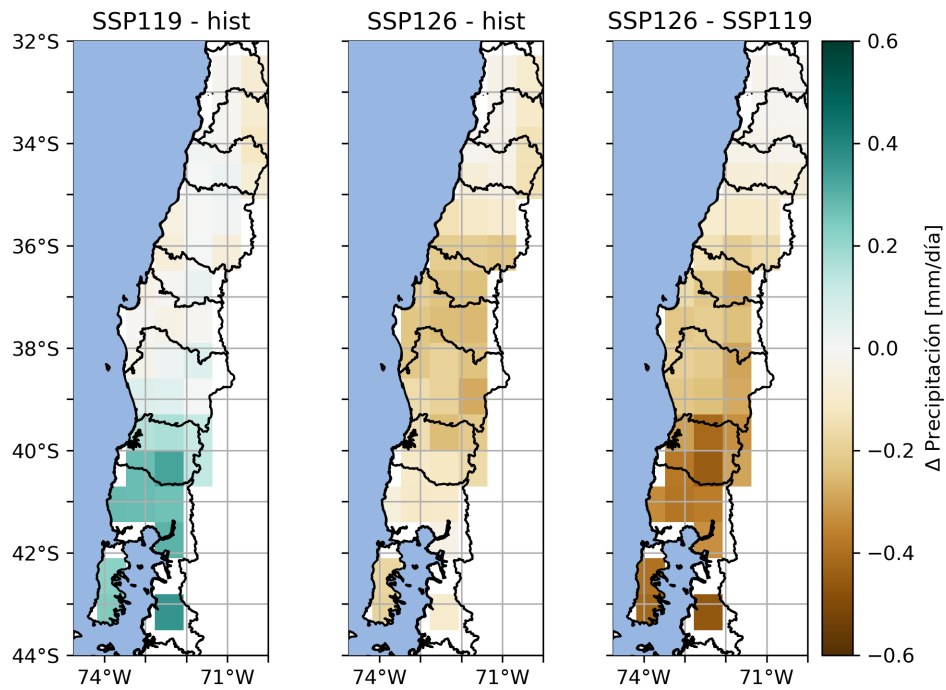


Figura C.36: Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg.

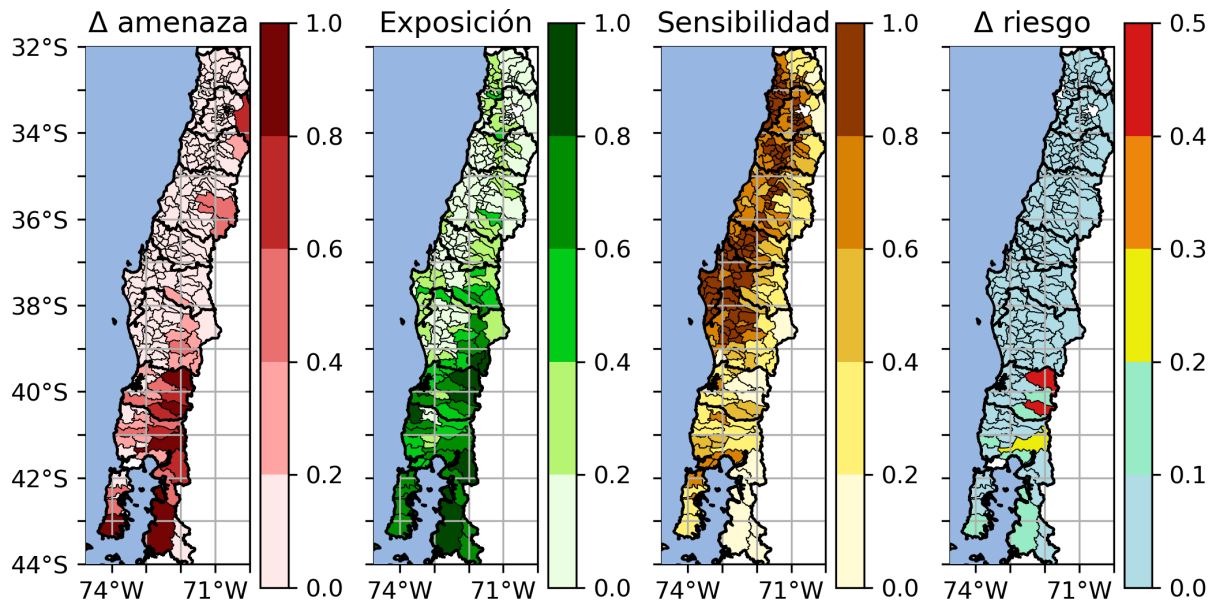


Figura C.37: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3-Veg.

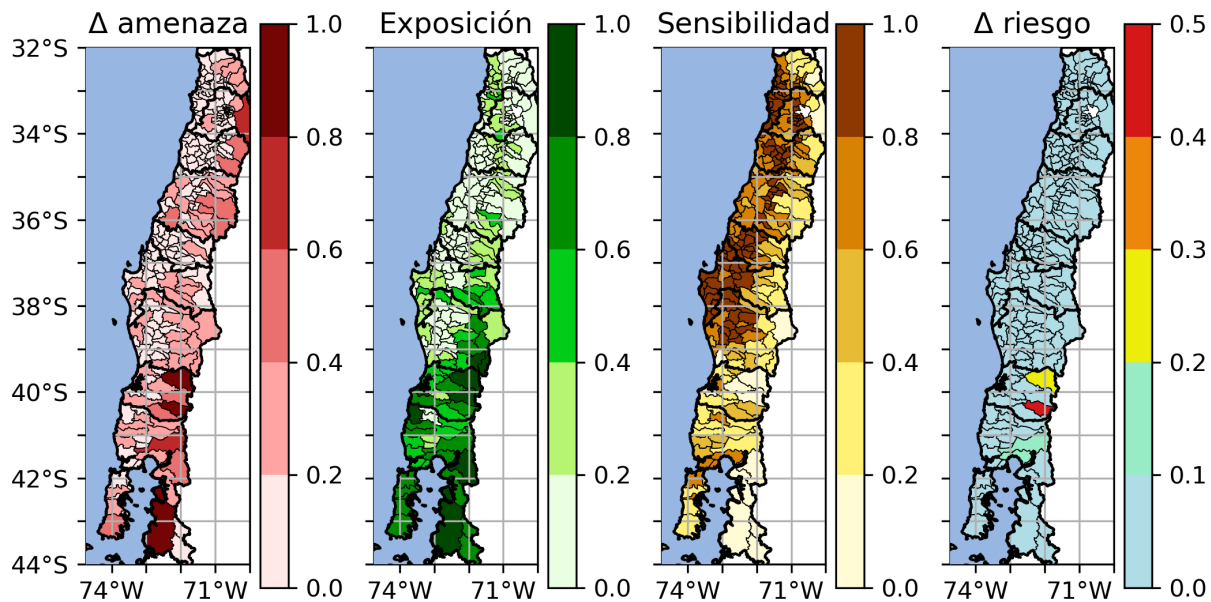


Figura C.38: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3-Veg.

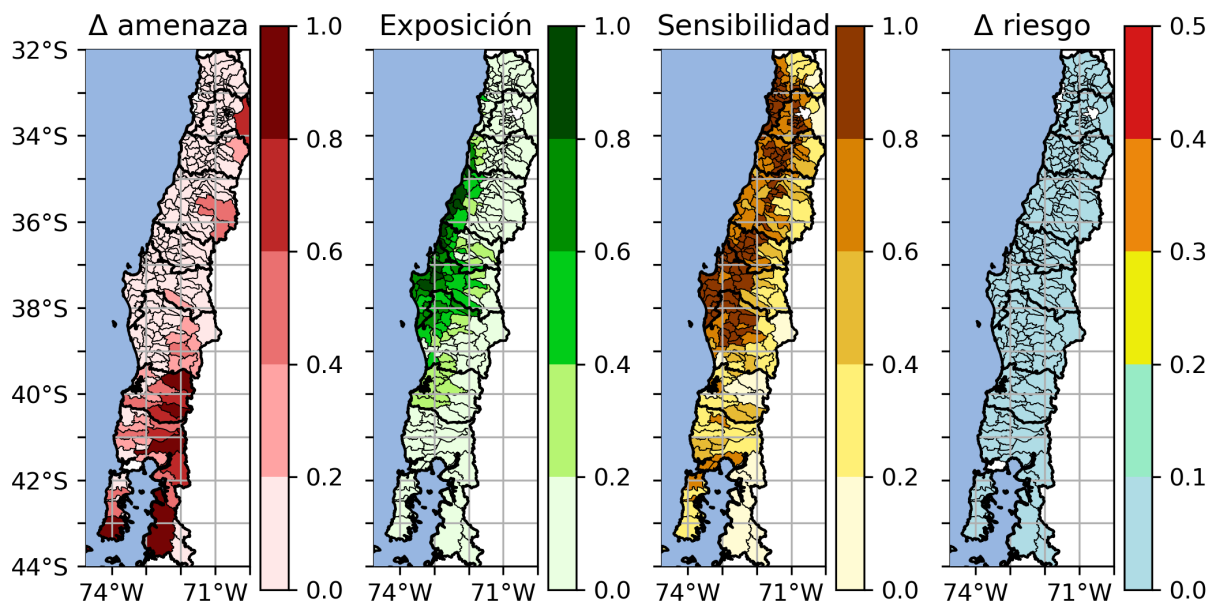


Figura C.39: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3-Veg.

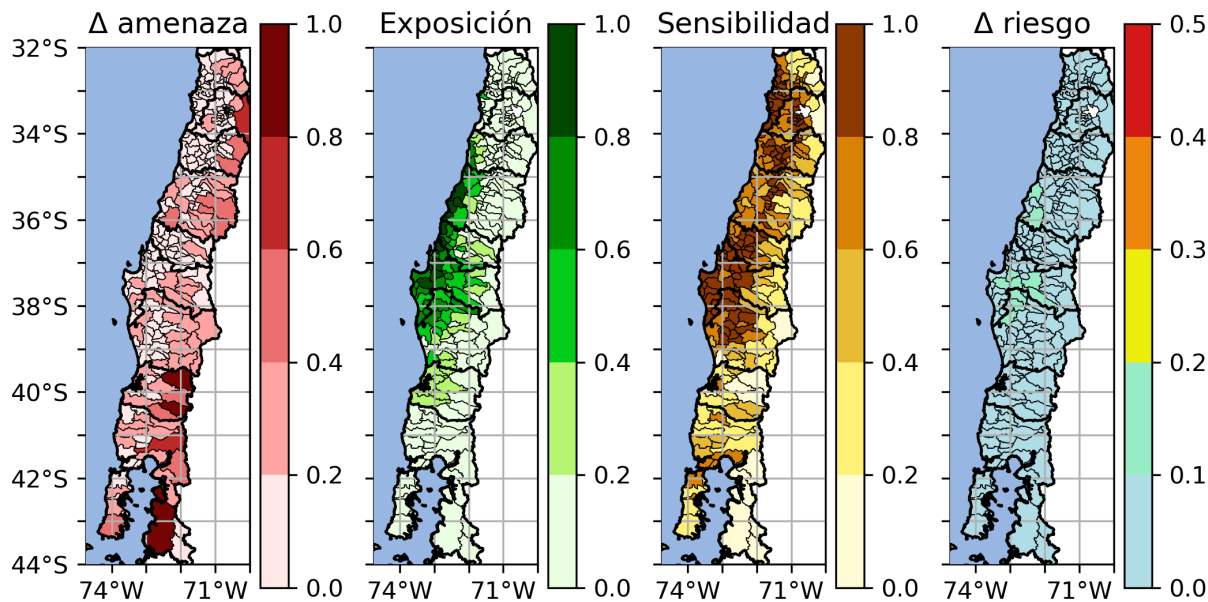


Figura C.40: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3-Veg.

