



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Escuela de Pregrado

Carrera de Geografía

**Análisis de la influencia de variables meteorológicas y del paisaje en el tamaño de cicatrices de incendios forestales desarrollados en la zona Centro-Sur de Chile durante el periodo 2013-2015**

Memoria para optar al título de Geógrafo

Fernando Cárdenas Castillo

Profesora Guía: Pamela Smith Guerra

Santiago, Chile

2023

## Resumen

Los incendios forestales se han transformado en una amenaza para los ecosistemas y comunidades a nivel global. La teledetección, apoyada por imágenes satelitales de alta resolución y plataformas de análisis de big data ha facilitado el estudio y análisis espacial de estos fenómenos. Bajo este contexto, la presente investigación se centra en la espacialización y análisis de cicatrices de incendios forestales ocurridos en la zona centro-sur de Chile, para comprender la influencia de factores meteorológicos y de la estructura del paisaje en su propagación. Para ello se creó una base de datos histórica de cicatrices de incendios con información del Servicio Forestal de Chile (CONAF), considerando incendios ocurridos durante el periodo 2013-2015 en las regiones de Valparaíso, RM, O'Higgins, Maule, Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. Mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE) se pudo generar un flujo de trabajo flexible que permitió reconstruir áreas quemadas individuales y obtener información sobre la gravedad de cada incendio. Luego se evaluó la relación entre el tamaño de las cicatrices de incendio obtenidas y el Índice de Clima de Incendios (FWI) del Sistema Canadiense de Clasificación de Peligro de Incendios, que incluye factores meteorológicos como temperatura, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento. Además, se aplicaron métricas del paisaje para analizar la estructura y configuración de los polígonos correspondientes a las cicatrices de incendios, proporcionando una mayor comprensión de cómo la disposición espacial y la heterogeneidad del paisaje influyen en la propagación de incendios forestales. Los resultados muestran patrones y procesos que afectan la dinámica del fuego, con implicaciones importantes para la gestión y planificación forestal orientada a la protección contra incendios. Tanto las métricas del paisaje como el FWI y sus componentes mostraron una correlación respecto al tamaño final generado por los distintos incendios, demostrando ser una herramienta valiosa para apoyar la toma de decisiones en estrategias de extinción y prevención de incendios forestales. Finalmente este estudio resalta la importancia de utilizar herramientas avanzadas de teledetección y análisis de big data para abordar los desafíos asociados con el manejo y prevención de incendios forestales bajo un contexto de cambio climático y constante evolución del paisaje.

Keywords: incendios forestales, cicatrices de incendio, fire weather index, métricas del paisaje

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN</b> .....	<b>5</b>
1.1 Introducción .....	5
1.2 Planteamiento del problema.....	7
1.3 Estado del asunto .....	9
1.3.1 Estudios sobre incendios forestales a nivel global .....	9
1.3.2 Estudios sobre incendios forestales en ecosistemas mediterráneos .....	12
1.3.3 Estudios sobre incendios forestales en Chile .....	13
1.3.4 Hallazgos obtenidos mediante el estudio de los incendios forestales a nivel global .....	15
1.4 Área de estudio .....	17
1.4.1 Clima .....	17
1.4.2 Vegetación/ uso de suelo:.....	18
1.5 Objetivos.....	22
1.5.1 Objetivo Principal .....	22
1.5.2 Objetivos secundarios .....	22
<b>CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLOGICO</b> .....	<b>23</b>
2.1 Puntos incendios forestales CONAF .....	23
2.2 Obtención cicatrices de incendios en GEE .....	24
2.3 Variables meteorológicas y su influencia en el desarrollo de incendios forestales.....	27
2.4 Métricas del paisaje y su influencia en el desarrollo de incendios forestales .....	30
<b>CAPÍTULO 3: RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
3.1 Resultados Generales .....	33
3.2 Relación entre tamaño de cicatrices de incendio y variables meteorológicas .....	36
3.2.1 Relación entre temperatura máxima y tamaño de las cicatrices.....	36
3.2.2 Relación entre velocidad del viento y tamaño de las cicatrices .....	37
3.2.3 Relación entre Fire Weather Index (FWI) y tamaño de las cicatrices.....	38
3.2.4 Relación entre Initial Spread Index (ISI) y tamaño de las cicatrices .....	39
3.2.5 Relación entre Build-up Index (BUI) y tamaño de las cicatrices.....	40
3.2.6 Relación entre Duff Moisture Code (DMC) y tamaño de las cicatrices.....	41
3.2.7 Relación entre Drought Code (DC) y tamaño de las cicatrices.....	42
3.2.8 Relación entre Fine Fuel Moisture Code (FFMC) y tamaño de las cicatrices .....	43

3.3 Relación entre tamaño de cicatrices de incendio y métricas del paisaje.....	44
3.3.1 Relación entre Aggregation Index (AI) y tamaño de las cicatrices .....	44
3.3.2 Relación entre Contagion Index (CNTG) y tamaño de las cicatrices .....	45
3.3.3 Relación entre Edge Density (ED) y tamaño de las cicatrices .....	46
3.3.4 Relación entre Shannon Diversity Index (SHDI) y tamaño de las cicatrices.....	47
3.3.5 Relación entre Total Edge (TE) y tamaño de las cicatrices.....	48
3.3.6 Regresión lineal múltiple entre métricas del paisaje y superficie quemada por cicatrices de incendio .....	49
<b>CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>50</b>
4.1 Discusión .....	50
4.2 Conclusiones .....	53
<b>Bibliografía.....</b>	<b>55</b>

# CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

## 1.1 Introducción

El fuego es un componente integral de muchos ecosistemas terrestres y ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de la humanidad, permitiendo mediante incendios intencionales alterar grandes extensiones de terrenos con abundante vegetación, con la finalidad de modificar el paisaje y así generar un hábitat más propicio para el desarrollo de las comunidades humanas a lo largo del espacio y el tiempo (Abatzoglou et al., 2018). Y si bien se considera que los incendios forman parte de la naturaleza y han sido agentes que han moldeado la diversidad de los ecosistemas durante millones de años, en la actualidad se vislumbra una pérdida del equilibrio en los regímenes de incendios. Esto, producto de diversos factores derivados de las actividades humanas, entre los que destacan el agravamiento del cambio climático y un acelerado proceso de cambio de usos y cobertura de suelos.

Para que se genere fuego se necesitan como mínimo tres componentes: una ignición, oxígeno y combustible. Sin embargo, la generación de fuego no necesariamente se traduce en un incendio. El término incendios forestales hace referencia a los fuegos no controlados, ya sean de origen natural o antrópico, que ocurren en los ecosistemas terrestres y que se propagan por la vegetación, dejando una marca característica definida como cicatriz de incendio (Pausas, 2012).

Si bien se entiende que la propagación de un incendio requiere que la vegetación presente una baja concentración de humedad (Costa-Saura et al., 2021), también depende de un conjunto de otros factores que modulan los regímenes de incendios forestales. Actualmente se reconoce que la estructura y composición de los bosques a escala de paisaje pueden regular el tamaño de los incendios cuando las condiciones climáticas proporcionan al fuego la capacidad inicial necesaria para propagarse (Duane et al., 2021). Varios estudios (González et al., 2018; Zhihua et al., 2013; Bessie y Johnson, 1995) determinan que una vez que un incendio comienza a crecer y alcanza una capacidad de propagación constante, su potencial para extenderse por el paisaje dependerá más de la estructura del paisaje y las condiciones climáticas que de las especies forestales o la estructura del bosque a nivel de rodal.

Al ser los incendios forestales un fenómeno de propagación y considerando que su mecanismo de transferencia de calor puede ser mediante radiación o convección, las distancias a las que el fuego puede dispersarse a través de un paisaje con una estructura interrumpida o continua dependen de atributos como la intensidad del fuego, las condiciones climáticas (estabilidad atmosférica y de viento), y la configuración, cantidad y humedad del combustible (Duane et al., 2021). Pero se debe considerar que tanto la conectividad del combustible, como los demás factores que actúan en la propagación de los incendios, podrían estar influyendo en el desarrollo de los incendios forestales en una relación no lineal. Algunos estudios han señalado umbrales críticos respecto a variables atmosféricas como el viento que

permiten que los incendios forestales se propaguen abiertamente cuando se presentan ciertos tipos de condiciones climáticas más extremas (Benyon et al., 2023; Duane et al., 2021).

Por lo tanto, al considerar la estrecha relación entre el clima y los incendios forestales, es de esperar que en el marco actual de cambio climático, con condiciones cada vez más extremas, los regímenes de incendios también cambien. Todo apunta a que en la mayoría de los ecosistemas está disminuyendo la disponibilidad de agua para las plantas y aumenta la frecuencia de sequía. Distintas investigaciones concuerdan en que uno de los mayores efectos que el cambio climático producirá en el país estará asociado a la disminución de precipitaciones, lo cual influiría en un incremento en la ocurrencia y área afectada por incendios forestales (González et al., 2018).

Simultáneamente se están produciendo otros cambios que también influyen de gran manera en los regímenes de incendios, destacando en el caso chileno: cambios en la densidad y distribución de la población humana; deforestación y fragmentación del paisaje; e invasiones vegetales. Factores que generan una alteración de la estructura del paisaje y contribuyen en la propagación de incendios al crear condiciones de mayor inflamabilidad.

La suma de todos estos factores ha contribuido a un aumento en la intensidad y ocurrencia de incendios forestales en nuestro país, especialmente en la zona centro-sur, donde confluyen grandes extensiones de plantaciones forestales y una vegetación nativa que se ve inmersa en paisajes cada vez más áridos. Consecuencias de esta situación se vieron reflejadas la temporada estival de 2017, cuando la zona centro-sur de Chile fue afectada por cientos de incendios de gran magnitud que arrasaron con extensos terrenos, quemando más de 5000 km<sup>2</sup>, un área 13,6 veces superior a la media de áreas quemadas previamente durante un periodo de 32 años (a contar desde 1985) para las cinco regiones administrativas que comprenden Chile central (Bowman et al., 2019).

Considerando el panorama actual resulta primordial estudiar los paisajes afectados por incendios forestales, analizando las condiciones previas al desencadenamiento y propagación de estos, ya que esta información puede dar luces sobre qué factores están contribuyendo de mayor manera en su propagación. Para ello la presente investigación pretende integrar y estandarizar un conjunto de atributos asociados a cada cicatriz de incendio recopilada para la zona centro-sur de Chile en el periodo 2013-2015. Estos atributos entregan información relacionada a la estructura y composición del paisaje, condiciones climáticas y atmosféricas. Mediante el análisis de estos datos, esta investigación busca generar información que pueda aportar conocimientos que contribuyan a una gestión más eficiente y segura de incendios forestales que resultan cada vez más frecuentes e intensos.

## 1.2 Planteamiento del problema

Durante las últimas décadas los incendios forestales han aumentado tanto en frecuencia como en magnitud, convirtiéndose en uno de los problemas ambientales que mayor impacto generan a nivel global. Cada vez se reconoce más la importancia de los incendios forestales en el sistema terrestre, ya que influyen en muchos aspectos del medio ambiente global, como la distribución de los ecosistemas, la biodiversidad, el ciclo del carbono, la química atmosférica y el clima (Bowman et al., 2009).

A escala global, las regiones subtropicales y mediterráneas son las zonas más afectadas por los incendios forestales, debido principalmente a sus características climáticas interanuales (periodo seco y cálido simultáneos) y a las tendencias relacionadas al cambio climático, como un aumento en las temperaturas y disminución de las precipitaciones (Sarricolea et al., 2019). Esta cuestión fue abordada por Ramo et al. (2021) a escala subcontinental, mediante un análisis sobre los incendios forestales ocurridos durante las últimas décadas en África, el cual sugiere que los factores climáticos son los que más influyen en la cantidad de superficie quemada.

En la actualidad los bosques templados y mediterráneos sufren de manera cada vez más frecuente el impacto generado por grandes y destructivos incendios, lo que puede indicar nuevas dinámicas en las condiciones actuales y futuras. Según las proyecciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para el próximo siglo, el aumento de la temperatura y los cambios en los patrones de precipitación producirán condiciones climáticas propicias para la ocurrencia de incendios forestales con una cada vez más elevada frecuencia y extensión (IPCC, 2007).

Junto al aumento de las temperaturas y la sequía, se plantea que el elevado nivel de continuidad del combustible leñoso promovido por la expansión de plantaciones forestales es otro factor que contribuye a la alteración del paisaje, generando condiciones propicias para un aumento en la actividad de los incendios forestales. Muchos de los mayores incendios se están produciendo en lugares donde la vegetación exótica altamente inflamable y las plantaciones forestales homogéneas han sustituido a una vegetación autóctona más heterogénea y menos propensa al fuego (McWethy et al., 2018).

En el caso de Chile, durante las últimas décadas el estado ha incentivado un dinamismo económico que ha potenciado la expansión de plantaciones forestales industriales homogéneas tanto en su estructura como en su composición, constituidas principalmente por especies exóticas como *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* (González et al., 2018). Esta expansión se ha dado a lo largo del centro-sur de Chile en áreas previamente ocupadas por una matriz más heterogénea de bosques nativos, tierras agrícolas y bosques abiertos degradados.

Coincidentemente, los incendios forestales han afectado principalmente a los terrenos ubicados entre las regiones de Valparaíso y la Araucanía (Ubeda y Sarricolea 2016). Durante la temporada de incendios de 2016-2017 ardieron más de 580.000 hectáreas en la zona central

de Chile, la mayor extensión de superficie quemada registrada en el país desde que se iniciaron registros detallados a principios de la década de 1960 (McWethy et al., 2018).

El extenso territorio cubierto por bosques a nivel nacional, la cada vez más frecuente ocurrencia de incendios forestales y el impacto cada vez más notorio generado por el cambio climático hacen que sea necesario analizar los distintos episodios de incendios ocurridos en el país. En este sentido, resulta fundamental considerar no solo el daño causado, sino también evaluar los factores bioclimáticos que hayan influido en su propagación, ya que esto permitirá generar políticas de respuesta frente a la intensificación de ciertos elementos que pueden predisponer al territorio a episodios de incendios más intensos y difíciles de controlar.

Un informe llevado a cabo por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2022) hace énfasis en la urgencia de entender mejor el comportamiento de los incendios forestales puesto que su prevención exige una combinación de datos y sistemas de monitoreo basados en la ciencia, conocimientos indígenas y cooperación regional e internacional sólida. En este sentido se aconseja a los gobiernos adoptar una fórmula en que 2/3 del presupuesto sean asignados a la planificación, prevención, preparación, y recuperación, dejando el tercio restante de los recursos al combate de los incendios una vez que ocurran. En la actualidad esta situación es diametralmente distinta, ya que las respuestas a los incendios forestales reciben más de la mitad de los presupuestos y se asigna menos del 1% a la planificación y prevención (PNUMA 2022).

Si no se planifica adecuadamente una estrategia que considere entre otros factores la creciente urbanización, los incendios pueden afectar cada vez a más territorio e implicar una mayor exposición de la población, no sólo al fuego sino también a la contaminación atmosférica y a otros procesos derivados como la erosión y los movimientos en masa durante los episodios de precipitación post-incendio (Abbate et al. 2019).

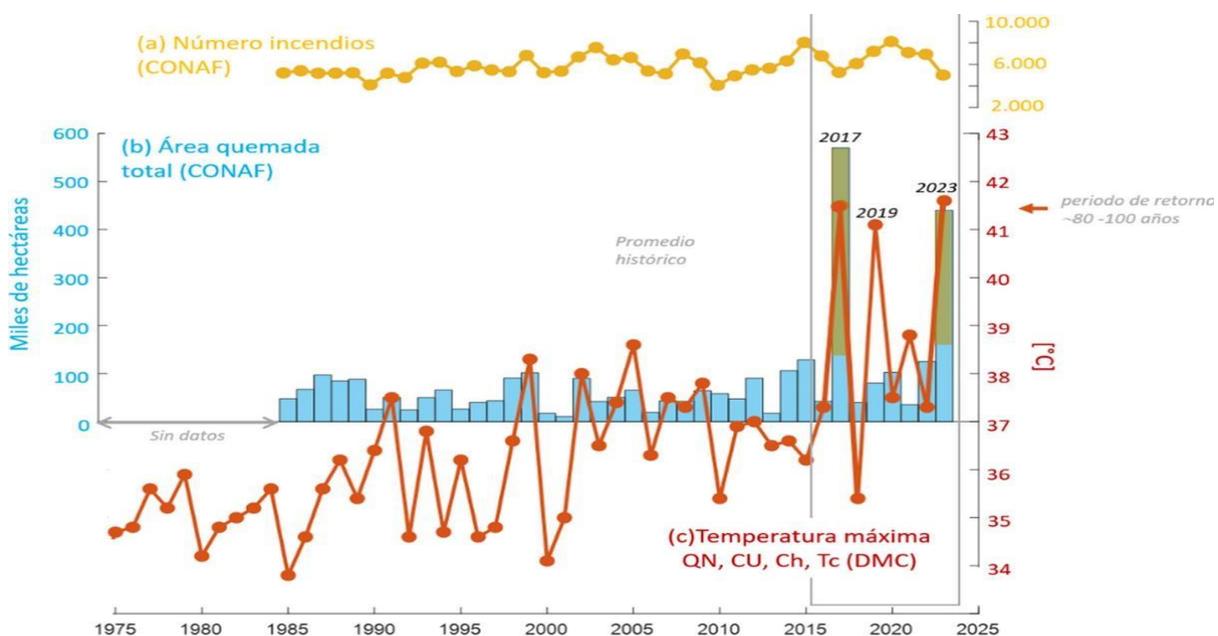


Figura 1: Régimen de incendios forestales en Chile (Fuente: DMC)

### **1.3 Estado del asunto**

Es bien sabido que los incendios forestales se ven influenciados principalmente por el clima, los combustibles y la topografía (Benyon et al., 2023; Duane et al., 2021; González et al., 2018), sin embargo, el efecto relativo de estos factores puede variar a lo largo de los distintos ecosistemas presentes en el planeta. Cada ecosistema cuenta con propiedades únicas, como la composición y estructura de la vegetación, disponibilidad y tipo de combustibles y se encuentran sometidos a diferentes condiciones climáticas locales (Pausas, 2012). Estas diferencias ecológicas pueden influir en la propagación y el comportamiento de los incendios forestales en diferentes regiones, por lo que se requiere un enfoque que considere el contexto en cada situación para comprender y gestionar los incendios forestales de manera efectiva.

Es por ello que durante las últimas décadas se han llevado a cabo diversos estudios con la finalidad de aportar información sobre las dinámicas que acompañan al desarrollo de los incendios forestales a lo largo del mundo y así poder determinar qué factores influyen de mayor manera en su propagación, bajo un contexto de cambio climático y expansión urbana que contribuye a que los ecosistemas en general sean cada vez más vulnerables a igniciones.

#### **1.3.1 Estudios sobre incendios forestales a nivel global**

Uno de los ecosistemas más estudiados corresponde a los bosques boreales, particularmente los que se encuentran localizados en China y Canadá, donde las investigaciones han seguido distintos enfoques. Ambos países cuentan con una gran extensión de bosques boreales, los que durante las últimas décadas se han visto afectados por incendios forestales cada vez más recurrentes y severos (Hély et al., 2010). Esta situación ha fomentado el estudio de los incendios forestales a través de investigaciones que analizan diferentes aspectos como la dinámica espacio-temporal, factores causales, efectos ecológicos y socioeconómicos, estrategias de prevención y escenarios futuros en un contexto de cambio climático (Li et al., 2022; Hély et al., 2010).

Respecto a los bosques chinos, destaca la investigación de Zhihua et al. (2013), cuyo principal objetivo fue analizar los efectos de los controles de incendio (combustible, topografía y clima) sobre la propagación de los incendios forestales considerando varias escalas espaciales en una gradiente continua y determinar si estos efectos se ven afectados por la composición del combustible. Para llevar a cabo esta investigación se construyó un modelo compuesto por variables dependientes y explicativas.

Las variables dependientes corresponden a una base de datos de incendios que abarca un periodo de 20 años y comprende un total de 146 incendios detectados entre los años 1991 y 2010. Por otra parte, las variables explicativas están dadas por el combustible, clima y datos topográficos.

El cálculo de combustible se llevó a cabo al interceptar las cicatrices de incendio con mapas forestales. Para los datos meteorológicos se calcularon seis índices de clima de incendios diarios basados en estudios de Van Wagner (FFMC, DMC, DC, ISI, BUI, FWI) cuyas mediciones se basan en observaciones diarias consecutivas de temperatura, humedad relativa,

velocidad del viento y precipitaciones en 24 horas. En cuanto a los datos topográficos, se utilizó información referente a elevación, orientación y pendiente dentro del vecindario de cada incendio. Estos datos fueron usados para crear un modelo de regresión del tamaño de los incendios utilizando árboles de regresión potenciados (BRT). Para cuantificar la importancia relativa del combustible, la topografía y el clima en los incendios a través de las escalas espaciales continuas, se diseñó un enfoque de remuestreo de ventana móvil. De esta forma se logró identificar el umbral de tamaño de incendio en que cambia el control dominante del fuego desde controles de “abajo hacia arriba” (combustible, topografía) por controles de “arriba hacia abajo” (clima).

Este estudio concluye que los incendios más grandes y más severos consumen diferentes tipos de combustible sin preferencia, por lo tanto, estarían más fuertemente relacionados con las condiciones climáticas, mientras que para los incendios más pequeños y menos severos, el tipo de combustible jugó un papel más importante en cuanto al tamaño final del incendio y su cicatriz.

Otro estudio realizado en territorio chino fue llevado a cabo por Li et al. (2022), cuyo objetivo fue construir un modelo de predicción de incendios forestales, tomando en consideración el efecto de la escala espacial sobre las distintas variables que influyen en la propagación de los incendios. Para lograrlo se utilizaron dos métodos estadísticos: Regresión logística geográficamente ponderada (GWLR) y Regresión geográficamente ponderada a múltiples escalas (MGWR).

La GWLR es un método que amplía el modelo de regresión logística tradicional ya que considera un conjunto de parámetros para cada sector dentro del área de estudio, en lugar de considerar un solo conjunto de parámetros para la totalidad de la región. De esta forma es posible observar la variación espacial de las relaciones entre la variable dependiente (ocurrencia de incendios) y las variables independientes (factores meteorológicos, topográficos, antrópicos y de paisaje).

A su vez, la MGWR es un método que amplía la GWLR al considerar la variabilidad de los parámetros a través de distintas escalas. De esta forma se puede analizar la influencia de las distintas variables a través de diferentes escalas y así seleccionar la escala óptima para cada variable.

Los resultados arrojados por este estudio muestran que para esta área de estudio las variables que guardan una mayor correlación con la propagación de incendios forestales son factores meteorológicos como humedad relativa, temperatura del aire, presión atmosférica, horas de sol, precipitación diaria, velocidad del viento; factores topográficos como altitud, pendiente y orientación; y factores antrópicos como la densidad de población y red vial. Por su parte, el modelo MGWR muestra la variación en la influencia de las diferentes variables a distintas escalas.

