



IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AIRE DE LOS MEGAINCENDIOS FORESTALES EN EL PERIODO DE FEBRERO 2023

Habilitación presentada para optar al título de Ingeniero Ambiental:

KATUSKA ESCOBAR SILVA.

Profesor guía: Dr. Francisco de la Barrera

Profesora co-guía: Dra. Claudia Ulloa Tesser

Concepción, Chile, 2024.

“IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AIRE DE LOS MEGAINCENDIOS FEBRERO 2023”

Profesor Guía: Dr. Francisco De La Barrera Melgarejo



Profesor Co-Guía: Dra. Claudia Ulloa Tesser



Profesor Comisión: Dra. Evelyn Habit Conejeros



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- | | |
|----------------------------------|---------------------------|
| ✓ Aprobado por Unanimidad : | (En Escala de 4,0 a 4,9) |
| ✓ Aprobado con Distinción | (En Escala de 5,0 a 5,6) |
| ✓ Aprobado con Distinción Máxima | (En Escala de 5,7 a 7,0) |

Concepción, mayo 2024

Agradecimientos.

Primero a mi familia, sobre todo a mis padres Fanny Silva y Luis Escobar, por su apoyo incondicional durante los 5 años de carrera, por su crianza y darme la oportunidad de estudiar en una universidad. También a mis hermanos Fanny, Carlos y Francisca, que sin sus palabras de aliento, el proceso universitario hubiera sido más complicado, sobre todo cuando un alumno es foraneo, la distancia con la familia es una lucha bastante complicada. Por eso también agradecer a mis amigos de universidad, que fueron una segunda familia durante el proceso universitario, la amistad y apoyo que generé con ellos fue primordial en mi estabilidad tanto académica, emocional y mental. El lazo de amistad que generé con mis amigos de la UDEC, es lo que más destaco dentro del proceso universitario, el amor y apoyo que te puede entregar una persona que no sea de algún parentesco familiar, además de las risas, salidas y conversaciones extensas que parecían terapias.

Agradecer también a mis profesores de tesis, el profesor Francisco De La Barrera quién me apoyó durante el año de tesis, resolviendo todas mis dudas en cualquier momento y teniendo siempre una buena disposición en explicarme y recomendándome asuntos sobre la tesis, también a la profesora Claudia Ulloa, que gracias a su electivo de contaminación atmosférica me di cuenta del área que me gustaba más de la carrera.

Por último agradezco haber estudiado en la Facultad de Ciencias Ambientales del Centro EULA, que contempla una diversidad de docentes dedicados a ramas de distintas áreas de las ciencias ambientales, que hicieron enriquecedor mi proceso en la universidad, entregándome múltiples conocimientos sobre la carrera de Ingeniería ambiental.

Índice General

Resumen	10
1. Introducción	12
1.1 Hipótesis/Pregunta	14
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
2. Antecedentes	15
2.1. Megaincendios.....	15
2.1.2. Megaincendios en Chile	17
2.2. Teledetección como herramienta para analizar de los megaincendios. .	18
2.2.1 Seguimiento de columna de humo proveniente de megaincendios ..	19
2.3. Contaminación atmosférica producida por los megaincendios.	20
2.3.1 Contaminantes emitidos por los megaincendios.	22
2.3.2 Contaminantes criterios.....	23
2.3.3 Efectos en la salud por contaminación atmosférica – contaminantes criterios.....	23
2.4 Marco regulatorio de contaminantes atmosféricos en Chile.	24
3. Metodología	26
3.1 Determinación del área de influencia atmosférica de los megaincendios de febrero de 2023.	26
3.1.1 Datos de teledetección y obtención de la columna de humo generada por los megaincendios.	26

3.1.2 Validación de imágenes satelitales mediante concentraciones <i>In Situ</i> e identificación de umbral de Índice de Aerosol.	28
3.1.3 Determinación del área de influencia atmosférica.	30
3.2 Análisis de los efectos de los megaincendios en la calidad del aire	31
3.2.1 Identificación de estaciones de monitoreo de calidad del aire.....	31
3.2.2 Establecer línea base de concentraciones de contaminantes atmosféricos.	31
3.2.3 Recopilación de datos de Redes de Estaciones de Monitoreo.....	32
3.2.4 Análisis de comportamiento de concentraciones previo y durante megaincendio.	32
3.2.5. Análisis concentraciones línea base.....	32
3.2.6 Percentil 98	33
3.2.7 Análisis comparativo de las concentraciones previas y en temporada al megaincendio.	33
3.3 Estimación del impacto en la calidad del aire para distintas zonas pobladas en el área de influencia.....	35
3.3.1 Evaluación del impacto en la calidad del aire para zonas urbanas dentro del área de influencia.	35
3.3.2 Cálculo de índice de Impacto	36
3.3.2 Elaboración de cartografía ambiental	37
4. Resultados	39
4.1 Determinación del área de influencia atmosférica del megaincendio febrero 2023.....	39
4.1.1 Distribución de contaminantes en diversas áreas urbanas.	39
4.1.2 Área de influencia atmosférica de los megaincendios.....	43

4.2 Efectos de los megaincendios en la calidad del aire.	49
4.2.2 Percentil 98 de concentraciones de contaminantes 2018-2023	54
4.2.3 Análisis de concentraciones de MP10 y 2.5 en temporada de megaincendio y previa a esta (línea base).	56
4.3 Evaluación y jerarquización del impacto en la calidad del aire para distintas zonas pobladas en el área de influencia.....	61
4.3.1 Duración de los contaminantes en el periodo de megaincendio	62
4.3.2 Intensidad de la contaminación atmosférica producida por los megaincendios	66
4.3.3 Población afectada por la exposición a contaminantes asociados al megaincendio	69
4.3.4 Magnitud de impacto en la calidad del aire de los megaincendios forestales del periodo febrero 2023	71
4.3.5 Índice de impacto en la calidad del aire de los megaincendios forestales en el periodo de febrero 2023	74
5. Discusión	78
6. Conclusiones	82
7. Referencias bibliográficas	85
8. Anexos	91

Índice de tablas

Tabla 1. Normas de calidad primarias para contaminantes regulados en Chile	25
Tabla 2. Criterios de clasificación de Correlación de Spearman	29
Tabla 3. Valores de Correlaciones de Spearman	45
Tabla 4. Datos concentraciones MP2.5 y MP10 febrero 2023 y temporada de línea base, Estación Universidad de Talca	60
Tabla 5. Datos concentraciones MP2.5 y MP10 febrero 2023 y temporada de línea base, Estación Rancagua I.	60
Tabla 6. Datos concentraciones MP2,5 y MP10 febrero 2023 y temporada de línea base, Estación El Bosque	60

Índice de figuras

Figura 1 Ejemplo de superposición cartográfica Fuente. Fundamentos de la evaluación de impacto ambiental, Centro de estudio para el desarrollo (CED) Chile, 2001.....	38
Figura 2. Mapas de distribución de aerosoles 03 a 08 de febrero 2023.....	41
Figura 3. Rosas de los vientos correspondientes a estaciones de monitoreo de calidad del aire.....	43
Figura 4. Correlación de Spearman de índice de Aerosol y Concentraciones promedios mensuales MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	44
Figura 5. Correlación de Spearman de índice de Aerosol y Concentraciones promedios mensuales MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	44
Figura 6. Determinación de área de influencia atmosférica del megaincendio febrero 2023.....	46
Figura 7. Área de influencia atmosférica.....	48
Figura 8. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, estación 21 de mayo, Los Ángeles.	50

Figura 9. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5. Estación Hualqui, Concepción.....	50
Figura 10. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, estación INIA, Chillán.....	50
Figura 11. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, estación Universidad de Talca.	50
Figura 12. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, Rancagua I, Rancagua.....	50
Figura 13. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, El Bosque.	50
Figura 14. Percentil 98 de Material Particulado 2,5, años de línea base y año de catastro. Se indica con una línea el valor límite de las concentraciones 24h, según el D.S N°12/2011.	54
Figura 15. Percentil 98 de Material Particulado 2,5, años de línea base y año de catastro. Se indica con una línea el valor límite de las concentraciones 24h, según el D.S N°12/2021..	55
Figura 16. Análisis de concentraciones para MP10 y MP2.5 de línea base y mes de febrero de megaincendios. Estación Hualqui, Concepción.....	57
Figura 17. Análisis de concentraciones para MP10 y MP2.5 de línea base y mes de febrero de megaincendios, estación 21 de mayo, Los Ángeles.	58
Figura 18. Análisis de concentraciones para MP10 y MP2.5 de línea base y mes de febrero de megaincendios, estación INIA, Chillán.	59
Figura 19. Mapa interpolación IDW, Promedio de días de concentración sobre el límite de normativa para el MP10	63
Figura 20. Mapa interpolación IDW, Promedio de días de concentración sobre el límite de normativa para el MP2,5	65
Figura 21. Mapa interpolación IDW de concentración máximas diarias para Material Particulado 10 Fuente.	67

Figura 22. Mapa interpolación IDW de concentración máximas diarias para Material Particulado 2,5.	68
Figura 23. Determinación del número de habitantes de las comunas pertenecientes al área de influencia atmosférica del megaincendio febrero 2023.	70
Figura 24 Mapa de magnitud según de concentración máximas diarias y duración de Material Particulado 10	72
Figura 25 Mapa de magnitud según de concentración máximas diarias y duración de Material Particulado 2,5..	73
Figura 26. Mapa de distribución de Índice de impacto atmosférico por megaincendio de febrero 2023 para MP2,5	76
Figura 27. Mapa de distribución de Índice de impacto atmosférico por megaincendio de febrero 2023 para MP10.....	77

Resumen

Durante el mes de febrero 2023, se registraron una serie de eventos de focos de incendios forestales en las provincias del Biobío, Concepción, Ñuble y Malleco. Estos eventos fueron caracterizados por su rápida e intensa propagación, abarcando miles de hectáreas afectadas. Los incendios impactan en la calidad del aire, ya que el proceso de combustión de plantaciones forestales afectadas, emiten grandes toneladas de gases y partículas hacia la atmosfera. La columna de humo proveniente de los focos del megaincendio es capaz de desplazarse a largas distancias, debido a la velocidad y dirección del viento afectando múltiples áreas pobladas.

En el presente estudio, se llevó a cabo un profundo análisis sobre el impacto de los megaincendios de febrero 2023 en la calidad del aire, centrándose en los contaminantes atmosféricos MP10 y MP2.5. Se utilizó el satélite Sentinel-5P y su índice espectral de aerosol Índice de Aerosol (AI) para identificar la distribución y extensión de los contaminantes. La relación existente entre las variables de los valores del índice de aerosol (AI) y las concentraciones in situ son significativas y existe una correlación moderada.

Durante el megaincendio, se observó un aumento significativo en las concentraciones de MP10 y MP2.5, superando los límites normados (D.S N°12/2011 y D.S N°12/2021). Las concentraciones más altas se registraron en las provincias de Biobío y Ñuble, con valores entre 400 y 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La estación de Laja fue la más afectada en términos de intensidad alcanzando 410 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y 560 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en MP10 sobrepasando el límite de la normativa durante 11 días para el MP2,5 y 10 días consecutivos para MP10.

El análisis del índice de impacto atmosférico reveló que el MP2.5 tuvo un mayor impacto que el MP10, afectando principalmente a las comunas de Chillán, Los Ángeles, La Florida y Puente Alto. El impacto de la contaminación atmosférica

producida por los megaincendios fue medio alto a alto, afectando a alrededor del 60% de la población del país.

1. Introducción

Los incendios forestales son eventos que causan impactos significativos en los ecosistemas, las especies endémicas y las poblaciones expuestas a estos eventos, además de tener consecuencias económicas e impacto a la calidad del aire (González *et al.*, 2020). Últimamente, se ha presenciado estos eventos de incendios pero con mayor intensidad y severidad, ya que su propagación es mucho más extensa y por este hecho las consecuencias o impactos generados son de una magnitud mayor. Con respecto a la última característica mencionada, se catalogan estos eventos como megaincendios y se caracterizan por abarcar mayores a 10.000 hectáreas quemadas. Además para categorizar un evento como megaincendio se deben incluir varios parámetros como: extensión, comportamiento, resistencia a la contención e impactos económicos y ambientales asociados a estos (Linley *et al.*, 2022)

Chile ha enfrentado un aumento significativo en la frecuencia e intensidad de los incendios forestales en las últimas décadas, fenómeno atribuido a una combinación de factores como el cambio climático, transformación de uso de suelo por plantaciones forestales, la expansión urbana y la actividad humana (González *et al.*, 2020). Entre estos eventos, se destaca los megaincendios de febrero 2017, caracterizados por su magnitud sin precedentes y su impacto ambiental de gran alcance. Estos incendios afectaron extensas áreas de bosques y vegetación, propagándose rápidamente debido a condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas y fuertes vientos. La magnitud de los daños causados por estos megaincendios superó ampliamente los eventos anteriores en el país (Bowman *et al.*, 2019).