C.5. EC-Earth3-Veg-LR

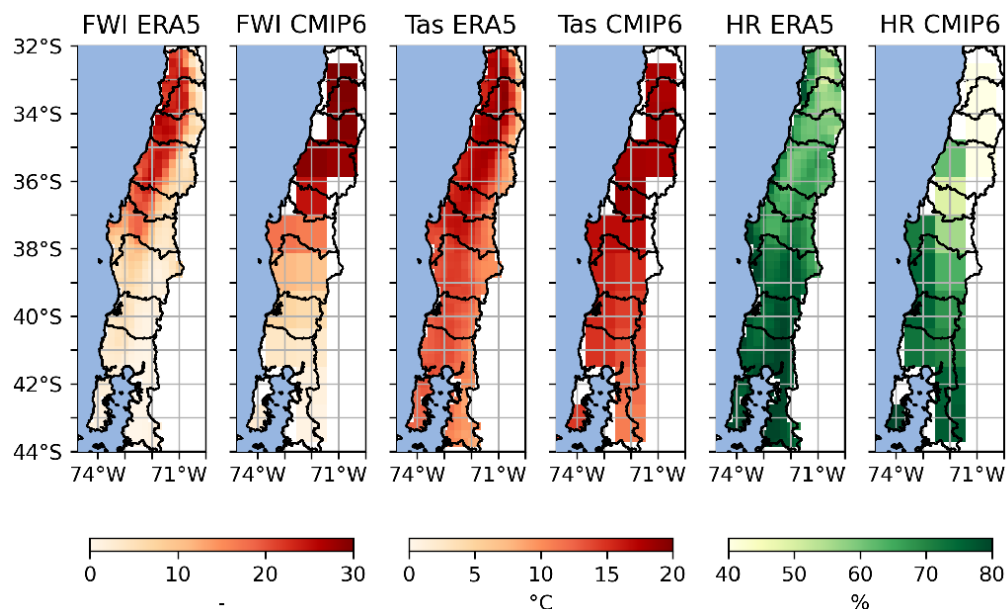


Figura C.41: Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

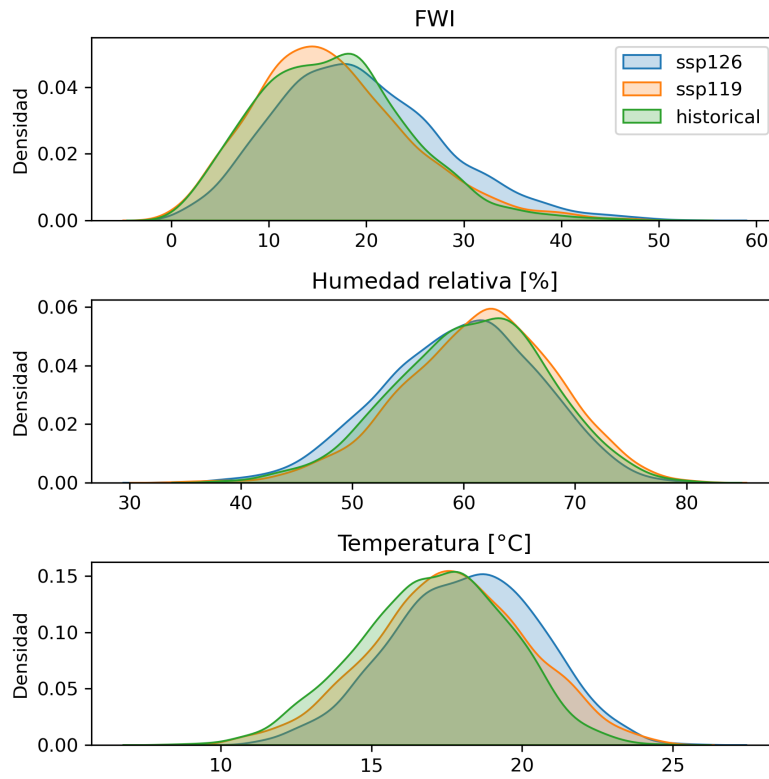


Figura C.42: Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

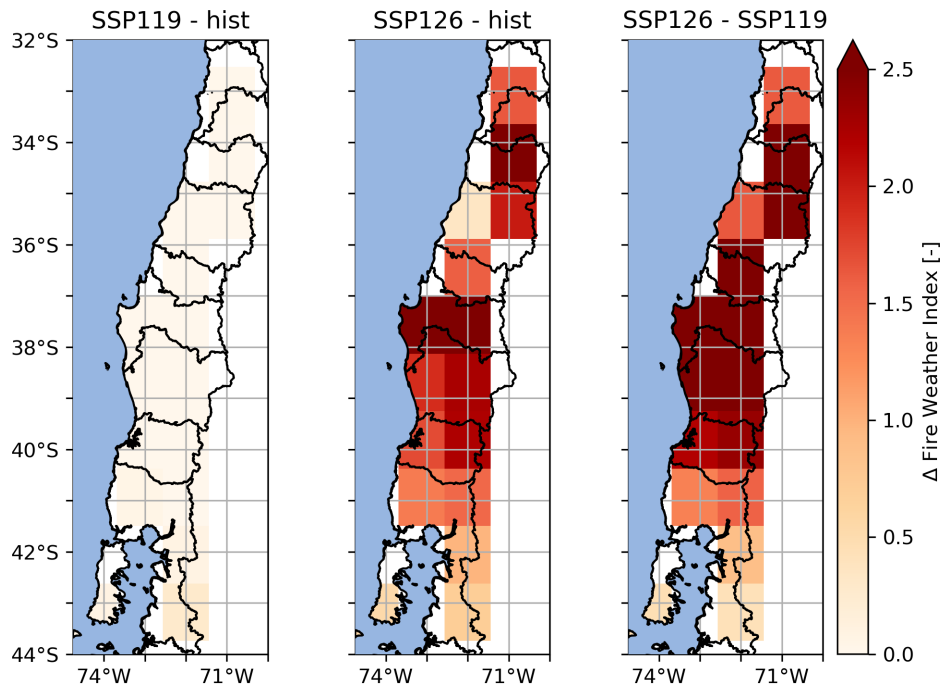


Figura C.43: Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

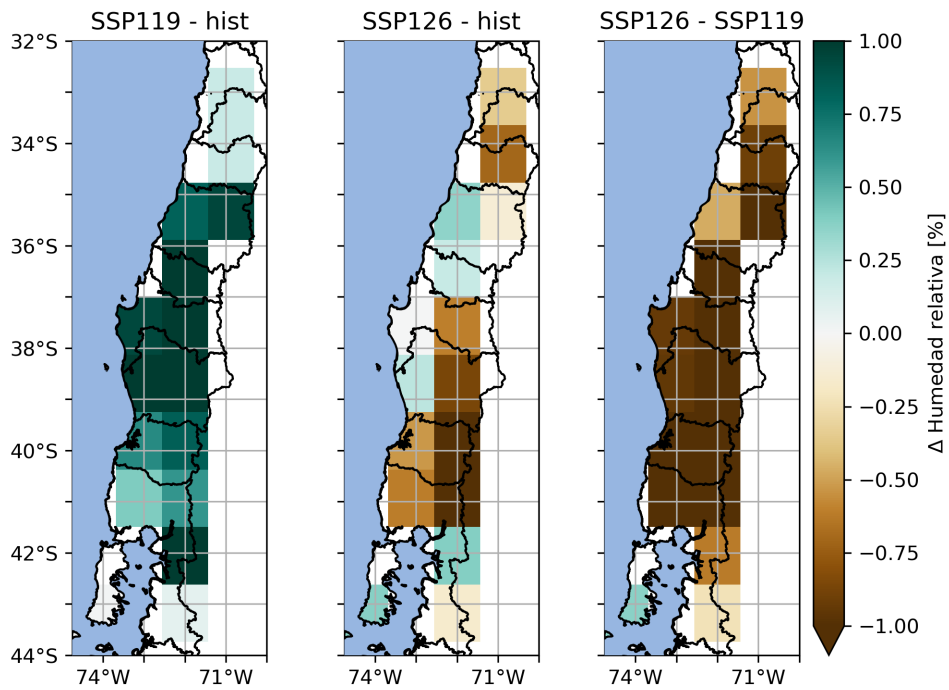


Figura C.44: Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

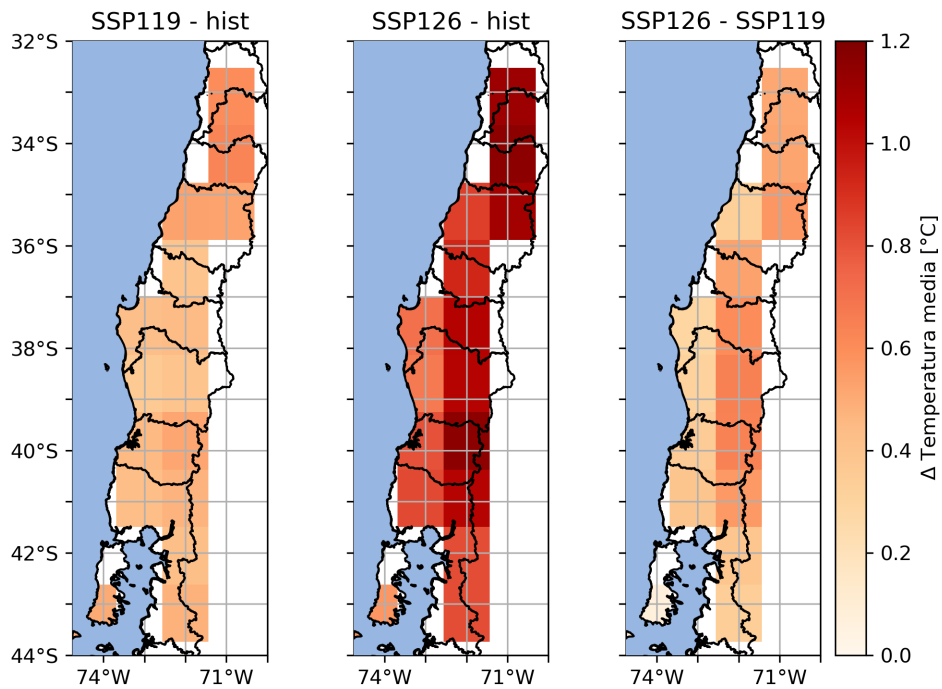


Figura C.45: Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

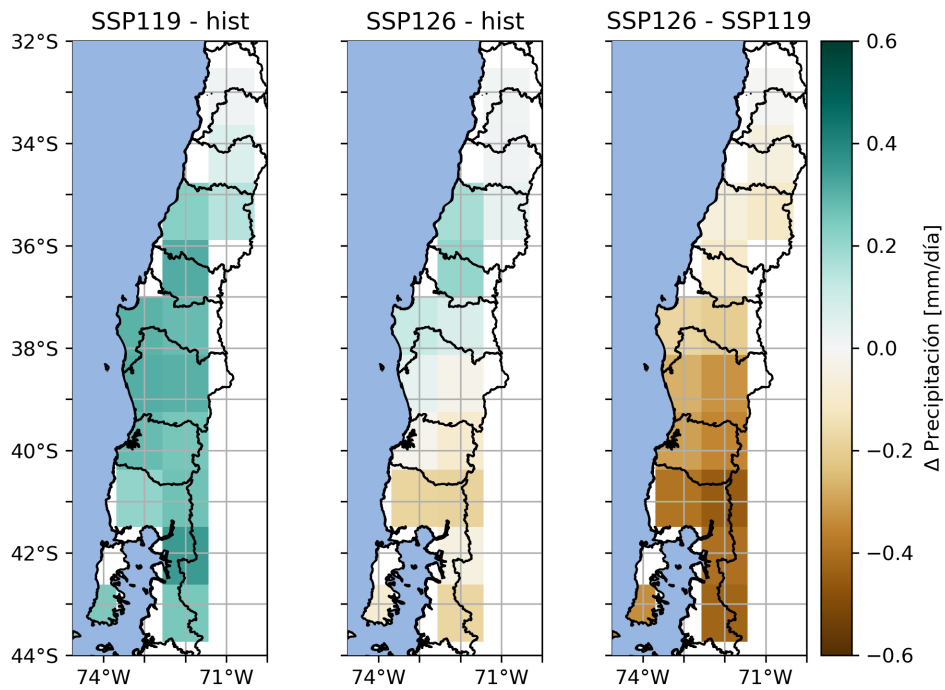


Figura C.46: Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