Se encontró que variables como altitud, orientación, velocidad del viento, temperatura, pendiente y distancia a caminos tuvieron una influencia más significativa en áreas más extensas y su efecto espacial fue relativamente constante, es decir, su impacto en la

propagación del fuego fue consistente en diferentes lugares. Mientras que variables como humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, densidad de población y tipo de vegetación mostraron un efecto más localizado y su heterogeneidad espacial tuvo una influencia más evidente en los resultados del modelo, es decir, las diferencias en estas variables entre distintos lugares influyeron de mayor manera en la propagación del fuego. Es por esto que los autores del estudio sugieren tener en consideración el efecto de la escala espacial de las distintas variables en futuros estudios sobre la predicción espacial de incendios forestales.

Respecto a Canadá, Hély et al. (2010) llevaron a cabo una investigación basada en simulaciones de incendios forestales, utilizando el Sistema de análisis de incendios prescrito (PFAS) para estudiar el efecto de la composición del paisaje en el tamaño de los incendios en los bosques boreales del este de Canadá. Se utilizaron tres riesgos climáticos de incendio basados en la humedad del suelo (DMC). Además, se realizaron 100 simulaciones por riesgo y mosaico, con topografía e hidrología fijadas como referencia constante. Los resultados mostraron que tanto el clima como la composición del paisaje influyen significativamente en el tamaño de los incendios. El clima relacionado con la propagación del fuego explicó casi el 79% de la variación, mientras que la composición del paisaje y las condiciones climáticas para la ignición explicaron 14 y 2% respectivamente.

Por su parte, Bessie y Johnson analizaron la intensidad de incendio superficial y el inicio de fuego de copa utilizando modelos de fuego de Rothermel con datos de combustible de 47 rodales de coníferas subalpinas y 35 años de datos meteorológicos diarios correspondientes al área del Valle Kananaskis en Alberta, Canadá. El modelo dividió las variables en componente de combustible y componente del clima, para luego examinar los roles relativos del combustible y el clima en la intensidad de los incendios.

Los resultados demostraron que tanto la intensidad del fuego en la superficie, como el inicio del fuego en la copa, estuvieron fuertemente relacionados con los componentes del clima y débilmente relacionados con los componentes del combustible, debido a una variabilidad mucho mayor en el clima que en el combustible y una relación más fuerte entre los mecanismos de comportamiento del incendio con el clima que con el combustible. Durante condiciones climáticas extremas, la importancia relativa de los combustibles disminuye ya que todos los rodales alcanzan el umbral requerido para permitir el desarrollo de incendios de copa, es decir, en situaciones que se combinan altas temperaturas, baja humedad y fuertes viento, la influencia de los combustibles en la propagación del fuego se ve limitada, ya que las condiciones climáticas adversas superan cualquier diferencia en la composición o disponibilidad de los combustibles.

### **1.3.2 Estudios sobre incendios forestales en ecosistemas mediterráneos**

Por otra parte, un área con ecosistemas similares a los que podemos encontrar en la zona centro-sur de nuestro país es España, donde se cuenta con varias investigaciones que analizan la ocurrencia de incendios en ecosistemas mediterráneos.

Una de estas investigaciones corresponde a la llevada a cabo por Duane et al. (2021) en la región de Cataluña, cuyo objetivo fue analizar los niveles de conectividad bosque-paisaje que permitieran la propagación del fuego bajo diferentes condiciones climáticas y de sequía. Tomando en consideración los incendios forestales que ocurrieron en Cataluña en el transcurso de 1987 a 2019 y la configuración del paisaje dentro de cada incendio, se propuso determinar los niveles de conectividad en los que un paisaje se vuelve continuo para la propagación de incendios forestales.

Para llevar a cabo el estudio se utilizó un conjunto de datos de incendios forestales que abarcó 554 cicatrices. Se utilizaron las distintas actualizaciones de mapas de cobertura forestal de Cataluña para el periodo 1987-2019 con la finalidad de obtener los datos referentes a la cobertura vegetal. En cuanto a los datos climatológicos, los incendios forestales se categorizaron de acuerdo con las características climáticas del día en que ocurrieron: temperatura, temperatura del punto de rocío, velocidad y dirección del viento, y el Código de Sequía (DC), que forma parte del Índice de Clima de Incendios de Van Wagner. Para calcular el nivel de conectividad forestal funcional asociado a la propagación de cada incendio forestal se utilizó la teoría de grafos y métricas de disponibilidad de hábitat.

Con la finalidad de diferenciar las tipologías de incendios se hizo una clasificación de acuerdo con las condiciones climáticas en las que ocurrieron: días con viento, días áridos y días sin factores climáticos fuertes. Posteriormente, para cada grupo se hizo una clasificación de los incendios en función de las condiciones climáticas a mediano plazo (el Código de Sequía), considerando que los incendios ocurrían durante condiciones secas si el valor de DC estaba por encima del percentil 55. Finalmente se obtuvieron seis tipos diferentes de incendios basados en una combinación de estas condiciones climáticas y de aridez.

Los análisis llevados a cabo en este estudio demostraron que los incendios quemaron diferentes estructuras del paisaje dependiendo de las condiciones climáticas en las que se desarrollaron. Los incendios forestales desarrollados en días con vientos fuertes se vieron menos relacionados con la estructura del paisaje que los demás incendios. De hecho la conectividad forestal no mostró ninguna influencia en el tamaño de las cicatrices cuando los incendios ocurrieron en días ventosos y bajo condiciones de aridez. En estos casos, los incendios pueden propagarse independientemente de la conectividad de los parches de bosque y otros procesos entrarían en juego. Los incendios forestales que ocurrieron en condiciones áridas estuvieron más influenciados por la conectividad forestal en comparación a los incendios producidos en días ventosos. Mientras que la conectividad del bosque sí afectó el tamaño de los incendios cuando ocurrieron en días sin factores climáticos fuertes para condiciones secas y no secas.

### 1.3.3 Estudios sobre incendios forestales en Chile

En el caso de Chile, si bien el estudio de los incendios forestales lleva larga data, el impacto generado por Los grandes incendios de 2016-2017 ha estimulado a las comunidades y las agencias gubernamentales a preguntarse qué políticas de uso de la tierra y factores ambientales son responsables de estos grandes incendios, generando un debate nacional sobre las estrategias que podrían desarrollarse para prevenir y mitigar las consecuencias negativas de futuros grandes incendios. En este contexto se han desarrollado un conjunto de investigaciones que buscan esclarecer las dinámicas que controlan el comportamiento de los incendios forestales en nuestro país.

Un estudio llevado a cabo por McWethy et al. (2021) analizó estas dinámicas a escala sinóptica, evaluando las condiciones atmosféricas en la superficie y la tropósfera libre, asociadas con meses anómalamente altos (activos) versus bajos (inactivos) de área quemada en el centro-sur de Chile (32-41 ° S).

Los autores utilizaron el análisis de componentes principales (PCA) para identificar los patrones espaciales y temporales del área quemada anual normalizada (AAB) en el centro-sur de Chile entre 1984 y 2018. Luego, clasificaron los meses en activos (AAB superior al percentil 75) o inactivos (AAB inferior al percentil 25) y compararon las condiciones atmosféricas sinópticas entre ellos usando datos de reanálisis de ERA 5. También analizaron las anomalías de temperatura superficial del mar (SST) y los índices climáticos como el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y el Modo Anular del Sur (SAM).

En la investigación, se realizaron análisis de tendencias para evaluar un posible aumento en la actividad de los incendios forestales a lo largo del tiempo. Para ello utilizaron datos de área quemada promedio y total anual para analizar tendencias mediante regresión lineal de los mínimos cuadrados (OLS), utilizando el año como variable predictora. Para el análisis climático, se emplearon dos fuentes principales de datos. En cuanto a la circulación troposférica, se utilizaron datos de campo meteorológico global (vientos y altura geopotencial) del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR). Mientras que para la meteorología cercana a la superficie, se utilizó el conjunto de datos CR2Met-V2, que combina datos de estaciones locales y datos de reanálisis, y proporciona temperaturas máximas/mínimas y precipitación para Chile continental con alta resolución espacial.

Se calculó el valor de anomalía climática para cada mes de incendio activo e inactivo, restando el valor promedio mensual a largo plazo (1980-2010) del valor mensual individual. Con esa información se realizaron promedios de anomalías para obtener compuestos de meses activos e inactivos. Además, se exploró la relación entre el área quemada y variables meteorológicas como la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. Para ello utilizaron la correlación de Pearson y pruebas de t de Student para evaluar la fuerza de la relación entre las variables climáticas y el área quemada a lo largo del espacio (desde la región de Valparaíso hasta la región de Los Ríos) y tiempo (temporada completa de incendios, noviembre-marzo).

Se utilizó el déficit de vapor de agua (VPD) como índice de clima de incendios, que combina la precipitación y la temperatura para evaluar las condiciones cálidas y secas de la superficie y el combustible. Para calcular el VPD mensual se utilizaron datos meteorológicos diarios de tres estaciones localizadas a lo largo del área de estudio y se comparó con la temperatura máxima (Tmax), utilizando Tmax como variable más disponible y con proyecciones sólidas para el futuro.

Los resultados de la investigación señalan que ciertos patrones climáticos están asociados con los meses de mayor actividad de incendios forestales en el centro-sur de Chile. Estos patrones incluyen anomalías anticiclónicas ubicadas sobre el océano Pacífico sur, condiciones cálidas en la superficie, anomalías de viento del este que reducen la ventilación de los vientos oceánicos hacia la tierra y patrones de alta presión en latitudes subtropicales y baja presión en la periferia antártica.

Estos resultados resaltan la necesidad de comprender cómo las condiciones atmosféricas y de superficie a gran escala interactuarán con las tendencias a largo plazo en el sistema climático para influir en la actividad de incendios futuros en nuestro país. También se observa un cambio en la relación entre los índices climáticos y el área quemada, lo que sugiere que la temperatura seguirá aumentando su influencia en la propagación de incendios de gran magnitud a pesar de un potencial aumento en las precipitaciones.

También destacan el significativo impacto generado por la actividad humana respecto a la ocurrencia de incendios forestales, donde se encuentra una compleja relación entre la gestión de los incendios, el uso de la tierra y los cambios demográficos. La actividad humana puede tanto promover como inhibir la actividad de incendios, esto depende de factores como la expansión de plantaciones forestales altamente inflamables, el uso intensivo de agua y los esfuerzos de supresión de incendios. Se espera que los esfuerzos de supresión sean más efectivos en años con condiciones climáticas moderadas, pero en años con condiciones de clima extremo, es poco probable que la supresión de incendios pueda contener la propagación de incendios de gran magnitud.

Otra investigación que buscó abordar la influencia de distintos factores en la actividad de incendios en Chile Central, esta vez a escala de paisaje, fue el estudio desarrollado por González et al. (2018), cuyo objetivo fue identificar las tendencias y los controladores de incendios recientes ocurridos a lo largo de seis regiones del centro-sur de Chile (~32-40° S de latitud), una zona con una alta diversidad de ecosistemas y un alto grado de intervención humana.

Para lograr esto se evaluó un conjunto de datos de área quemada obtenida de manera satelital para el período 2001-2017 en seis regiones administrativas del centro-sur de Chile a partir de imágenes del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS). Primero se caracterizó el área quemada a partir de los datos de la Colección 6 de MODIS para luego comparar los resultados con los registros de incendios de CONAF. Para evaluar los impulsores de los incendios se utilizaron modelos lineales generalizados (GLM), modelos aditivos generalizados (GAM) y algoritmo de clasificación de árbol de decisión Random Forests para modelar la probabilidad de ocurrencia de incendios en toda el área de estudio.

Los registros de incendios de CONAF y MODIS indicaron una fuerte variabilidad interanual tanto en la frecuencia de incendios como en el área total quemada y no se mostraron tendencias significativas a lo largo del tiempo. En toda la zona bioclimática más árida del norte del área de estudio, la superficie quemada fue mayor en matorral, pastizales y bosques de plantaciones exóticas. En la zona bioclimática más húmeda del sur del área de estudio, la proporción de área quemada fue mayor en bosques de plantaciones exóticas, pastizales y cultivos anuales, bosques caducifolios nativos y matorral. El área media anual y total quemada (2001-2017) fue mayor en las regiones de Araucanía, Bío-Bío y Maule.

Los resultados del modelo indican que una combinación de variables que representan el clima, la topografía, la presencia humana y el tipo de vegetación explican mejor la variabilidad espacial en la ocurrencia de incendios. La densidad de población, la precipitación de la temporada de crecimiento y la pendiente fueron los predictores más importantes de la probabilidad de que ocurra un incendio, seguidos por el tipo de vegetación y la elevación.

Todos los tipos de vegetación donde el fuego muestra una fuerte preferencia se caracterizaban por una estructura con combustibles abundantes y conectados capaces de promover la propagación del fuego durante condiciones de altas temperaturas y escasas precipitaciones. Durante condiciones extremas de incendio, las condiciones cálidas, secas y ventosas pueden provocar grandes incendios en todos los tipos de vegetación, incluidos los bosques caducifolios que dominan las regiones del sur del área de estudio. Las tendencias de calentamiento y secado que se proyecta que continúen en el futuro para gran parte del centro-sur de Chile se espera que promuevan aún más el desarrollo de grandes incendios en estos bosques ricos en combustible y que a menudo tardan en recuperarse de los incendios. Esto puede resultar en una mayor disminución en la abundancia de conjuntos de bosques nativos.

#### **1.3.4 Hallazgos obtenidos mediante el estudio de los incendios forestales a nivel global**

En síntesis, los resultados obtenidos a través de las distintas investigaciones muestran que los incendios poseen una naturaleza dinámica, que hace que su comportamiento vaya mutando en concordancia con los distintos factores que controlan su propagación. Al inicio de los incendios se demuestra una relación más potente entre el fuego y la estructura del paisaje, la cual define el tipo de combustible presente. Sin embargo a medida que los incendios comienzan a expandirse, el rol que el combustible presenta durante la propagación inicial comienza a perder relevancia frente a la influencia que comienza a ejercer el factor climático/meteorológico, lo que conduce a incendios de mayor magnitud y con una mayor dificultad para ser controlados. Además, se coincide en el hecho de que en presencia de factores climáticos más extremos (fuertes vientos, escasez de precipitaciones) el fuego se propagará independientemente de la estructura del paisaje.

Por lo tanto, si bien se estima que el combustible presente en los paisajes juega un rol no despreciable en la propagación inicial de los incendios, son principalmente el clima y los diversos factores meteorológicos que le acompañan los principales responsables del resultado final correspondiente al tamaño de la cicatriz generada por el incendio.

Estos hallazgos nos hacen reflexionar acerca del impacto generado por el cambio climático en los regímenes de incendios forestales a lo largo del mundo. Con el aumento de las temperaturas globales y los patrones climáticos cambiantes, es probable que las condiciones extremas se vuelvan más frecuentes y severas. Esto implica que la influencia del clima en los incendios forestales puede volverse aún más pronunciada en el futuro, por lo que se requieren estrategias de gestión adaptativas y una comprensión más profunda de cómo las variables interactúan entre sí.

Si bien el conocimiento generado a través de este tipo de estudios ha permitido avanzar en la comprensión de los mecanismos subyacentes de los incendios forestales y ha contribuido al desarrollo de herramientas y estrategias de gestión más efectivas, aún existen desafíos importantes en la comprensión a cabalidad de las dinámicas de los incendios forestales. La complejidad de los sistemas naturales, la variabilidad espacial y temporal de los factores involucrados, y la necesidad de considerar múltiples escalas de análisis son algunos de los aspectos que deben ser considerados en la investigación de los incendios forestales.

## 1.4 Área de estudio

### 1.4.1 Clima

El área de estudio de esta investigación abarca el territorio comprendido entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos (32°-43° S), con una superficie aproximada de 212.000 km<sup>2</sup>, correspondientes al 28% del territorio nacional, el cual presenta un clima altamente variable debido a la combinación de factores geográficos y atmosféricos.

En las investigaciones enfocadas en el centro-sur de Chile se suele dividir el territorio de estudio en dos zonas bioclimáticas: norte y sur (McWethy et al., 2021; Urrutia-Jalabert et al., 2018). Estas zonas representan una transición crítica entre los regímenes de incendios de matorrales secos (limitados por combustible) en el norte, donde los controles primarios sobre la distribución, abundancia y estructura de la vegetación varían desde la disponibilidad limitada de agua y las altas temperaturas hasta los regímenes de incendios en condiciones más húmedas (limitados por el clima) en el sur, donde la disponibilidad y estructura de la vegetación está determinada por la radiación solar y bajas temperaturas (McWethy et al., 2021).

Esta zona en su conjunto resulta de interés para el estudio de incendios forestales ya que además de concentrar la mayor cantidad de incendios que afectan cada temporada al país (98,5% de la ocurrencia histórica nacional de incendios), cuenta con las densidades de población más altas encontradas en Chile, concentrando aproximadamente el 90% de la población (15.5 millones de habitantes) y se espera que en el futuro sea más vulnerable a igniciones producto del cambio climático y la transformación en el uso de la tierra (Urrutia-Jalabert et al., 2018).

La zona bioclimática norte (aproximadamente entre 32°-36° S), incluye las regiones administrativas de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule. Es heterogénea tanto en términos topográficos como ecológicos, experimentando condiciones de verano cálidas y secas (temperaturas máximas superiores a los 30 °C), así como temperaturas invernales moderadas, con una única estación lluviosa corta. Se presenta un clima semiárido de tipo mediterráneo, con precipitaciones medias anuales que oscilan entre 100 y 500 mm en el valle central. Las precipitaciones se concentran en gran medida en el invierno austral (junio-agosto) (Garreaud et al., 2017), lo que conduce a una larga estación seca con alta radiación solar, baja humedad relativa y altas temperaturas desde aproximadamente septiembre hasta abril (Urrutia-Jalabert et al., 2018).

Por otra parte, la zona bioclimática del sur (aproximadamente entre 36°-43° S) abarca las regiones administrativas de Bío-Bío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. En esta zona se experimentan temperaturas anuales moderadas, veranos cálidos e inviernos fríos, con la mayor parte de las precipitaciones concentradas en los meses de invierno. El clima es templado con cierta influencia mediterránea y la precipitación media anual a lo largo del valle central aumenta a 1000-1500 mm. En contraste con la parte norte, los eventos de

precipitación de verano ocurren en el sur cada dos semanas, pero sólo representan el 15% de la acumulación anual (Viale y Garreaud, 2015).

Cabe destacar que en años recientes la zona centro-sur del país vivenció un intenso periodo de disminución en el nivel de precipitaciones, lo que desembocó en una mega sequía que afectó considerablemente la actividad de incendios forestales. El estudio llevado a cabo por González et al. (2018) mostró que el número, área quemada y duración de los grandes incendios aumentó considerablemente durante el periodo de mega sequía 2010-2015, donde el déficit sostenido de precipitaciones fue el factor más crítico en el aumento de la actividad de incendios forestales.

El clima en ambas zonas bioclimáticas está influenciado por la oscilación del fenómeno climático El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), que puede generar cambios en los patrones de precipitación y temperatura. Ejemplo de ello es la variabilidad interanual de las precipitaciones en el área de estudio determinada por dicho fenómeno (ENSO), responsable de aproximadamente la mitad de la varianza de las precipitaciones invernales en Chile central (30°-35° S). Por otro lado, si bien existe una relación débil entre ENSO y las precipitaciones en la zona sur durante el invierno, se observa que las precipitaciones de finales de primavera y verano tienden a estar por debajo de la media durante los años de El Niño (McWethy et al., 2018).

A ello se suma la influencia que ejerce el Modo Anular del Sur (AAO) en el clima del sur de Sudamérica. Se trata de una variabilidad atmosférica de baja frecuencia cuya polaridad positiva se relaciona con vientos del oeste más fuertes en la periferia antártica y cuyos efectos también se llegan a mostrar en las regiones administrativas y las principales ciudades del sur de Chile (37°-47° S) (Quintana y Aceituno, 2012).

#### **1.4.2 Vegetación/ uso de suelo:**

El territorio comprendido dentro del área de estudio presenta paisajes y formaciones vegetales muy variados debido a la diversidad climática y topográfica presente a distintas latitudes en esta zona.

Esta zona está dominada por matorrales de hoja perenne y bosques esclerófilos en tierras bajas y estribaciones. Estas comunidades, según la altitud y la topografía (laderas orientadas al sur o al norte), exhiben un dominio mixto de muchas especies de arbustos y árboles comunes como *Lithraea caustica*, *Peumus boldus*, *Quillaja saponaria*, *Cryptocarya alba*, *Beilschmiedia miersii* (McWethy et al., 2018). El matorral y el bosque esclerófilo hacen la transición a una comunidad similar a la sabana conocida como espinal (dominada por el árbol espinoso *Acacia caven*) en áreas perturbadas por el hombre en la depresión central y las laderas orientales de la cordillera costera desde aproximadamente el río Choapa (32 ° S) hasta el río Laja (36 ° S) (Donoso, 1982). Las laderas secas orientadas hacia el ecuador contienen especies bien adaptadas a condiciones xéricas, por ejemplo, cactus arborescente *Echinopsis chiloensis*, *Puya*, *Trevoa trinervis*, *Lithraea caustica*, *Kageneckia oblonga*, *Colliguaya odorifera*, entre otros (Keeley et al., 2012). Los bosques esclerófilos se encuentran

principalmente en laderas de exposición sur con rodales dominados por árboles como *Quillaja saponaria*, *Cryptocaria alba*, *Beilschmiedia miersii*, *Kosterm* y *Peumus boldus* (Keeley et al., 2012).

Más al sur, el flujo persistente del oeste y el suministro de humedad asociado apoyan extensos bosques templados caducifolios de hoja perenne que se conocen como bosques templados mixtos caducifolios-perennifolios. A mayor altitud (comúnmente por encima de los 1000 m s.n.m.) en la cordillera costera y andina (~34° S) o valle central (~37° S, desde el río Malleco), los bosques matorral y esclerófilo dan paso a bosques templados caducifolios dominados por especies puras o mixtas de *Nothofagus* (*N. obliqua*, *N. alessandrii* y *N. glauca*, *Nothofagaceae*) (Donoso, 1982). En la transición de la región mediterránea de Chile central a los bosques templados (35°30'-38° S), *N. obliqua* y *Nothofagus nervosa* son más abundantes, y las especies siempreverdes (*Nothofagus dombeyi*, *Laureliopsis philippiana*, *Drimys winteri*) dominan el paisaje en las regiones más australes de Los Ríos y Los Lagos (39°-43° S) (Urrutia-Jalabert et al., 2018).