La preocupación por la calidad del aire durante y después de estos megaincendios fue especialmente relevante en las zonas pobladas cercanas a las áreas afectadas. La emisión de contaminantes atmosféricos, incluyendo gases tóxicos y partículas finas, plantea serios riesgos para la salud pública

aumentando así la mortalidad y morbilidad (De la Barrera *et al.*, 2018). Estos eventos han generado una creciente conciencia sobre la importancia de abordar los impactos asociados con los megaincendios y la contaminación del aire. La necesidad de comprender mejor los impactos de estos megaincendios en la calidad del aire se ha convertido en una prioridad para las políticas públicas, con el fin de mitigar los impactos negativos y proteger la salud y el bienestar de la población afectada (D'Evelyn *et al.*, 2022)

Frente a tal situación, es que surge la importancia de investigar el impacto de los megaincendios en la calidad del aire, dada su repercusión directa en la salud de las personas y la sostenibilidad ambiental. El aumento en la frecuencia y severidad de los megaincendios no solo representan una amenaza para la salud de las personas expuestas a la contaminación atmosférica generada, sino que también tienen un impacto significativo en el deterioro de la calidad del aire a nivel puntual y regional (Akdis & Nadeau, 2022).

El objetivo principal de esta investigación es identificar las consecuencias que de los megaincendios que repercuten en la calidad del aire y la población afectada. Es esencial llevar a cabo estudios que examinan las consecuencias que generan estos eventos en la calidad del aire en términos de intensidad e identificar las localidades afectadas por este impacto. Esto se debe a que la población impactada es vulnerable estar expuestas a contaminantes perjudiciales para la salud, desencadenando enfermedades respiratorias y aumentar la tasa de mortalidad cuando hay una exposición aguda (24 horas) (Graham *et al.*, 2021).

Por ello, en el presente estudio se buscó evaluar el impacto en la calidad del aire que generaron los megaincendios de febrero 2023 en la zona centro-sur de Chile. En esta investigación se utilizan herramientas satelitales, que permiten monitorear el comportamiento de la atmósfera, reflejando el impacto generado por los megaincendios ya que visualiza el comportamiento y evolución de la columna de humo emitidas por los megaincendios (Othman *et al.*, 2022).

Asimismo, se analizan de las concentraciones de los contaminantes. Estos datos se obtienen mediante estaciones de monitoreo de calidad del aire, para saber la clasificación de la calidad del aire de la zona en donde se encuentra la estación de monitoreo (De la Barrera et al., 2018).

1.1 Hipótesis/Pregunta

¿Cuál fue el impacto en la calidad del aire en términos de extensión, intensidad y zonas urbanas afectadas del megaincendio de febrero de 2023?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el impacto en la calidad del aire provocado por los megaincendios de febrero de 2023.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Determinar el área de influencia atmosférica de los megaincendios de febrero de 2023.
- 2) Analizar los efectos de los megaincendios en la calidad del aire, en términos de cambios en concentraciones de los contaminantes Material Particulado 10 y 2,5 en el área de influencia.
- 3) Evaluar y jerarquizar el impacto en la calidad del aire para distintas zonas pobladas en el área de influencia.

2. Antecedentes

2.1. Megaincendios.

Los megaincendios son aquellos eventos en que ocurre un incendio, pero con mayor intensidad y severidad. En pocas palabras, se trata de sucesos en los que este fenómeno causa daños catastróficos, provocando efectos sociales, ecosistémicas y económicas a corto y largo plazo en un área determinada. La severidad es una terminología que define a un incendio que aborda los cambios biológicos, químicos y físicos ocurridos en un lugar como consecuencia del fuego (Armenteras & De la Barrera, 2023).

La dimensión que abarca un megaincendio corresponde a miles de hectáreas incineradas producto de este fenómeno. Algunas investigaciones señalan que son considerados megaincendios, aquellos que poseen una extensión aproximadamente mayor o igual a 10.000 ha (Linley *et al.*, 2022). Estos representan cuantitativamente el $\pm 0,1$ % de los incendios totales registrados, sin embargo, comprenden el ± 95 % del área total quemada producto de estos sucesos (Attiwill & Binkley, 2013).

Los paisajes caracterizados por un clima mediterráneo presentan una mayor tendencia a producir incendios debido a sus veranos secos y calurosos. Evidentemente, el cambio climático es un factor significativo en el aumento de los megaincendios. Los índices climáticos que favorecen la incidencia de incendios cada vez más extensos se deben a la disminución de precipitaciones y humedad relativa, escasez hídrica, aumento de temperaturas, además de las altas velocidades del viento (Cartaña *et al.*, 2021).

Los paisajes mediterráneos más propensos a generar incendios son aquellos donde coinciden características determinadas por la cantidad, tipología y densidad de la vegetación que actúa como combustibles, es decir, materia forestal viva o especialmente muerta (seca) (Catillo. *et al.*, 2019). Algunos tipos de vegetación son más inflamables en comparación a otros (p. ej. pastos altos,

eucaliptos y pinos). Además, la intervención humana a los usos de tierra debido a la incorporación de pirófitos exóticos (p. ej., plantaciones forestales propensas al fuego), ha alterado a la producción y propagación de incendios (Bowman *et al.*, 2019). Por otro lado, el aumento de la sequía en diversas áreas del mundo transforma a las especies arbolearas y matorrales en grandes potenciales de combustibles disponible debido a la disminución de humedad contenidas en estas especies. De este modo, las altas temperaturas favorecen paralelamente el origen de un incendio, emitiendo calor a los arbolados y pastizales que carecen de humedad, que en conjunto con el oxígeno del aire llega a provocar los megaincendios.

Los megaincendios no solo afectan áreas forestales o naturales, también involucran las consecuencias generadas por este suceso debido a los incendios generados en paisajes urbanos y rurales con asentamiento humanos, ya que existen áreas urbanas aledañas a las plantaciones forestales altamente inflamables, conocidas como interfaz urbano-forestal (WUI) las cuales se ven altamente afectada por pérdidas estructurales y económicas (Chas-Amil *et al.*, 2013). En consecuencia, se presenta contaminación en el aire producto de las emisiones de contaminantes debido al proceso de combustión de los incendios, afectando principalmente a la población aledaña a estos eventos (Sandoval *et al.*, 2019).

Respecto a los impactos que los megaincendios, estos cubren múltiples aspectos, incluyendo la biodiversidad, que se ve principalmente afectada la cobertura del suelo y la pérdida de especies endémicas. Además, generan impactos económicos considerables, tanto por la pérdida de servicios ecosistémicos como por los costos en los que incurre el Estado. A nivel psicológico y comunitario, los megaincendios también tienen impactos significativos. Además, generan impactos negativos en la calidad del aire debido a las emisiones de contaminantes como el CO₂ y las partículas, lo que agrava

aún más las consecuencias ambientales y de salud asociadas a estos eventos (CR², 2017).

2.1.2. Megaincendios en Chile

La zona centro-sur de Chile presenta un clima mediterráneo, el cual se extiende desde la Región de Valparaíso hasta la Región de la Araucanía. Este tipo de clima es especialmente propenso a generar incendios forestales debido a sus altas temperaturas y bajas precipitaciones en la estación de verano. Estudios recientes han señalado una variabilidad climática en los últimos años en la zona central de Chile, con la presencia de un aumento significativo en la recurrencia de las sequías y disminución de las precipitaciones (González *et al.*, 2011).

Los megaincendios no son episodios recurrentes en el país y se ha contemplado cada vez con más frecuencia en el Chile durante los últimos diez años, debido principalmente a la variabilidad climática. Además, la intensiva transformación de usos de suelos naturales de bosques y matorrales nativos por reforestaciones de plantaciones forestales masivas de pirófitos exóticos (pinos y eucaliptos) repercuten en la magnitud y frecuencia de los incendios forestales (De la Barrera *et al.*, 2018)

Los paisajes que presentan plantaciones forestales densas de Pino y Eucalipto son factores imprescindibles por considerar, ya que las hojas de estas especies contienen un bajo porcentaje de humedad y un alto poder calorífico, lo que las vuelve altamente inflamables (Peña-Fernández & Valenzuela-Palma, 2004). Dado el gran porcentaje de hectáreas de las regiones VII, VIII, y XVI caracterizadas por la presencia de plantaciones forestales (pinos y eucalipto), se puede inferir que son paisajes que presentan una mayor susceptibilidad a los incendios forestales debido a su gran carga de combustibles con mayor inflamabilidad.

En el verano de 2017, Chile presentó una serie de grandes eventos de megaincendios. En dicho contexto, se registró una superficie quemada total de 529.974 hectáreas, distribuidas en 91 focos de fuego que afectaron a 5 regiones del país. Se identificaron 3 de estos incendios forestales, que fueron caracterizados como megaincendios debido a su extensión, ya que abarcaban un área quemada mayor a >40.000 ha. Incluso, uno de estos incendios abarcó una extensión mayor a 100.000 hectáreas. Además las repercusiones en la calidad del aire afectaron a las mayoritariamente en la región del Biobío, donde se registró la mayor concentración diaria de 739 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el $\text{MP}_{2,5}$, 689 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre el límite de la normativa establecida para el contaminante (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, D.S N°12/2011) (De la Barrera *et al.*, 2018).

2.2. Teledetección como herramienta para analizar de los megaincendios.

Es posible evaluar la dimensión de los incendios mediante herramientas como la teledetección, ya que pueden brindar información temporal, espacial y espectral sobre los cambios en la superficie de la tierra y atmósfera, así como su expansión geográfica mediante Imágenes Satelitales. La Teledetección ha sido fundamental en el análisis de los incendios forestales, ya que representan en la cartografía el área quemada mediante resoluciones espaciales en el preciso momento en el cual ocurren los incendios (Paula Michalijos & Uboldi, 2013). Este proceso es llevado a cabo mediante el análisis de datos extraídos de un dispositivo de los satélites conocido como sensor, los cuales proyectan imágenes en periodos de tiempo tanto mensuales, cada 15-10 días, semanales o diarias, según el tipo de sensor del satélite respectivo (Barmoutis *et al.*, 2020)

Los incendios se perciben mediante la detección de focos de calor, basándose en la capacidad de determinados sensores para capturar la energía emitida por la superficie en las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo medio y térmico. Estos sensores están diseñados específicamente para detectar y medir

la radiación infrarroja emitida por los objetos o áreas que generen calor (Marcelo *et al.*, 2008).

Además de los focos de calor (incendios) que percibe los satélites, es posible presenciar la nube de partículas y/o contaminación emitida por estos incendios. La teledetección ha encontrado diversas aplicaciones dentro del ámbito científico, destacando especialmente la utilidad en los estudios atmosféricos como la contaminación provocada por eventos naturales, mediante sensores especializados que pueden monitorear la radiación electromagnética a diferentes ondas (Barmpoutis *et al.*, 2020), lo que permite detectar y analizar diversos aspectos relacionados a la calidad del aire .

2.2.1 Seguimiento de columna de humo proveniente de megaincendios

Las imágenes satelitales son de gran importancia para complementar las mediciones terrestres y obtener una visión global de la calidad del aire y las concentraciones de contaminantes. En el caso de los megaincendios, estas imágenes permiten visualizar de manera clara la extensión y dirección de la columna de humo, además de brindar información sobre las concentraciones de los contaminantes (De la Barrera *et al.*, 2018).

El satélite Sentinel-5p, parte del programa Copernicus de la Unión Europea, desempeña una función importante en monitorear la atmosfera, capaz de proporcionar visualizar una gran cantidad de gases trazas y aerosoles atmosféricos, permitiendo identificar la calidad del aire áreas a estudiar o ser analizadas (Soleimany *et al.*, 2021). El satélite detecta y mapea varios gases, incluidos el dióxido de nitrógeno (NO₂), el ozono (O₃), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂), el metano (CH₄), formaldehído (CH₂O), así como aerosoles. Estos datos se obtienen mediante dos versiones: casi en tiempo real (NRTI) y fuera de línea (OFFL), lo que permite una monitorización continua del comportamiento de los gases en la atmósfera.

En situaciones de megaincendios, los datos satelitales son útiles por su capacidad de proporcionar mediciones de concentraciones precisas de gases y aerosoles, donde las imágenes producidas por este colaboran para la realización un análisis sobre la extensión y dirección de los contaminantes emitidos por los incendios. En particular, el índice espectral “Índice de aerosol” del satélite que permite visualizar las concentraciones de los aerosoles, se obtienen mediante el contraste espectral en el rango ultravioleta, lo que proporciona información importante ya que a diferencia de las mediciones ópticas del espesor de aerosoles basadas en otros satélites, el Índice de Aerosol puede reflejar las concentraciones de los aerosoles en presencia de nubes. Esto beneficia al momento de monitorear la evolución de columnas de aerosoles provenientes de polvo del desierto, cenizas de erupciones volcánicas y el humo por el proceso de combustión de biomasa (Otero et al., 2020).