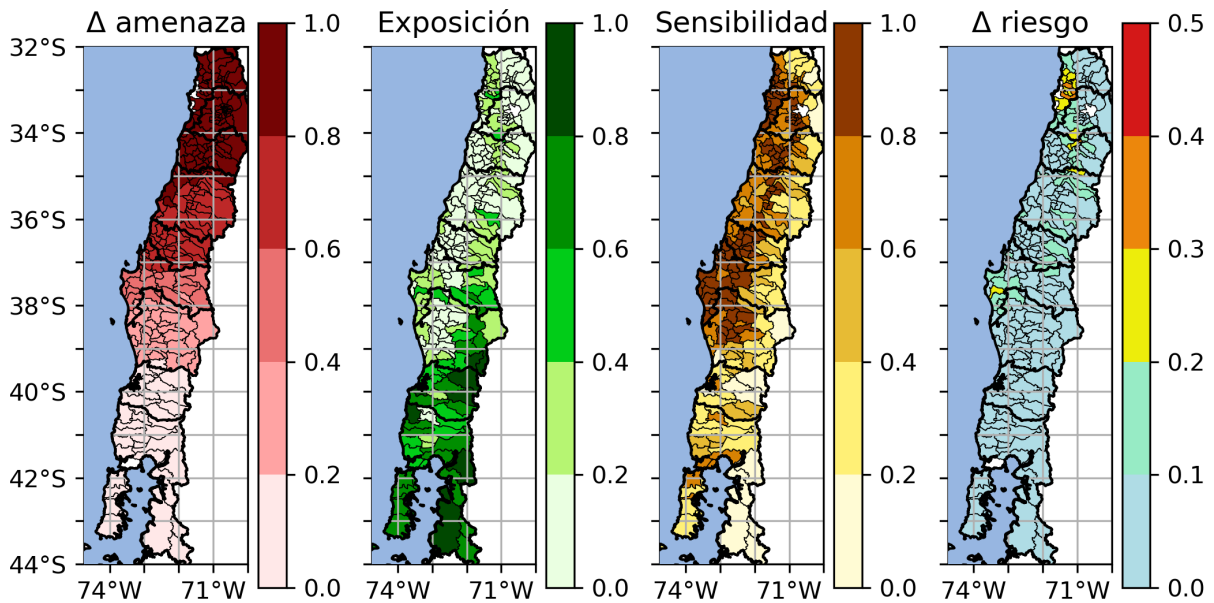


Figura C.47: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

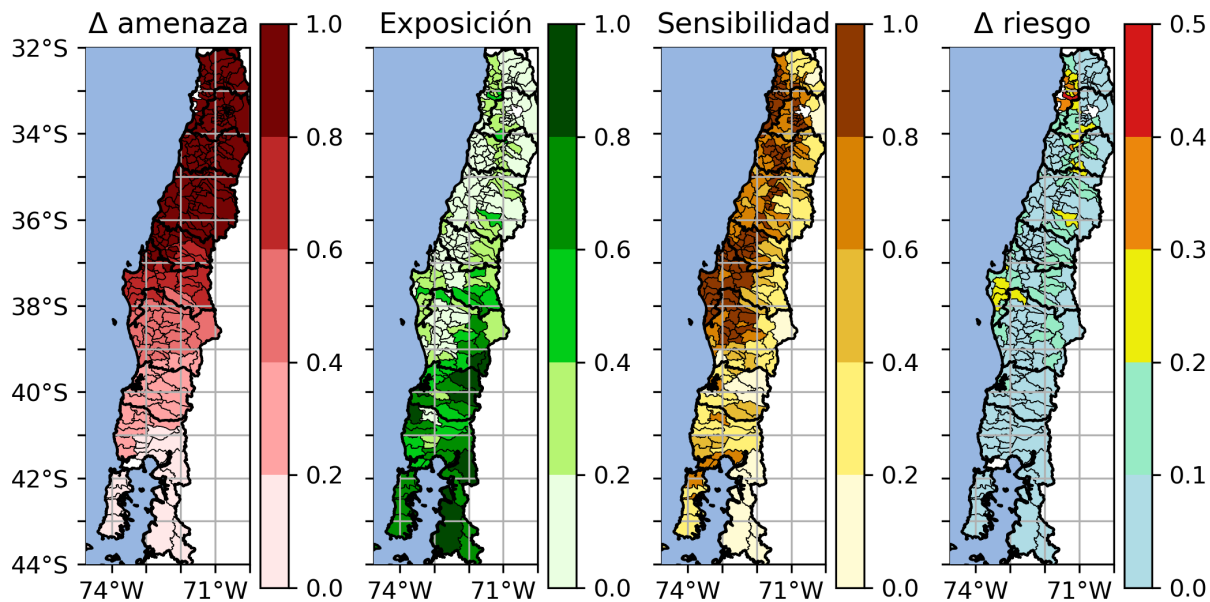


Figura C.48: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

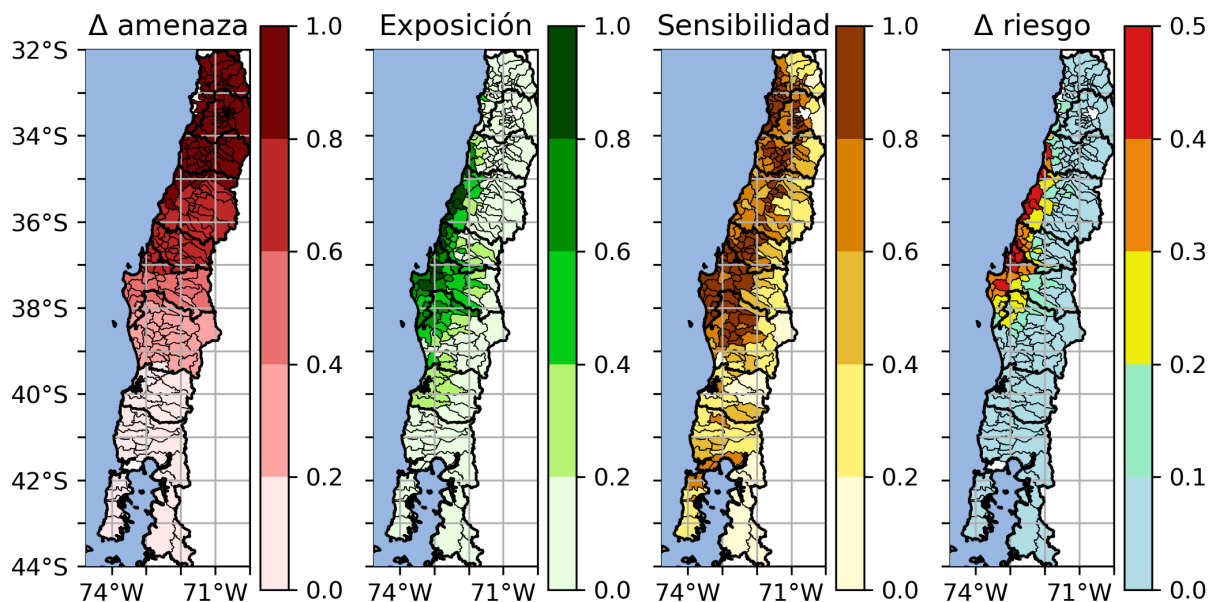


Figura C.49: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

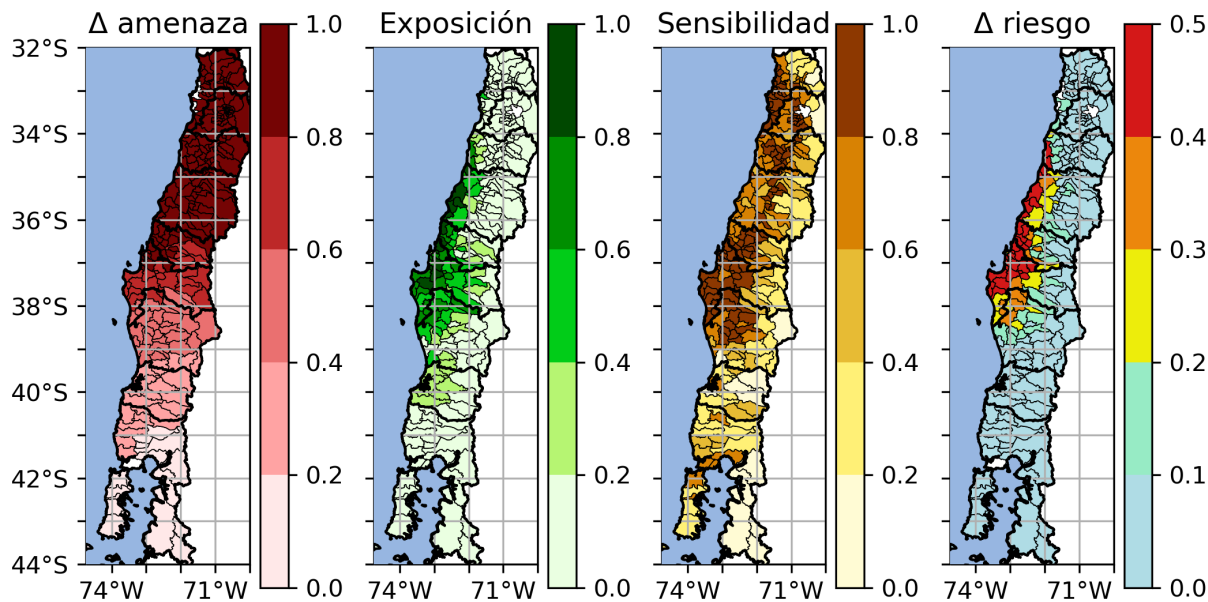


Figura C.50: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo EC-Earth3-Veg-LR.

C.6. MIROC6

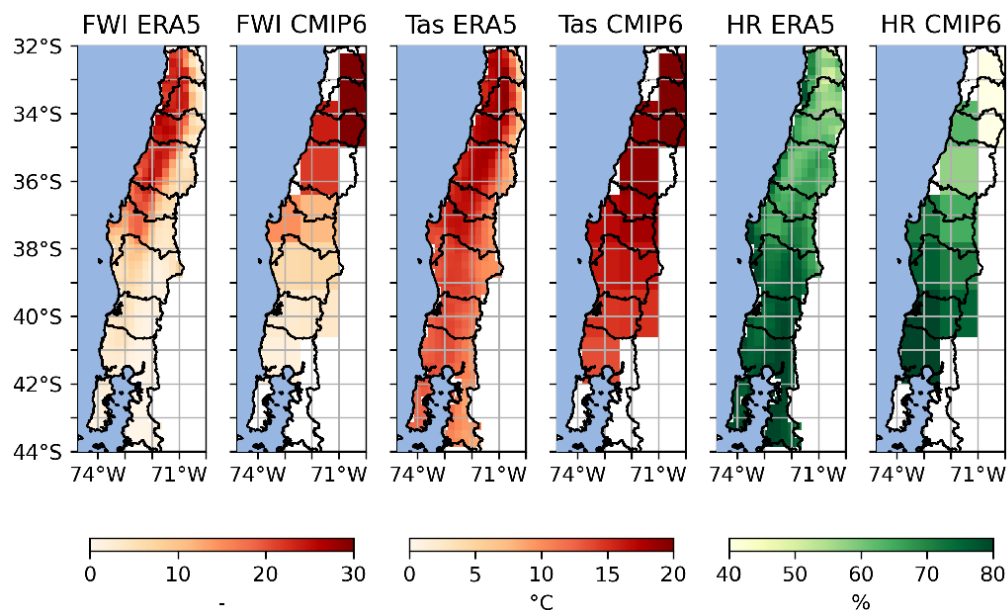


Figura C.51: Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo MIROC6.

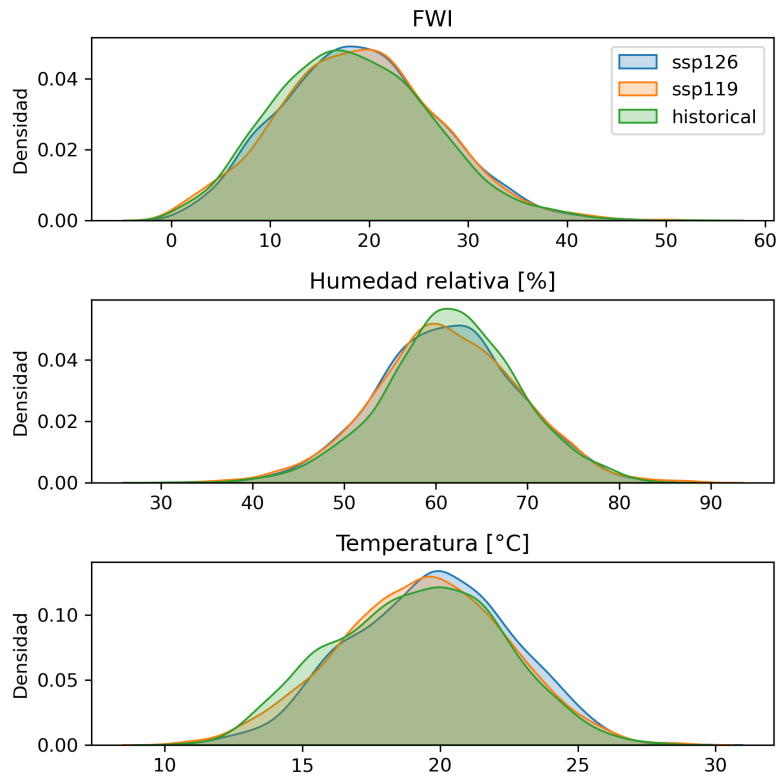


Figura C.52: Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo MIROC6.