Cabe destacar que en la región en general, y especialmente en la cordillera costera y las estribaciones de los Andes, extensas áreas han experimentado cambios en el uso de la tierra y ahora soportan plantaciones a gran escala y propensas al fuego (*Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*) (Lara et al., 2016). En el área de estudio en la actualidad, aproximadamente el 23,3% de la cobertura del suelo corresponde a bosques nativos, el 18,2% a plantaciones exóticas, el 21% a pastizales y matorrales, y el 21% a tierras agrícolas (González et al., 2018).

# Distribución de cicatrices de incendios en zona bioclimática norte

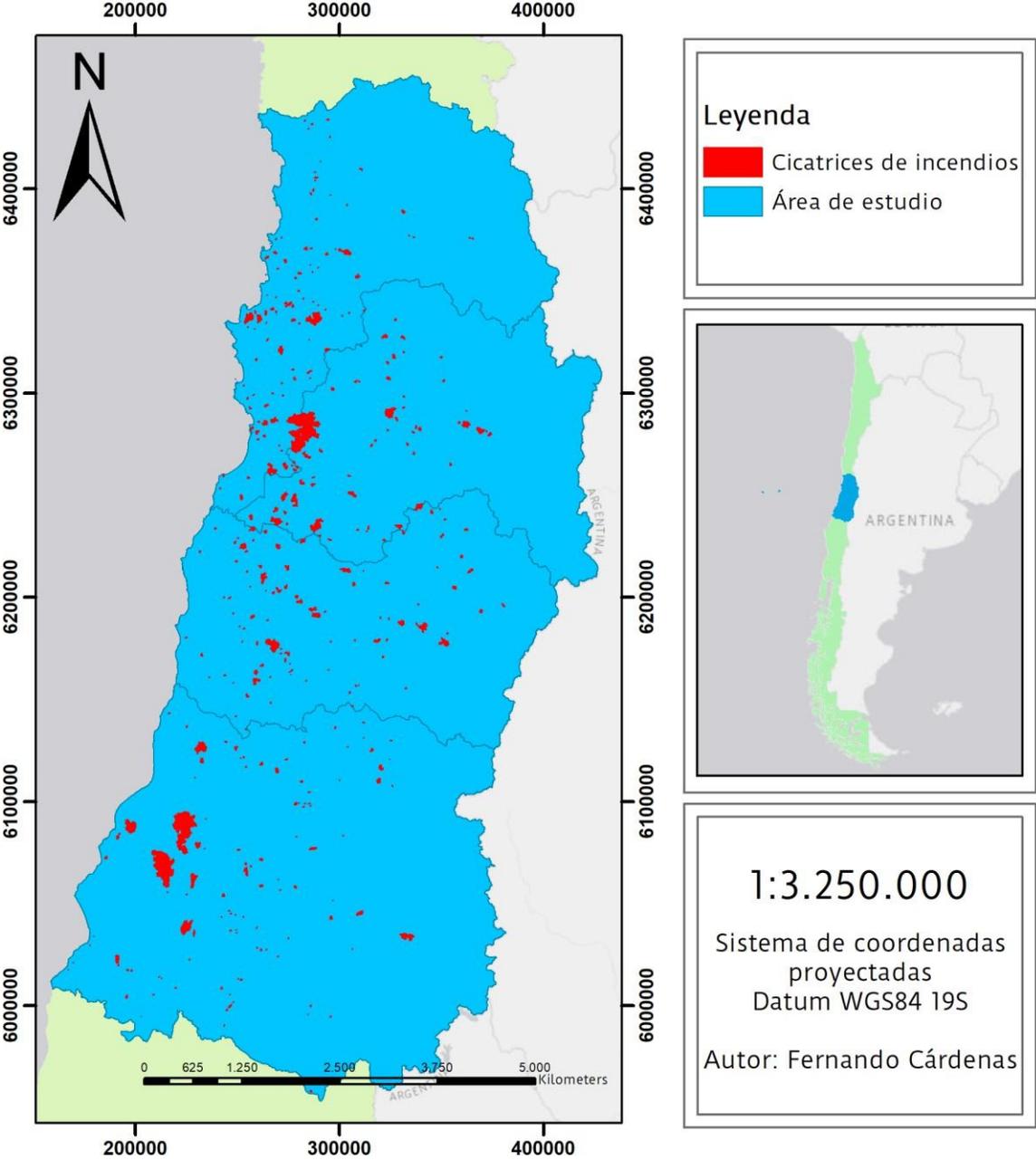


Figura 2: Distribución de las cicatrices de incendio recopiladas para la zona bioclimática norte (RM, Valparaíso, O'Higgins, Maule)

### Distribución de cicatrices de incendios en zona bioclimática sur

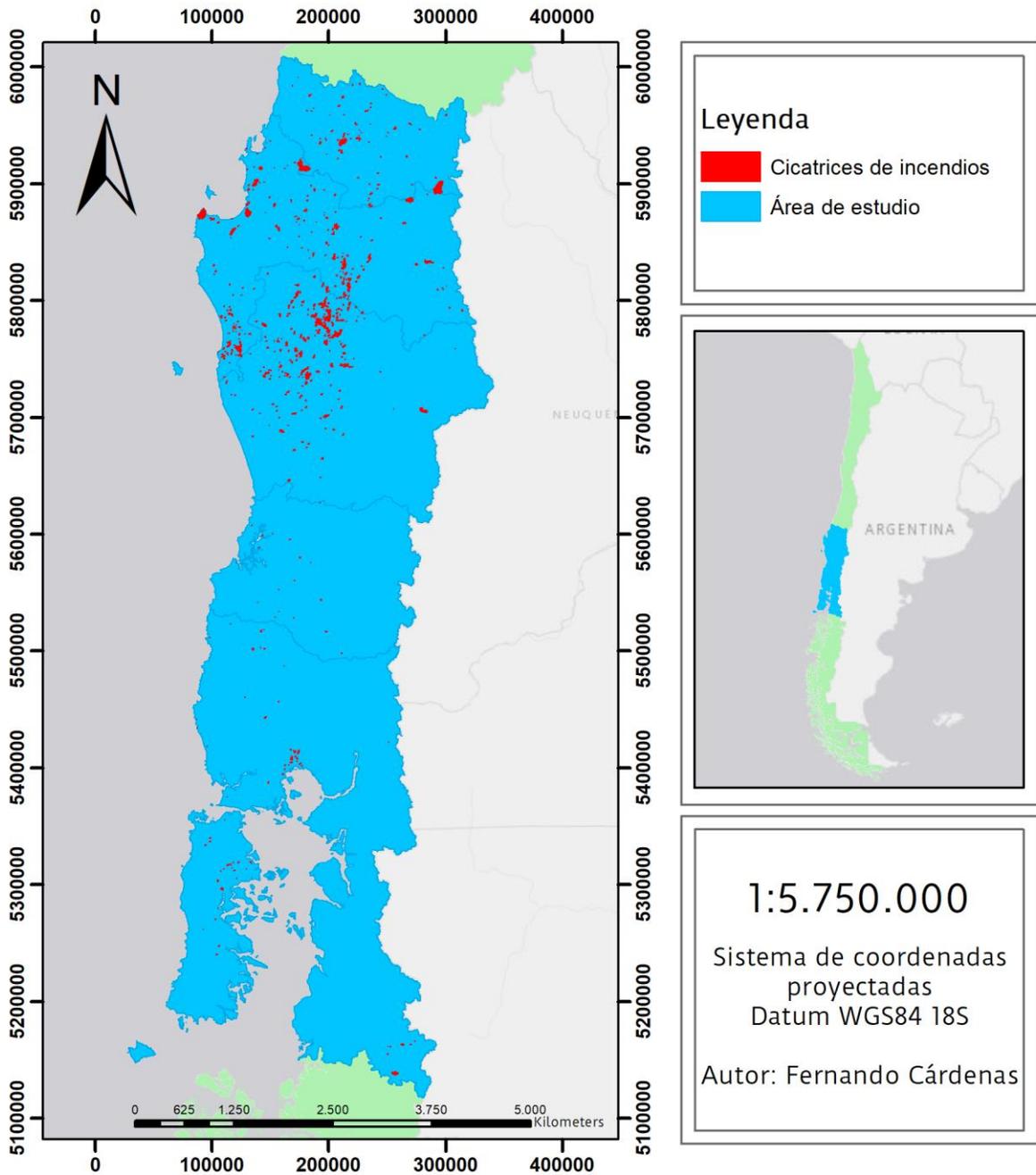


Figura 3: Distribución de las cicatrices de incendio recopiladas para la zona bioclimática sur (Biobío, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos)

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo Principal**

Evaluar la influencia de variables meteorológicas y del paisaje en el tamaño de los incendios forestales ocurridos entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos, Chile, entre los años 2013-2015.

### **1.5.2 Objetivos secundarios**

Específico 1: Generar una base de datos geoespacial que integre y estandarice los atributos de estructura del paisaje y las condiciones atmosféricas asociados a cada cicatriz de incendio forestal.

Específico 2: Identificar las relaciones entre el tamaño de las cicatrices de incendios forestales, las variables componentes del Fire Weather Index (FWI) y el conjunto de métricas del paisaje seleccionadas.

## CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLOGICO

Existen varios estudios que hablan de distintas técnicas de análisis de imágenes mediante la teledetección, las cuales pueden ser aplicadas en la espacialización y análisis de incendios forestales y otros fenómenos físicos que se desarrollan en la superficie terrestre (Delegido et al., 2018). En este sentido, Google Earth Engine (GEE) ofrece las facilidades para que los países en desarrollo generen sus propias bases sobre cicatrices de incendios forestales con datos locales e históricos de alta resolución (Miranda et al., 2022). GEE es una plataforma abierta de computación en la nube que permite el desarrollo de un análisis geoespacial gracias a un catálogo público de imágenes satelitales, topografía, cobertura terrestre y otros conjuntos de datos ambientales (Gorelick et al., 2017).

Es por ello que en esta investigación se utilizó dicha plataforma de análisis de big data, con la finalidad de generar una base de datos detallada de las cicatrices de incendios en Chile a través del desarrollo de un flujo de trabajo flexible, lo que permite reconstruir áreas quemadas individuales e información sobre la gravedad del incendio para todos los incendios históricos informados (Miranda et al., 2022). Todo esto fue posible gracias al proyecto “Mapeo Semiautomático de Cicatrices Históricas de Incendios” impulsado por el CR2 y cuyos resultados (8.351 cicatrices de incendios, para el territorio comprendido entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos, periodo 1985-2018) están disponibles para ser utilizados en futuras investigaciones: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.941127>

### 2.1 Puntos incendios forestales CONAF

Para construir una base de datos histórica de cicatrices de incendios, se utilizó un subconjunto de la base de datos pública de incendios forestales proporcionada por el Servicio Forestal de Chile (Corporación Nacional Forestal – CONAF). Este organismo es el encargado de registrar y almacenar información sobre la ubicación, fecha, causa, área afectada por uso de suelo, fecha y hora del primer control y supresión del fuego, para todos los incendios (> 0,01 ha).

Dada la disponibilidad de imágenes, la calidad y la resolución espacial de los programas Landsat, se extrajeron datos solo para incendios con un área quemada de más de 10 ha (según la información de CONAF) que hubieran sucedido entre los años 2013-2015 (806 cicatrices). Este umbral de corte de 10 ha para el tamaño de las cicatrices se debe a que dichos incendios representan más del 93 % del área quemada según información oficial de CONAF para el período 1985-2018. Además, los pequeños incendios suelen confundirse con las quemas agrícolas (Miranda et al., 2022). En cuanto al periodo de estudio tan acotado, se debe a que posteriormente se utilizó el mapa de cobertura del suelo más preciso elaborado para el país en 2014 (Zhao et al., 2016) para recopilar información referente a las coberturas de suelo presentes en cada cicatriz, con la finalidad de calcular métricas del paisaje que serán incluidas como variables dependientes en el posterior análisis.

## 2.2 Obtención cicatrices de incendios en GEE

La base de datos de cicatrices de incendios fue generada usando programación JavaScript. El flujo de trabajo detallado del script desarrollado para crear cicatrices de incendios individuales se muestra en la Fig. 3 y consta de los siguientes pasos consecutivos: (1) selección e identificación de datos de entrada; (2) elaboración de imágenes pre y post incendio; (3) cálculo de máscaras y vectorización; (4) filtrado espacial y espectral; y (5) generación y exportación de datos de salida.

En primer lugar, los datos de entrada en el paso 1 se encontraban en formato tipo puntos y contaban con coordenadas geográficas que representaban el punto de ignición o un punto dentro del área quemada. Los datos de entrada se traspasaron a una lista para procesar y extraer las cicatrices de incendios individuales. Alrededor de cada punto de entrada, se creó un área de amortiguamiento circular (buffer) en función del área quemada estimada, con las dimensiones precisas dadas por  $\text{Bufferradius} = \log(\text{área quemada}) \cdot 2000$ . El uso de este buffer fue necesario ya que existía la posibilidad de se contara con el punto de ignición del fuego solo como referencia espacial, por lo que en varios casos fue necesario explorar el área cercana a este punto para lograr interceptar con los límites de la cicatriz de incendio.

En el paso 2, se preparan dos colecciones de imágenes (conjuntos de imágenes) para cada incendio forestal, según la fecha de inicio del incendio. Se usó la reflectancia superficial corregida atmosféricamente y las imágenes ortorrectificadas de Landsat 7: "LANDSAT/LE07/C01/T1\_SR" (1999–2021), con una colección de imágenes para una condición previa al incendio y otra para una condición posterior al incendio, todas las cuales están disponibles en GEE. Para cada colección de imágenes, se aplicó la función reductora "mosaico" o "mediana" para obtener una imagen única de las condiciones del paisaje en momentos lo más cercanos posible antes y después de un evento de incendio.

En el paso 3 se calcularon todos los índices espectrales (Tabla 1) utilizados para identificar las áreas quemadas y no quemadas. El índice de área quemada más utilizado es el índice normalizado de área quemada (NBR) y su forma multitemporal, el índice normalizado de área quemada delta (dNBR) (Fassnacht et al., 2021). Estos índices reducen los errores de detección causados por sombras, cuerpos de agua, cosecha agrícola o de árboles, inundaciones y deshielo (Chuvieco et al., 2019; Long et al., 2019).

El paso 4 involucró la selección del valor del índice RdNBR para cada incendio forestal que capturase mejor el área quemada según la interpretación visual. Este fue un proceso interactivo (incendio por incendio) basado en la evaluación visual del mejor valor de RdNBR que delimitara cada cicatriz de incendio individual. El perímetro del área quemada para cada cicatriz de incendio se convirtió a formato vectorial (shape) para posteriormente someterlo a filtrado espacial y espectral.

Finalmente en el paso 5, una vez delimitadas las cicatrices de incendios, se calculó la severidad de cada incendio a partir de la RdNBR en formato raster continuo. Cada cicatriz de incendio y su gravedad se exportaron en formato vectorial y ráster, junto con las imágenes Landsat multiespectrales corregidas pre y post incendio y el índice RdNBR. Los datos

vectoriales contienen información sobre el registro de incendios, el área calculada y las respuestas espectrales utilizadas para el filtrado.

<b>Índice</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Descripción</b>
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	NDVI	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	Calcula la salud de la vegetación
Índice Normalizado de Área Quemada	NBR	$(\rho\text{NIR} - \rho\text{SWIR}) / (\rho\text{NIR} + \rho\text{SWIR})$	Detecta áreas quemadas
Índice Normalizado de Área Quemada Delta	dNBR	$\text{NBR}_{\text{preincendio}} - \text{NBR}_{\text{postincendio}}$	Detecta cambios en las bandas NIR y SWIR para identificar áreas quemadas y severidad del fuego
Índice Normalizado de Área Quemada por Diferencia Relativa	RdNBR	$\text{NBR}_{\text{pre}} - \text{NBR}_{\text{post}} / \sqrt{\text{ABS}(\text{NBR}_{\text{pre}})}$	Normaliza los cambios según el estado de la vegetación previo al incendio

*Tabla 1: Índices espectrales utilizados para diferenciar áreas quemadas y no quemadas*

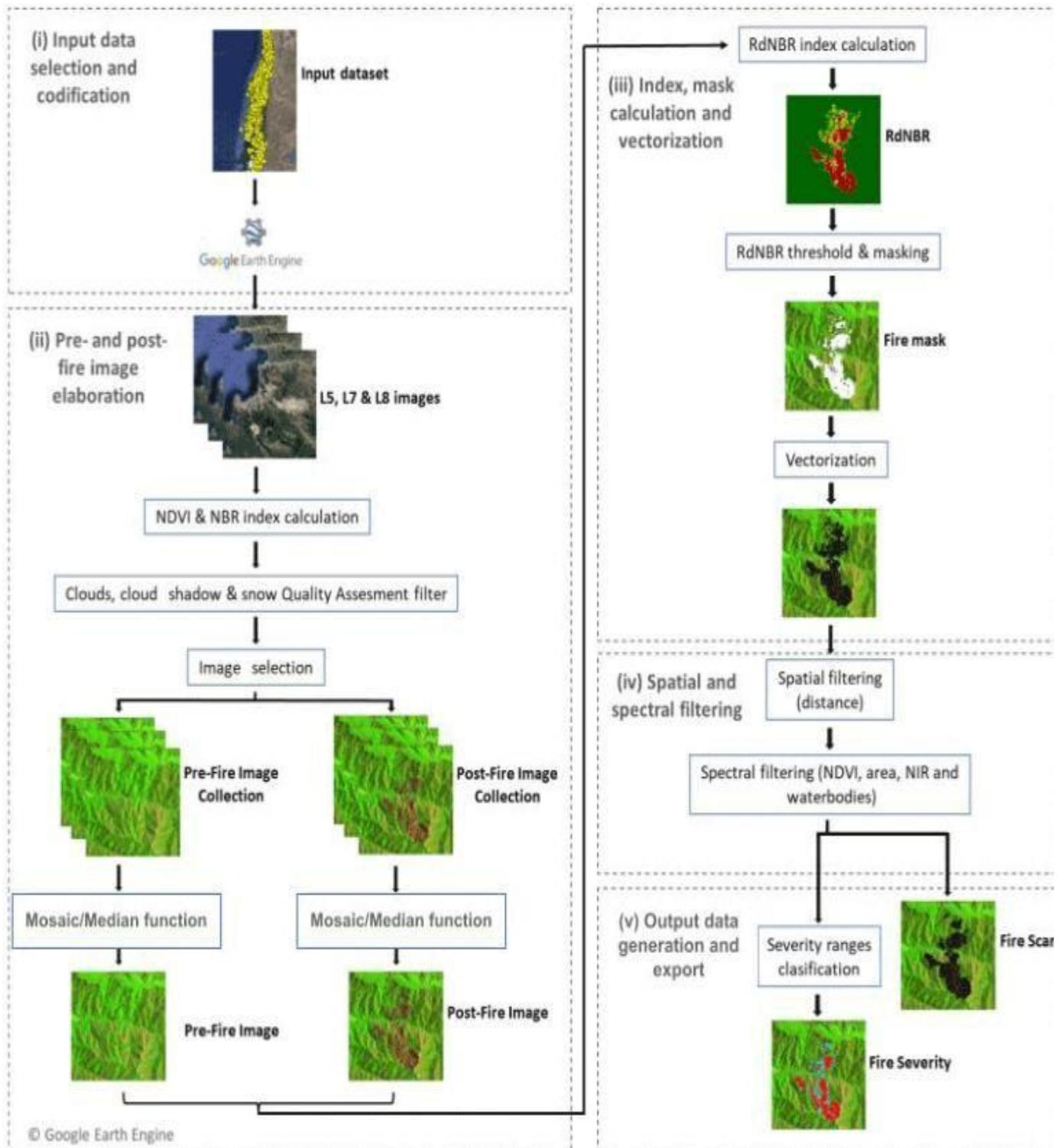


Figura 4: Diagrama metodología utilizada para obtención de cicatrices de incendio (Fuente: Miranda et al., 2022)

De esta forma se logró obtener un total de 806 cicatrices de incendio para el área de estudio y periodo de tiempo de esta investigación. Para cada cicatriz se generaron dos archivos vectoriales (.shp) con el perímetro de la cicatriz de incendio y la clasificación de gravedad de la cicatriz de incendio.

Al vectorizar los parches quemados identificados inicialmente, posteriormente se pudo agregar una serie de variables correspondiente a las condiciones meteorológicas y del paisaje presentes al momento de desarrollarse cada incendio detectado.

En cuanto a los datos meteorológicos, el FWI y sus componentes fueron obtenidos mediante el *Copernicus Emergency Management Service*, que mediante reanálisis ECMWF ERA5, al combinar datos de modelos y un amplio conjunto de observaciones de calidad controlada, proporciona un conjunto de datos globalmente completo y consistente y se considera un buen indicador de las condiciones atmosféricas observadas.

Finalmente se dividió el conjunto de cicatrices de incendio en categorías por tamaño, las cuales se designaron en base a una adaptación de las categorías determinadas por González et al. (2018): <10 ha, 10-50 ha, 50-100 ha, 100-200 ha, >200 ha.

### **2.3 Variables meteorológicas y su influencia en el desarrollo de incendios forestales**

A lo largo de los años se han propuesto varios indicadores de clima de incendios y aunque todos ellos han sido desarrollados para informar sobre el riesgo de incendio, cada uno tiene sus propias cualidades. Esta investigación se enfoca en el Índice de Clima de Incendios (FWI) del Sistema Canadiense de Clasificación de Peligro de Incendios Forestales (Van Wagner, 1987). Este índice representa el peligro potencial de incendios en lugar de la ocurrencia real de estos, determinando cómo las condiciones meteorológicas generan dinámicas propicias para el desarrollo y propagación de incendios. Para ello se tienen en cuenta los cuatro factores principales del clima de incendios a escala mundial (temperatura, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento).

Se han demostrado relaciones claras entre el FWI y el área quemada en los modelos del sistema terrestre (ESM) (Abatzoglou et al., 2018; Grillakis et al., 2022), lo que hace que este índice sea relevante para evaluar. Finalmente, este índice se puede utilizar a escala global para la previsibilidad del peligro de incendios y los sistemas de alerta (de Groot et al., 2015; Bedia et al., 2018) o la actividad de incendios bajo el cambio climático proyectado (Abatzoglou et al., 2018).

Los datos sobre el FWI se obtuvieron a través del Copernicus Climate Change Service que cuenta con una resolución satelital de 25km para el periodo 1980-2018. El FWI se calcula usando variables climáticas obtenidas a través del reanálisis de datos del ECMWF ERA5 (Vitolo et al. 2020).

A partir del año 2019, ECMWF lanzó una base de datos de reanálisis de nueva generación, ERA5, cuyas principales variables como temperatura, humedad, precipitación y velocidad del viento se utilizan para impulsar el modelo GEM. Los campos atmosféricos de ERA5 se

someten a un procesamiento previo para representar las condiciones atmosféricas a las 12:00 del mediodía local nominal, ya que corresponde al momento en que se considera que se encuentran las peores condiciones de incendio en la mayoría de las regiones.