Uno de los aspectos más destacados es la utilización del Sentinel-5p para estimas concentraciones de partículas (MP2.5 y 10) a partir del índice de aerosoles. Se ha observado una fuerte relación entre los valores dados por el índice de aerosoles y las mediciones de partículas, siendo así una herramienta eficaz para evaluar la calidad del aire y predecir las concentraciones de Material Particulado en áreas urbanas y regiones afectadas por la contaminación atmosférica (Mamić et al., 2023)

2.3. Contaminación atmosférica producida por los megaincendios.

La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de compuestos químicos o biológicos que afectan a la salud o bien estar humano, proveniente de eventos naturales (erupción volcánica, incendios forestales) como de actividades humanas (fuentes industriales, residenciales).

Los megaincendios emiten una columna de humo que contienen contaminantes primarios (gases y partículas liberadas directamente a la atmósfera) (Graham et al., 2021). Estos eventos naturales son capaces de contribuir con grandes

concentraciones de gases y partículas en la atmósfera durante periodos de tiempo indeterminados, tanto a corto como a largo plazo, dependiendo del tipo de contaminante.

Las condiciones climáticas durante el incendio, como los fuerte vientos, puede tener un impacto significativo en la dispersión de la pluma de gases y partículas emitidas desde los puntos de los incendios, extendiéndose hacia diferentes áreas. Los megaincendios pueden tener consecuencias de gran magnitud en la atmósfera perjudicando principalmente a las áreas urbanas ubicadas en los valles centrales (Santiago, Rancagua, Talca, Linares, Chillán). Esto se debe al fenómeno de cuenca atmosférica, en donde las concentraciones de los contaminantes tenderán a permanecer constantes durante un tiempo más prolongado debido por la poca ventilación que ocurren en esa área, es decir, la falta de circulación de aire en los valles centrales permite que los contaminantes se acumulen y mantengan en la atmósfera durante más tiempo.

Es posible evaluar el impacto en la calidad del aire generado por los eventos de los megaincendios a través de diversos criterios y metodologías de medición que permite cuantificar las concentraciones de los contaminantes y la dispersión de estos que logran afectar diversas áreas lejanas a los focos de fuego.

Este impacto se puede determinar mediante las concentraciones de contaminantes que se obtienen a través de estaciones de monitoreo de la calidad del aire. Además, los índices de calidad del aire (ICA) entrega una interpretación de la calidad del aire según las concentraciones de los contaminantes, calificando un área en categorías que van desde “bueno” hasta “emergencia”.

Por otro lado, los modelos de dispersión de contaminantes, también conocidos como modelación de contaminantes atmosféricos, permiten simular el movimiento de los contaminantes en la atmósfera y predecir su distribución espacial y temporal (Silva Adrian & Godoy Gustavo, 2016). Por último, el monitoreo remoto, mediante herramientas como imágenes satelitales,

proporciona información detallada sobre la extensión, intensidad y evolución de las concentraciones de contaminantes generadas por los megaincendios, contribuyendo así a una evaluación en impacto en la calidad del aire (Marino *et al.*, 2010.).

2.3.1 Contaminantes emitidos por los megaincendios.

Los incendios liberan grandes concentraciones de gases y partículas principalmente, entre ellas se destacan:

- **Gases de efecto invernadero:**
 - CO₂ (Dióxido de carbono)
 - CH₄ (Metano)
 - N₂O (Óxido nitroso)
 - O₃ (Ozono)
- **Compuestos foto químicamente reactivos**
 - CO (Monóxido de carbono).
 - COV (Compuestos orgánicos volátiles).
 - NO_x (Óxido de nitrógeno).
- **Partículas**
 - Agua
 - MP2,5
 - MP10

Según el informe de *Los Incendios Forestales en Chile del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR², 2017)*, los megaincendios del verano del 2017 en Chile emitieron 100 millones de toneladas de CO₂, aproximadamente el 90% de lo que se emite en un año entero (González *et al.*, 2020). Además, cerca de un 90% del total de masa de partículas emitidas por los incendios forestales

corresponde partículas finas de diámetro menor o igual a 2,5 µm (Shrestha et al., 2022).

2.3.2 Contaminantes criterios

Los contaminantes criterios son compuestos químicos o biológicos emitido al ambiente a través de diversas fuentes, tanto naturales como antrópicas. Estos contaminantes se encuentran presente en todos los lugares y se caracterizan específicamente por ser peligrosos para la salud pública y el medio ambiente cuando alcanzan ciertas concentraciones específicas.

Los megaincendios emiten una serie de gases y partículas a la atmosfera, muchos de los cuales son considerados contaminantes criterios como el MP 2,5 y MP 10, NO₂ y O₃.

Los contaminantes criterios están regulados por organizaciones y entidades internacionales con el fin de establecer límites de sus concentraciones en la atmósfera, proporcionando así un marco de referencia para que los países propongan restricciones mediante normas de calidad ambiental. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha estado particularmente al tanto de los impactos de la calidad del aire en la salud humana. En el año 2005, publicó una Guía de Calidad del Aire, la cual el 2021 tuvo su última actualización (Guo *et al.*, 2020). Este texto se centra los seis contaminantes criterios, MP 2,5, MP10, SO₂, NO₂, CO y O₃, estableciendo límites para sus concentraciones en condiciones de exposición a largo plazo (1 año) y corto plazo (24 horas).

2.3.3 Efectos en la salud por contaminación atmosférica – contaminantes criterios.

La contaminación atmosférica es causante a efectos nocivos en la salud de las personas provocando efectos fisiopatológicos, aumento en las enfermedades respiratorias, consultas diarias y hospitalizaciones por un incremento de mortalidad (Akdis & Nadeau, 2022).

Los contaminantes criterios atmosféricos están relacionados con la contribución de disminución de la función pulmonar y aumento de reactividad bronquial, exacerbación del asma bronquial y cáncer pulmonar, entre otros problemas a la salud humana (D'Evelyn *et al.*, 2022). Además, estudios describen que las personas más susceptibles a la contaminación atmosférica son los adultos mayores, niños pequeños, personas con problemas pulmonares o respiratorios, mujeres embarazadas y aquellas personas con deficiencias nutricionales.

Los principales contaminantes criterios que amenazan a la salud de las personas son el MP10 y MP2,5 debido a sus grandes concentraciones en la atmósfera ya que son altamente emitidos por diversas fuentes como los megaincendios. Estas micropartículas pueden entrar vías respiratorias causando infecciones agudas del tracto respiratorio bajo, alteraciones del sistema de coagulación, inflamación e infecciones, asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, enfermedades cardiovasculares, efectos en el sistema nervioso central y en los casos de mayor gravedad, incluso cáncer (Ubilla & Karla Yohannessen, 2016).

2.4 Marco regulatorio de contaminantes atmosféricos en Chile.

Existen regulaciones que se enfocan en controlar y limitar las concentraciones de los contaminantes emitidos por los megaincendios como el material particulado (MP) 2,5 y 10, monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y también ozono (O₃). Las normativas de calidad primaria ambiental para la calidad del aire están implementadas para proteger la salud de la población y reducir los efectos perjudiciales de la contaminación atmosférica a corto plazo (agudos) y largo plazo (crónicos).

En Chile existen normativas para los 5 contaminantes criterios, además para los contaminantes Monóxido de Carbono (CO) y Plomo (Pb), normativas las cuales especifican las concentraciones límites diarias y anuales, definidas de la siguiente forma:

Contaminante	Valor de la norma	Unidad	Unidad de tiempo	Normativa ambiental aplicable
MP10	130	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Diaria	D.S. N°12/2021
	50	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Anual	
MP2,5	20	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Diaria	D.S. N°12/2011
	50	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Anual	
O3	130	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	8 horas	D.S. N°112/2002
SO2	250	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Diaria	D.S. N°104/2018
	80	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Anual	
NO2	400	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora	D.S. N°114/2002
	100	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Anual	
CO	30.000	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora	D.S. N°115/2002
	10.000	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Anual	
Pb	0,5	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	8 horas	D.S. N°136/2000

Tabla 1. Normas de calidad primarias para contaminantes regulados en Chile

Fuente. Elaboración propia con datos extraídos de las normativas de calidad ambiental.

3. Metodología

3.1 Determinación del área de influencia atmosférica de los megaincendios de febrero de 2023.

La obtención del área de influencia se obtiene a través de múltiples procesos metodológicos. Primeramente descargó información satelital y se visualizó las imágenes satelitales en formato ráster en un software GIS con la finalidad de analizar el comportamiento de los contaminantes. Complementando la información mediante la generación de una rosa de los vientos que indicará la dirección y velocidad de viento, por ende la posible dispersión de los contaminantes durante los días de megaincendio. También se realizó una relación entre las variables valores de índice de aerosol (IA) y las concentraciones del MP10 y MP2,5 *in situ* mediante una correlación de Spearman. Además mediante el mismo análisis estadístico se estableció un umbral de valores del Índice de Aerosol que refleje concentraciones sobre 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y mayores a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10.

3.1.1 Datos de teledetección y obtención de la columna de humo generada por los megaincendios.

El proceso de detección e identificación de la distribución espacial de contaminantes atmosféricos generados por los megaincendios se basó en la recopilación de imágenes del satélite Sentinel-5p, utilizando unos de sus índices espectrales denominado “índice de aerosoles”. Esta herramienta es sumamente útil, ya que permite visualizar capas de imágenes satelitales sobre los peligros y eventos naturales, detectando polvos del desierto, columnas de cenizas volcánicas y quema de biomasa (L. Otero *et al*, 2020)

El sensor índice de aerosoles (AI) es capaz de monitorear el espesor de aerosoles absorbentes por radiación ultravioleta, es decir, el índice visualiza contaminantes atmosféricos, como partículas aerodinámicas suspendidas en la atmósfera, que pueden ser presenciado en superficies brillantes (nubes y

desiertos), generando así un espectro visual de la contaminación producida por los megaincendios (Bruno *et al.*, 2023).

Primeramente se visualizó la magnitud de la contaminación provocada por los incendios debido a la generación de la pluma de humo según la extensión dentro del territorio chileno mediante el programa EOSDID Worldview-Earth Data, durante un intervalo de un mes, con la finalidad de tener una percepción de la distribución y extensión de la columna de humo.

Para la visualización y descarga de las imágenes satelitales producidas por el satélite Sentinel-5P se generó un *script* en el programa Google Earth Engine (GEE) con ciertas características que debe contemplar la imagen satelital como; fecha del evento que refleje la imagen, polígono del área estudiada y sus coordenadas, valores de las bandas espectrales y sus respectivos colores (Soleimany *et al.*, 2021).

Para comprender mejor el comportamiento y la distribución de los contaminantes atmosféricos, específicamente material particulado (MP), durante el mes de febrero, se elaboraron imágenes satelitales diarias. Adicionalmente, se generó una imagen satelital que representa la concentración promedio de MP durante todo el mes. Una vez descargado los datos, se trabajó las imágenes satelitales en un formato ráster en una herramienta de Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) para identificar donde se hallaban las mayores concentraciones de los contaminantes (Material Particulado).

Complementando la información visualizada por las imágenes satelitales por la distribución de los contaminantes, se generaron rosas de los vientos en diversos puntos de las áreas afectadas por la presencia de aerosoles, con el propósito de analizar la distribución de los contaminantes presenciada por las imágenes es complementaria con la dirección y velocidad del viento y no interfieren otros factores ambientales en la dispersión de estos.

3.1.2 Validación de imágenes satelitales mediante concentraciones *In Situ* e identificación de umbral de Índice de Aerosol.

Unos de los pasos para validar la comparación de los datos de calidad del aire derivados de observaciones del satélite Sentinel-5P con los datos de calidad del aire obtenidos por mediciones *in situ* de estaciones de monitoreo es mediante análisis estadísticos (Bruno *et al.*, 2023)

Las imágenes satelitales demuestran valores de concentraciones de contaminantes, sin embargo estos valores no definen un umbral para determinar cuándo estos valores representan niveles elevados de aerosoles. En el presente estudio se llevó a cabo una metodología que propone combinar un análisis estadístico-espacial.

Se evaluó la relación entre los valores de aerosol obtenidos mediante la imagen satelital relacionada al mes de febrero y las concentraciones promedio mensuales de Material Particulado 10 (MP10) y Material Particulado 2.5 (MP2,5) obtenidas de las estaciones de monitoreo de calidad del aire. Con el propósito de comprender cómo los valores del aerosol detectados desde el espacio se relacionan con las mediciones de las concentraciones *in situ* y establecer el umbral que indique el valor del índice que refleje elevadas concentraciones de los contaminantes estudiados del mes analizado.