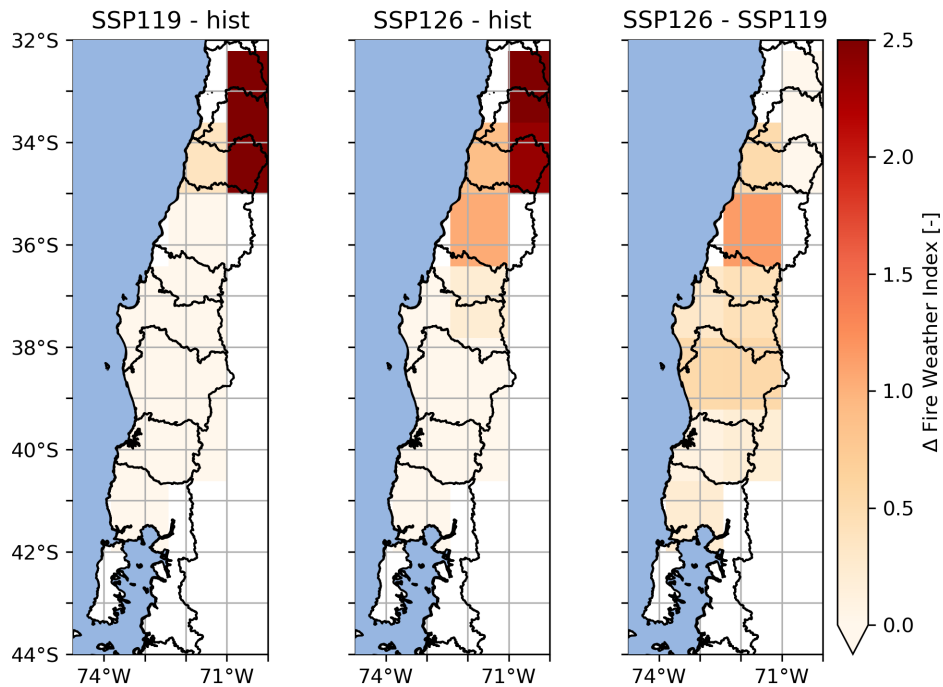


Figura C.53: Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC6.

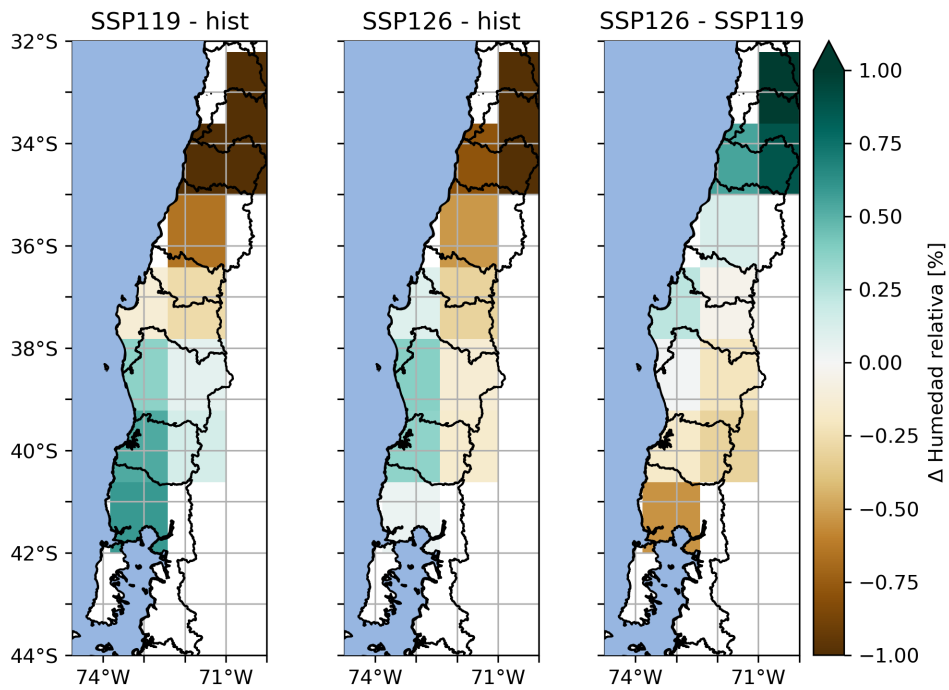


Figura C.54: Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC6.

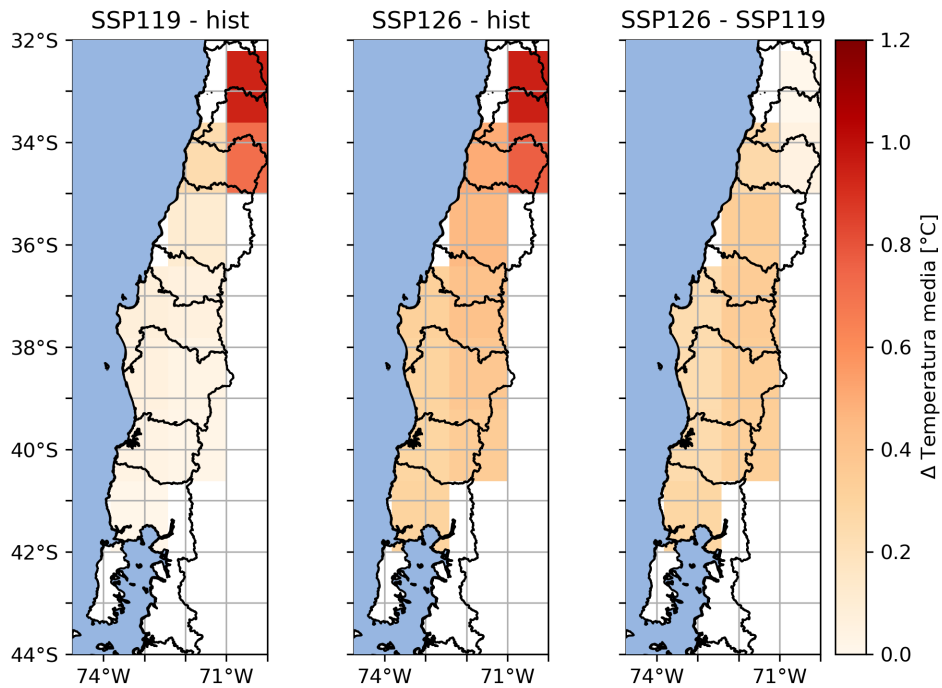


Figura C.55: Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC6.

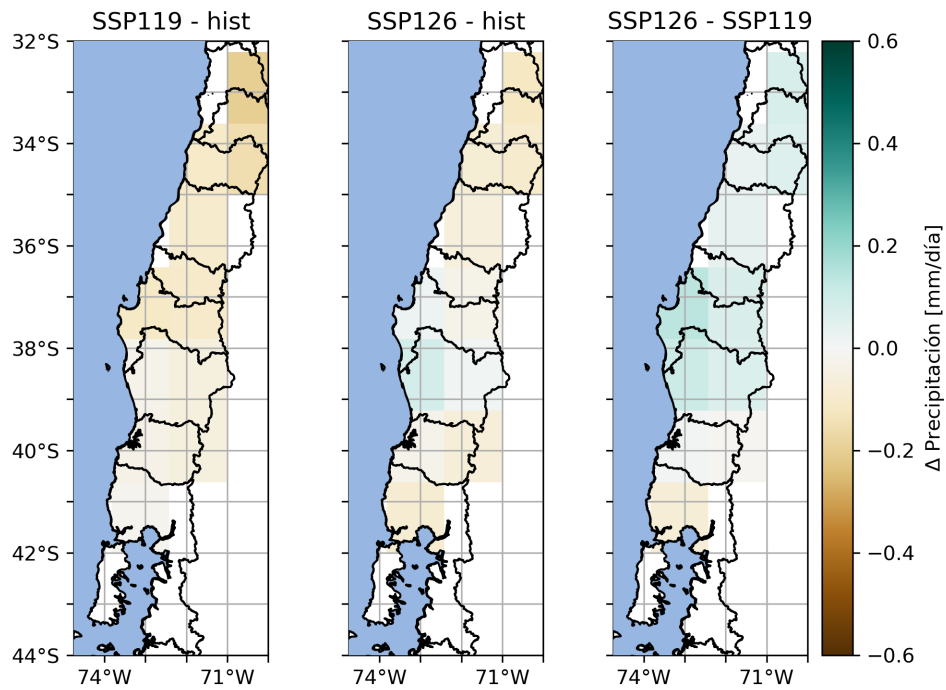


Figura C.56: Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC6.

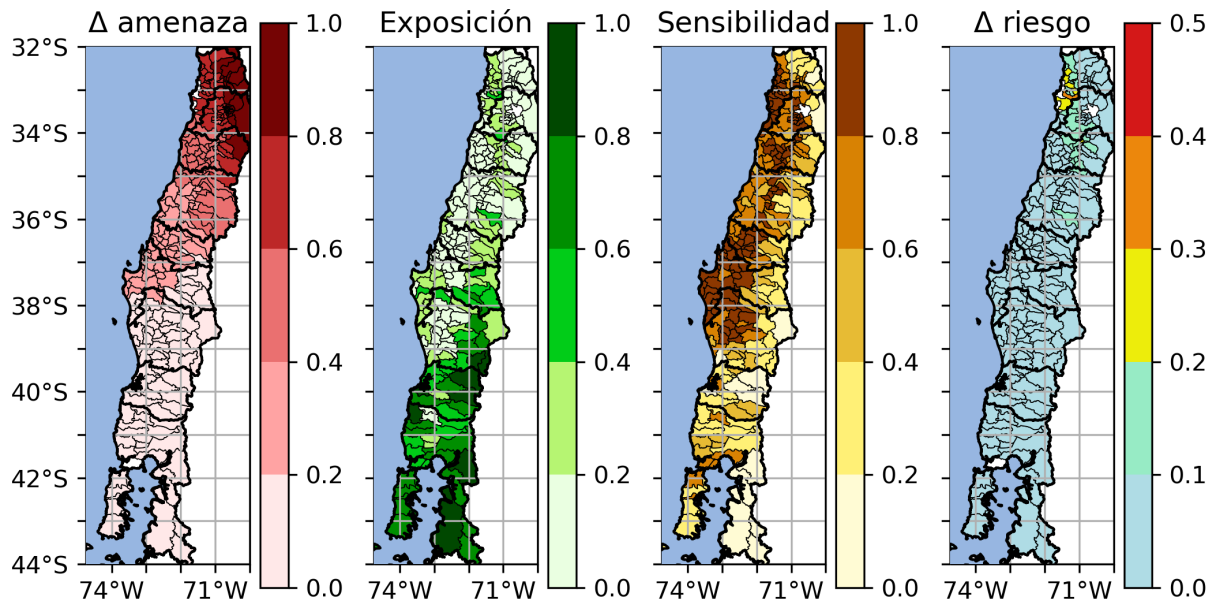


Figura C.57: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MIROC6.

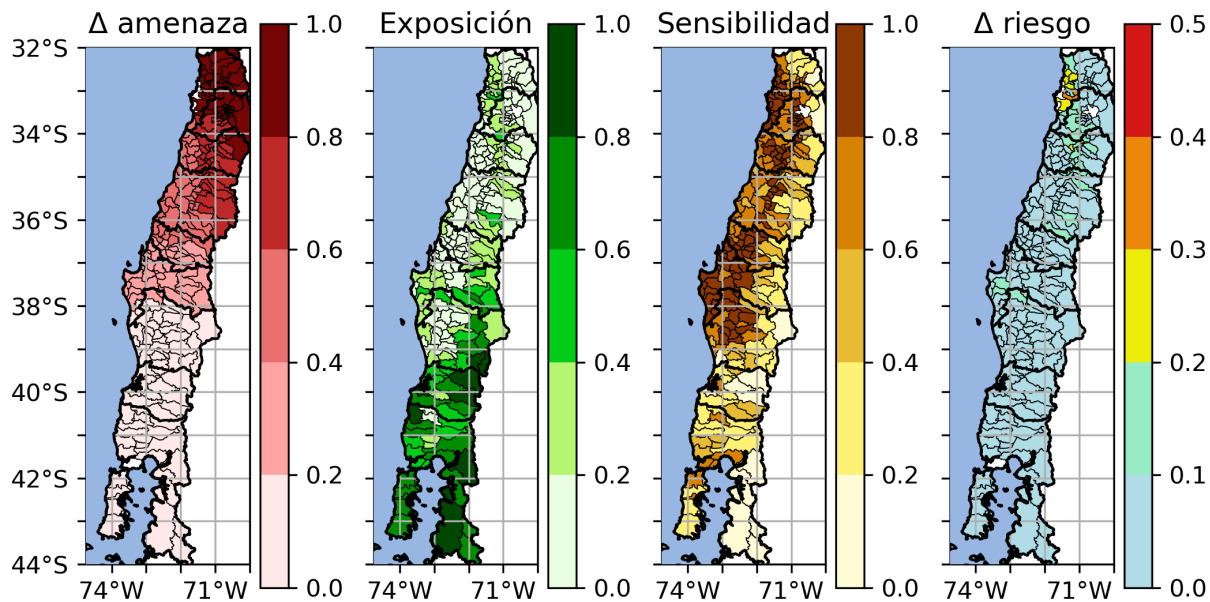


Figura C.58: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MIROC6.