El sistema canadiense FWI consta de seis índices (Figura 5): tres medidas de humedad del suelo y tres índices de comportamiento del fuego (Vitolo et al., 2020).

Las tres medidas de humedad del suelo son calculadas con diferentes códigos según el tipo de combustible y la profundidad de la capa:

Fine Fuel Moisture Code (FFMC) se refiere al contenido de humedad de la hojarasca y otros combustibles finos curados que ocupan las primeras capas del lecho de combustible (capa superficial, de 1 a 2 cm de profundidad). Este código es un indicador de la relativa facilidad de encendido y la inflamabilidad del combustible fino y se caracteriza por una rápida respuesta a las variaciones climáticas, con un retraso de 16 horas en condiciones estándar. La escala de este código de humedad varía de 0 a 99.

Duff Moisture Code (DMC) se refiere al contenido de humedad de capas orgánicas compactadas sueltas de profundidad moderada (capa de materia muerta, 5–10 cm) y da una indicación del consumo de combustible en capas de materia muerta moderada y material leñoso de tamaño mediano. DMC se caracteriza por una respuesta a mediano plazo (alrededor de 10 a 12 días) a las variaciones climáticas. Esta también es una calificación numérica pero definida en el rango  $[0, +\infty]$ .

Drought Code (DC) se refiere al contenido de humedad de las capas orgánicas profundas y compactas (capa profunda, 10–20 cm). Este código es un indicador útil de los efectos de las sequías estacionales en los combustibles forestales y la cantidad de combustión lenta en capas profundas de mantillo y troncos grandes. DC tiene una respuesta a largo plazo (alrededor de 50 días) a las variaciones climáticas. La calificación se define en el rango  $[0, +\infty]$ .

A partir de estos cálculos de humedad del combustible impulsados por el clima, el modelo FWI genera índices de comportamiento del fuego en términos de:

Initial Spread Index (ISI) una medida de la velocidad a la que se propagaría un incendio en sus primeras etapas poco después de la ignición. Combina los efectos del viento y el FFMC en la tasa de propagación sin la influencia de cantidades variables de combustible. ISI es una calificación numérica definida en el rango  $[0, +\infty]$ .

Build Up Index (BUI) la cantidad total de combustible disponible para la combustión. Es una combinación ponderada de DMC y DC y se define en el rango  $[0, +\infty]$ .

Finalmente, con estos datos el modelo calcula el FWI:

Fire Weather Index (FWI) es un índice que se genera mediante la combinación del ISI y el BUI, y es una clasificación numérica de la intensidad potencial del incendio frontal. Indica la intensidad del fuego al combinar la tasa de propagación del fuego con la cantidad de combustible que se consume. Los valores del FWI no tienen un límite superior, pero de todas formas un valor sobre 50 se considera extremo en muchos lugares.

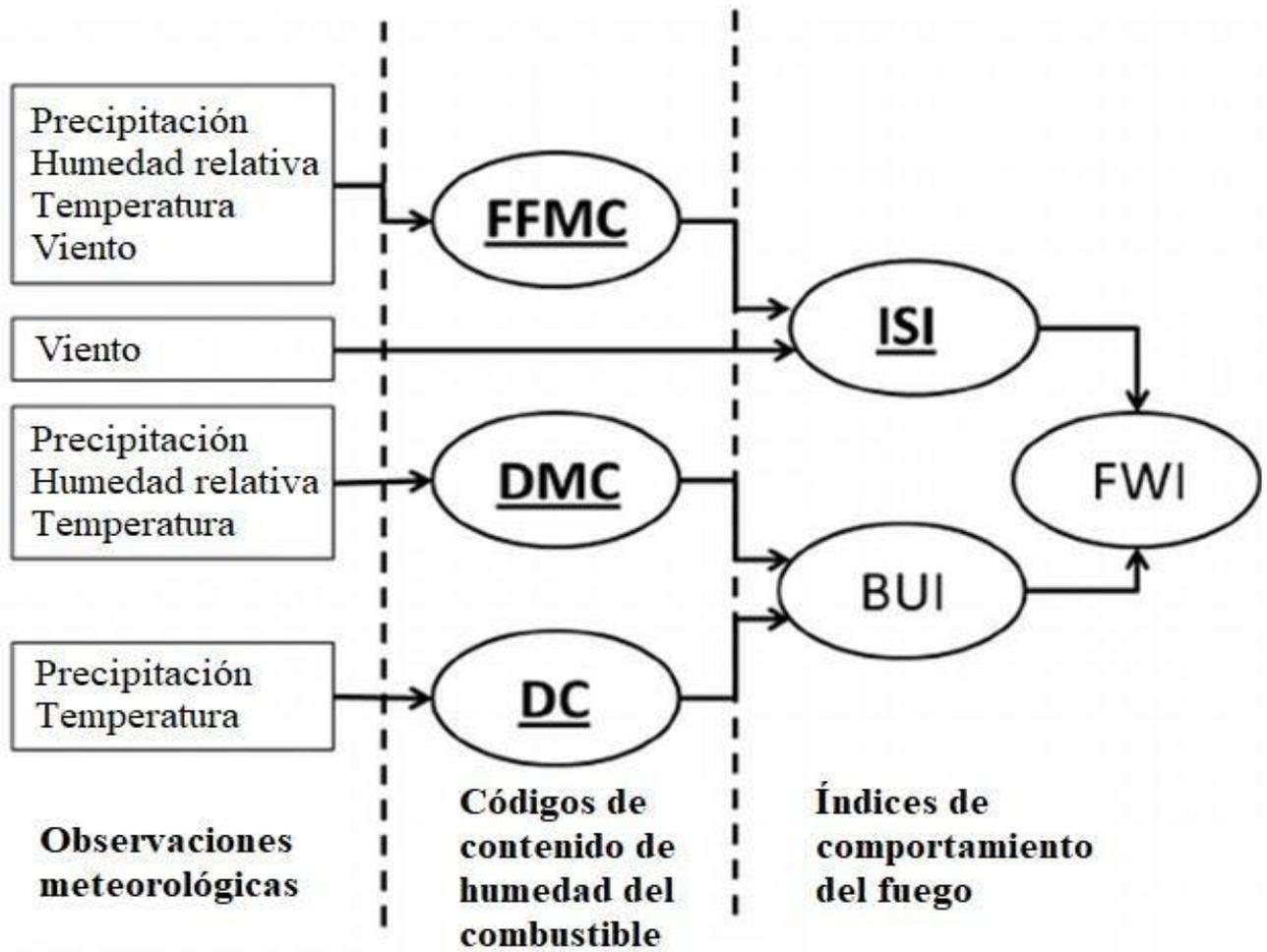


Figura 5: Estructura del sistema Fire Weather Index

## 2.4 Métricas del paisaje y su influencia en el desarrollo de incendios forestales

Varios estudios han mostrado que la estructura del paisaje forestal tiene un efecto significativo en la propagación de los incendios forestales a diferentes escalas espaciales, ya que la probabilidad de propagación del fuego se ve afectada por los tipos de uso/cubierta del suelo y su disposición espacial (Bajocco y Ricotta, 2008; Vega-García y Chuvieco, 2006). Sobre la interacción entre la estructura del paisaje y los incendios forestales se ha planteado que los tipos de uso/cubierta del suelo con alta carga de combustible (como los bosques) y los paisajes homogéneos facilitan la propagación del fuego, además los incendios reducen el combustible por la degradación de los bosques y a la vez aumentan el nivel de homogeneidad del paisaje (Loepfe et al., 2010)

Para corroborar estas aseveraciones resulta muy útil el uso de métricas del paisaje ya que son un instrumento de análisis que permite caracterizar los patrones de fragmentación e interrelacionar esto con las características propias de los regímenes de incendios (Blondel y Fernandez, 2012) En este sentido FRAGSTATS es un programa de análisis de patrones espaciales diseñado para cuantificar las métricas del paisaje a varias escalas espaciales, que además ha servido de base para el desarrollo de nuevas plataformas que permiten llevar a cabo dichos análisis con mayor capacidad de manejo de datos y facilidad para compartir los resultados (Hesselbarth et al., 2019).

Las métricas del paisaje miden las características estructurales o funcionales de un territorio delimitado para cuantificar sus patrones espaciales y sus cambios a través del espacio y del tiempo. Estas métricas se utilizan ampliamente en ecología, siguiendo la hipótesis de que los patrones espaciales pueden explicar los procesos y funciones ecológicos en un paisaje (Turner y Gardner, 1991). La incorporación de la dinámica de la cubierta terrestre o el cambio de patrones espaciales del paisaje como predictor del régimen de incendios es un ejemplo de cómo se podría ampliar la aplicación de métricas del paisaje y llegar a una mejor comprensión de los impulsores de incendios, escenarios presentes/futuros de la cubierta terrestre y el impacto del cambio climático en el riesgo de incendios (Viedma et al., 2006; Ricotta et al., 2012).

En el campo de la planificación paisajística orientada a la protección contra incendios, el uso de este instrumento permite disminuir el riesgo de ignición, evitando las cubiertas terrestres peligrosas y entregando valiosa información sobre sus patrones espaciales y sus interacciones (Miranda et al., 2022). Además podría ser un recurso valioso para la prevención de incendios en zonas de riesgo, así como para apoyar las estrategias de planificación de la extinción, por ejemplo, asignando los recursos pertinentes en función del riesgo asociado a los patrones topológicos detectados en la zona. Esto se reflejaría en estrategias de extinción de incendios más eficientes y efectivas, además de proporcionar información de apoyo a la hora de desarrollar planes de tratamiento del paisaje (por ejemplo, tratamiento del combustible, incendios prescritos o clareos) que tengan como objetivo minimizar el impacto de futuros incendios forestales (Miranda et al., 2022).

El análisis del tamaño y la complejidad de la forma de cicatrices de incendios individuales puede proporcionar mejores estimaciones del consumo de combustible, la intensidad del fuego, la recuperación de la vegetación tras el incendio y sus efectos en los cambios del paisaje para comprender mejor la dinámica regional de los incendios.

La reducción del riesgo de incendios es una de las cuestiones más importantes en la gestión y planificación forestal, y las métricas que miden la fragmentación han proporcionado buenos resultados a la hora de explicar la propagación de los incendios, y se ha descubierto que la gravedad de los incendios depende en buena medida de la composición del bosque, es decir, del tipo de cubierta, y es más probable que sea baja en bosques con una alta densidad de manchas y una cubierta arbórea diversa (Román-Cuesta et al., 2009).

Tradicionalmente, las métricas del paisaje se han utilizado en mayor medida para evaluar los efectos de los incendios forestales en el paisaje. Sin embargo, en este estudio se adoptó un enfoque inverso, con el objetivo de analizar la influencia de las métricas del paisaje en la propagación de los incendios forestales.

Examinando métricas del paisaje como la densidad de bordes, el índice de agregación y el índice de diversidad de Shannon se puede llegar a comprender de mejor manera cómo la disposición espacial y la heterogeneidad del paisaje contribuyen a la propagación de los incendios forestales. Estos estudios pueden ayudar a identificar patrones y procesos clave que afectan la dinámica del fuego, lo que a su vez puede guiar la gestión del paisaje y las estrategias de prevención y control de incendios forestales (Ryu et al., 2007)

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó *landscapemetrics*, un paquete en R de código abierto derivado de *FRAGSTATS*, que cuenta con varias mejoras que permiten llevar a cabo los análisis de manera más fluida y con una mayor cantidad de datos ya que incluye una amplia colección de métricas de paisaje de uso común en un flujo de trabajo ordenado y proporciona muchas funciones de utilidad para visualizar, extraer y muestrear dichas métricas (Hesselbarth et al., 2019).

El núcleo de *landscapemetrics* comprende funciones para calcular métricas del paisaje y utiliza datos raster como entrada. Para llevar a cabo el cálculo es necesario comprobar si el ráster de entrada es adecuado para la medición del paisaje. Para eso se debe verificar si el sistema de referencia de coordenadas está proyectado, si las unidades de celda están en metros, si las clases están decodificadas como valores enteros y si el número de valores diferentes es razonable (en otras palabras, si hay clases discretas de cobertura del suelo). El raster utilizado en este caso corresponde al Land cover de Zhao (2014), ya que como se mencionó anteriormente es el Land cover más preciso hasta el momento realizado para todo el territorio nacional.

La versión actual del software incluye métricas en todos los niveles disponibles, es decir, a nivel de parche, de clase y de paisaje. En esta investigación se usaron métricas a nivel de paisaje ya que describen las características del paisaje en su totalidad (McGarigal et al. 2012). La paisajimetría incluye, entre otras, métricas de área, superficie, densidad, diversidad, forma, ecotono, hábitat interior, distancia, vecindad y conectividad. En cuanto a las métricas

analizadas en esta investigación, se seleccionó un conjunto de 5 indicadores que definen la composición, configuración y diversidad en la estructura de los polígonos correspondientes a las cicatrices de incendio. Estos son Índice de Agregación (Aggregation Index – AI), Índice de Contagio (Contagion Index – CNTG), Densidad del borde (Edge Density – ED), Borde Total (Total Edge – TE) y el Índice de Diversidad de Shannon (Shannon Diversity Index – SHDI).

<b>Métrica</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Descripción</b>
Índice de Agregación	AI	Evalúa el grado de agrupamiento de los parches de vegetación.
Índice de Contagio	CNTG	Mide la tendencia de los parches de diferentes coberturas del suelo a mezclarse entre sí.
Densidad del borde	ED	Cuantifica la cantidad de borde en relación con el área total del paisaje.
Borde Total	TE	Cuantifica la longitud total de todos los bordes en el paisaje.
Índice de diversidad de Shannon	SHDI	Evalúa la diversidad de tipos de cobertura del suelo en el paisaje.

*Tabla 2: Métricas del paisaje utilizadas en el análisis*

## CAPÍTULO 3: RESULTADOS

### 3.1 Resultados Generales

A nivel general, al comparar las cifras correspondientes a cada región administrativa se puede observar una gran variabilidad tanto en la cantidad de incendios como en la superficie quemada total (figura 6). En total se lograron obtener 806 cicatrices de incendio, con una superficie total correspondiente a 87.303,22 ha. Llama la atención el hecho de que si bien las regiones del Biobío y la Araucanía concentran la mayor cantidad de incendios (205 y 169 respectivamente), muestran valores relativamente bajos respecto a la superficie quemada total (9.913,19 ha y 13.295,27 ha respectivamente), en comparación con la Región Metropolitana y el Maule, que si bien cuentan con una baja cantidad de incendios (56 y 99 respectivamente) concentran los valores de superficie quemada total más altos en toda el área de estudio (19.549,37 ha y 25.219,78 ha respectivamente), superando en conjunto el 50% del área quemada total para el área de estudio en el periodo 2013-2015. Las regiones del extremo sur del área de estudio (Los Ríos y Los Lagos) concentran los niveles más bajos tanto de cantidad de incendios como de superficie quemada total, lo que tiene sentido considerando las condiciones climáticas de dicha zona, menos favorables en general para la propagación de incendios forestales.

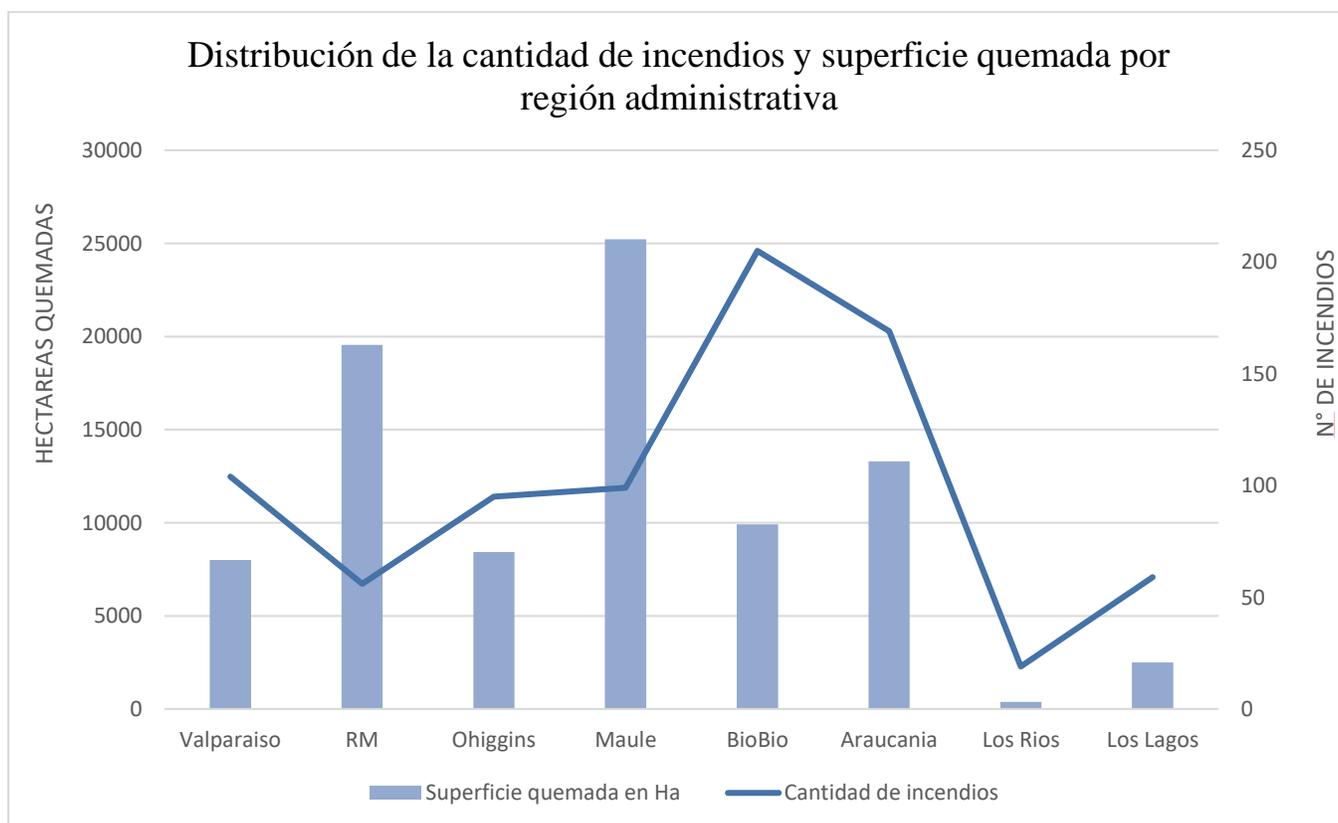


Figura 6: Cantidad de incendios y superficie quemada (Ha) por región administrativa

<b>Región</b>	<b>Cantidad de incendios</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Superficie quemada en hectáreas</b>	<b>Porcentaje</b>
Valparaíso	104	13%	8005,06	9%
RM	56	7%	19549,37	22%
O'Higgins	95	12%	8429,19	10%
Maule	99	12%	25219,78	29%
Biobío	205	25%	9913,19	11%
Araucanía	169	21%	13295,27	15%
Los Ríos	19	2%	387,26	1% (0,004)
Los Lagos	59	7%	2504,1	3%
<b>Total General</b>	<b>806</b>	<b>100%</b>	<b>87303,22</b>	<b>100%</b>

*Tabla 3: Porcentaje incendios y superficie quemada (Ha) por región administrativa*

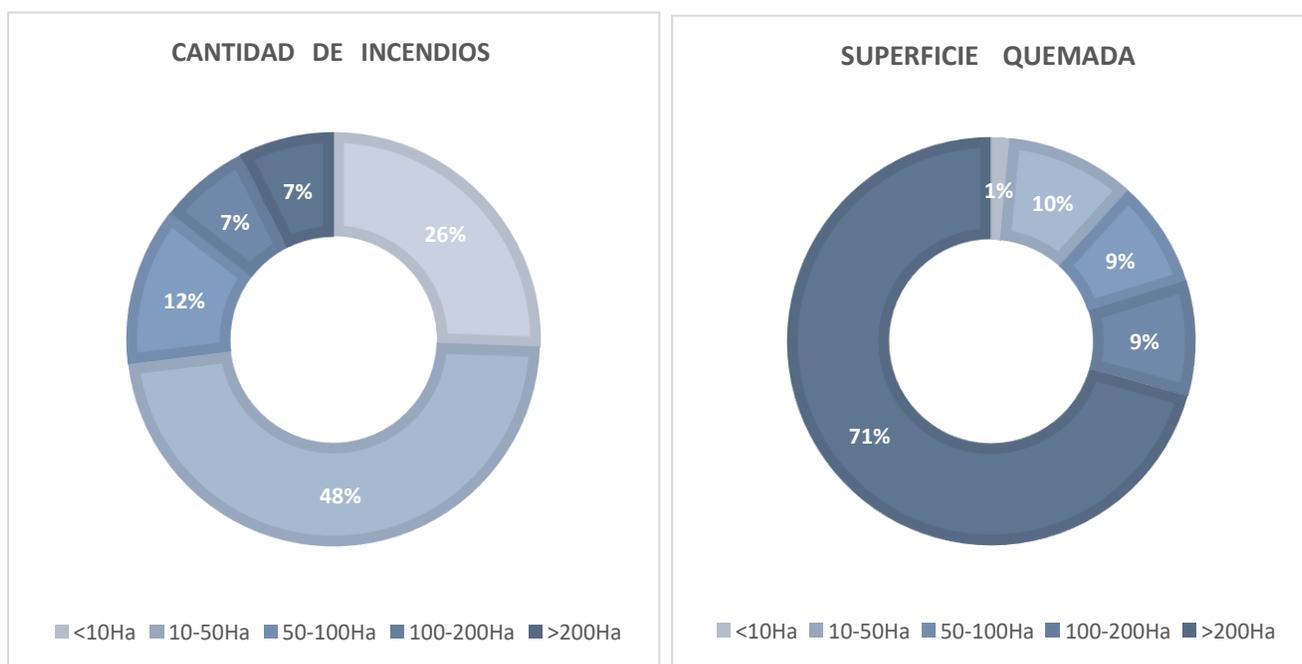
Al incluir en el análisis las categorías de tamaño de cicatrices de incendio (tabla 4), se observa que a nivel general la mayor cantidad de incendios se ubica en la categoría 10-50ha, concentrando casi el 50% del total de cantidad de incendios, mientras que los incendios de gran magnitud (>100 ha) muestra los valores más bajos de cantidad de incendios. Sin embargo, al comparar estos datos con la superficie quemada total (tabla 5) se observa que la categoría de mega incendios (>200 ha) concentra la mayor cantidad de superficie quemada del área de estudio, llegando a un total de 61.726,36ha (71% del total) (figura 8), mientras que las categorías de incendios más pequeños (<50 ha) si bien son los que concentran la mayor cantidad de incendios, apenas logran concentrar 10.192,67 ha (11% del total). Esta situación evidencia que, a lo largo del área de estudio, si bien la mayor cantidad de incendios detectados pueden ser clasificados como moderados o leves, son los mega incendios los que indiscutiblemente generan el mayor impacto en el territorio, aportando la mayor cantidad de hectáreas quemadas para el área de estudio.