Los datos necesarios para la realización del análisis estadístico fueron la información de los valores del índice de aerosol obtenidos de las imágenes satelitales del mes de febrero y las concentraciones promedio mensuales de los contaminantes en cuestión recopilados de estaciones de monitoreo de calidad del aire, es decir, concentraciones de las contaminantes *in situ*. Las estaciones consideradas en el estudio pertenecen a las regiones de: Valparaíso, Metropolitana, Libertador Bernardo O'Higgins, Maule, Ñuble, Biobío y Araucanía

Se generó un análisis estadístico de Correlación de Spearman para establecer la relación entre los valores del índice de aerosol (AI), indicador de la presencia de

material particulado fino en la atmósfera, y las concentraciones *in situ* de MP10 y MP2,5 recopiladas de múltiples estaciones de monitoreo ubicadas en regiones potencialmente afectadas por la contaminación atmosférica generada por el megaincendio.

Esta técnica estadística establece si existe una relación entre las dos variables independientes y con valores no paramétricos (Médicas C. *et al.*, 2009). Donde la fórmula de *r* de Spearman se define de la forma:

$$R_s = 1 - \frac{6 - \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde:

- *R_s* es el coeficiente de Correlación de Spearman
- *d_i* = *r_{x_i}* – *r_{y_i}* es la diferencia entre las variables X (valores de índice de aerosoles) e Y (valores de concentraciones promedio mensuales *in situ*)
- *n* es el número de observaciones.

en los valores de *R_s* indican que tan relacionados están las variables, se puede clasificar entre valores del -1 a 1, donde:

Clasificación de correlación	de	Valor R de Spearman (R _s)
Negativa perfecta		-1,0
Negativa, fuerte moderada, débil		-0,5
Moderada fuerte		+0,5
Positiva perfecta		+1,0

Tabla 2. Criterios de clasificación de Correlación de Spearman

Fuente. Elaboración propia

Al tener el valor del coeficiente de correlación de Spearman que verifica si ambas variables se correlacionan. Se procedió a establecer un umbral en el índice de aerosol que indicó las concentraciones elevadas de MP10 y MP2,5 durante el

evento de los megaincendios, Para establecer el umbral se consideró las imágenes satelitales como las concentraciones in situ de los contaminantes.

Se realizó un análisis en conjunto mediante lo visualizado de las imágenes satelitales para identificar áreas donde se puede encontrar altas concentraciones de los contaminantes. Este análisis visual se complementó con la correlación de Spearman, para determinar qué valor del índice de aerosol coincidían con las concentraciones anómalas de MP10 y MP2,5, para ello analizaron las concentraciones sin evento de megaincendio como referencia ($>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ya que estas indican una alteración significativa de los contaminantes durante este mes.

En otras palabras, se estableció un umbral utilizando los valores del índice de aerosol que coincidían con concentraciones mayores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10 y 2,5. Este umbral se utilizó como indicador para identificar la presencia altas concentraciones de contaminantes para el AI.

3.1.3 Determinación del área de influencia atmosférica.

Una vez que se estableció el umbral que identifica los valores de altas concentraciones de contaminantes atmosféricos, se procedió a utilizar un Software de Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) para delimitar un polígono en el ráster de la imagen satelital. El polígono incluye todas las zonas donde el valor del índice de aerosol es igual o mayor al umbral establecido según la correlación de Spearman.

Posteriormente, en el área de influencia atmosférica, correspondiente al área total que abarca el polígono, se llevó a cabo un análisis para determinar cuántas provincias y comunas se encuentran dentro de esta área. Es decir, se identificó las zonas geográficas que fueron afectadas por el evento de megaincendio de febrero 2023, proporcionando así un panorama claro de las áreas impactadas por los contaminantes y posteriormente realizar un análisis de estas zonas.

3.2 Análisis de los efectos de los megaincendios en la calidad del aire

3.2.1 Identificación de estaciones de monitoreo de calidad del aire

El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) del Ministerio del Medio Ambiente, es una herramienta que entrega información sobre la calidad del aire en diversos puntos del país mediante una red de estaciones de monitoreo de calidad del aire que cuenta con una representatividad poblacional. Su función es proporcionar información sobre las concentraciones de ciertos contaminantes atmosféricos que son capturados por las estaciones. Los contaminantes medidos por esta red de monitoreo son principalmente los que están regulados por determinadas normativas primarias de calidad del aire, entre estos se encuentran principalmente los contaminantes criterios: Material particulado respirable y fino respirable (MP10 y MP2,5), Dióxido de azufre (SO₂), Dióxido de nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) y Monóxido de carbono (CO).

Al obtener el área de influencia atmosférica se analizó y seleccionó las estaciones de monitoreo de calidad del aire que inciden dentro de esta área. Para esto se descargó el *Shapefile* de la red de monitoreo del SINCA, se insertó en ArcGIS y recortó este *Shapefile* según el polígono de área de influencia atmosférica.

3.2.2 Establecer línea base de concentraciones de contaminantes atmosféricos.

Una línea de base corresponde a las condiciones ambientales previas a la generación de un impacto, en los antecedentes del área de influencia debe contener ciertas descripciones del medio físicos y sus características (Espinoza *et al.*, 2001). En el caso de estudio, se analizó la situación previa al impacto generado por la contaminación atmosférica en comparación con las transformaciones por el cambio de concentraciones de los contaminantes emitidos por el megaincendios.

Con respecto a lo anterior, se estableció una línea base para evaluar la variabilidad de las concentraciones en el evento de megaincendio y anterior a

este, para esto, la línea base debe comprender un periodo en donde no se contemplen escenarios o eventos que alteren en el aumento de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos. Se consideró un periodo de 5 años, abarcando el mes de febrero de los años 2018 al 2022. Se tomó en cuenta este periodo como línea base por lo estipulado anteriormente, ya que no reflejan anomalías con respecto a la calidad del aire.

3.2.3 Recopilación de datos de Redes de Estaciones de Monitoreo.

Considerando que los contaminantes evaluados en el estudio son MP2,5 y MP10 se descargaron la base de datos de Excel con la información de las concentraciones de los contaminantes, se debe considerar para esto las concentraciones diarias del mes de febrero del evento de megaincendio (2023) y de los años anteriores estipulados en la línea base (2018-2022).

3.2.4 Análisis de comportamiento de concentraciones previo y durante megaincendio.

Mediante la base de datos de las concentraciones del MP10 y 2.5, se realizó análisis del comportamiento de los contaminantes previamente al evento del megaincendio para esto se evaluó la concentraciones mensuales de los años de la línea base, el percentil 98 de ambos contaminantes con la finalidad de identificar qué tan significativa fue la contaminación emitida por este evento durante el año 2023, por último se generó un análisis comparativo entre las concentraciones de la línea base y las concentraciones presenciadas en el mes de febrero 2023.

3.2.5. Análisis concentraciones línea base.

Se calcularon las concentraciones mensuales de febrero de los contaminantes durante el periodo previo al megaincendio (2018-2022) de las estaciones de monitoreo ubicadas dentro del área de influencia atmosférica. El análisis ayudó a comprender la calidad basal del aire en las zonas afectadas y determinar si el

aumento de las concentraciones del MP10 y MP2,5 en febrero de 2023 alteró significativamente la calidad basal preexistente.

3.2.6 Percentil 98

El percentil 98 se evaluó para los años de la línea base (2018-2022) y el año 2023 correspondiente al año de megaincendio, este procedimiento se llevó a cabo para identificar las estaciones que superaban las normativas DS N°12/2021 para MP10 y DS N°12/2011 para MP2.5 de los 5 años consecutivos (2018 al 2023). También se ejecutó con el propósito de analizar si se generó un aumento del Percentil 98 del 2023 con respecto a los años anteriores en cuanto al aumento de las concentraciones de los contaminantes debido al evento de megaincendio. Para llevar a cabo el cálculo del Percentil 98 se siguió el procedimiento determinado en las normativas mencionadas anteriormente:

- **Percentil:** Corresponde a una medida estadística que da cuenta de la posición de un valor (X_k) respecto al total de una muestra (X_1, X_n).
- Para calcular el Percentil 98 se debe considerar las concentraciones diarias de un año, posteriormente se debe ordenar de forma decreciente $X_1 \geq X_2 \geq X_3 \geq \dots \geq X_k > X_{n-1} \geq X_n$. El valor del P98 corresponderá al valor “k”, del cual k se calculará como: $k=q*n$, en donde “q” es 0,98 y “n” es el valor de número de concentraciones correspondientes al año, ej: 365.

La normativa además indica que si el Percentil 98 supera los 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2.5, la estación evaluada con este procedimiento sobrepasa las normativas correspondientes para cada contaminante (D.S N° 12/2021, BCN, Santiago 2021).

3.2.7 Análisis comparativo de las concentraciones previas y en temporada al megaincendio.

Se realizó un análisis para evaluar cómo el megaincendio de 2023 afectó la calidad del aire en las áreas impactadas, comparando las concentraciones de

contaminantes durante el evento con los valores registrados en años previos (línea base).

Con respecto a lo anterior, se realizaron dos análisis comparativos:

- Análisis comparativo de concentraciones máximas diarias:
 - a) Se identificaron las concentraciones máximas diarias de los contaminantes registradas en las estaciones de monitoreo del área de influencia durante el mes de febrero 2023.
 - b) Se calculó las concentraciones máximas diarias promedio del mes de febrero durante los cinco años de línea base.

- Análisis comparativo de concentraciones promedio mensuales:
 - a) Se calcularon las concentraciones promedio mensuales de febrero del MP10 y MP2,5 para la temporada de megaincendio (febrero 2023).
 - b) Se calculó las concentraciones promedio mensuales de febrero de la temporada de línea base (2018-2022).

El objetivo principal de este análisis es proporcionar información comparativa de cuánto las concentraciones aumentaron debido al efecto de los megaincendios con relación a los años anteriores, lo cual es crucial para comprender el impacto de este evento en la calidad del aire.

3.3 Estimación del impacto en la calidad del aire para distintas zonas pobladas en el área de influencia.

3.3.1 Evaluación del impacto en la calidad del aire para zonas urbanas dentro del área de influencia.

Para llevar a cabo una evaluación de impacto se realizó un modelo basado en la creación de un índice de impacto con la finalidad de generar una simulación de una metodología adecuada para la determinación de cómo el ambiente es afectado por la emisión de material particulado derivado de los megaincendios. Se utilizó variables ambientales representativas para medir el impacto, justificando su escala, volumen de datos y definición de umbrales de impactos. Posteriormente se creó una cartografía ambiental, metodología que refleja el impacto ambiental mediante la superposición de mapas que representa cada característica del impacto ambiental específico evaluado (Espinoza et al., 2001).

Primeramente se seleccionó las áreas urbanas dentro el área de influencia atmosférica, correspondientes a las zonas que presentan estaciones de monitoreo de calidad del aire. Para generar el índice de impacto de calidad del aire se evaluó tres características pertenecientes al impacto ambiental evaluado, es decir, impacto de la calidad del aire.

- **Intensidad:** Este término corresponde a las concentraciones de los contaminantes emitidos por el megaincendio, para esto se evaluaron las concentraciones máximas diarias del mes de febrero 2023 de las distintas estaciones involucradas al área de influencia atmosférica.
- **Duración:** La duración del impacto corresponde al comportamiento en el tiempo del impacto ambiental presenciado, es decir, pertenece a los días en que se encuentran concentraciones sobre el límite diario indicado por

las normativas ($130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10 y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2.5) de cada estación dentro del área de influencia.

- **Población afectada:** El análisis de la calidad del aire puede cumplir varias finalidades, como el pronóstico en el impacto de la población (Espinoza *et al.*, 2001). Para esta característica del impacto ambiental, se recopiló datos del número de habitantes de cada comuna que perteneciente al área de influencia atmosférica desde la página del Instituto Nacional de Estadística (INE).

3.3.2 Cálculo de índice de Impacto

En cuanto a la creación de un índice de impacto, se propuso la generación de un índice con la finalidad de cuantificar el impacto en la calidad del aire generado por el megaincendio.

El índice de impacto se calculó mediante las tres características mencionadas anteriormente que contemplan las concentraciones máximas de mes de febrero (intensidad), días de las concentraciones sobre el límite de normativa (duración) y también la población expuesta a las altas concentraciones de estos contaminantes (población afectada).

Para transformar parámetros en unidades de impacto ambiental (UIA) deben cada característica del impacto (intensidad, duración y población afectada) deben estandarizarse y luego ponderarse por la importancia de cada parámetro. El índice de calidad del aire es un número comprendido entre 0 y 1, representando este último el valor óptimo (Coria, 2008). En el caso de estudio presente, cada valor de ponderación es el mismo para las tres unidades de impacto ambiental.