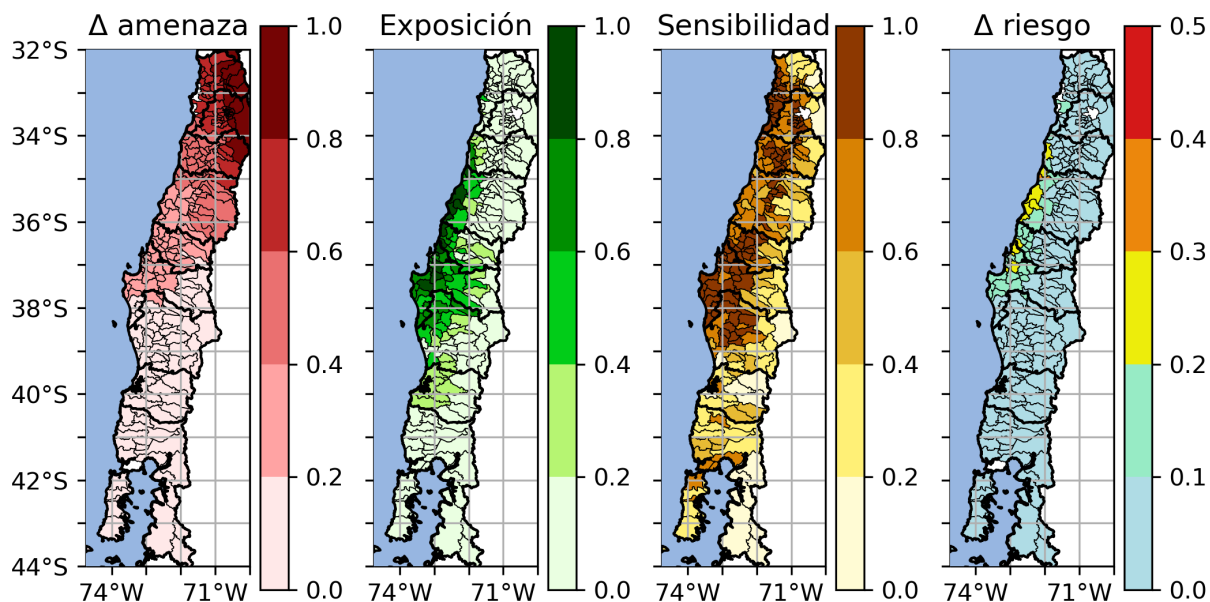


Figura C.59: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MIROC6.

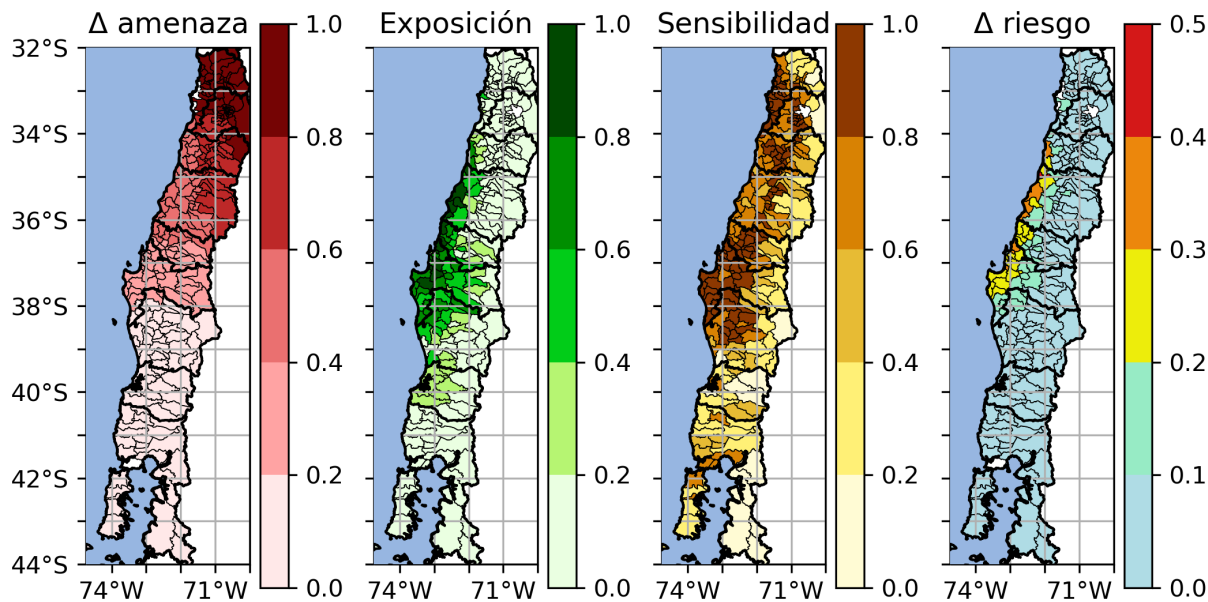


Figura C.60: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MIROC6.

C.7. MIROC-ES2L

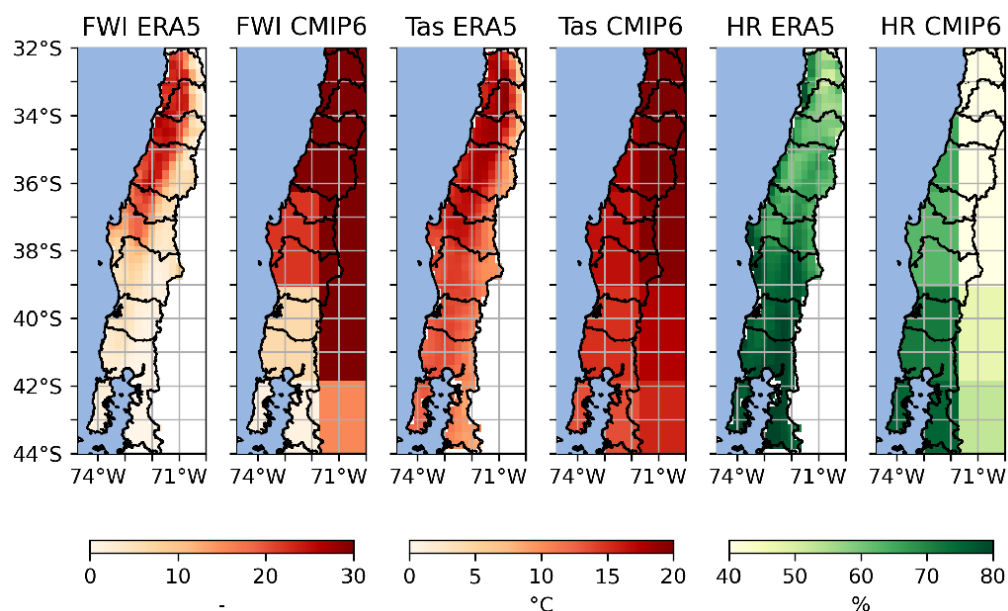


Figura C.61: Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo MIROC-ES2L.

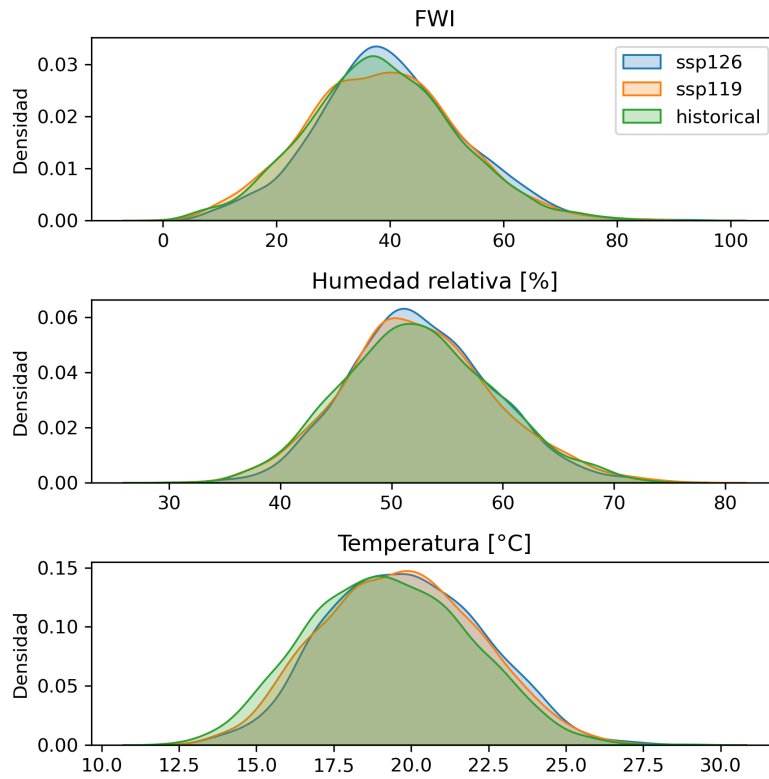


Figura C.62: Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo MIROC-ES2L.

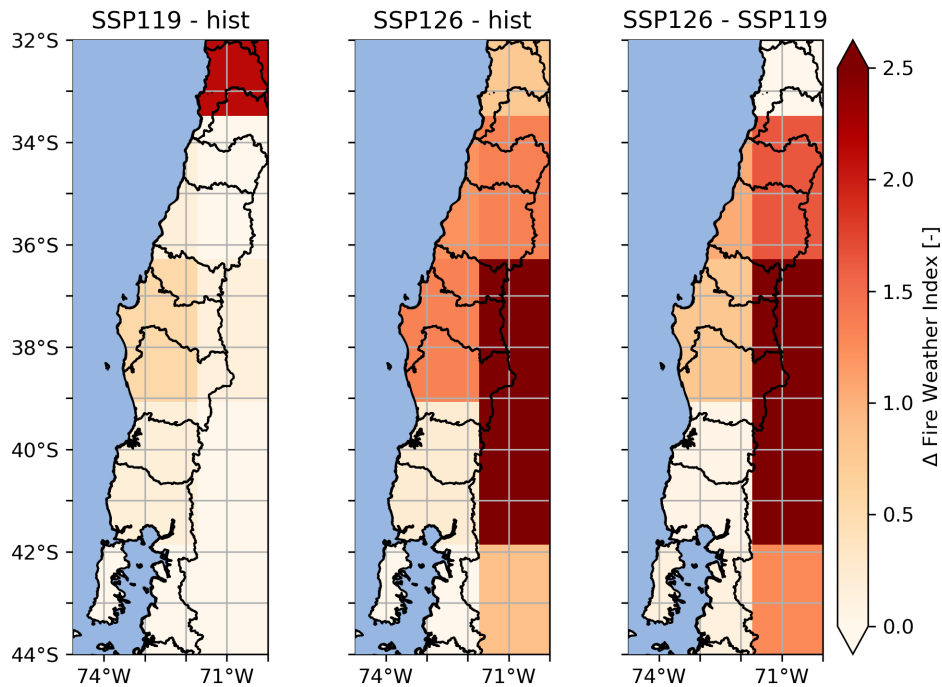


Figura C.63: Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC-ES2L.

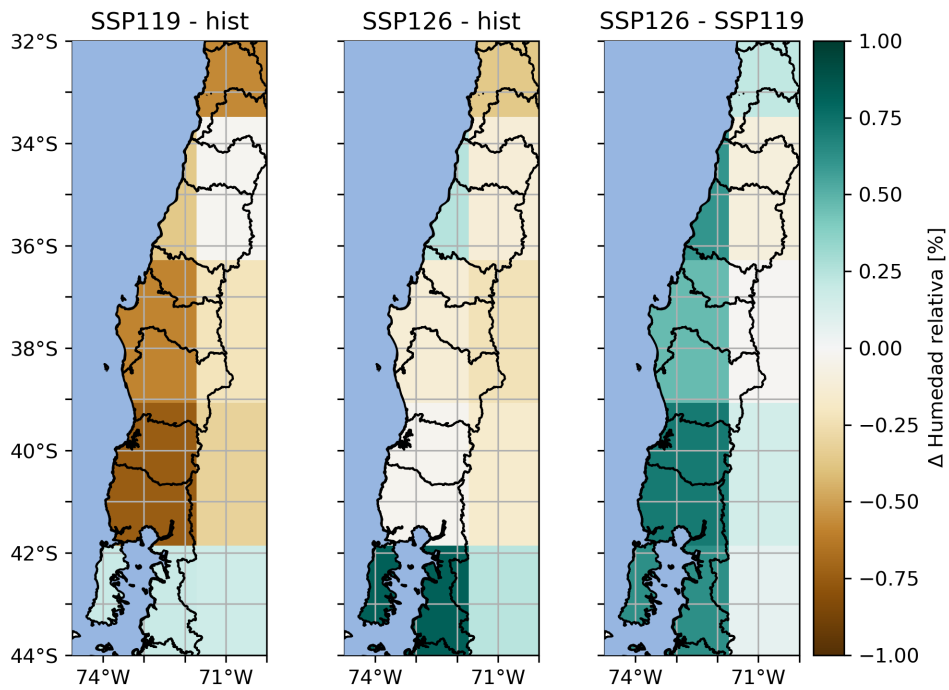


Figura C.64: Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC-ES2L.