<b>Región</b>	<b>1-10Ha</b>	<b>10-50Ha</b>	<b>50-100Ha</b>	<b>100-200Ha</b>	<b>200+Ha</b>	<b>Total general</b>
Valparaíso	25	54	13	7	5	104
RM	1	32	8	6	9	56
O'Higgins	12	48	18	8	9	95
Maule	38	36	11	3	11	99
Biobío	71	97	17	12	8	205
Araucanía	35	75	25	17	17	169
Los Ríos	6	11	2			19
Los Lagos	18	30	6	4	1	59
<b>Total general</b>	<b>206</b>	<b>383</b>	<b>100</b>	<b>57</b>	<b>60</b>	<b>806</b>

*Tabla 4: N° de incendios según categoría de tamaño de cicatriz para las regiones administrativas del área de estudio*

Región	1-10Ha	10-50Ha	50-100Ha	100-200Ha	200+Ha	Total general
Valparaíso	179,56	1236,13	995,29	983,01	4611,07	8005,06
RM	7,50	967,38	595,79	837,52	17141,19	19549,37
O'Higgins	82,34	1063,15	1371,12	1185,61	4726,97	8429,19
Maule	220,05	795,82	855,74	486,71	22861,45	25219,78
Biobío	450,83	2143,23	1247,71	1548,26	4523,15	9913,19
Araucanía	219,72	1731,01	1864,77	2302,33	7177,43	13295,27
Los Ríos	32,45	239,11	115,69			387,26
Los Lagos	111,71	712,66	429,36	565,27	685,10	2504,10
<b>Total general</b>	<b>1304,18</b>	<b>8888,49</b>	<b>7475,47</b>	<b>7908,71</b>	<b>61726,36</b>	<b>87303,22</b>

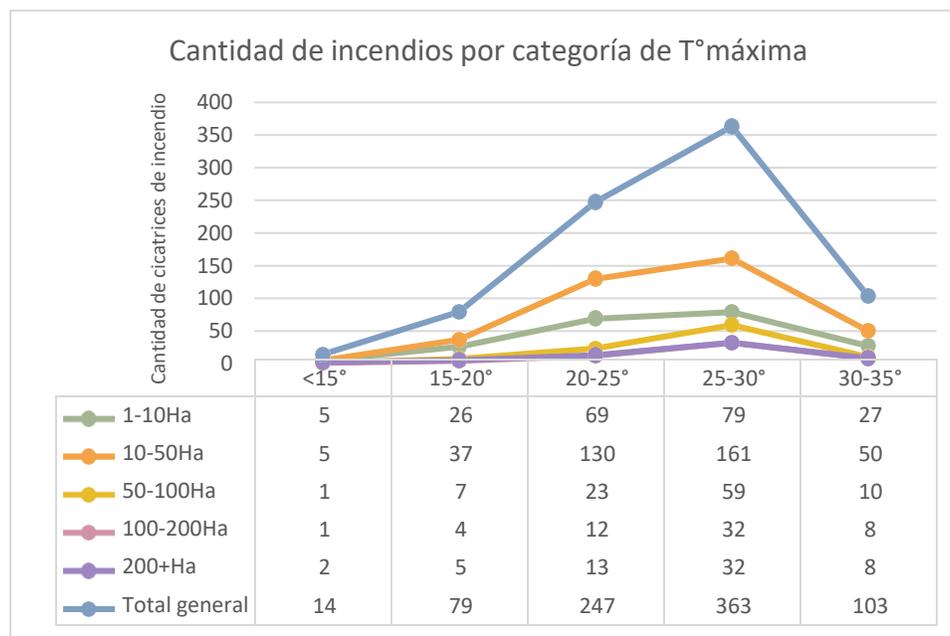
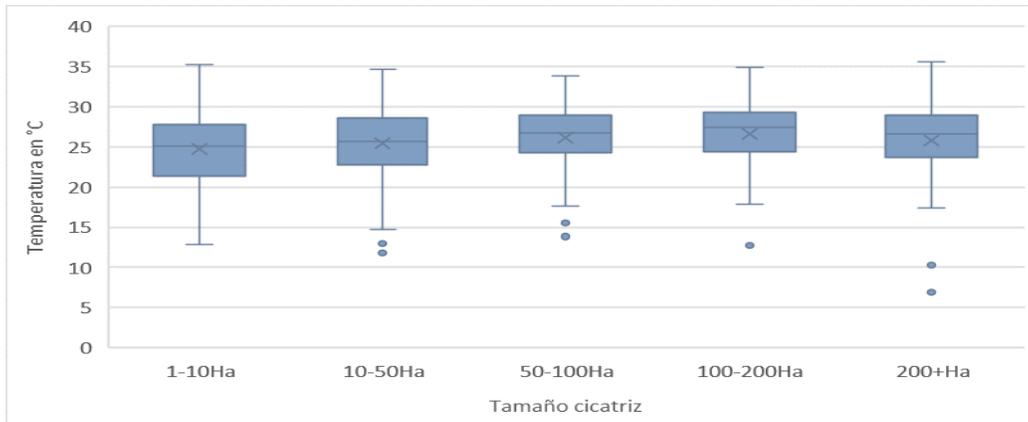
Tabla 5: Hectáreas incendiadas según categoría de tamaño de cicatriz para las regiones administrativas del área de estudio



Figuras 7 y 8: Porcentaje de cantidad de incendios y hectáreas quemadas por categoría de tamaño de cicatriz

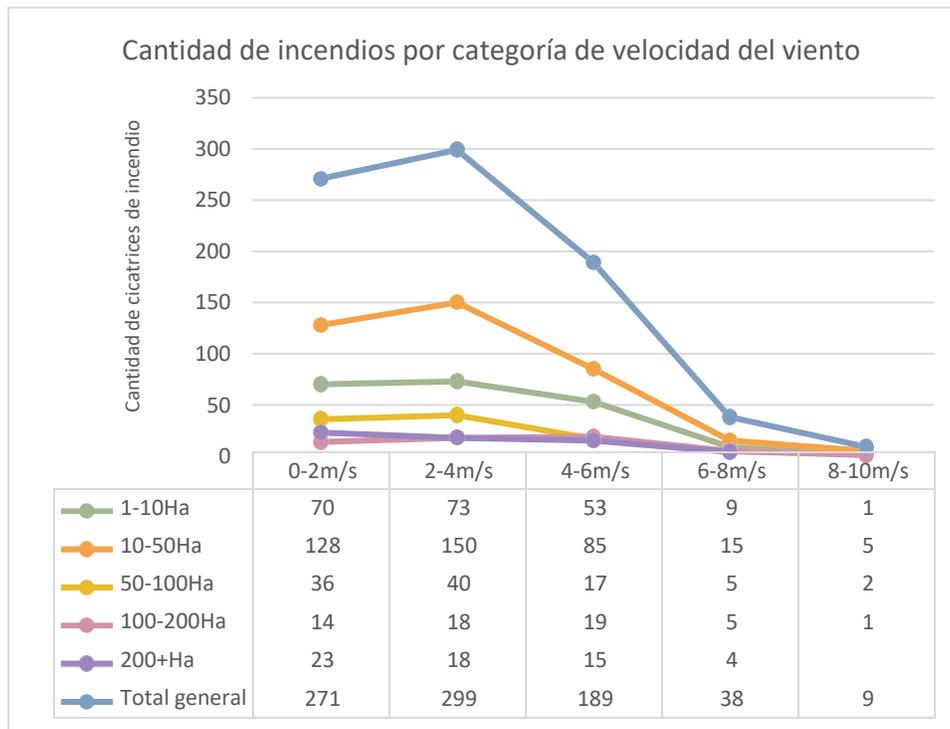
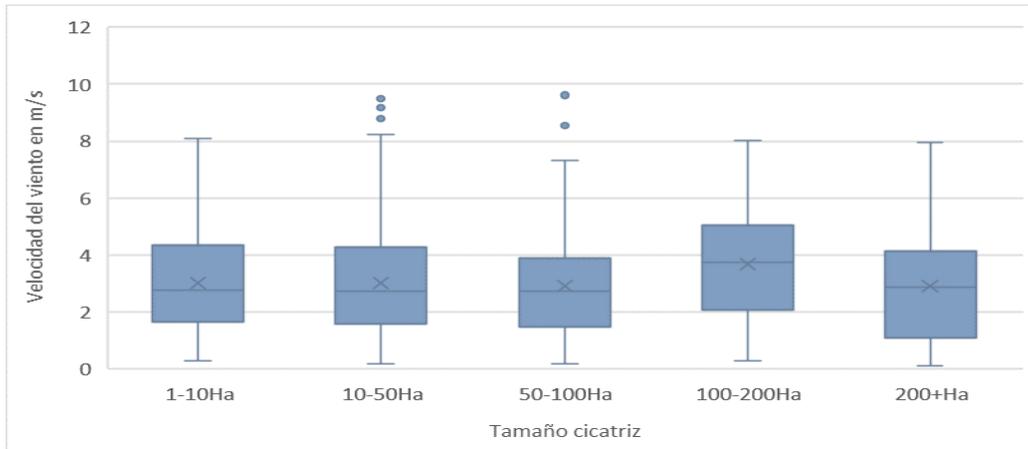
### 3.2 Relación entre tamaño de cicatrices de incendio y variables meteorológicas

#### 3.2.1 Relación entre temperatura máxima y tamaño de las cicatrices



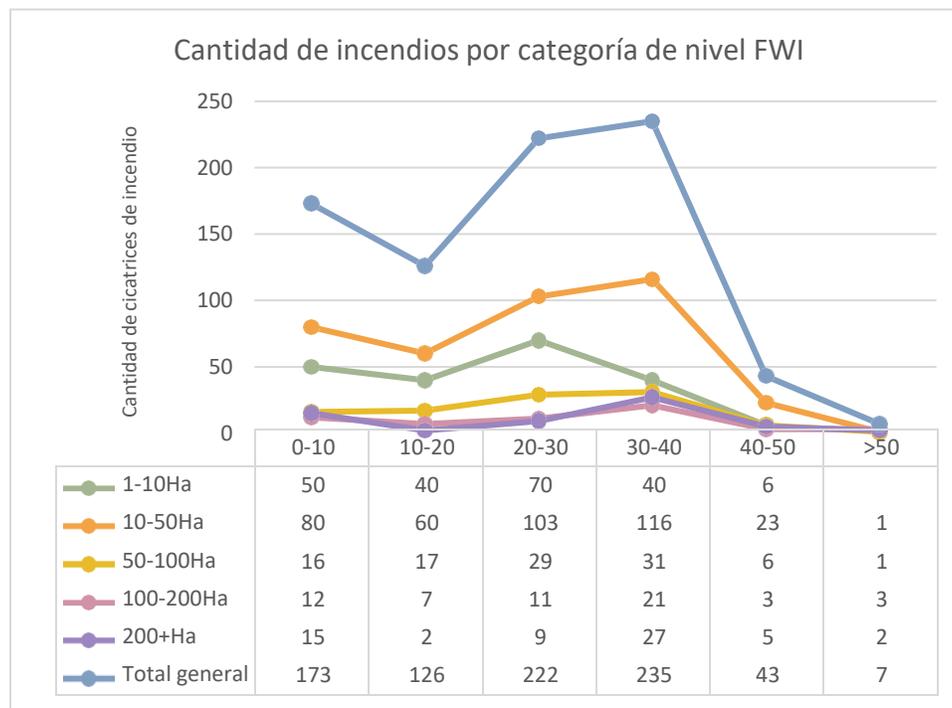
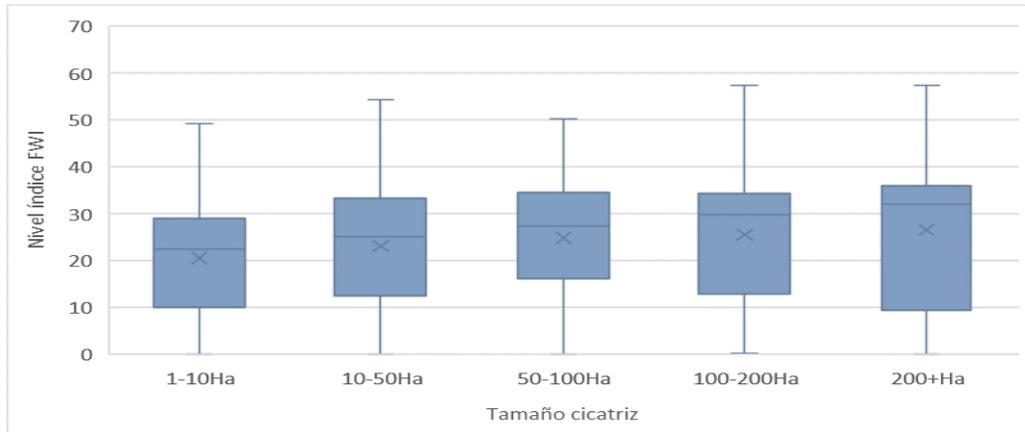
Al analizar los gráficos resultantes de la combinación entre temperatura máxima y tamaño de las cicatrices de incendio, se observa una clara tendencia a aumentar la cantidad de incendios de todos los tamaños a medida que se eleva la temperatura máxima, llegando a concentrarse la mayor cantidad de incendios en el rango de temperaturas 25-30°C. Sin embargo, disminuye la probabilidad de encontrar cicatrices que ocurrieran con temperaturas mayores a 30°C. Llama la atención la ocurrencia de medianos y grandes incendios (>50Ha) con valores atípicamente bajos de temperatura máxima (<15°C). Esto se debe a que se trata de incendios ocurridos en la zona del extremo sur del área de estudio (Los Ríos y Los Lagos), caracterizada por un clima más frío, donde otros factores estarían impulsando la propagación de incendios de considerable magnitud. En general el promedio de temperatura máxima para los incendios de los distintos tamaños se encuentra por sobre los 25°C, acercándose más a los 30°C a medida que aumenta el tamaño de las cicatrices.

### 3.2.2 Relación entre velocidad del viento y tamaño de las cicatrices



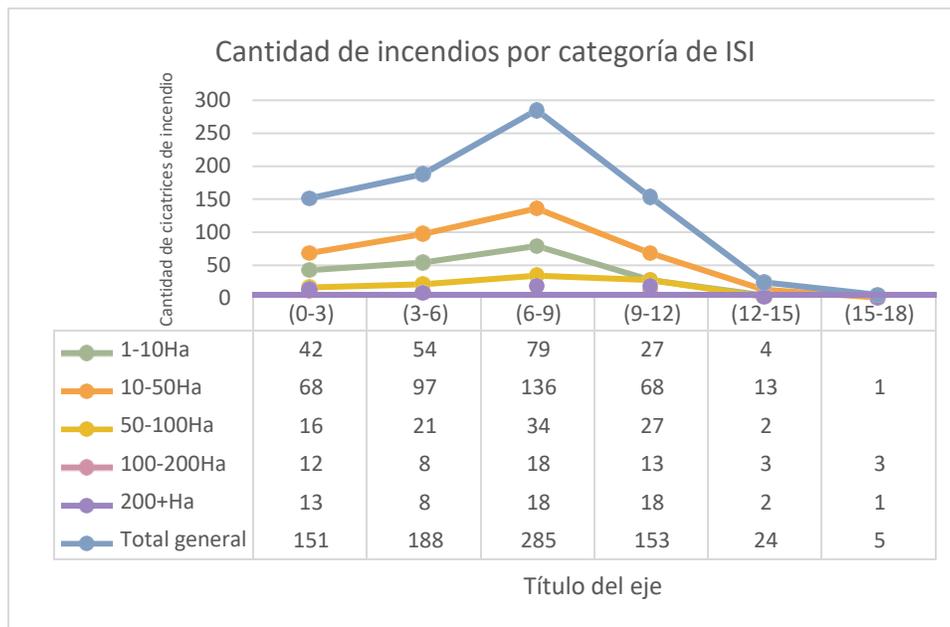
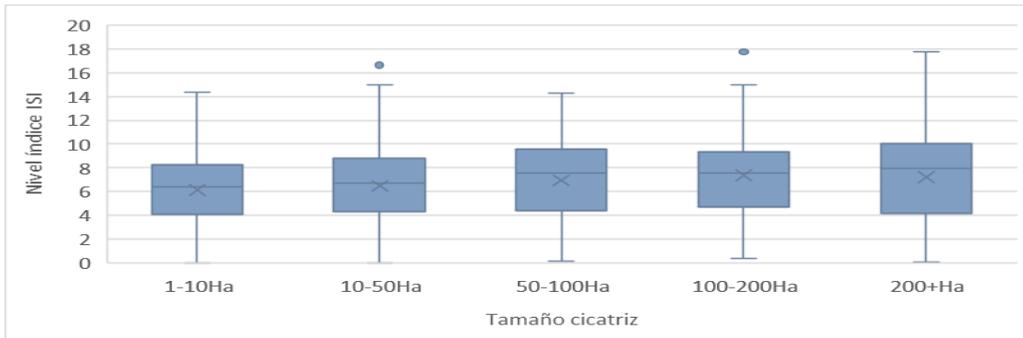
Considerando que en general las investigaciones han señalado al viento como uno de los factores más influyentes en la propagación de los incendios forestales, llama la atención que al analizar los gráficos que relacionan tamaño de cicatrices de incendio e intensidad del viento se contempla que la mayor cantidad de incendios se desarrollaron bajo condiciones de viento leve a moderado (0-4m/s), disminuyendo considerablemente la cantidad de incendios ocurridos bajo condiciones de vientos con intensidad superior a 6m/s. El promedio de cantidad de incendios de todos los tamaños se ubica entre el rango 2-4m/s. Una explicación para este comportamiento podría ser que los vientos leves pueden estar asociados a otras condiciones meteorológicas que favorezcan la propagación del fuego, como alta temperatura y baja presión atmosférica.

### 3.2.3 Relación entre Fire Weather Index (FWI) y tamaño de las cicatrices



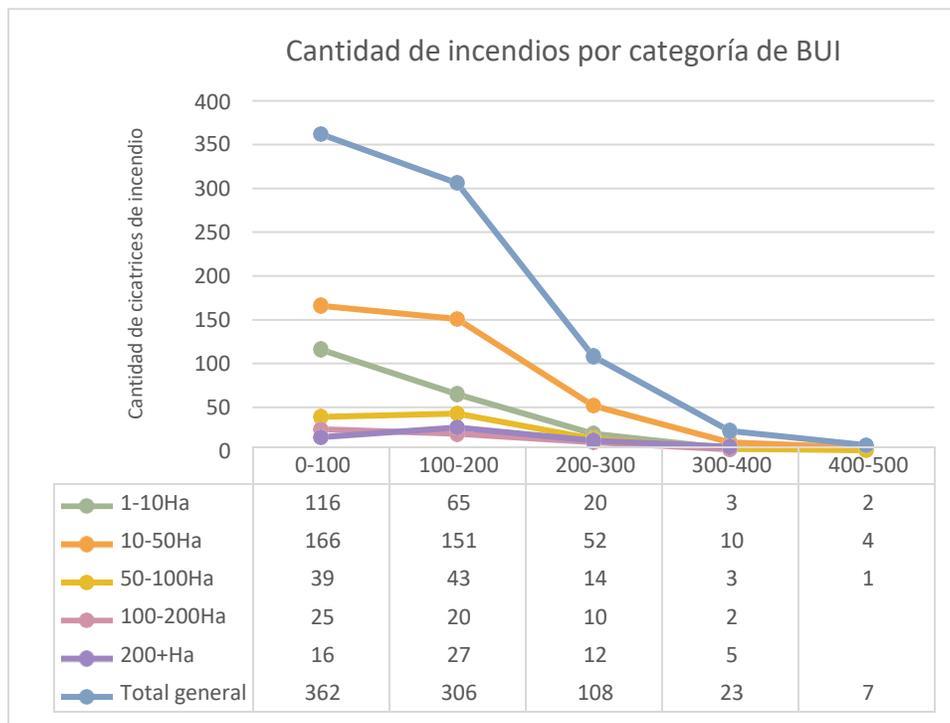
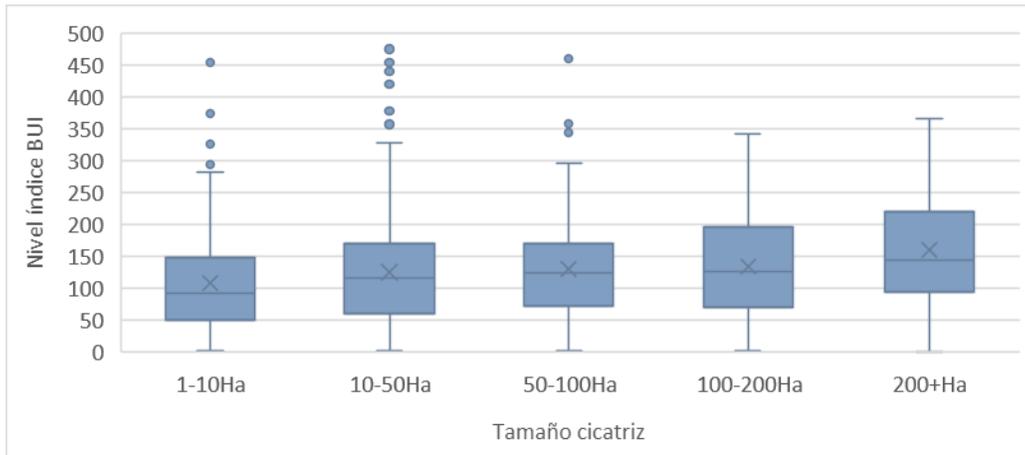
Gran cantidad de cicatrices de incendio, especialmente de tamaño pequeño y mediano (<50 Ha), se desarrollaron bajo condiciones con un FWI bajo. Se trata de incendios que habrían ocurrido bajo condiciones climáticas que en general no se supone que fueran favorables para su propagación. Luego de un descenso en la cantidad de cicatrices para la categoría con un índice FWI entre 10 y 20, se produce un aumento en el número de cicatrices a partir de un índice superior a 20, llegando a concentrarse la mayor cantidad de cicatrices en el rango 30-40 del FWI. Para las cicatrices con tamaño inferior a 100 Ha su promedio se ubica entre el rango 20-30 del índice FWI, mientras las cicatrices con tamaño superior muestran un promedio por sobre 30. La variabilidad en los valores de FWI para los mega incendios (>200 Ha) es bastante amplia, lo que indica que los incendios de mayor tamaño ocurrieron bajo diversos escenarios climáticos, sin embargo, el promedio de este tipo de cicatrices se ubica por sobre 30 en el nivel del FWI.