Donde:

$$\sum_{i=1}^n \text{Índice de impacto de calidad del aire} = (I*0.25)^i + (D*0.25)^i + (PA*0.5)^i$$

- I: Intensidad
- D: Duración
- PA: Población afectada
- i: Estación de monitoreo (comuna) evaluada

3.3.2 Elaboración de cartografía ambiental

La metodología basada en la cartografía ambiental es una de la más utilizadas principalmente en el área de planificación territorial, procedimiento el cual se basa en generar un mapa indicando la característica física, social o cultural, que reflejando un impacto ambiental específico. La superposición de estos mapas permite visualizar el impacto ambiental correspondiente al conjunto de los impactos establecidos de forma independiente, con el propósito de establecer de esta forma un impacto global (Espinoza *et al.*, 2001).

Para la creación de cada cartografía que visualice las características del impacto generado, se creó un mapa de distribución mediante el método de interpolación IDW. El método de interpolación de Ponderación en Función Inversa de la Distancia o IDW se basa en el supuesto que cada punto valorizado tiene una influencia local que disminuye al alejarse de este punto, en otras palabras, al aumentar su distancia. Por ende asigna una mayor ponderación o valor a los puntos más cercanos a diferencia de los que están más lejanos (Chirinos & Mallqui, 2016).

El método IDW se utilizó principalmente ya que el área de influencia atmosférica abastece una gran superficie y no en todas las áreas se encontraban estaciones de monitoreo, por ende, existían zonas dentro de esta área de influencia que carecía de valores de las características de impacto, principalmente de valores como intensidad y duración de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos evaluados.

Una vez teniendo los tres mapas de caracterización de impacto: intensidad, duración y población afectada. Se generó un mapa de magnitud de impacto, el cual refleja las localidades afectadas por la mala calidad del aire debido a un aumento de las concentraciones producto el evento del megaincendio. Para llevar a cabo este, se generó la superposición de los mapas intensidad y duración con un valor de 0,5 para ambos mapas.

Por último, se realizó una superposición cartográfica de los mapas de intensidad duración y población afectada, proyectando geográficamente el impacto acumulado y visualizando además el índice de impacto de calidad del aire. Para cada mapa se le asignó un peso ponderado correspondiente a lo indicado por el índice de impacto atmosférico producto del megaincendio, es decir, el mapa de intensidad y duración equivalen a valores de 0,25 y la población afectada a un valor de 0,5.

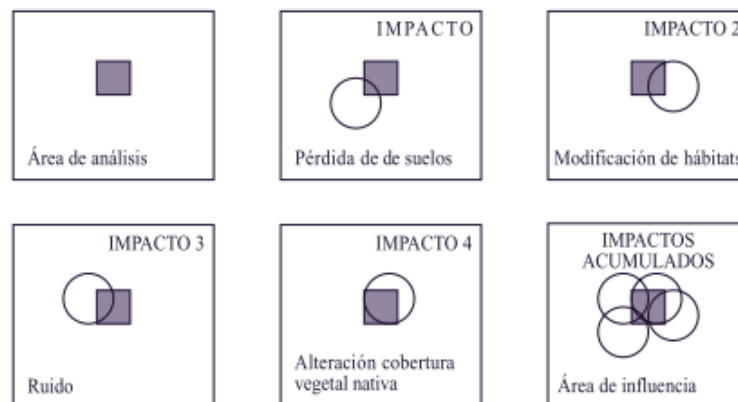


Figura 1 Ejemplo de superposición cartográfica

Fuente. Fundamentos de la evaluación de impacto ambiental, Centro de estudio para el desarrollo (CED) Chile, 2001.

4. Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la investigación se basan en identificar el área que fue expuesta a la contaminación atmosférica provocada por el megaincendio. Posteriormente se evaluó los cambios de concentraciones de contaminantes atmosféricos, material particulado 2.5 y 10 durante el periodo de del megaincendio y duración de las altas concentraciones en el área de influencia afectada por estos contaminantes. Por último, se evaluó el impacto por la contaminación atmosférica para cada área urbana.

4.1 Determinación del área de influencia atmosférica del megaincendio febrero 2023

4.1.1 Distribución de contaminantes en diversas áreas urbanas.

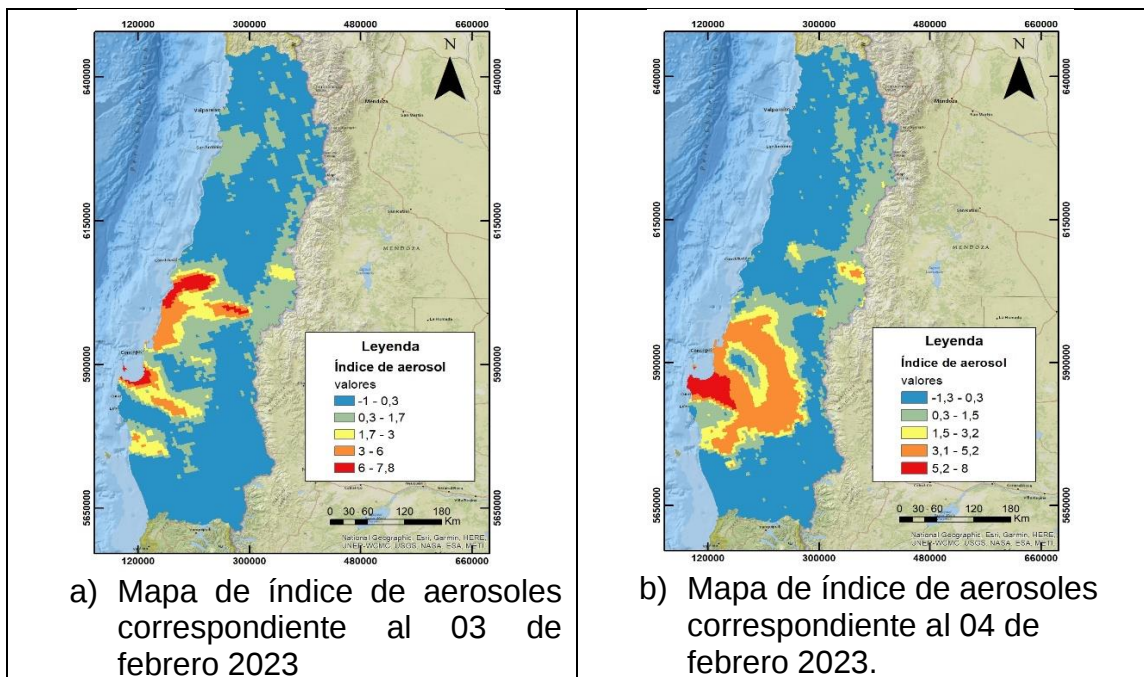
Durante el megaincendio ocurrido principalmente en las provincias de Concepción, Bío-bío, Itata y Coihueco, los contaminantes emitidos por estos se dispersaron a largas distancias, afectando diversas zonas urbanas fuera de los focos de los incendios. Para identificar las zonas perjudicadas por la contaminación atmosférica producto del megaincendio, se utilizó un modelo de teledetección basado en la recopilación de imágenes satelitales obtenidas desde el satélite Sentinel 5P mediante el programa Google Earth Engine(GEE).

Este modelo permitió visualizar y analizar la presencia de contaminantes, específicamente Material Particulado 2,5 y 10 (MP2,5 y 10), en la tropósfera durante el período del megaincendio. Esto incluyó la dispersión y dirección de las partículas aerodinámicas menores a 10 y 2,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, además de la duración de estos contaminantes en las zonas afectadas a lo largo del mes.

Las áreas afectadas, como se muestra en las figuras a continuación, incluyen zonas urbanas de las regiones de Biobío, Ñuble, Maule, Libertador Bernardo O'Higgins y Metropolitana. En la figura 2a correspondiente al 3 de febrero, se observan que las concentraciones más altas del día en las zonas donde se localizaron los focos de los incendios en las provincias de Biobío e Itata.

Posteriormente, estas concentraciones se expandieron hacia el noreste abarcando ciudades como Chillán y San Carlos de la región de Ñuble, como se muestra en la figura 2b del 4 de febrero. Para el 5 de febrero (figura 2c), se evidencia un desplazamiento de las partículas hacia el norte, incluyendo ahora áreas urbanas de las regiones del Maule, Libertador Bernardo O'Higgins y Metropolitana.

La figura 2d, correspondiente al 6 de febrero, muestra una mayor distribución de los contaminantes en las regiones mencionadas anteriormente, con una dispersión leve hacia el sur. Sin embargo, las concentraciones de partículas en estas áreas eran menores en comparación con otras zonas dentro del área afectada por la contaminación atmosférica. En las figuras 2e y 2f, se evidencia un desplazamiento más extenso de los contaminantes, mayormente hacia el norte de donde se analizaron los primeros registros de las concentraciones de los contaminantes.



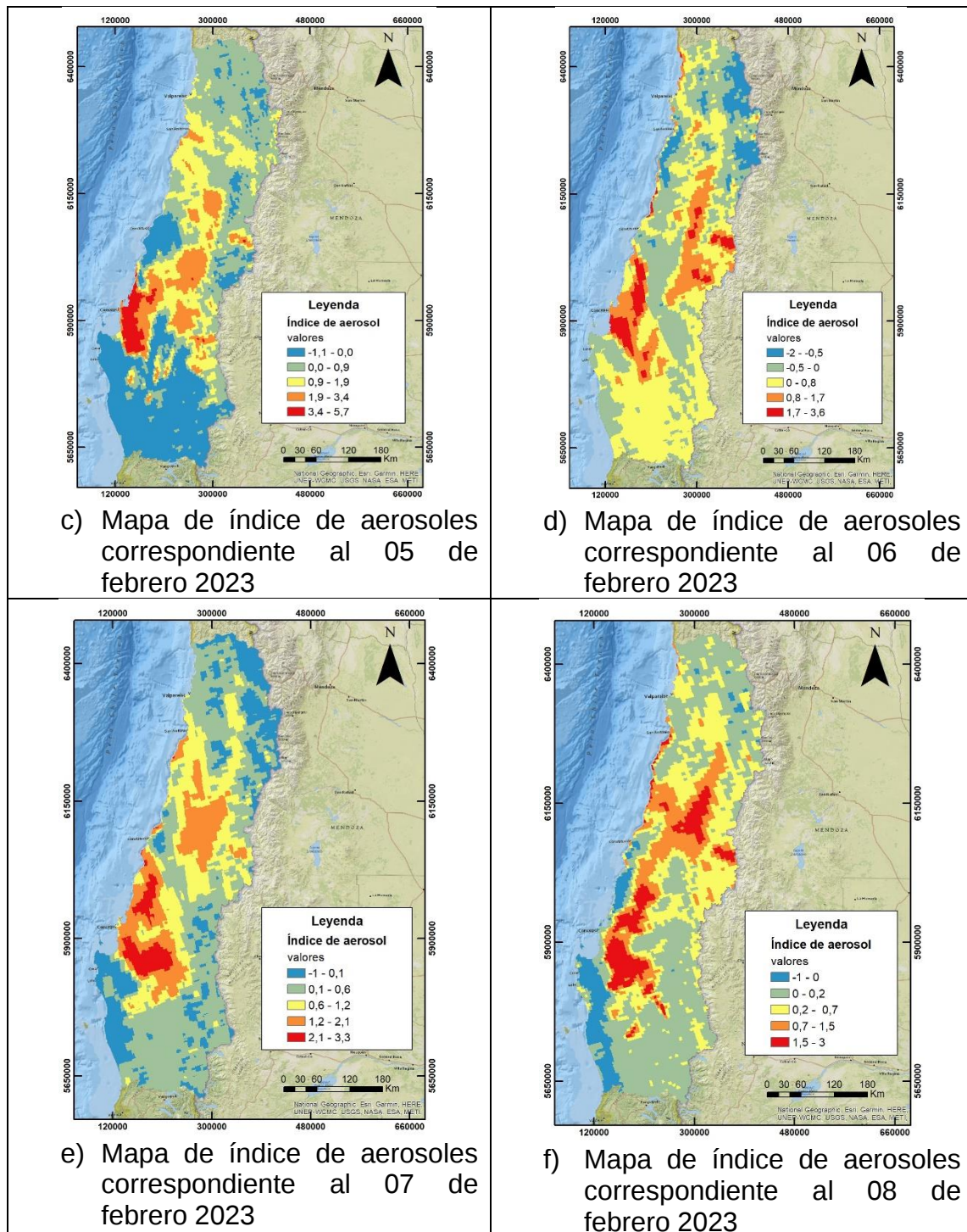


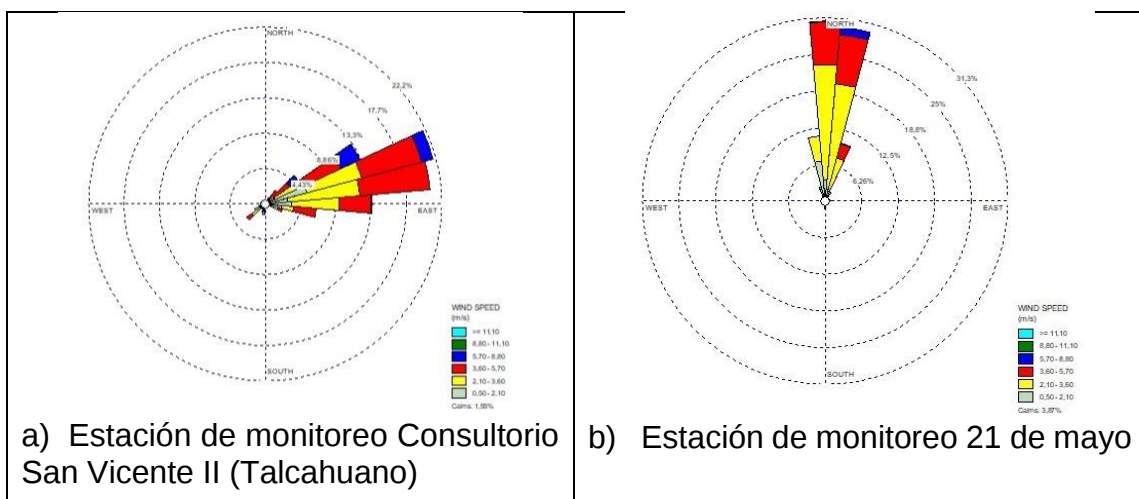
Figura 2. Mapas de distribución de aerosoles 03 a 08 de febrero 2023.