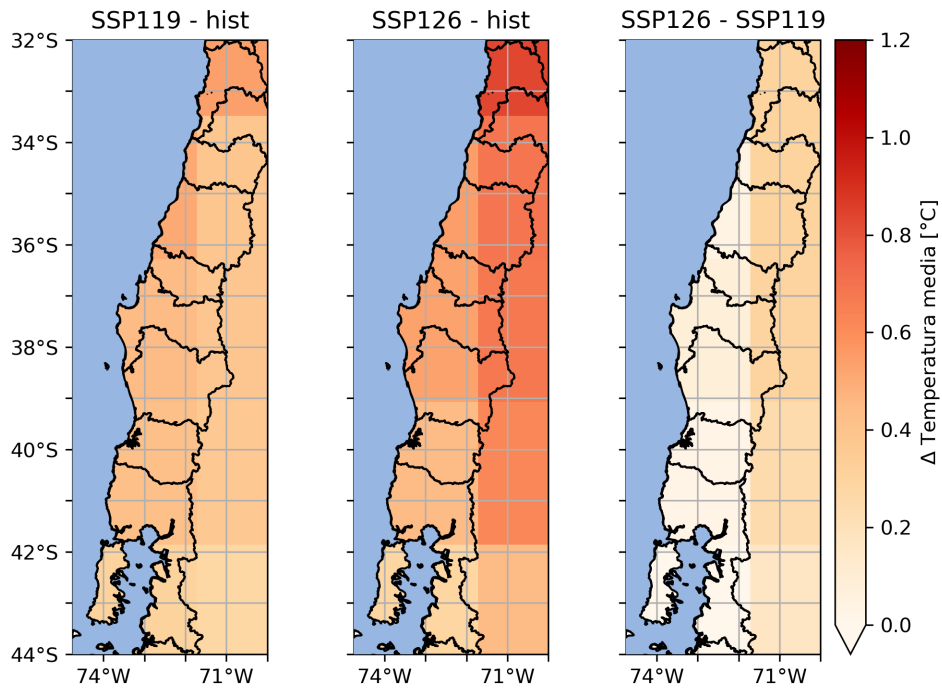


Figura C.65: Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC-ES2L.

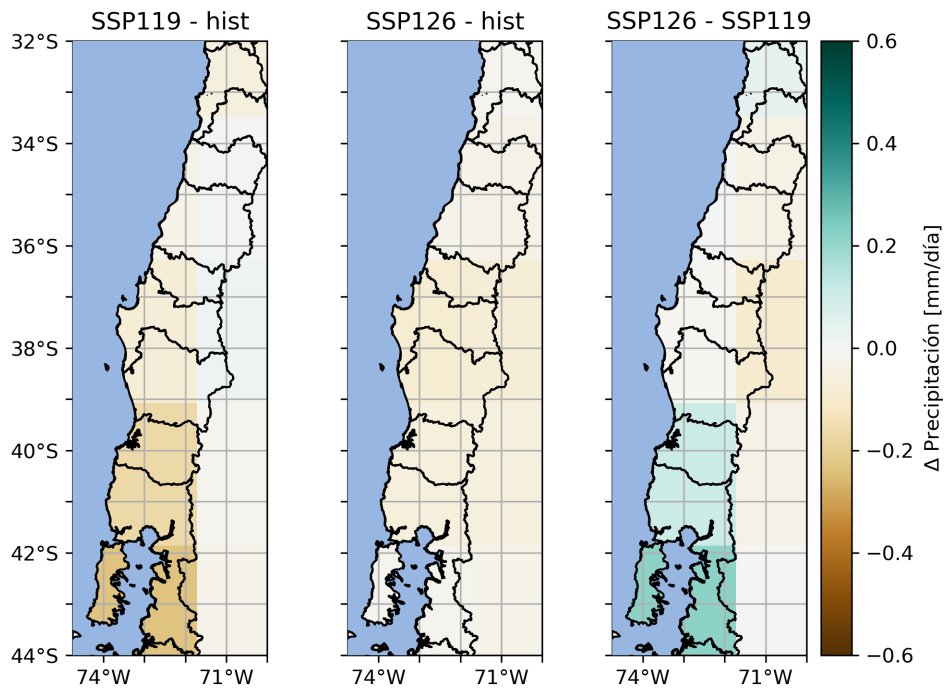


Figura C.66: Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MIROC-ES2L.

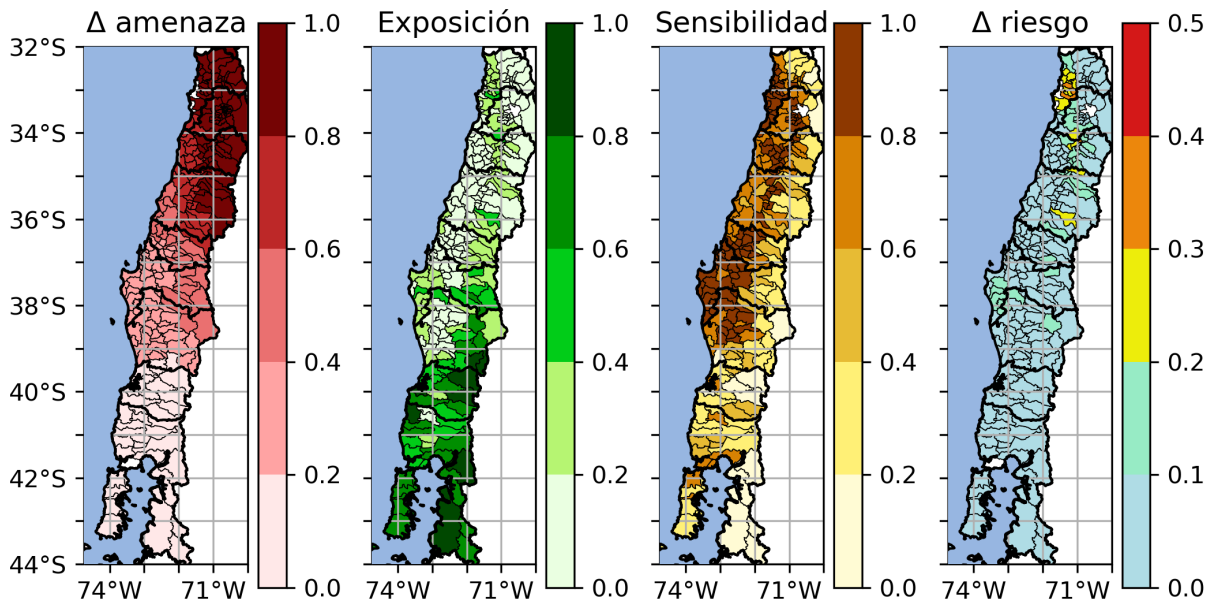


Figura C.67: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MIROC-ES2L.

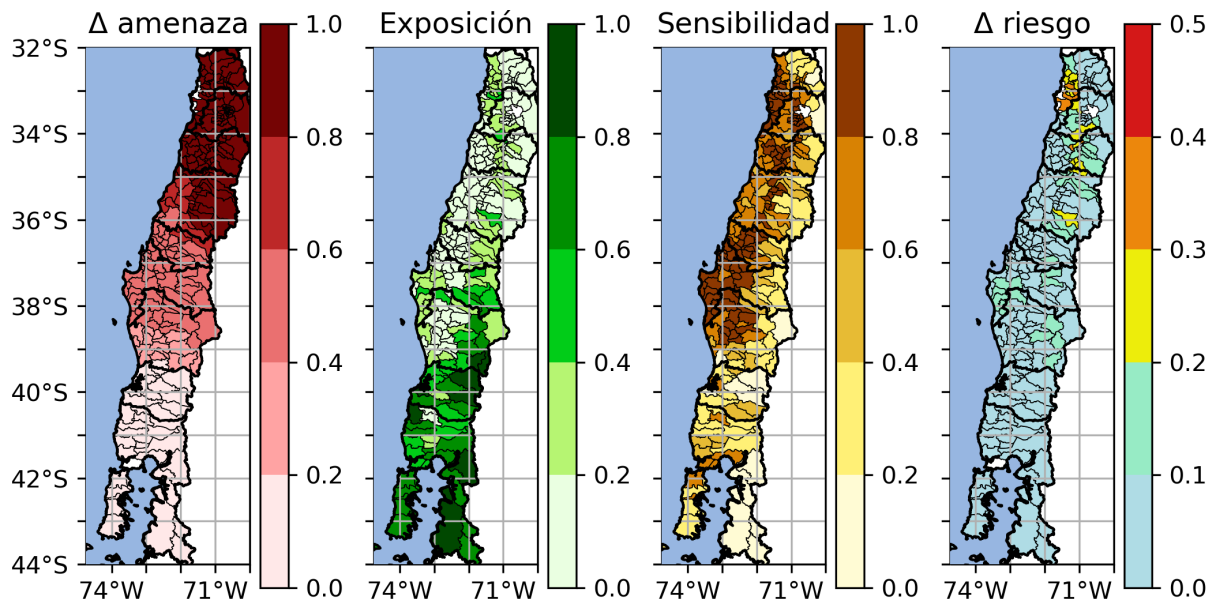


Figura C.68: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MIROC-ES2L.

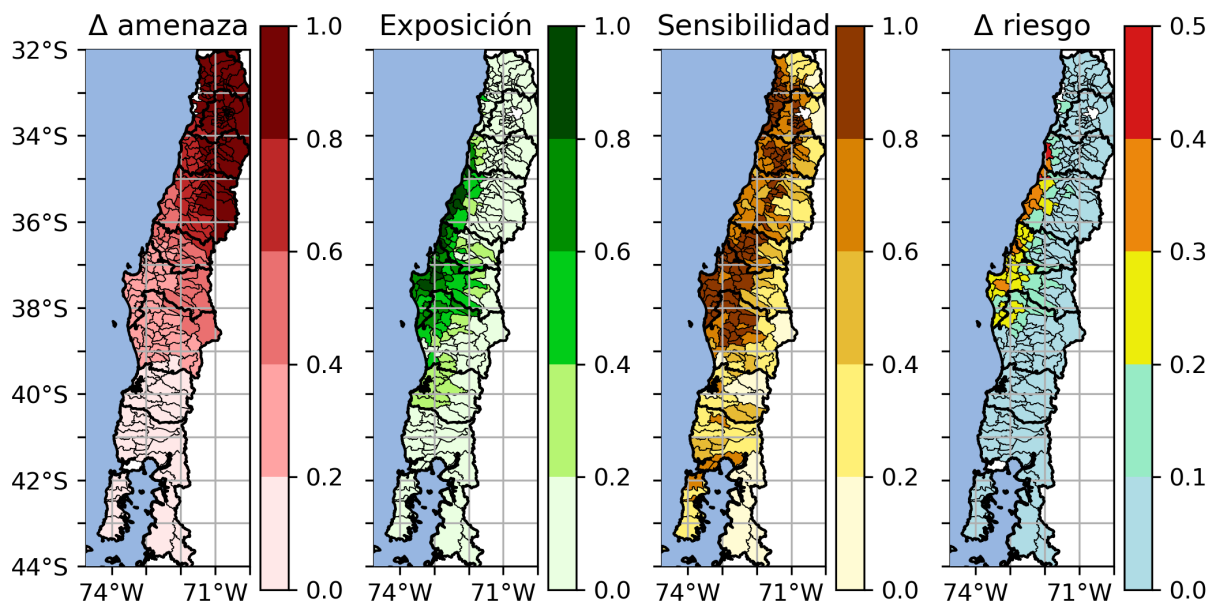


Figura C.69: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MIROC-ES2L.