### 3.2.4 Relación entre Initial Spread Index (ISI) y tamaño de las cicatrices



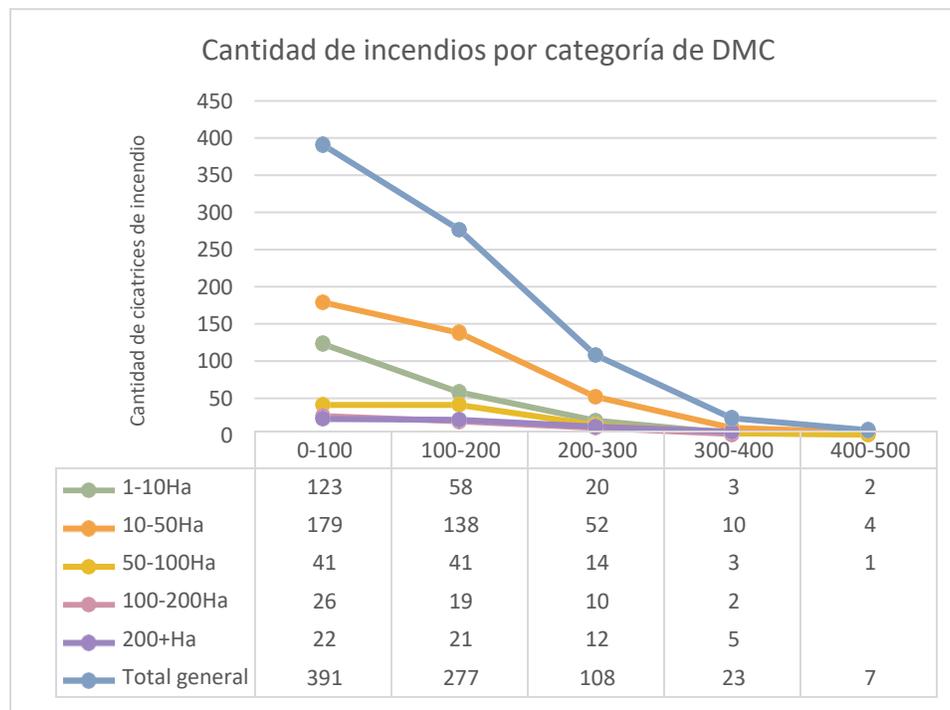
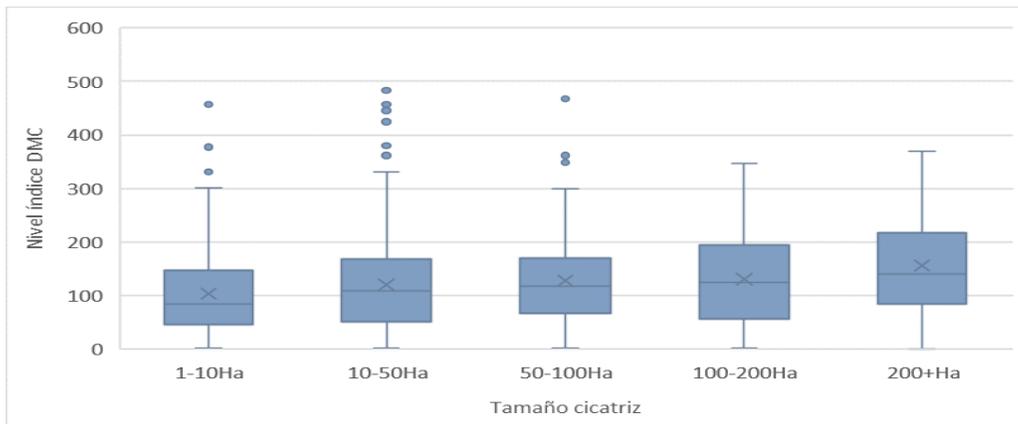
El ISI corresponde a un índice componente del FWI utilizado para evaluar la velocidad potencial de propagación inicial de un incendio forestal, basándose en la cantidad y disposición de los combustibles, la velocidad del viento y otros factores que afectan la ignición y la propagación del fuego. En las gráficas resultantes se puede observar en general una tendencia a aumentar la cantidad de incendios a medida que aumenta el nivel del índice ISI, a excepción de las cicatrices de incendio de mayor envergadura (>100 Ha) que muestran un comportamiento relativamente constante a lo largo de las distintas categorías de ISI. La mayor cantidad de incendios en general se concentran en el rango 6-9 del nivel de ISI, donde las cicatrices de incendio de menor tamaño (<50 Ha) tienden a concentrarse en promedio en valores cercanos al nivel 6 mientras que las cicatrices de incendio más grandes (>100 Ha) se concentran en promedio en valores más cercanos al nivel 8 del índice ISI. También destaca la amplitud en la variabilidad de los valores del índice ISI para las cicatrices correspondientes a mega incendios (>200 Ha), con cifras que varían entre 0 y 18. En general valores entre 5 y 10 se consideran moderados, mientras que sobre 10 se consideran valores altos, donde puede existir un alto riesgo de propagación rápida del incendio.

### 3.2.5 Relación entre Build-up Index (BUI) y tamaño de las cicatrices



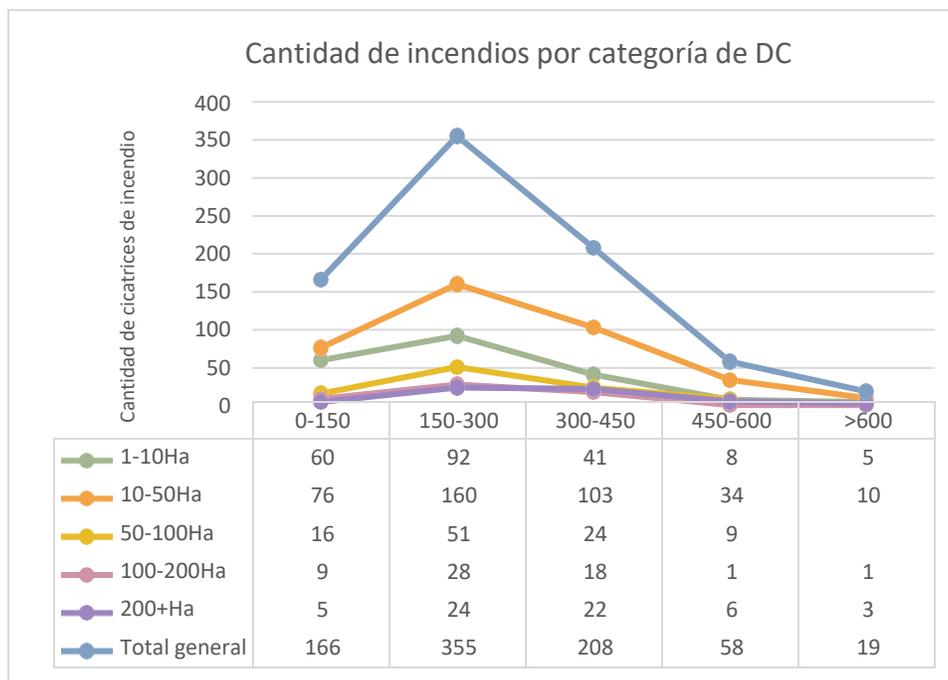
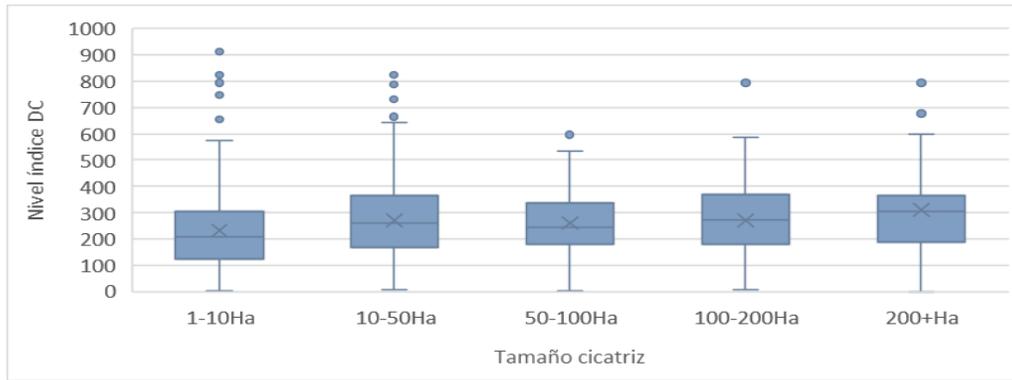
El índice BUI se utiliza para evaluar la cantidad de combustible seco acumulado en el suelo y su capacidad para sostener un incendio. Este índice se calcula considerando el contenido de humedad de la segunda capa orgánica (DMC) y de los combustibles gruesos (DC). Se observa que a excepción de las cicatrices más pequeñas (<10 ha), el promedio de la cantidad de incendios para el resto de las categorías de tamaño de cicatriz se encuentra por sobre 100 en el nivel del índice BUI, aumentando progresivamente a medida que aumenta el tamaño de los incendios, llegando a un valor promedio cercano a 150 en la categoría de cicatrices de mega incendios (>200 Ha). El índice BUI muestra un comportamiento bastante similar al DMC, ya que este es el componente principal para el cálculo del BUI. Si DMC es 0, el BUI también lo será, sin importar el valor de DC.

### 3.2.6 Relación entre Duff Moisture Code (DMC) y tamaño de las cicatrices



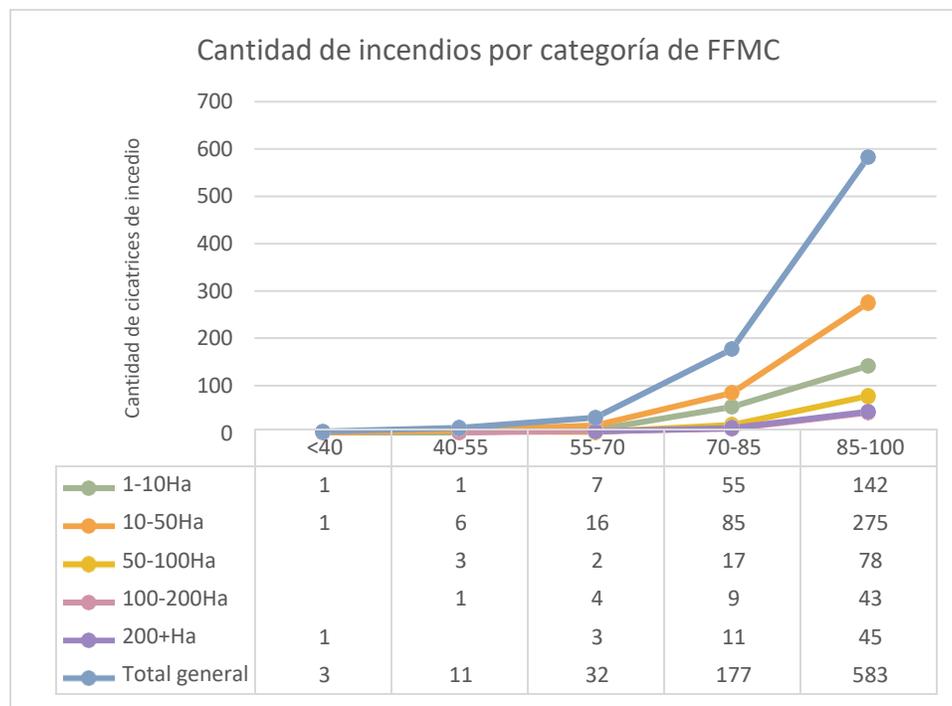
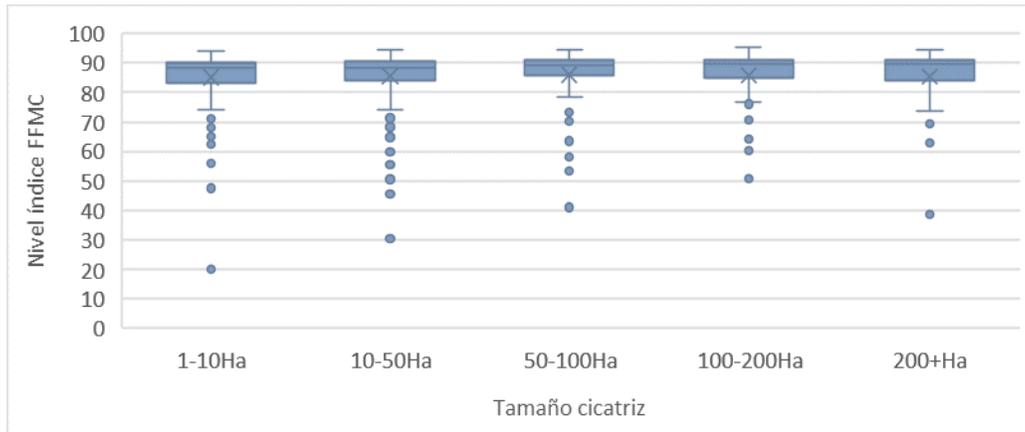
Al analizar la relación graficada entre el índice DMC y el tamaño de las cicatrices de incendio, se observa una clara tendencia a disminuir la cantidad de incendios a medida que aumenta el nivel de DMC, lo cual resulta contradictorio ya que este índice señala el nivel de humedad de la hojarasca, donde los valores bajos señalan un mayor nivel de humedad y valores altos indican un menor contenido de humedad y por ende mayor riesgo de ignición. Esta concentración de la cantidad de incendios en niveles relativamente bajos de DMC puede deberse a que, si bien este código tiene una escala abierta, en general el valor probable más alto tiende a ubicarse en el rango de 150, según el Copernicus Climate Change Service. En esta serie de datos se cumple con dicha tendencia, ya que a excepción de los incendios más pequeños, los valores promedio del resto de los incendios se concentran entre los rangos 100-200 de DMC, con una clara tendencia a aumentar los valores promedio para los incendios de mayor magnitud (>200 Ha).

### 3.2.7 Relación entre Drought Code (DC) y tamaño de las cicatrices



El índice DC representa el contenido de humedad de los combustibles gruesos, muertos y en contacto con el suelo (más de 5 cm de diámetro), que depende de la precipitación acumulada y la temperatura. Al analizar el gráfico resultante para este índice se encuentra un comportamiento bastante similar para todas las categorías de tamaño de cicatriz, aumentando la cantidad de incendios junto a un índice DC más elevado, llegando a concentrarse la mayor cantidad de incendios en la categoría 150-300. A medida que aumenta el nivel del índice DC (>300) comienza a disminuir la concentración de número de cicatrices de todos los tamaños, llegando a un mínimo de cantidad de incendios para la categoría DC >600. Los promedios de los valores de DC para las distintas categorías de tamaño de cicatrices de incendio muestran un progresivo aumento a medida que crece el tamaño de las cicatrices, con un promedio cercano a 200 para incendios pequeños (<10 Ha) y valores promedio que llegan a 300 para mega incendios (>200 Ha). Llama la atención que a lo largo de todas las categorías de tamaño de incendio se encuentran datos anómalos que se alejan bastante del promedio.

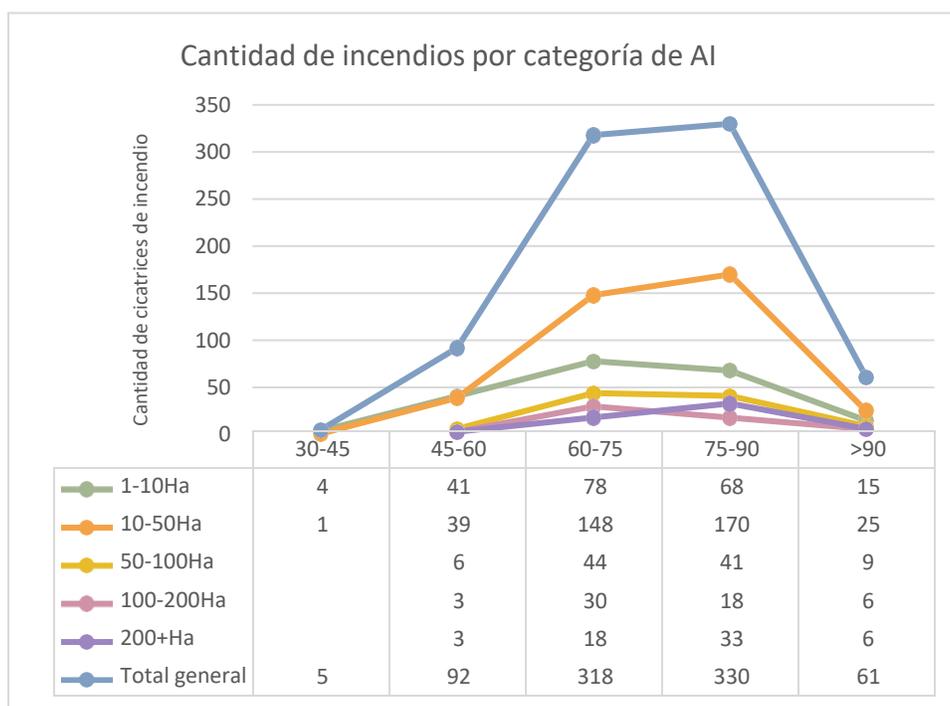
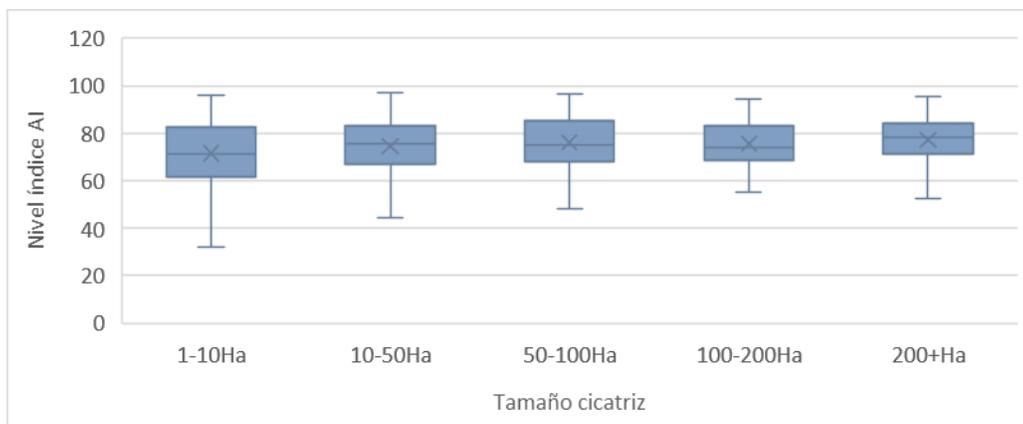
### 3.2.8 Relación entre Fine Fuel Moisture Code (FFMC) y tamaño de las cicatrices



El FFMC es un índice que se calcula considerando la relación entre la humedad presente y la capacidad máxima de retención de humedad de los combustibles finos. Los combustibles finos incluyen hojas, ramas pequeñas, hierba y otros materiales vegetales livianos que se encuentran en el suelo del bosque. Al analizar los gráficos que relacionan el tamaño de las cicatrices de incendio con el índice FFMC se aprecia un comportamiento con una tendencia bastante marcada a aumentar la cantidad de cicatrices de incendios para todas las categorías de tamaño a medida que aumenta el nivel de FFMC. A partir de la categoría 70-85 (nivel moderado) de FFMC la cantidad de incendios comienza a aumentar considerablemente, llegando a concentrarse la máxima cantidad de cicatrices de todos los tamaños en la categoría 85-100 (nivel muy alto). El valor promedio del nivel de FFMC para las cicatrices de todos los tamaños se encuentra cercano a 90 y llama la atención la presencia de valores atípicos bastante bajos para todas las categorías de tamaño de incendio.

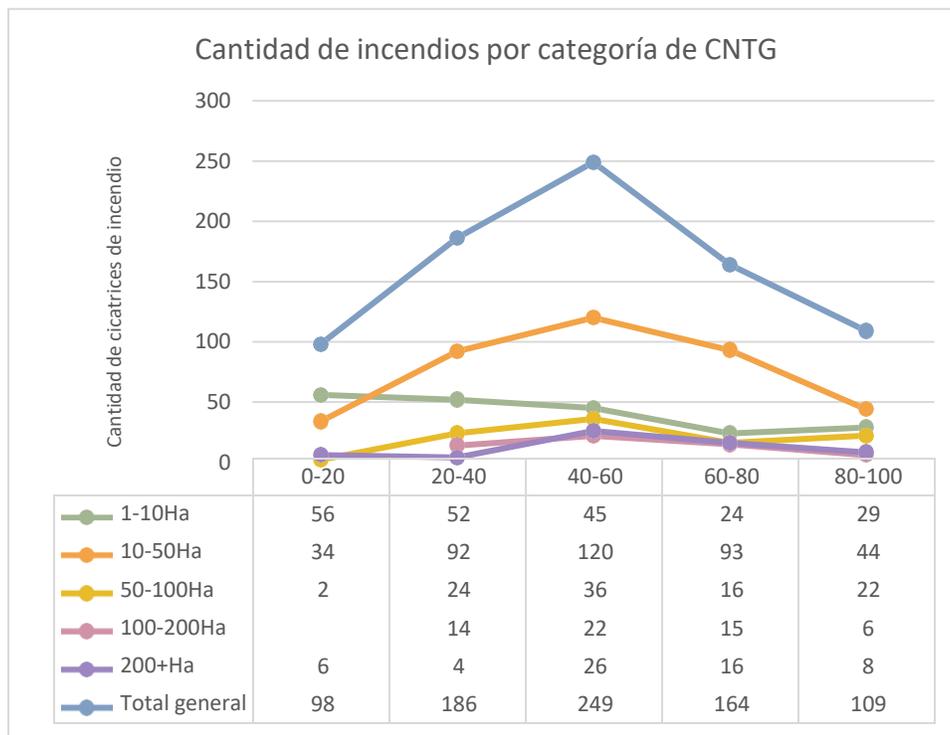
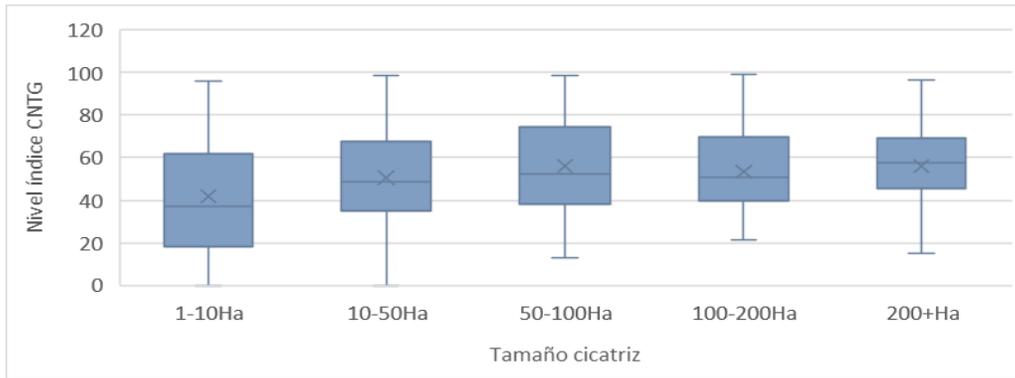
### 3.3 Relación entre tamaño de cicatrices de incendio y métricas del paisaje