Fuente . Elaboración propia mediante ArcGIS y GEE.

Además, es importante complementar esta información con la velocidad y dirección del viento, ya que son factores claves para un análisis más preciso de la distribución de los contaminantes MP2,5 y MP10. La dirección del viento puede indicar cómo se dispersan los contaminantes, mientras que la velocidad indica con qué rapidez puede propagarse.

Las figuras a continuación representan un análisis visual de la rosa de los vientos. Permite observar cómo los contaminantes originados principalmente en la provincia de Concepción (Consultorio San Vicente), se distribuyeron hacia el noreste debido a la dirección predominante del viento visualizado en la figura 4b lo cual se evidencia esta conexión de la dirección del viento con la figura 3a.

Además las rosas de los vientos de las figuras 3b, 3c y 3d indican dirección del viento hacia el norte, al igual que las figuras de las concentraciones de aerosoles de la figura 4b a 4f, se analiza que la dispersión de los contaminantes se desplazó hacia el norte



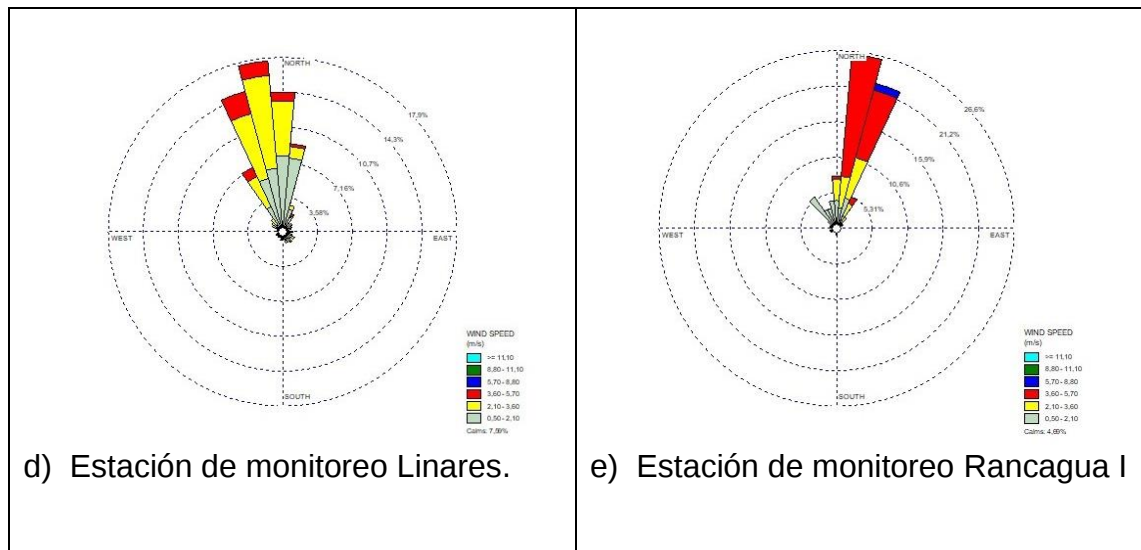


Figura 3. Rosas de los vientos correspondientes a estaciones de monitoreo de calidad del aire.

Fuente. Elaboración propia mediante WRPLOT.

4.1.2 Área de influencia atmosférica de los megaincendios.

La identificación del área de influencia atmosférica se determinó estableciendo un umbral del índice de aerosol (AI) que representara concentraciones de contaminantes alteradas o más altas que las que predominan en la temporada de febrero en un periodo sin eventos de megaincendio. Este umbral se seleccionó mediante una correlación de Spearman, que indicó la relación entre las concentraciones de los contaminantes in situ medidos por las estaciones del SINCA y los valores del Índice de Aerosol (AI). Además, se utilizó para identificar los valores del AI que mostraban concentraciones fuera de lo normal de la temporada de verano, que suelen ser bajos.

Cabe destacar, que en la temporada de verano sin eventos de megaincendios las concentraciones de MP2.5 suelen ser alrededor de 20 ug/m³, mientras que para MP10 rodea concentraciones de 50ug/m³.

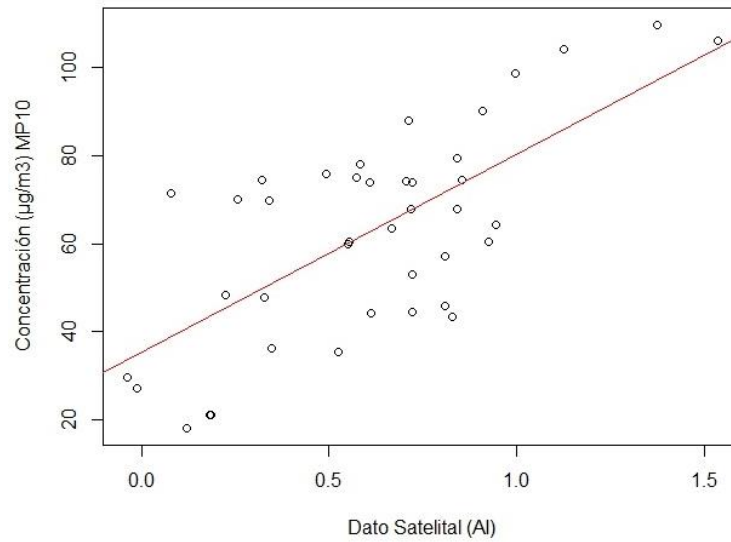


Figura 4. Correlación de Spearman de índice de Aerosol y Concentraciones promedios mensuales MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fuente. Elaboración propia mediante RStudio.

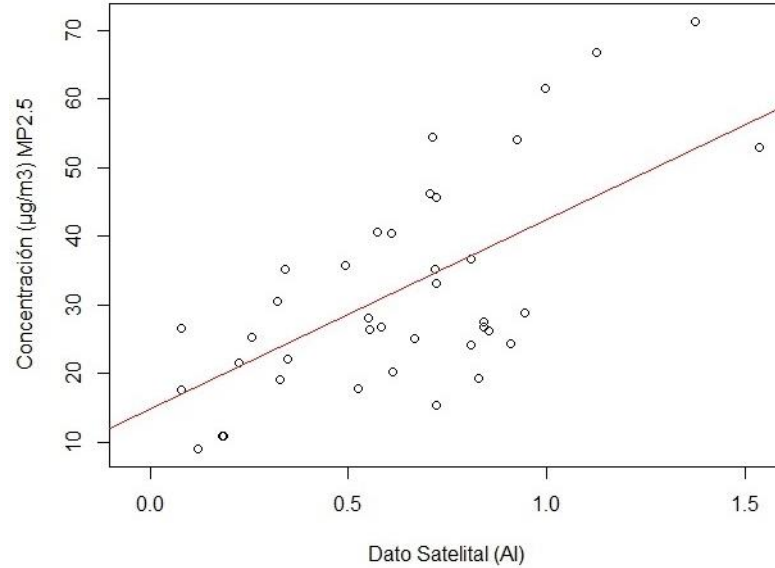


Figura 5. Correlación de Spearman de índice de Aerosol y Concentraciones promedios mensuales MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fuente. Elaboración propia mediante RStudio.

	Correlación de Spearman índice de aerosol y concentración promedio mensual MP10($\mu\text{g}/\text{m}^3$). (Figura 4)	Correlación de Spearman índice de aerosol y concentración promedio mensual MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). (Figura 5)
Coeficiente de relación (Rs)	0,572	0,580
P-Value	<0,01	<0,01

Tabla 3. Valores de Correlaciones de Spearman

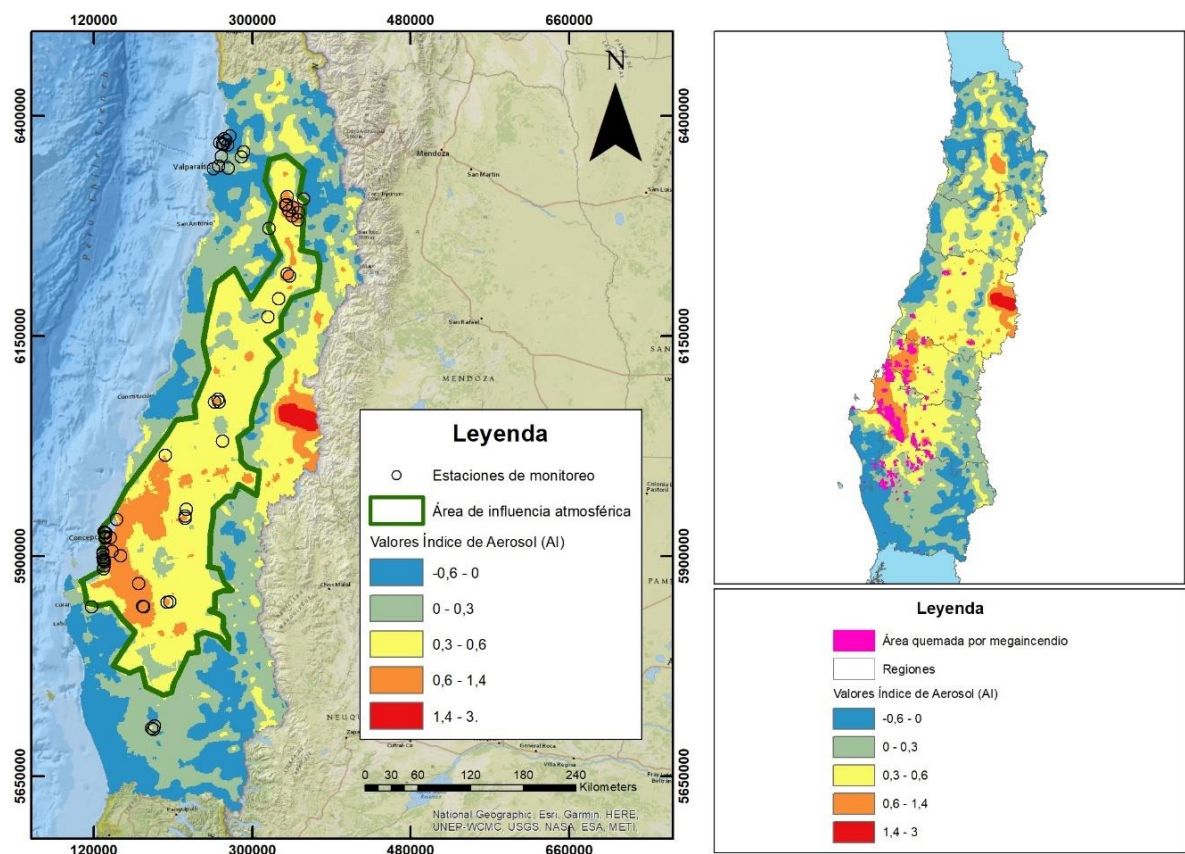
Fuente. Elaboración propia.

En la tabla 3. se demuestra el análisis de la correlación de Spearman, se observan los valores de correlacion fuerte (+0,5) entre los valores de índice de aerosol y las concentraciones de Material Particulado 2,5 y 10. Además, existe un gran valor de significancia de significancia para ambas correlaciones. Esto indica que hay una relación significativa entre el índice de aerosol (AI) y las concentraciones in situ de MP2,5 y MP10.