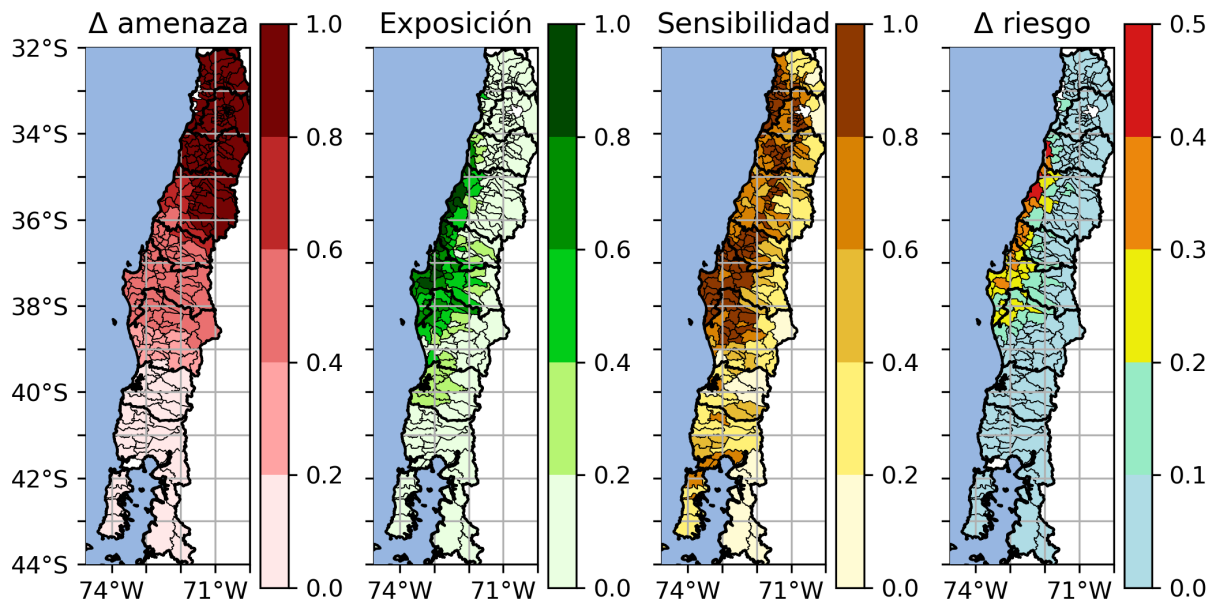


Figura C.70: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MIROC-ES2L.

C.8. MRI-ESM2-0

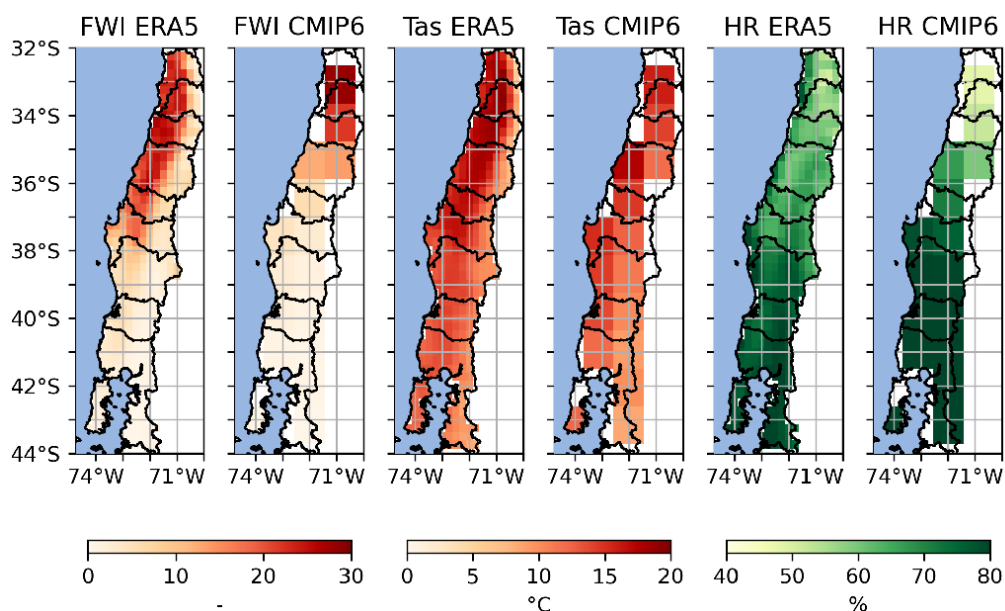


Figura C.71: Mapa de comparación entre CMIP6 y ERA5 del promedio histórico (1995-2014) del FWI, temperatura media y humedad relativa. Modelo MRI-ESM2-0.

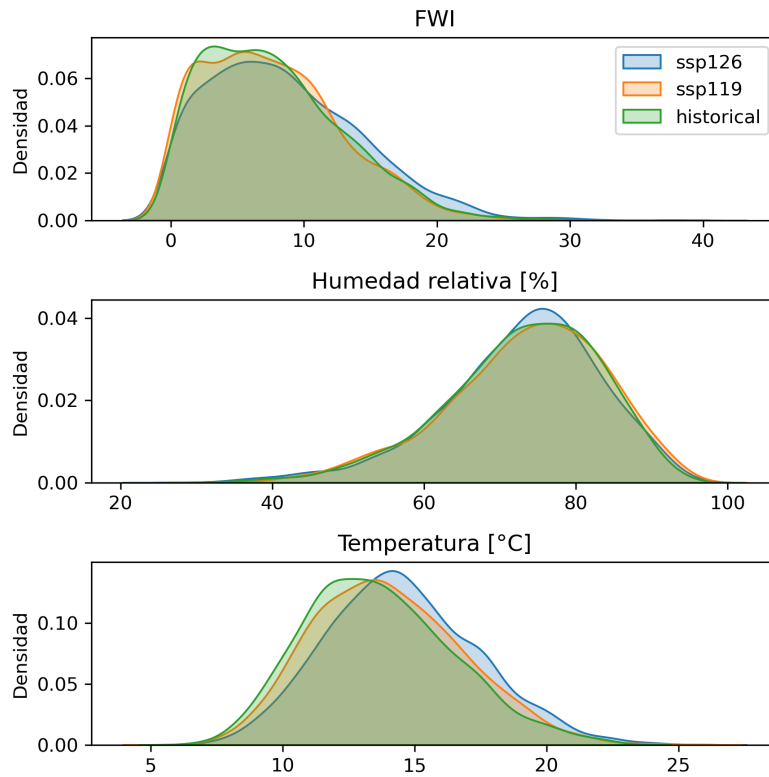


Figura C.72: Histogramas de la distribución de los escenarios histórico, ssp119 y ssp126. Modelo MRI-ESM2-0.

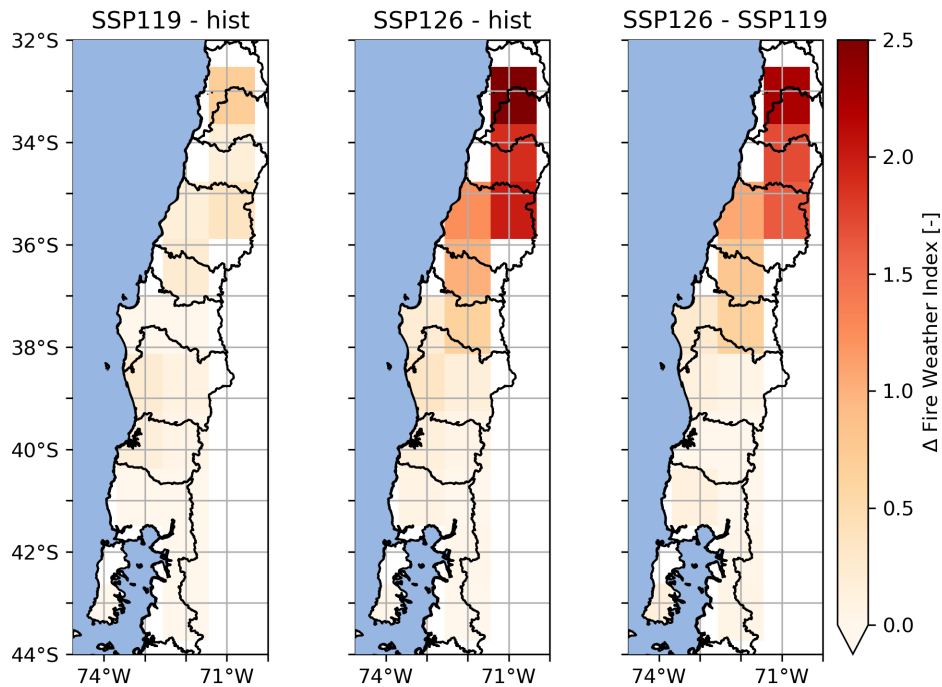


Figura C.73: Mapas de la diferencia del FWI promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MRI-ESM2-0.

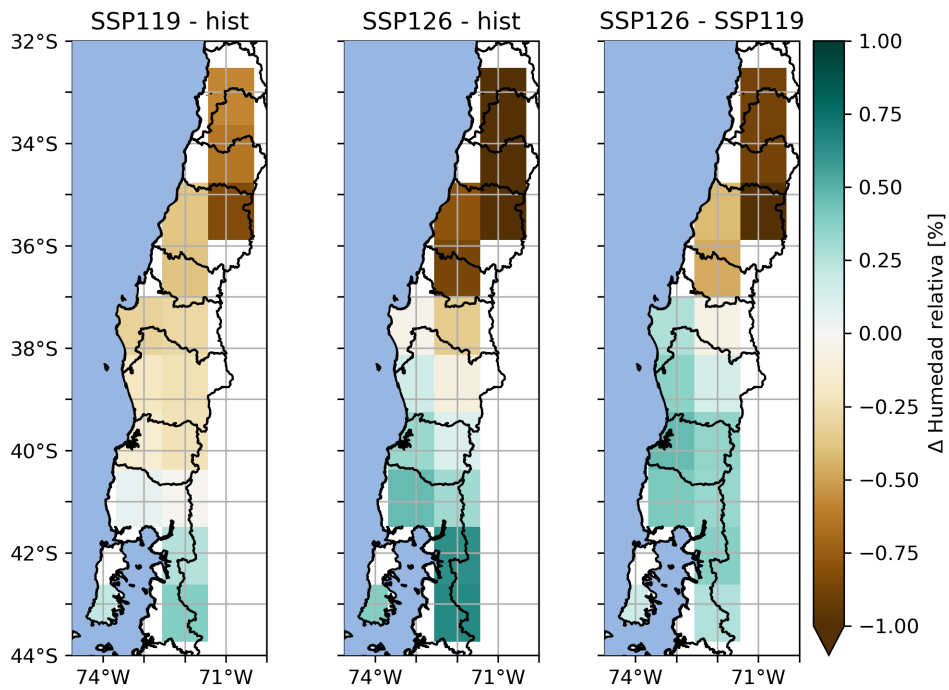


Figura C.74: Mapas de la diferencia de la humedad relativa promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MRI-ESM2-0.

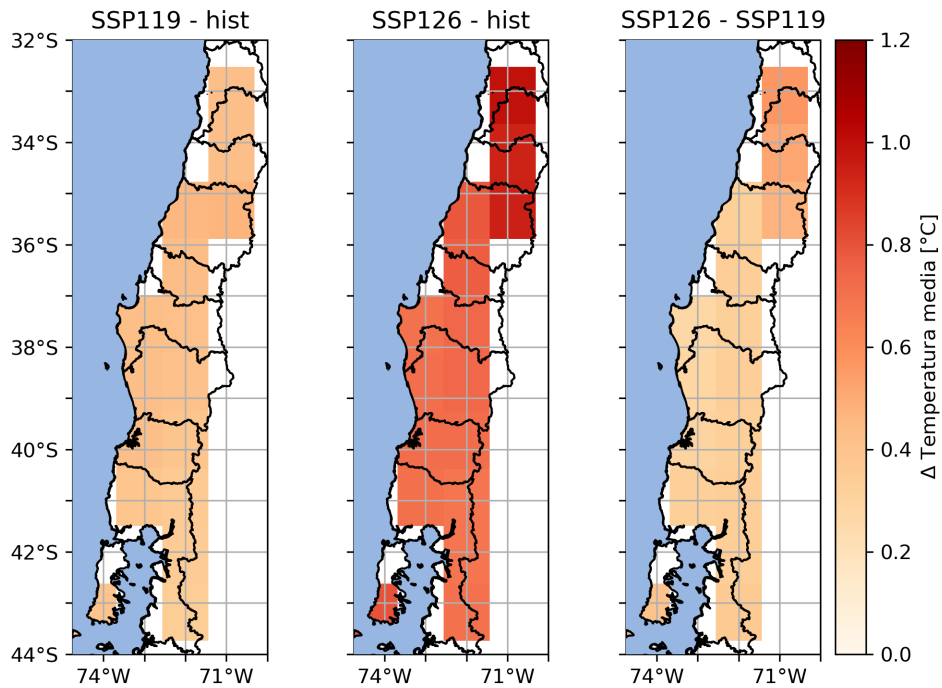


Figura C.75: Mapas de la diferencia de la temperatura promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MRI-ESM2-0.