#### 3.3.1 Relación entre Aggregation Index (AI) y tamaño de las cicatrices



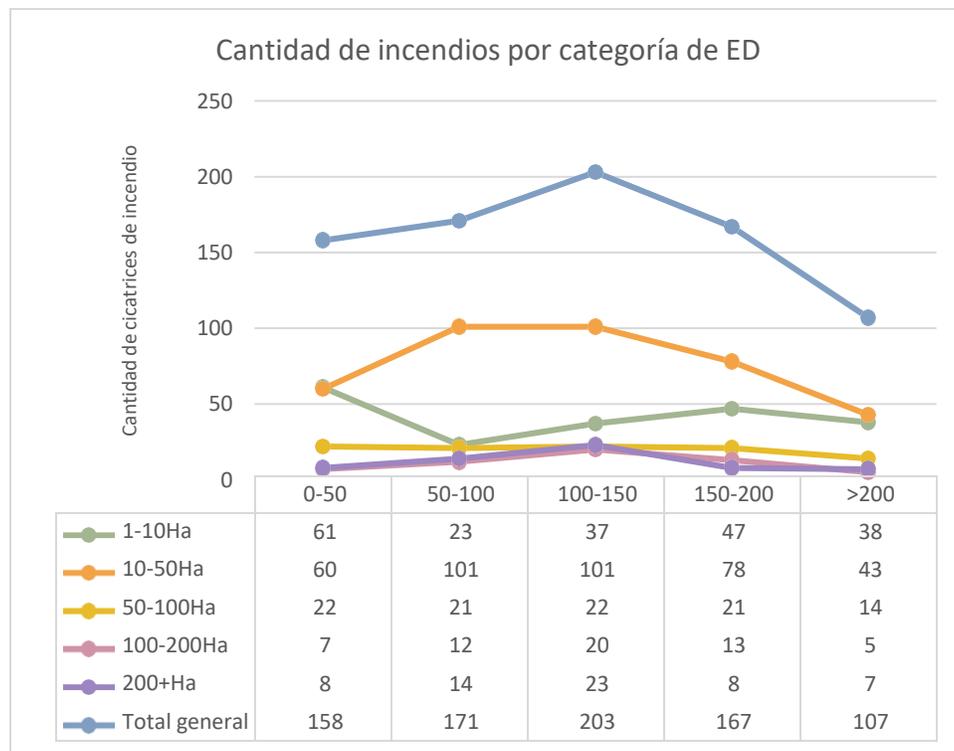
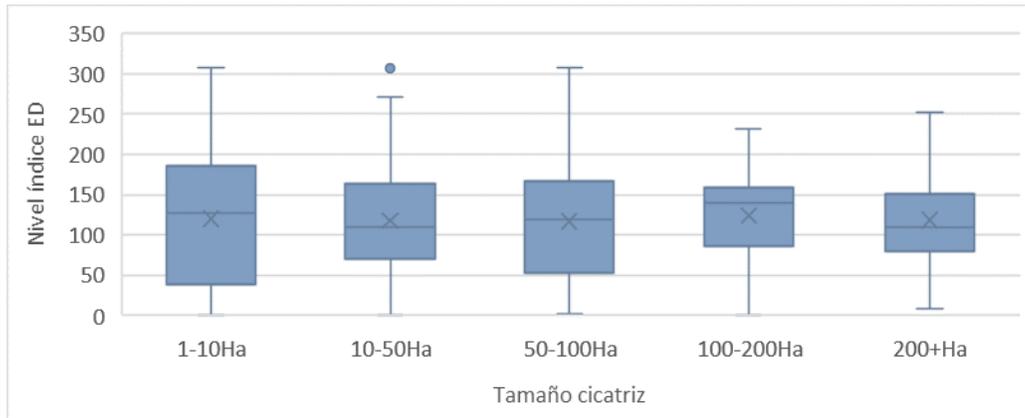
La métrica AI proporciona información sobre la configuración espacial de la vegetación en el paisaje, permitiendo evaluar cómo los parches de diferentes categorías estaban distribuidos y agregados en el paisaje. Mediante el análisis de los gráficos resultantes se observa que en general los incendios de todos los tamaños tienden a aumentar en cantidad a medida que aumenta el nivel de agregación determinado por el AI. La mayor cantidad de las cicatrices de incendio presenta valores entre los rangos 60-90 de AI, con un promedio que aumenta a medida que aumenta el tamaño de las cicatrices. Si bien el rango en la variabilidad de los valores de AI es amplia para las cicatrices de incendio más pequeños, a medida que aumentan en tamaño, la variabilidad es cada vez menor y tiende a concentrarse en valores más cercanos a 80 en el nivel de agregación dado por AI.

### 3.3.2 Relación entre Contagion Index (CNTG) y tamaño de las cicatrices



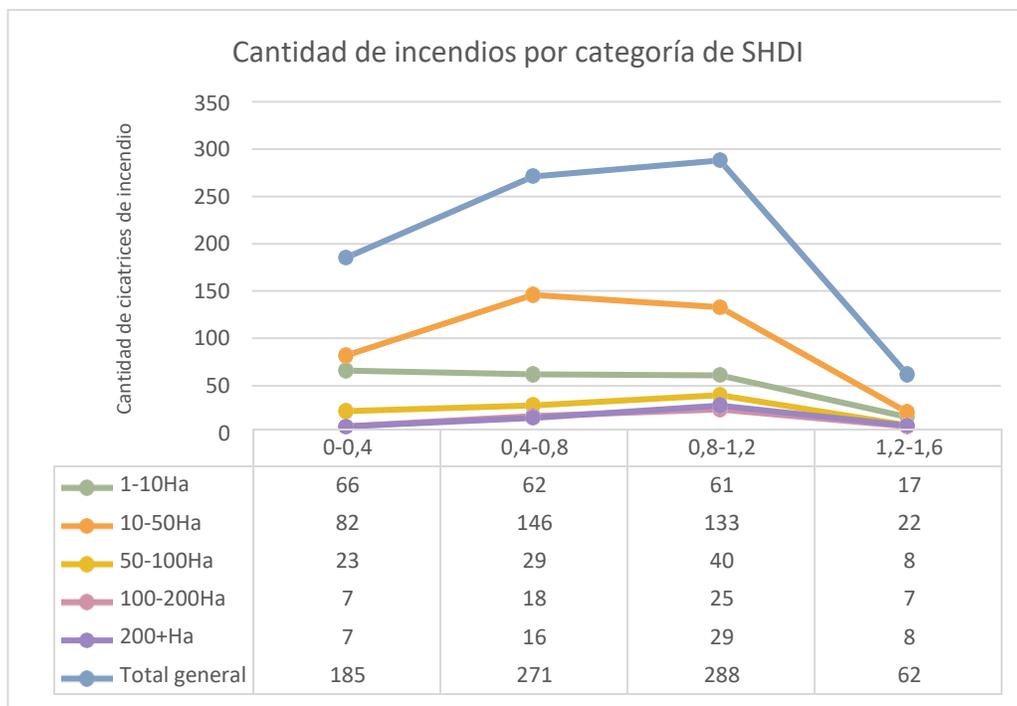
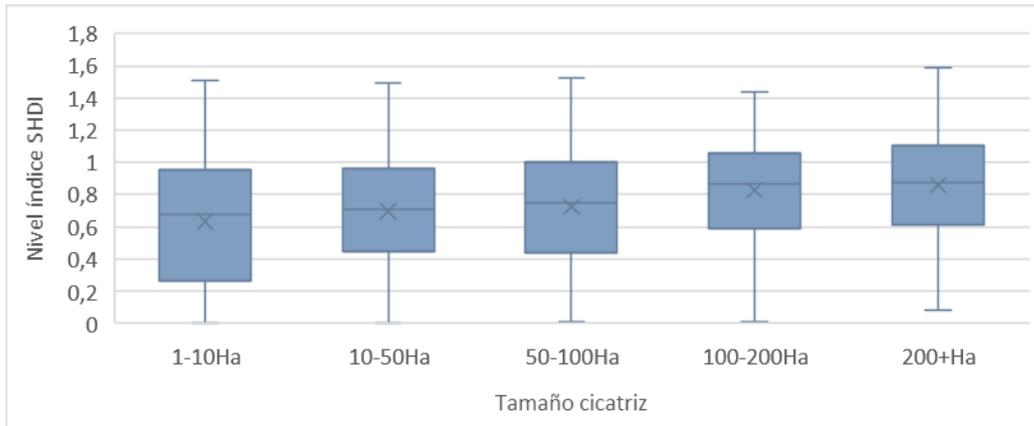
La métrica CNTG mide la conectividad del paisaje y permite evaluar la forma en que la vegetación quemada se encontraba distribuida y conectada previo al desencadenamiento del incendio forestal que le afectó. Al analizar los gráficos resultantes es posible observar que los incendios más pequeños (<10 ha) tienden a disminuir en cantidad a medida que el nivel de conectividad aumenta, mientras que lo contrario sucede con los incendios de mayor tamaño, los que en general tienden a aumentar en cantidad a medida que el nivel de conectividad se eleva. El mayor conjunto de incendios se llega a concentrar en el rango 40-60 del nivel de conectividad, para luego disminuir progresivamente a medida que aumenta el valor de CNTG. Los incendios más pequeños muestran un rango bastante amplio en la variabilidad del nivel de conectividad, pero a medida que aumenta el tamaño de los incendios se ve una distribución con menor variabilidad, con valores promedio más cercanos a 60 en el nivel de conectividad dado por CNTG.

### 3.3.3 Relación entre Edge Density (ED) y tamaño de las cicatrices



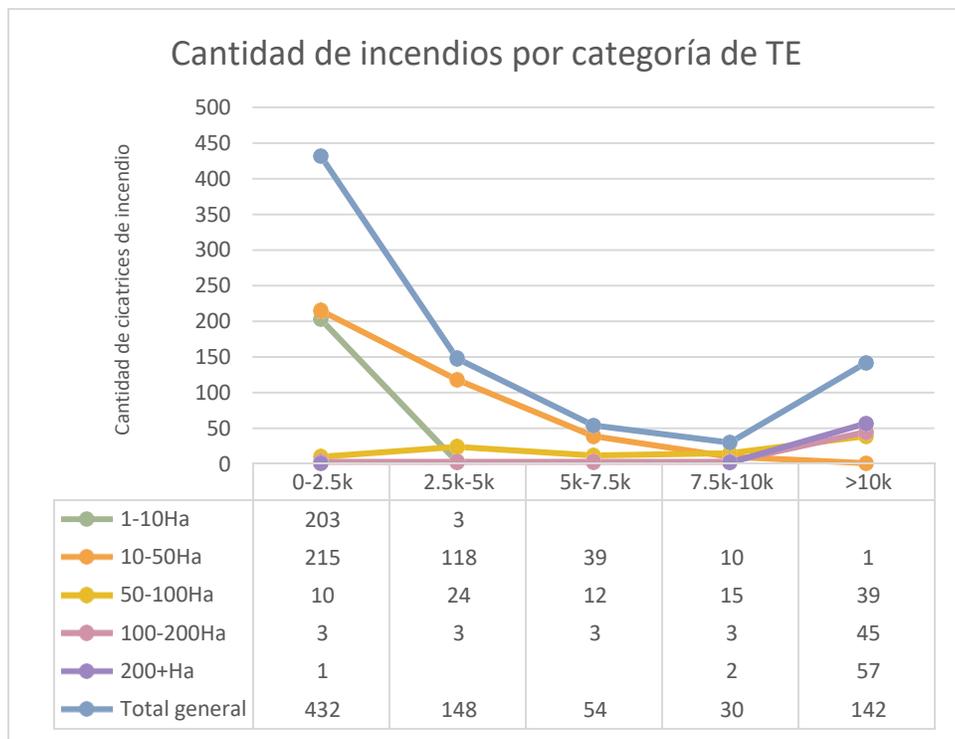
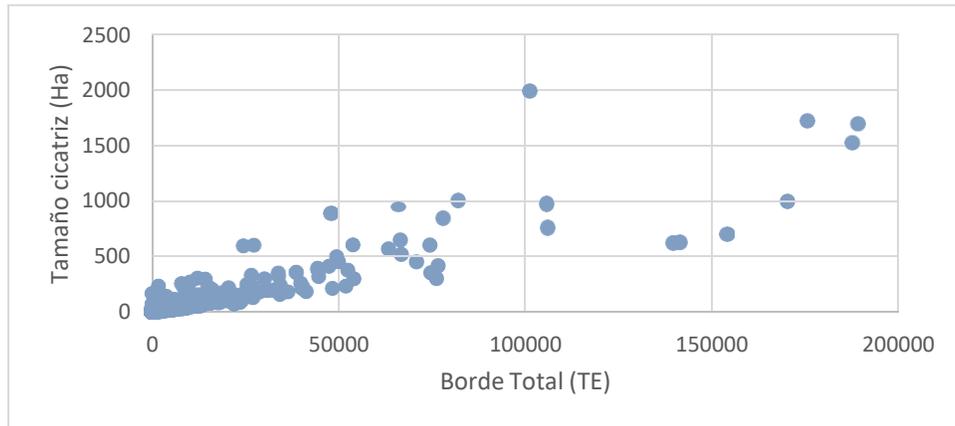
La métrica ED proporciona información sobre la cantidad y la distribución de los bordes en el paisaje previo al desencadenamiento de los incendios. Se refiere a la longitud total de los bordes entre diferentes tipos de parches en relación con el área total del paisaje. En valores bajos de ED se presenta una considerable cantidad de incendios forestales pequeños y medianos (1-50 Ha), y en general a medida que aumenta el nivel de ED tiende a aumentar la cantidad de incendios de mayor tamaño, llegando a concentrarse la mayor cantidad de cicatrices de incendio en general en el rango 100-150 de ED. La variabilidad en el rango de valores de ED para las cicatrices de todos los tamaños es bastante amplia, particularmente en los incendios con superficies menores a 100 ha, pero para los grandes incendios (>100 Ha) se ve una mayor concentración dentro de los rangos 100-150.

### 3.3.4 Relación entre Shannon Diversity Index (SHDI) y tamaño de las cicatrices



La métrica SHDI corresponde al índice de diversidad de Shannon y proporciona información sobre la heterogeneidad y la diversidad del paisaje previo a los incendios, evaluando la distribución de los diferentes tipos de cobertura del suelo en el paisaje y su equidad relativa. Al analizar los gráficos se ve en general un comportamiento equilibrado para los incendios de todos los tamaños. A excepción de las cicatrices de tamaño mediano (10-50 Ha) que aumenta levemente en cantidad para el rango 0,4-0,8 de SHDI, en general la cantidad de incendios para los demás tamaños se mantiene estable dentro del rango 0-1,2. Sin embargo esto cambia para valores mayores de SHDI, ya que el número de cicatrices disminuye abruptamente en el rango 1,2-1,6 donde se concentra la menor cantidad de cicatrices de incendio. Para el conjunto de cicatrices no hubo valores de SHDI superiores a 1,6 lo que indica paisajes más homogéneos con un bajo nivel de diversidad.

### 3.3.5 Relación entre Total Edge (TE) y tamaño de las cicatrices



TE es una métrica del paisaje que entrega información respecto al tamaño promedio de los parches en el paisaje previo al desencadenamiento de los incendios. Para su cálculo se considera la longitud total de los bordes que separan los diferentes parches en el paisaje, dividida por el número total de parches. Al graficar la relación entre el tamaño de las cicatrices de incendio y el nivel del índice TE se muestra una clara tendencia a disminuir la cantidad de incendios pequeños y medianos (1-50 Ha) a medida que aumenta el nivel de TE. Lo contrario sucede con los incendios de mayor envergadura (>100 Ha) que mantiene cantidades bajas de manera constante para las categorías de TE menores a 10.000, pero que aumentan considerablemente con valores superiores a esta medida. La variabilidad entre los valores de TE para el conjunto de cicatrices es bastante amplia, pudiendo encontrar valores máximos cercanos a 190.000.

### 3.3.6 Regresión lineal múltiple entre métricas del paisaje y superficie quemada por cicatrices de incendio

<b>Estadísticas de la regresión</b>	<b>Valor</b>
Coefficiente de correlación múltiple	0,917073534
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,841023866
R <sup>2</sup> ajustado	0,840030265
Error típico	269,1110071
Observaciones	806

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Valor crítico de F</b>
<b>Regresión</b>	5	306499167,3	61299833,46	846,44037	0
<b>Residuos</b>	800	57936587,29	72420,73412		
<b>Total</b>	805	364435754,6			

<b>Variables</b>	<b>Coefficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
<b>Intercepción</b>	-245,463	197,340	-1,244	0,214	-632,829	141,903
<b>Ai</b>	2,960	2,200	1,345	0,179	-1,359	7,279
<b>Contag</b>	0,737	0,536	1,374	0,170	-0,316	1,789
<b>Ed</b>	0,346	0,468	0,740	0,459	-0,572	1,265
<b>Shdi</b>	-54,224	54,164	-1,001	0,317	-160,544	52,097
<b>Te</b>	0,007	0,000	64,226	0,000	0,007	0,008

De acuerdo a los resultados obtenidos, el modelo tiene un buen ajuste, ya que el coeficiente de determinación R<sup>2</sup> es 0.841, lo que significa que el 84.1% de la variación de la superficie quemada se explica por las variables independientes. Sin embargo, al observar los coeficientes de regresión y sus estadísticos t, se puede ver que ninguna de las variables independientes es significativa al nivel del 5%, ya que todas tienen una probabilidad mayor que 0.05. Esto implica que no hay evidencia suficiente para afirmar que las métricas del paisaje tengan un efecto lineal sobre la superficie quemada, lo que se coincide con los resultados obtenidos al graficar las relaciones entre las variables y el tamaño de las cicatrices.

## CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1 Discusión

En general en el área de estudio para el periodo analizado, se muestra una gran variabilidad tanto en la cantidad de incendios como en la superficie quemada total a lo largo de las distintas regiones administrativas. La mayor cantidad de incendios concentrados en El Biobío y La Araucanía no implica que estas regiones hayan recibido el mayor impacto generado por los incendios forestales durante el periodo estudiado, ya que regiones con una considerable menor cantidad de incendios como la Región Metropolitana y el Maule concentran la mayor cantidad de superficie quemada total, debido a la ocurrencia de mega incendios que con un solo siniestro acumulan más de 10.000 hectáreas quemadas. Esto ocurre con el caso del incendio denominado “El Carrizo” el cual se originó en el sector de Melipilla, RM el 3/01/2014 y pudo ser controlado recién 9 días después, abarcando una superficie quemada de 13.933,13 ha, contribuyendo con el 71% de hectáreas quemada para el total de la región metropolitana.

Lo anterior guarda relación con el hecho de que si bien la mayor cantidad de cicatrices de incendio obtenidas corresponden a la categoría de tamaño <50 ha, en total solo representan el 11% de la superficie quemada total en el área de estudio para el periodo 2013-2015. Mientras que las cicatrices correspondientes a mega incendios >200 ha concentran el 71% de la superficie quemada total en el área de estudio.

Al analizar las relaciones entre tamaño de cicatrices y variables meteorológicas, se obtuvieron resultados que en general se condicen con las observaciones llevadas a cabo por otras investigaciones, a excepción de la variable velocidad del viento, cuyo análisis muestra que la mayoría de los incendios se desarrollaron bajo condiciones de vientos leves.

Considerando que diversas investigaciones catalogan la variable velocidad del viento como una de las más influyentes en la propagación de incendios forestales una posible hipótesis que explique este comportamiento es que los datos de velocidad del viento obtenidos mediante ERA5-Land no reflejen adecuadamente la variabilidad espacial y temporal de este factor en el territorio chileno, debido a las limitaciones propias del proceso de reanálisis. El ERA5-Land se basa en el modelo atmosférico del ERA5, que tiene una resolución espacial de 31 km y 137 niveles verticales. Aunque el ERA5-Land aumenta la resolución en el componente terrestre a 9 km, puede que esto no sea suficiente para captar los efectos locales del relieve, la vegetación y la costa sobre el viento.

Por su parte, a medida que los valores de variables como temperatura máxima, ISI, y DC se elevan, aumenta la cantidad de incendios para todas las categorías de tamaño. Para llegar a un valor cúspide sobre el cual comienzan a disminuir la cantidad de cicatrices de incendio al continuar elevando los valores de estas variables.

El valor de la temperatura máxima que concentra la mayor cantidad de cicatrices de incendio comprende el rango 25-30°C, pero luego la categoría 30-35°C muestra un abrupto descenso en la cantidad de cicatrices. Los valores del ISI por su parte muestran una relación positiva

en cuanto a la cantidad de cicatrices de incendio hasta llegar al rango de valores 6-9, el cual una vez superado comienza a mostrar un marcado descenso en la cantidad de incendios, especialmente en cuanto a cicatrices de menor envergadura (<50 ha). Cabe recordar que valores más altos indican mayor velocidad de propagación del incendio.

Lo mismo ocurre con el índice DC, el cual muestra una mayor cantidad de cicatrices de incendio a medida que aumenta sus valores. Esto es lógico ya que se trata de un código de sequía cuyos valores más elevados indican mayor severidad. Sin embargo, tras alcanzar un valor máximo dentro de la categoría 150-300, este índice comienza a mostrar un marcado descenso en la cantidad de incendios.

Por su parte índices como el BUI y el DMC mostraron estar estrechamente correlacionados, lo cual tiene lógica ya que el contenido de humedad del combustible (DMC) es el componente principal para el cálculo del BUI. Si bien en los gráficos de categorías para BUI y DMC se observa un continuo descenso en la cantidad de incendios a medida que aumentan los valores de ambos índices, esto no significa necesariamente que exista una relación inversa entre la ocurrencia de incendios y estos códigos. Esto se debe a la existencia de valores bastante alejados de la media, lo que obligó a incluir categorías de valores bastante elevados para llevar a cabo el análisis de todos los datos. Pero al considerar que según el Copernicus Climate Change Service, el valor probable más alto para el índice DMC se ubica en el rango 150, se comprende por qué la mayor cantidad de cicatrices de incendio se ubican en las categorías 0-100 y 100-200. Además, se puede observar una relación positiva entre tamaño de incendio y ambos códigos, ya que a medida que aumenta el tamaño de las cicatrices de incendio se evidencia que los valores promedio de DMC y BUI tienden a aumentar y concentrarse en valores más cercanos a 200.

El FFMC es el índice que muestra un comportamiento más marcado y constante, ya que a medida que aumenta el nivel de este código, aumenta la cantidad de cicatrices de incendio para todas las categorías de tamaño, concentrando la mayor parte de las cicatrices en el rango 85-100 del FFMC. Esto tiene sentido ya que se trata de un código referente a la humedad de los combustibles finos, donde valores más altos indican menor contenido de humedad y por ende mayor riesgo de incendio. Además al analizar el promedio de los valores de FFMC por categoría de tamaño de cicatriz, se observa que los valores promedio para todas las categorías se encuentran bien concentrados en torno al rango 90, nivel considerado muy alto para el riesgo de propagación de incendios forestales.