El análisis nos indica en qué valor del Índice de aerosol se puede visualizar la contaminación atmosférica producto del Material Particulado. Cuando el AI tiene valores entre 0,3 y 0,7, apunta que las concentraciones en el aire (específicamente del MP2,5 y MP10) están por encima de los niveles normales para la temporada de verano, que son alrededor de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para M10. En otras palabras, un AI en el rango 0,3 a 0,7 señala la presencia de concentraciones contaminantes atmosféricos (material particulado) sobre los niveles normales para la época de verano. Por consiguiente, el umbral del Índice de Aerosol entre 0,3 a 0,7 que indica la presencia de contaminantes atmosféricos, MP10 y 2,5, facilitó la delimitar el área de influencia atmosférica.

El raster de la figura 6. que visualiza las concentraciones del AI entre los valores -0.6 a 3 en un periodo de un mes (febrero). Para obtener los valores del AI que refleje un rango de contaminación de los contaminantes, se realizó una delimitación mediante un polígono donde las concentraciones de AI se valorizaba

entre 0,3 a 0,6. En otras palabras, se generó el polígono en el umbral que representan altas concentraciones de los contaminantes y en consecuencia de esto analizar las áreas afectadas por estas altas concentraciones en el periodo de febrero. Se muestra la figura 6. el área de influencia atmosférica está representada con colores cálidos donde, el índice de aerosol se encuentra entre 0,3 a 0,6



Por otro lado, la identificación del umbral del IA para seleccionar el área de influencia atmosférica, indica que las altas concentraciones de material

particulado se encuentran entre los valores de 0,3 a 3 del Índice de Aerosol. En la figura 7. se puede apreciar que en la provincia de Concepción, Biobío e Itata donde se encuentran localizados altos valores del AI, estas zonas corresponden a los focos del megaincendio. Sin embargo, se encuentra otro foco de altas concentraciones de AI en el sector cordillerano de la Región del Maule, esto se debe posiblemente a la actividad del Complejo Volcánico Laguna del Maule (CVLM) por lo tanto no se contabilizó dentro del área de influencia esta área.

La figura 7. representa el área de influencia atmosférica, donde en el mapa pequeño de la figura destaca las provincias pertenecientes al área de influencia, bajo esta clasificación 21 provincias pertenecen a esta, distribuidas de la siguiente manera:

- 5 provincias de la Región Metropolitana (Chacabuco, Maipo, Melipilla, Talagante y Santiago)
- 3 provincias de la Región O'Higgins (Cachapoal. Cardenal Caro y Colchagua)
- 4 provincias de la Región del Maule (Curicó, Cauquenes, Linares y Talca)
- 3 provincias de la Región del Ñuble (Itata, Diguillín y Punilla)
- 3 provincias de la Región del Biobío (Arauco, Biobío y Concepción)
- 1 provincias de la Región de la Araucanía (Malleco)

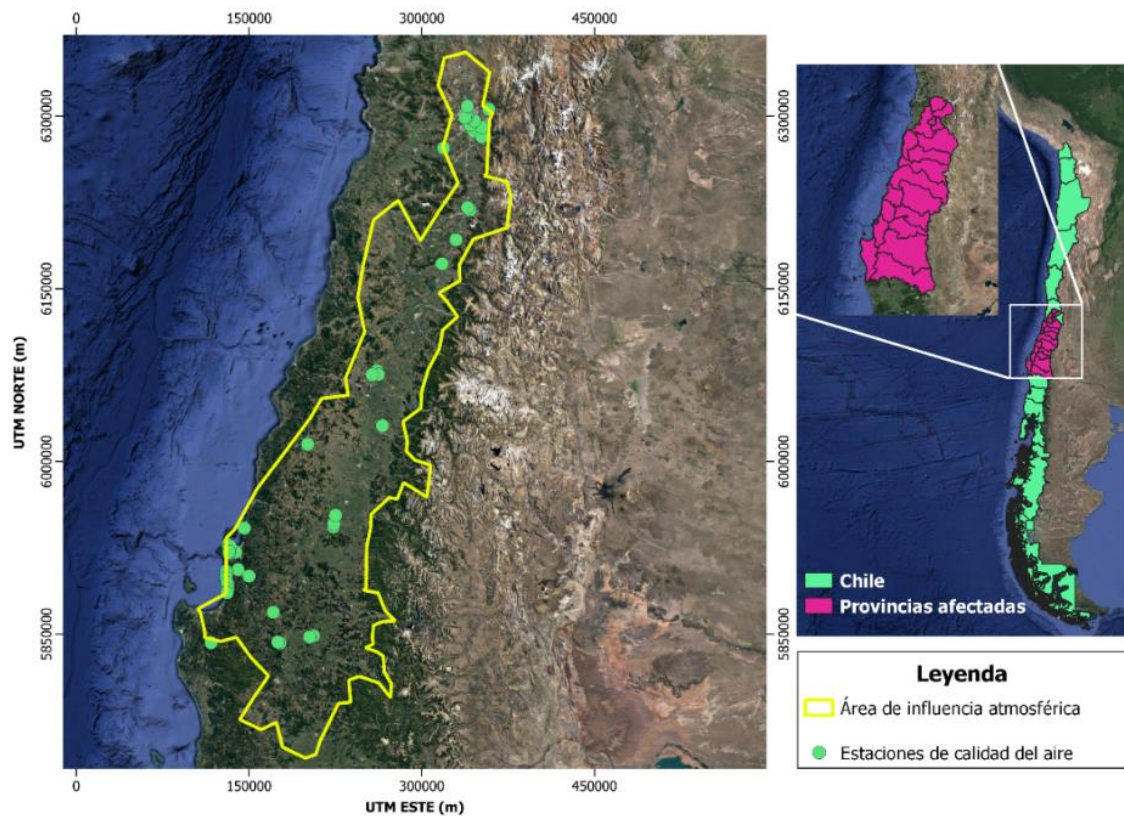


Figura 7. Área de influencia atmosférica.

Fuente. Elaboración propia mediante QGIS.

En cuanto a subdivisión geográfica más pequeñas, las comunas involucradas en el área de influencia atmosférica corresponden a 154, de las cuales están se distribuyen de la siguiente forma:

- 45 comunas de la Región Metropolitana
- 28 comunas de la Región O'Higgins
- 23 comunas de la Región del Maule
- 20 comunas de la Región del Ñuble
- 27 comunas de la Región del Biobío
- 8 comunas de la Región de la Araucanía

En la figura 7. es posible evidenciar las estaciones de monitoreo dentro del área de influencia atmosférica. Las cuales son 46 estaciones de monitoreo de calidad del aire que fueron analizadas en el presente estudio, estas estaciones cuentan con el registro del monitoreo de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos evaluados (Material particulado 10 y 2,5) en el tiempo que fueron evaluados.

4.2 Efectos de los megaincendios en la calidad del aire.

- **Línea Base:**

La línea base consta evaluar las concentraciones de 5 años anteriores al evento del megaincendio, con la finalidad de analizar el comportamiento de los contaminantes atmosféricos MP10 y MP2,5 antes del evento, es decir, si las condiciones basales de las localidades donde se encuentran las estaciones eran optimas y cuanto fue el aporte del megaincendio en las alzas de las concentraciones.

- **Estaciones de monitoreo de calidad del aire planteadas:**

Las estaciones de monitoreo seleccionadas para demostrar los resultados obtenidos de la variabilidad de las concentraciones de los contaminantes dentro de la línea base y de la temporada del megaincendio son: Hualqui, 21 de mayo, INIA Chillán, UTAL, Rancagua I, El Bosque.

Las estaciones demostradas en el estudio corresponden a estaciones que presentaron gran importancia dentro del estudio, debido a que fueron aquellas que presenciaron mayores concentraciones de contaminantes según su ubicación geográfica correspondiente (región), la región del Biobío contempló dos estaciones de monitoreo ya que fue la zona más afectada por las altas concentraciones de contaminantes debido a que se localizaron los focos de incendios en estas zonas.

4.2.1 Concentraciones promedio mensuales MP2.5 periodo 2018-2022

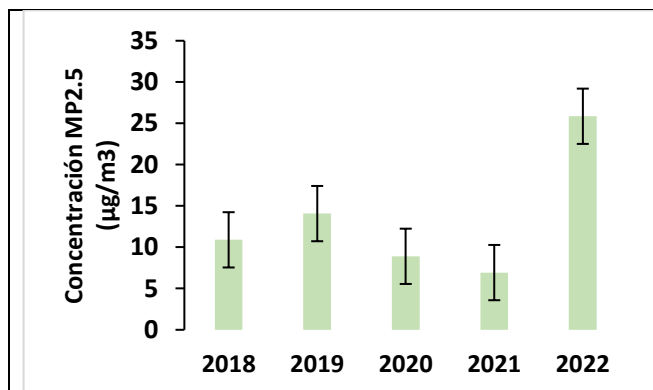


Figura 8. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, estación 21 de mayo, Los Ángeles.
Fuente. Elaboración propia

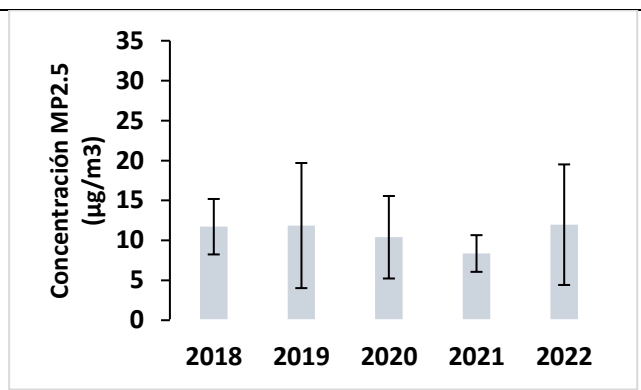


Figura 9. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5. Estación Hualqui, Concepción.
Fuente. Elaboración propia

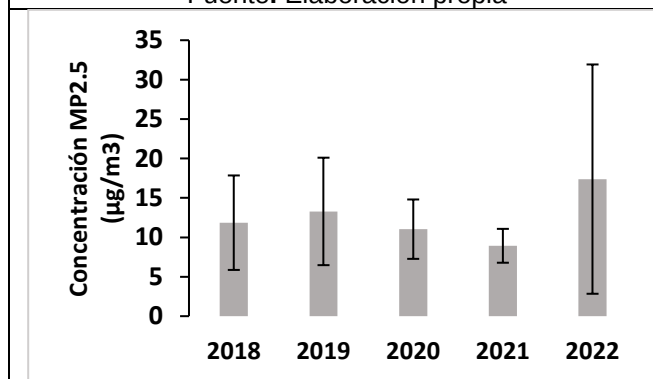


Figura 10. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, estación INIA, Chillán
Fuente. Elaboración propia

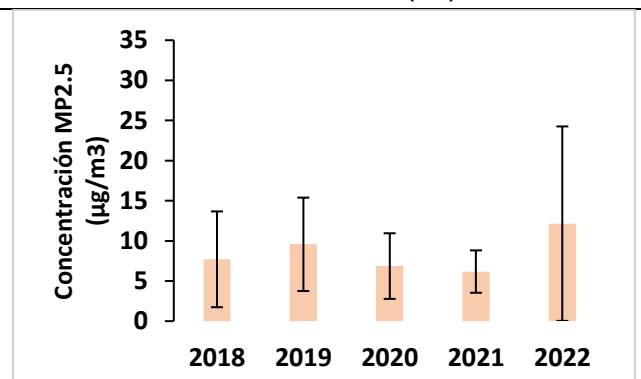


Figura 11. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, estación Universidad de Talca.
Fuente. Elaboración propia

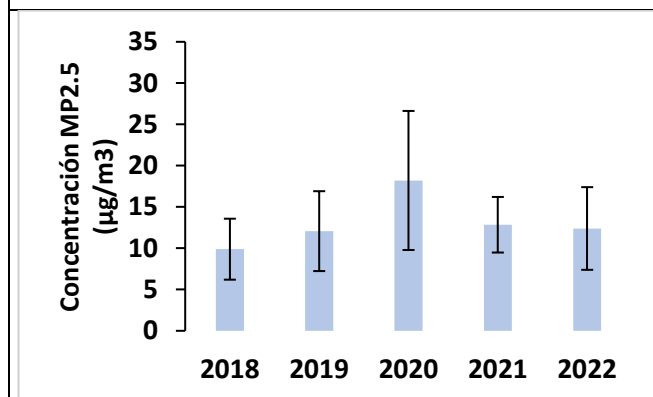


Figura 12. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, Rancagua I, Rancagua.
Fuente. Elaboración propia