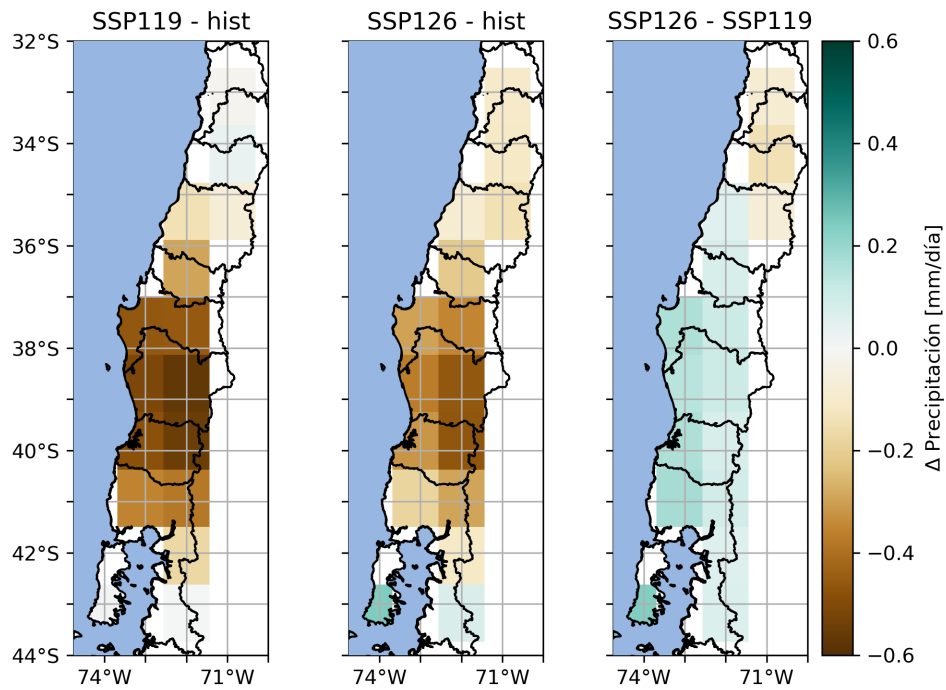


Figura C.76: Mapas de la diferencia de la precipitación promedio entre escenarios: ssp119 - histórico (izquierda), ssp126 - histórico (medio) y ssp126 - ssp119 (derecha). Modelo MRI-ESM2-0.

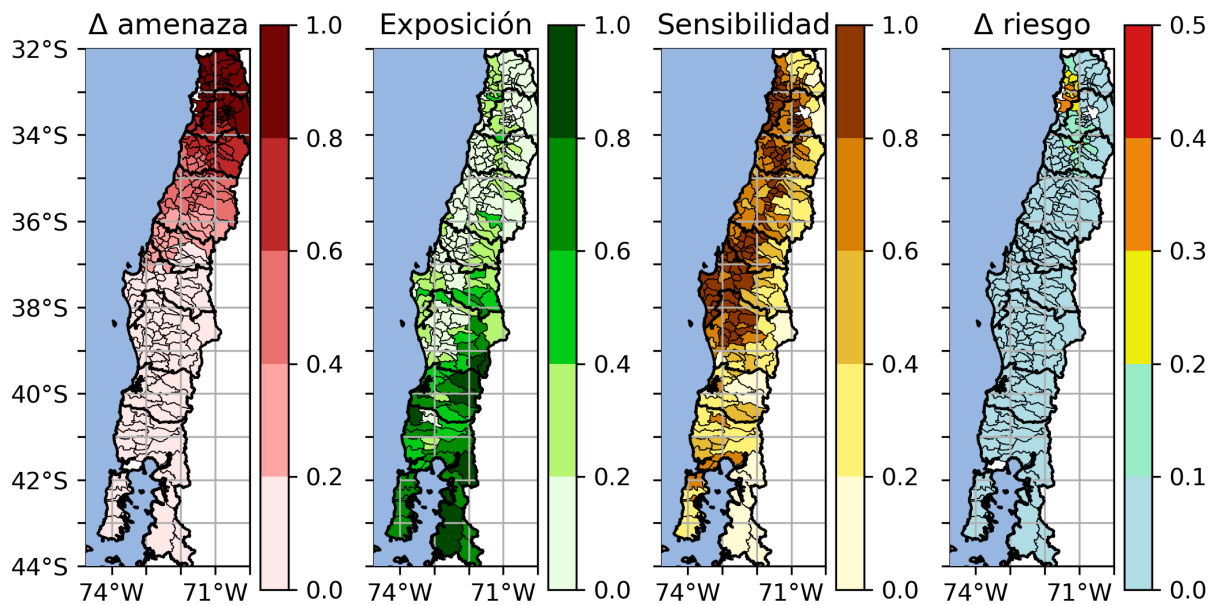


Figura C.77: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MRI-ESM2-0.

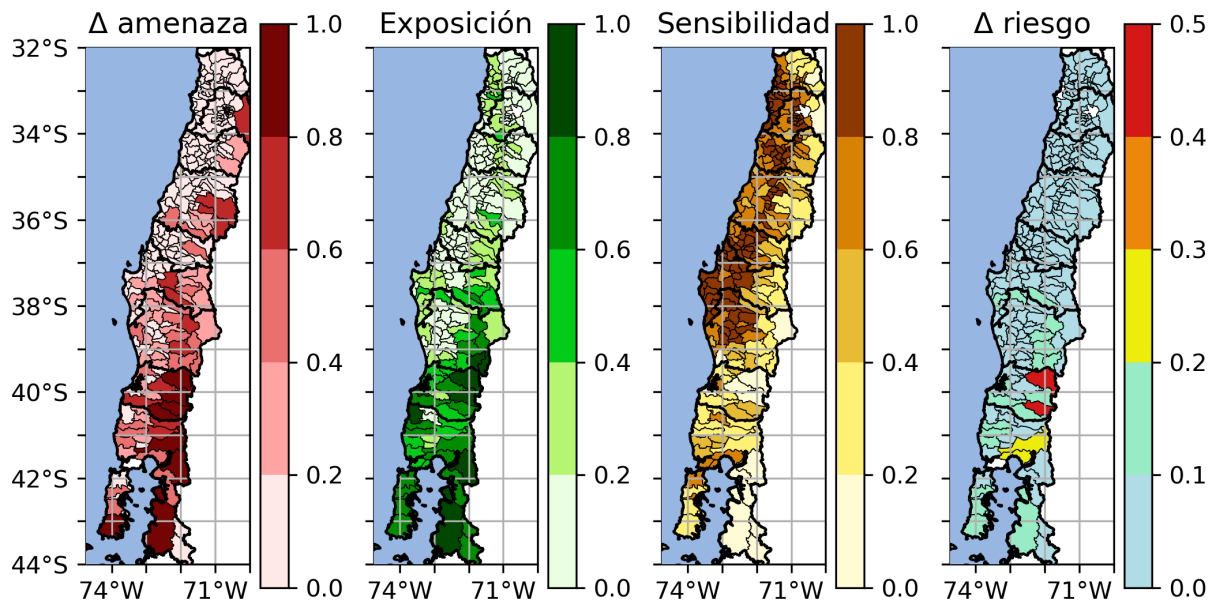


Figura C.78: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en bosques nativos, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MRI-ESM2-0.

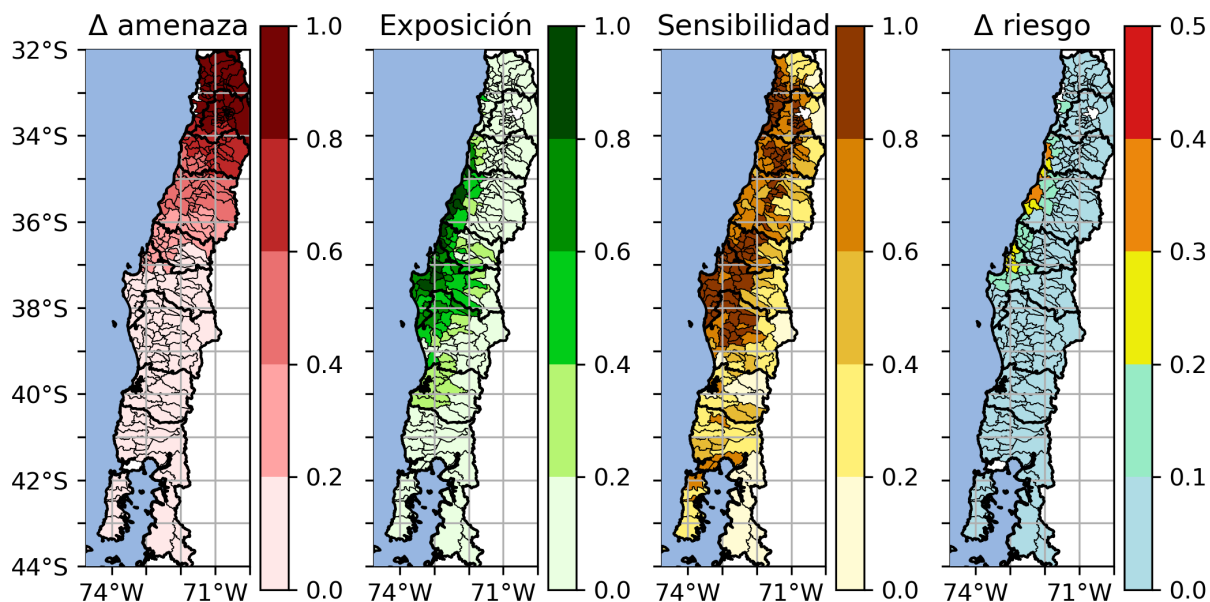


Figura C.79: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP119 (+1.5 °C) e histórico (1995-2014). Modelo MRI-ESM2-0.

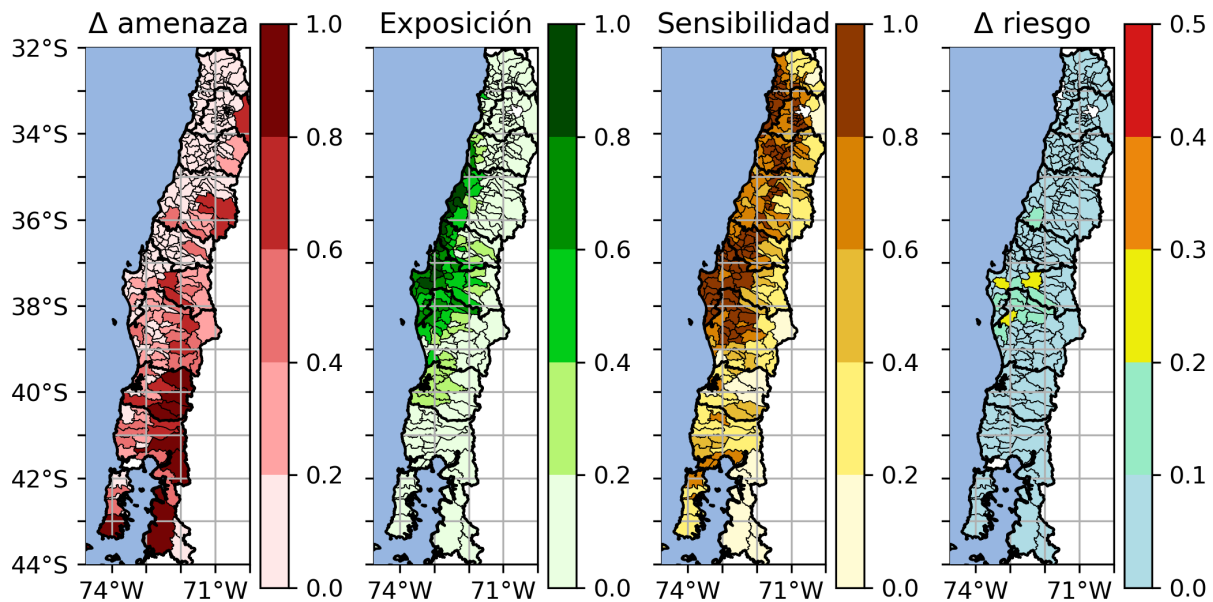


Figura C.80: Diferencias en el riesgo futuro de incendios en plantaciones forestales, entre los escenarios SSP126 (+2 °C) y SSP119 (+1.5 °C). Modelo MRI-ESM2-0.