Este conjunto de variables meteorológicas da origen al FWI, un índice que ha sido ampliamente adoptado por las diversas investigaciones referentes a incendios forestales, ya que ha demostrado ser una herramienta útil y efectiva para el manejo de incendios forestales, proporcionando información valiosa para la prevención, control y análisis de incendios en diferentes regiones y contextos. En el contexto de esta investigación, el FWI muestra un comportamiento similar a las variables T° máxima, ISI y DC, ya que en general se observa un progresivo aumento en la cantidad de cicatrices de incendio a medida que se elevan los valores de FWI. La mayor cantidad de cicatrices de incendio para todas las categorías de tamaño se ubican dentro del rango de FWI 20-40, categoría cuyos valores se consideran de alto riesgo de incendio según Plataforma Europea de Adaptación al Clima (Climate-ADAPT).

Respecto a la relación entre el tamaño de las cicatrices de incendio y las variables correspondientes a métricas del paisaje, se repite un comportamiento similar al de la relación entre tamaño de cicatrices de incendio y las variables meteorológicas. A excepción de la métrica TE, las demás métricas muestran una relación positiva respecto al tamaño de las cicatrices de incendio, hasta que los valores de estas alcanzan un máximo tras el cual comienza a disminuir la cantidad de cicatrices.

Al analizar la relación entre cicatrices y AI, se observa que en general los incendios de todos los tamaños tienden a aumentar en cantidad a medida que aumenta el nivel de agregación, hasta llegar a valores cercanos a 80, ya que a valores superiores tiende a disminuir la cantidad de cicatrices. Esto estaría mostrando que los parches más agregados podrían facilitar la propagación de los incendios, mientras que un nivel más bajo indicaría parches más dispersos que pueden desacelerar la propagación.

En cuanto a la métrica CNTG se observa una relación más estable que en el caso anterior, ya que si bien también existe una relación positiva entre el aumento de los valores de esta variable y el tamaño de las cicatrices, la cantidad de cicatrices de incendios se mantiene un tanto más constante a lo largo de las distintas categorías de CNTG. La mayor cantidad de cicatrices de incendio se ubica en el rango 60 de valores de CNTG, mientras que a valores superiores la cantidad de cicatrices tiende progresivamente a disminuir. Valores más altos para esta métrica indican un paisaje más homogéneo y compacto, lo que facilitaría la propagación de incendios forestales.

La métrica ED muestra un comportamiento similar a la variable anterior, pero con una tendencia más estable. A medida que aumenta el nivel de ED, progresivamente aumenta la cantidad de cicatrices de incendios, hasta llegar al rango 100-150, a partir del cual se muestra un descenso paulatino en el número de incendios. Un valor alto de ED refleja un paisaje más fragmentado y complejo mientras que valores bajos indican un paisaje más simple y continuo. En este caso la mayoría de las cicatrices de incendio de todos los tamaños se ubica en el rango 100-150 de ED. Los valores promedios no muestran una tendencia tan clara a aumentar a medida que aumenta el tamaño de las cicatrices.

Los gráficos sobre el SHDI muestran una relación relativamente estable entre la cantidad de cicatrices y las categorías del nivel de SHDI, llegando a concentrar la mayor cantidad de cicatrices de incendio bajo la categoría 0,4-1,2. Esto cambia abruptamente al superar el valor de 1,2, que indicaría una estructura relativamente más diversa y heterogénea del paisaje, factor que se ha indicado como un inhibidor de la propagación de incendios forestales debido a la presencia de diferentes tipos de vegetación con diferentes características de combustible que podrían dificultar el avance de las llamas.

Finalmente el modelo de regresión lineal múltiple desarrollado entre los datos de las distintas métricas del paisaje y la superficie de hectáreas quemadas por cada cicatriz muestran un buen ajuste, ya que el coeficiente de determinación  $R^2$  es 0.841, lo que significa que el 84.1% de la variación de la superficie quemada se explica por las variables independientes. Sin embargo, al observar los coeficientes de regresión y sus estadísticos t, se puede ver que ninguna de las variables independientes es significativa al nivel del 5%, ya que todas tienen una probabilidad mayor que 0.05. Si bien es posible que esto se deba a que hay otras variables que influyen más en la superficie quemada, mediante el análisis de los gráficos resultantes

para cada variable se evidencia que en general estas no muestran una relación lineal. En el contexto de un fenómeno tan dinámico como los incendios forestales, las relaciones parecen ser más complejas y no seguir un patrón lineal. Es probable que interacciones entre las variables o que otros factores no incluidos en el modelo estén influyendo en el tamaño de los incendios.

## 4.2 Conclusiones

En síntesis, los resultados de esta investigación se pueden resumir en los siguientes hallazgos:

- La mayor cantidad de incendios se concentró en las regiones de El Biobío y La Araucanía, pero la mayor superficie quemada se registró en la Región Metropolitana y el Maule por la ocurrencia de mega incendios.
- La temperatura máxima, el ISI y el DC mostraron una relación no lineal con el tamaño de las cicatrices de incendio, con un punto máximo a partir del cual la cantidad de incendios disminuyó. El FFMC mostró una relación lineal positiva con el tamaño de las cicatrices de incendio.
- El AI mostró una relación positiva con el tamaño de las cicatrices de incendio, mientras que el CNTG, el ED y el SHDI mostraron una relación negativa, indicando que los paisajes más agregados, homogéneos y fragmentados favorecen la propagación de los incendios.
- El FWI fue una herramienta útil para el análisis de incendios forestales, mostrando una relación similar a las demás variables y concentrando la mayor cantidad de cicatrices de incendio en categorías de alto riesgo según el Climate-ADAPT.
- El modelo de regresión lineal múltiple entre las métricas del paisaje y la superficie quemada presentó un buen ajuste en general, pero las variables independientes no resultaron significativas al nivel del 5%, lo que sugiere una relación no lineal entre el tamaño de los incendios y las métricas del paisaje seleccionadas.

En mayor medida los resultados obtenidos coinciden con lo que se esperaba, considerando los hallazgos de las demás investigaciones. Las variables que se esperaba mostraran una relación positiva respecto al tamaño y cantidad de incendios cumplieron con los resultados esperados, sin embargo dichas variables en general muestran una relación no lineal respecto al tamaño y cantidad de cicatrices de incendio. Esto debido a que se alcanzan umbrales tras los cuales la cantidad de cicatrices de incendio en general comienzan a disminuir. Sin embargo, estos umbrales en general se muestran en valores superiores a los considerados como de riesgo para el desarrollo y propagación de los incendios forestales, por lo que estos resultados muestran que los incendios en general se desarrollaron bajo condiciones que se considerarían de riesgo moderado a alto para la propagación de incendios forestales. Esto

demuestra que en general las variables analizadas en esta investigación guardan una estrecha relación con la dinámica que acompaña al desarrollo de incendios forestales en nuestro país.

El hecho de que la mayor cantidad de superficie quemada corresponda a cicatrices de incendios con tamaños mayores a 200 ha, nos incentiva a comprender de mejor manera qué factores desencadenan el desarrollo de mega incendios, sobre todo considerando que nos encontramos bajo un contexto de cambio climático que muestra de forma cada vez más evidente su impacto en el comportamiento de diversos fenómenos, entre ellos los incendios forestales, ya que propicia de manera cada vez más frecuente condiciones climáticas favorables para una propagación descontrolada de incendios. Por ello es de esperar que se siga ampliando el estudio de distintas variables que puedan estar relacionadas al desarrollo de incendios y así poder encontrar patrones que expliquen en mayor profundidad la dinámica de este fenómeno tan complejo. Como recomendación para futuras investigaciones me gustaría señalar la importancia que pueden significar las particularidades geográficas de cada región, las cuales no fueron consideradas en esta investigación en mayor medida. Al considerar los aspectos geográficos propios de cada zona es posible llegar a un entendimiento más acabado de las dinámicas que favorecen la propagación de los incendios forestales bajo diferentes contextos.

Finalmente, algunas medidas que podrían adoptarse para evitar el desarrollo de incendios que se propaguen fuera de control, tomando en consideración los hallazgos de esta investigación:

Reducir la continuidad y la conectividad de los combustibles en el paisaje, creando cortafuegos, mosaicos o corredores que impidan o limiten la propagación del fuego entre los parches de vegetación. Esto se podría lograr mediante el manejo del uso del suelo, la restauración ecológica o el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

Aumentar la diversidad y la heterogeneidad de los combustibles en el paisaje, favoreciendo la presencia de especies vegetales con diferentes características de inflamabilidad, humedad y resistencia al fuego. Esto se podría lograr mediante la conservación de la biodiversidad, la reforestación con especies nativas o el control de especies invasoras.

Disminuir la cantidad y la proporción de borde en el paisaje, evitando la fragmentación y la pérdida de hábitat que aumentan la exposición y la susceptibilidad al fuego. Esto se podría lograr mediante la planificación territorial, la protección de áreas naturales o el fomento de prácticas agroforestales.

Aumentar la mezcla y la diversidad entre las clases de cobertura del suelo en el paisaje, creando una matriz más equilibrada y compleja que reduzca la homogeneidad y la uniformidad del fuego. Esto se podría lograr mediante la integración de usos múltiples del suelo, la gestión adaptativa o el manejo del fuego prescrito.

Es destacable que durante el último tiempo se ha planteado que una forma de reducir el impacto generado por mega incendios puede venir de la mano con la reincorporación de prácticas ancestrales como quemas prescritas, de forma que se reduzca de manera controlada la cantidad de combustible presente en el paisaje.

## Bibliografía

- Abatzoglou, J. T., Williams, A. P., Boschetti, L., Zubkova, M., & Kolden, C. A. (2018). Global patterns of interannual climate-fire relationships. *Global Change Biology*, *24*(11), 5164. <https://doi.org/10.1111/GCB.14405>
- Arblaster, J. M., Meehl, G. A., & Karoly, D. J. (2011). Future climate change in the Southern Hemisphere: Competing effects of ozone and greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, *38*(2). <https://doi.org/10.1029/2010GL045384>
- Bajocco, S., & Ricotta, C. (2008). Evidence of selective burning in Sardinia (Italy): Which land-cover classes do wildfires prefer? *Landscape Ecology*, *23*(2), 241–248. <https://doi.org/10.1007/S10980-007-9176-5/METRICS>
- Bedia, J., Golding, N., Casanueva, A., Iturbide, M., Buontempo, C., & Gutiérrez, J. M. (2018). Seasonal predictions of Fire Weather Index: Paving the way for their operational applicability in Mediterranean Europe. *Climate Services*, *9*, 101–110. <https://doi.org/10.1016/J.CLISER.2017.04.001>
- Benyon, R. G., Inbar, A., Sheridan, G. J., & Lane, P. N. J. (2023). Critical climate thresholds for fire in wet, temperate forests. *Forest Ecology and Management*, *537*, 120911. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2023.120911>
- Berkova, V. (2014). *The impact of highways on land use changes , and their detection*. 523–529. [https://www.researchgate.net/publication/265211908\\_Wind\\_Effect\\_on\\_Wildfire\\_and\\_Simulation\\_of\\_its\\_Spread\\_Case\\_Study\\_Siahkal\\_Forest\\_in\\_Northern\\_Iran](https://www.researchgate.net/publication/265211908_Wind_Effect_on_Wildfire_and_Simulation_of_its_Spread_Case_Study_Siahkal_Forest_in_Northern_Iran)
- Bessie, W. C., & Johnson, E. A. (1995). The relative importance of fuels and weather on fire behavior in subalpine forests. *Ecology*, *76*(3), 747–762. <https://doi.org/10.2307/1939341>
- Blondel, M. & Fernández, I. C. (2012). Efectos de la fragmentación del paisaje en el tamaño y frecuencia de incendios forestales en la zona central de Chile. *Revista Conservación Ambiental*, *2*(1), 7-16. <http://www.ecomabi.cl/biblioteca/le/297-blondel-mb-fernandez-ic-2012-efectos-de-la-fragmentacion-del-paisaje-en-el-tamano-y-frecuencia-de-incendios-forestales-en-la-zona-central-de-chile-rev-cons-amb?tmpl=component>
- Bowman, D. M. J. S., Moreira-Muñoz, A., Kolden, C. A., Chávez, R. O., Muñoz, A. A., Salinas, F., González-Reyes, Á., Rocco, R., de la Barrera, F., Williamson, G. J., Borchers, N., Cifuentes, L. A., Abatzoglou, J. T., & Johnston, F. H. (2019). Human–environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires. *Ambio*, *48*(4), 350–362. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1084-1>
- Butler, B., & Forthofer, J. (2005). *Detailed wind information and at its application to improved firefighter safety*. [https://www.academia.edu/17066010/Detailed\\_wind\\_information\\_and\\_at\\_its\\_application\\_to\\_improved\\_firefighter\\_safety](https://www.academia.edu/17066010/Detailed_wind_information_and_at_its_application_to_improved_firefighter_safety)

- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanasse, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I., Heil, A., Hawbaker, T. J., & Giglio, L. (2019). Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, *225*, 45–64. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.02.013>
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2019): Fire danger indices historical data from the Copernicus Emergency Management Service. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.0e89c522
- Costa-Saura, J. M., Balaguer-Beser, Á., Ruiz, L. A., Pardo-Pascual, J. E., & Soriano-Sancho, J. L. (2021). Empirical Models for Spatio-Temporal Live Fuel Moisture Content Estimation in Mixed Mediterranean Vegetation Areas Using Sentinel-2 Indices and Meteorological Data. *Remote Sensing*, *13*(18), 3726. <https://doi.org/10.3390/rs13183726>
- de Groot, W. J., Wotton, B. M., & Flannigan, M. D. (2015). Wildland Fire Danger Rating and Early Warning Systems. *Wildfire Hazards, Risks, and Disasters*, 207–228. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410434-1.00011-7>
- Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E. P., Jiménez, J. C., Sobrino Rodríguez, J. A., Soria, G., & Moreno Méndez, J. (2018). Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-8. *Revista de Teledetección: Revista de La Asociación Española de Teledetección*, *ISSN 1133-0953*, *Nº. 51*, 2018, *Págs. 47-60*, 51, 47–60. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6480503&info=resumen&idioma=ENG>
- Donoso Z, & Claudio. (1982). *RESEÑA ECOLOGICA DE LOS BOSQUES MEDITERRANEOS DE CHILE*.
- Duane, A., Miranda, M. D., & Brotons, L. (2021). Forest connectivity percolation thresholds for fire spread under different weather conditions. *Forest Ecology and Management*, *498*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119558>
- Fassnacht, F. E., Schmidt-Riese, E., Kattenborn, T., & Hernández, J. (2021). Explaining Sentinel 2-based dNBR and RdNBR variability with reference data from the bird's eye (UAS) perspective. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *95*, 102262. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2020.102262>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/HESS-21-6307-2017>

- González, M. E., Lara, A., Urrutia, R., & Bosnich, J. (2011). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42°s). *Bosque*, 32(3), 215–219. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300002>
- González, M. E., Gómez-González, S., Lara, A., Garreaud, R., and 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. 10.1002/ecs2.2300
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.06.031>
- Grillakis, M., Voulgarakis, A., Rovithakis, A., Seiradakis, K. D., Koutroulis, A., Field, R. D., Kasoar, M., Papadopoulos, A., & Lazaridis, M. (2022). Climate drivers of global wildfire burned area. *Environmental Research Letters*, 17(4), 045021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AC5FA1>
- Huang, Y., Jin, Y., Schwartz, M. W., & Thorne, J. H. (2020). Intensified burn severity in California’s northern coastal mountains by drier climatic condition. *Environmental Research Letters*, 15(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba6af>
- Keeley, J. E., Bond, W. J., Bradstock, R. A., Pausas, J. G., & Rundel, P. W. (2011). Fire in mediterranean ecosystems: Ecology, evolution and management. *Fire in Mediterranean Ecosystems: Ecology, Evolution and Management*, 9780521824910, 1–515. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139033091>
- Li, W., Xu, Q., Yi, J., & Liu, J. (2022). Predictive model of spatial scale of forest fire driving factors: a case study of Yunnan Province, China. *Scientific Reports* 2022 12:1, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23697-6>
- Liu, Z., Yang, J., & He, H. S. (2013). Identifying the Threshold of Dominant Controls on Fire Spread in a Boreal Forest Landscape of Northeast China. *PLoS ONE*, 8(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055618>
- Loepfe, L., Martinez-Vilalta, J., & Piñol, J. (2011). An integrative model of human-influenced fire regimes and landscape dynamics. *Environmental Modelling and Software*, 26(8), 1028–1040. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.015>
- Long, T., Zhang, Z., He, G., Jiao, W., Tang, C., Wu, B., Zhang, X., Wang, G., & Yin, R. (2019). 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine. *Remote Sensing* 2019, Vol. 11, Page 489, 11(5), 489. <https://doi.org/10.3390/RS11050489>
- Mariani, M., Fletcher, M. S., Holz, A., & Nyman, P. (2016). ENSO controls interannual fire activity in southeast Australia. *Geophysical Research Letters*, 43(20), 10,891-10,900. <https://doi.org/10.1002/2016GL070572>

- Miranda, A., Pais, C., Carrasco, J., Shen, Z. J. M. (2021). Deep fire topology: Understanding the role of landscape spatial patterns in wildfire occurrence using artificial intelligence. *Environmental Modelling & Software*, 143, 105122. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2021.105122>
- Miranda, A., Mentler, R., Moletto-Lobos, Í., Alfaro, G., Aliaga, L., Balbontín, D., Barraza, M., Baumbach, S., Calderón, P., Cárdenas, F., Castillo, I., Contreras, G., De La Barra, F., Galleguillos, M., González, M. E., Hormazábal, C., Lara, A., Mancilla, I., Muñoz, F., Urrutia, V. (2022). The Landscape Fire Scars Database: Mapping historical burned area and fire severity in Chile. *Earth System Science Data*, 14(8), 3599-3613. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3599-2022>
- Mckenzie, D., & Kennedy, M. C. (2011). Power-law behavior reveals phase transitions in landscape controls of fire regimes. In *Nature Precedings*.
- McWethy, D. B., Garreaud, R. D., Holz, A., & Pederson, G. T. (2021). Broad-Scale Surface and Atmospheric Conditions during Large Fires in South-Central Chile. *Fire*, 4(2), 28. <https://doi.org/10.3390/FIRE4020028/S1>
- McWethy, D. B., Pauchard, A., García, R. A., Holz, A., González, M. E., Veblen, T. T., Stahl, J., & Currey, B. (2018). Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in south-central Chile. *PLOS ONE*, 13(8), e0201195. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0201195>
- Moritz, M. A., Krawchuk, A., & Parisien, M.-A. (2010). Pyrogeography: Understanding the ecological niche of fire. In *PAGES news* • (Vol. 18, Issue 2). [http://www.pages-igbp.org/products/newsletters/ref2010\\_2.html](http://www.pages-igbp.org/products/newsletters/ref2010_2.html)
- Parry, M. L., Canziani, O., Palutikof, J. P., & Van der Linden, Paul. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. [https://www.researchgate.net/publication/220042209\\_Climate\\_Change\\_2007\\_Impacts\\_Adaptation\\_and\\_Vulnerability](https://www.researchgate.net/publication/220042209_Climate_Change_2007_Impacts_Adaptation_and_Vulnerability)
- Pausas, J. (2012). “Incendios Forestales”. 2012. ISBN: 978-84-8319-714-1/978-84-00-09492-8, Catarata y CSIC, Madrid, España. *Ecosistemas* 21(3):121. doi.: 10.7818/ECOS.210.21-3.20
- Quintana, J. M., & Aceituno, P.. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera*, 25(1), 1-22. Recuperado en 20 de julio de 2023, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-62362012000100001&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362012000100001&lng=es&tlng=en).
- Ramo, R., Roteta, E., Bistinas, I., van Wees, D., Bastarrika, A., Chuvieco, E., & van der Werf, G. R. (2021). African burned area and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse resolution satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(9), e2011160118. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2011160118/ASSET/620B40ED-92D5-41FF-84A9-ABC1313299F9/ASSETS/IMAGES/LARGE/PNAS.2011160118FIG04.JPG>

- Ricotta, C., Guglietta, D., & Migliozzi, A. (2012). No evidence of increased fire risk due to agricultural land abandonment in Sardinia (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(5), 1333–1336. <https://doi.org/10.5194/NHESS-12-1333-2012>
- Román-Cuesta, R. M., Gracia, M., & Retana, J. (2009). Factors influencing the formation of unburned forest islands within the perimeter of a large forest fire. *Forest Ecology and Management*, 258(2), 71–80. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.03.041>
- Sarricolea P., Serrano-Notivoli R., Fuentealba M., Hernández-Mora M., de la Barrera F., Smith P., Meseguer-Ruiz O., (2020). Recent wildfires in Central Chile: Detecting links between burned areas and population exposure in the wildland urban interface, *Science of The Total Environment*, Volume 706, 135894, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135894>.
- Turner, M., & Gardner, R. (1991). *Quantitative methods in landscape ecology : the analysis and interpretation of landscape heterogeneity*.
- Úbeda X., Sarricolea P., (2016) Wildfires in Chile: A review, *Global and Planetary Change*, Volume 146, Pages 152-161, ISSN 0921-8181, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.004>.
- Universidad de Chile. Instituto de Asuntos Públicos. Departamento de Políticas Públicas., Universidad de Chile. Centro de Análisis de Políticas Públicas., & Maval Impresores). (2016). *Informe país : estado del medio ambiente en Chile: comparación 1999-2015*. Centro de Análisis de Políticas Públicas, Universidad de Chile.
- Urrutia-Jalabert, R., González, M. E., González-Reyes, Á., Lara, A., & Garreaud, R. (2018). Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(4), e02171. <https://doi.org/10.1002/ECS2.2171>
- Van Wagner, C. E. (1987). *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System* (Vol. 35). Canadian Forestry Service.
- Vega-García, C., & Chuvieco, E. (2006). Applying local measures of spatial heterogeneity to Landsat-TM images for predicting wildfire occurrence in Mediterranean landscapes. *Landscape Ecology*, 21(4), 595–605. <https://doi.org/10.1007/S10980-005-4119-5/METRICS>
- Viale, M., & Garreaud, R. (2015). Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(10), 4962–4974. <https://doi.org/10.1002/2014JD023014>
- Viedma, O., Moreno, J. M., & Rieiro, I. (2006). Interactions between land use/land cover change, forest fires and landscape structure in Sierra de Gredos (Central Spain). *Environmental Conservation*, 33(3), 212–222. <https://doi.org/10.1017/S0376892906003122>
- Vitolo, C., Di Giuseppe, F., Barnard, C. (2020). ERA5-based global meteorological wildfire danger maps. *Sci Data* 7, 216. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0554-z>

Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., Radke, J. D., & Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2016.05.016>