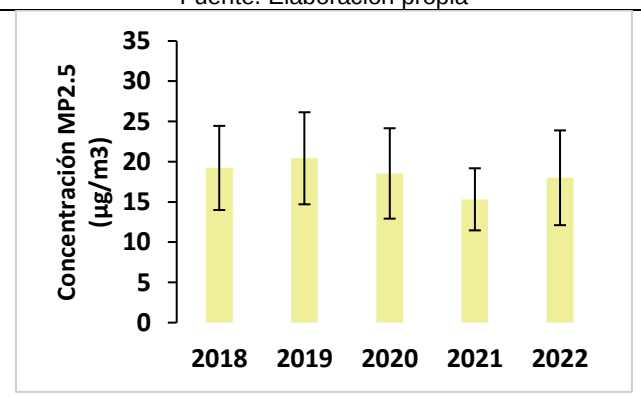


Figura 13. Concentraciones promedio mensuales línea base MP2,5, El Bosque.
Fuente. Elaboración propia

Las concentraciones promedias mensuales corresponden al mes de febrero, ya que es el mes evaluado en el estudio, de las siguientes graficas es posible identificar la variabilidad de las concentraciones de material particulado 2,5 en los años de línea base. En el análisis de las concentraciones mensuales de la línea base sólo se contempló el Material Particulado 2,5, debido a que el MP10 se comporta de una forma parecida al MP2,5:

- **Estación 21 de mayo, Los Ángeles.**

La figura 8 demuestra que no hay tendencia de aumento o disminución en el MP2,5 de los meses de febrero de los años de la línea base. La variabilidad entre la concentración mensual mínima y máxima corresponde a un delta de 18,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, presentando una concentración máxima el 2022 con 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínima el 2021 con 6,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La mayor variabilidad de las concentraciones máximas y mínimas diarias corresponde al año 2022, las cuales fueron 6 y 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

- **Estación de Hualqui, Concepción.**

La figura 9 se visualiza que el Material Particulado 2,5 no muestra una tendencia en un aumento o disminución en las concentraciones mensuales de febrero. Sin embargo, es posible presenciar una variabilidad de las concentraciones entre años. Por ejemplo, la concentración mensual de 2020 fue más alta del periodo analizado, alcanzando una concentración de 52,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la concentración promedio mensual más baja se presencia el 2019 con 12,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Además el año 2019 y 2022 presenta la mayor variabilidad de las concentraciones diarias del mes de febrero.

En términos de calidad del aire, según el DS. N°12/2011 en ningún año evaluados en la línea de base de la estación de Hualqui sobrepasó el límite de las concentraciones de la normativa.

En relación con la calidad basal del aire en la estación correspondiente a Los Ángeles, solo el año 2022 presentó una superación al límite de la normativa ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) según lo estipulado por normativa primaria de calidad del aire.

- **Estación INIA, Chillán.**

La estación INIA, correspondiente a la figura 10 refleja las concentraciones promedio mensuales del periodo de línea base. Las concentraciones reflejadas no presentan una tendencia de aumento o disminución de las concentraciones del Material Particulado 2,5. Sin embargo se puede definir la variabilidad entre las concentraciones máximas y mínimas del contaminante en el periodo de línea de base, la concentración promedio mensual máxima se evidenció en el año 2022 contemplando una concentración de $17,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en cuanto a la concentración mínima mensual de la línea de base fue presenciada en el año 2021 con $8,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Según lo indicado por la normativa primaria de calidad del aire para MP_{2,5}, en los años de línea base no se hallaron concentraciones mensuales sobre el límite de la normativa, la cual establece que para concentraciones mayores a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la estación supera el límite de dicha normativa.

- **Estación UTAL, Talca.**

En la región del Maule se evaluó la estación de UTAL, correspondiente a la figura 11 No se presentó una tendencia en las concentraciones mensuales del MP_{2,5}, la concentración máxima se obtuvo el año 2022 y la mínima 2021, siendo $12,4$ y $6,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Con respecto a la calidad de aire en los meses de febrero de la línea base, no superaron el límite de la normativa dictado por el DS N°12/2011. Es decir, la calidad del aire permaneció bajo las concentraciones que pueden provocar algún daño a la salud de las personas.

- **Estación Rancagua I, Rancagua.**

La estación de Rancagua I (figura 12) no se presencié una tendencia de los datos de las concentraciones de MP2,5. Se puede evidenciar que la concentración máxima mensual se generó en el año 2020 con 18,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la concentración mínima corresponde a 9,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del año 2018. Con respecto a lo mencionado la estación de monitoreo no presenta una superación del límite de la normativa en su periodo de línea base, según lo estipulado por la normativa vigente del MP2,5.

- **Estación El Bosque, Santiago.**

La estación El Bosque no presenta una tendencia de disminución o aumento en las concentraciones promedio mensuales correspondientes al mes de febrero. Sin embargo, se observan que las variaciones no son tan significativas en las concentraciones de un año a otro, ya que la concentración promedio mensual 2020 fue la más alta de los años de línea de base alcanzando 20,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la concentración promedio mensual de 2019 fue la más baja con 15,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En las 6 estaciones evaluadas para las concentraciones promedio mensual de la línea base, no se registró superación del límite de la normativa. Las concentraciones permanecieron con una tendencia que circula un umbral entre 6 a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, cabe destacar que la estación que presenta mayores concentraciones promedio mensuales fue la estación de El Bosque, correspondiente a la ciudad de Santiago.

4.2.2 Percentil 98 de concentraciones de contaminantes 2018-2023

El cálculo del percentil 98 se generó para los años de línea base (2018-2022) y el año 2023 correspondiente al año del evento del megaincendio. Se realizó la comparación entre la línea base y el año 2023 para evaluar si existe alguna variabilidad de concentraciones producto al evento de megaincendio. Además, el cálculo del Percentil 98 puede indicar si una estación sobrepasa la normativa primaria de calidad del aire, este se lleva a cabo mediante las concentraciones diarias de un año.

Percentil 98 - MP2.5

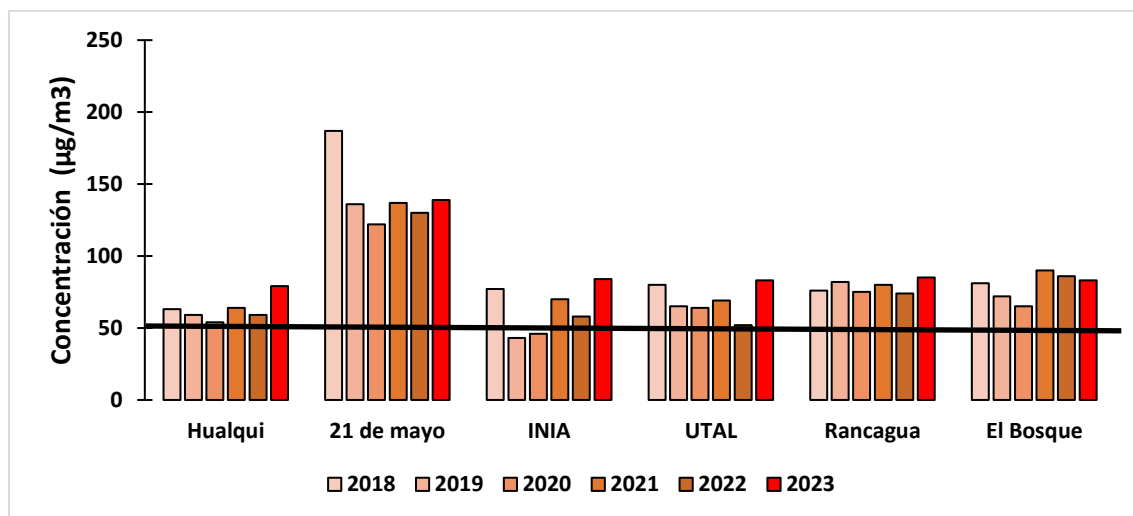


Figura 14. Percentil 98 de Material Particulado 2,5, años de línea base y año de catastro. Se indica con una línea el valor límite de las concentraciones 24h, según el D.S N°12/2011.

Fuente. Elaboración propia.

En la figura 14. se puede visualizar que los valores de las concentraciones correspondientes al Percentil 98 (P98) para el Material Particulado 2,5. La gráfica indicó una tendencia en la disminución de las concentraciones del P98 en el periodo de línea base para las estaciones de Hualqui, UTAL y Rancagua. Además se puede presenciar un aumento en las concentraciones del percentil 98

en el año de megaincendios, exceptuando las estaciones de Hualqui y El Bosque. La estación de Hualqui presentó la mayor concentración del percentil 98 en el 2018, por otro lado la estación El Bosque presentó el mayor valor del percentil en el año 2021.

Además, como lo indica la Figura 14. todas las estaciones sobrepasan la normativa DS N°12/2011, es decir, concentraciones de los percentiles sobre 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tanto para los dos periodos analizados, los años de línea base y el año de megaincendio.

Percentil 98 – MP10

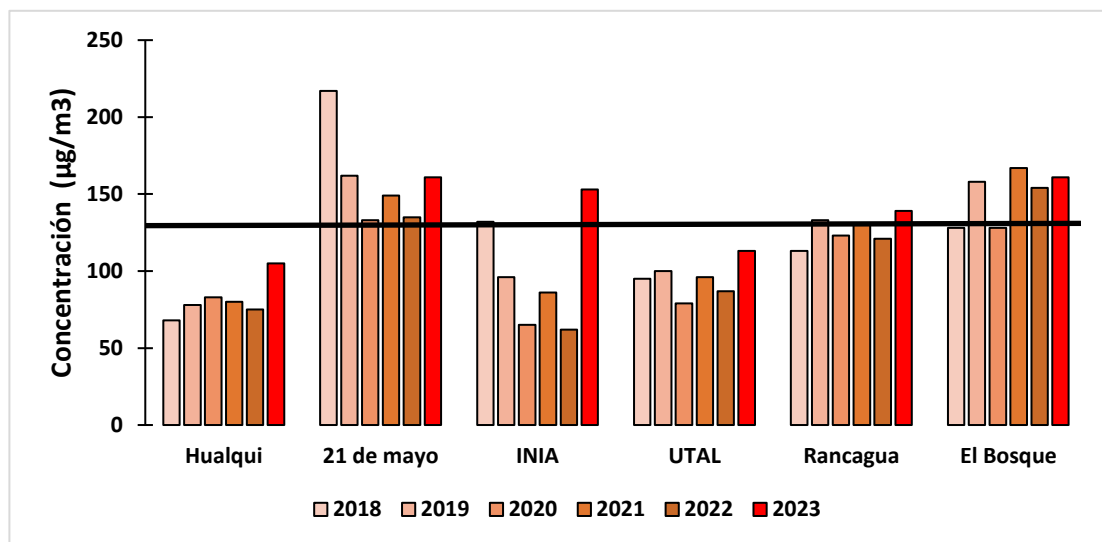


Figura 15. Percentil 98 de Material Particulado 2,5, años de línea base y año de catastro. Se indica con una línea el valor límite de las concentraciones 24h, según el D.S N°12/2021.

Fuente. Elaboración propia.

Por otro lado, el cálculo de las concentraciones del Percentil 98 para el MP10, presenta variaciones de concentraciones distintas a las analizadas para el MP2,5. Las estaciones 21 de mayo e INIA Chillan presentan una tendencia de disminución de las concentraciones del percentil en el periodo de línea base

exceptuando por el año 2023, a diferencia de las otras estaciones, estas no presentan alguna tendencia de aumento o disminución de las concentraciones. Al igual que en las concentraciones del P98 para MP2,5, son las mismas estaciones que presentan un aumento en las concentraciones del percentil 98 en el año 2023, en cuanto a la estación de 21 de mayo las mayores concentraciones se presentaron el 2018 y para la estación El Bosque el año 2021, de igual forma que para el MP2,5.

En cuanto al estado de la calidad del aire de los años anteriores con respecto al año del megaincendio, las estaciones de Hualqui y UTAL no presentaron superación en la normativa, es decir, valores menores a $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al contrario de la estación 21 de mayo que presentó 4 años sobrepasando la normativa, la estación INIA Chillán 2 años, la estación Rancagua I 2 años y por último la estación El Bosque 4 años. Si bien, las estaciones INIA Chillán presento dos años sobrepasando la normativa, uno de estos perteneció al periodo del megaincendio (2023) al igual que con Rancagua I.

4.2.3 Análisis de concentraciones de MP10 y 2.5 en temporada de megaincendio y previa a esta (línea base).

Se consideró las concentraciones máximas diarias mensuales de febrero promedio de los años de línea de base y la concentración máxima diaria del mes de febrero 2023, con el propósito de generar una comparación de la variabilidad de las concentraciones entre ambos periodos. También se consideró las concentraciones promedio mensual de los años de línea base y el año 2023.

Estación de Hualqui

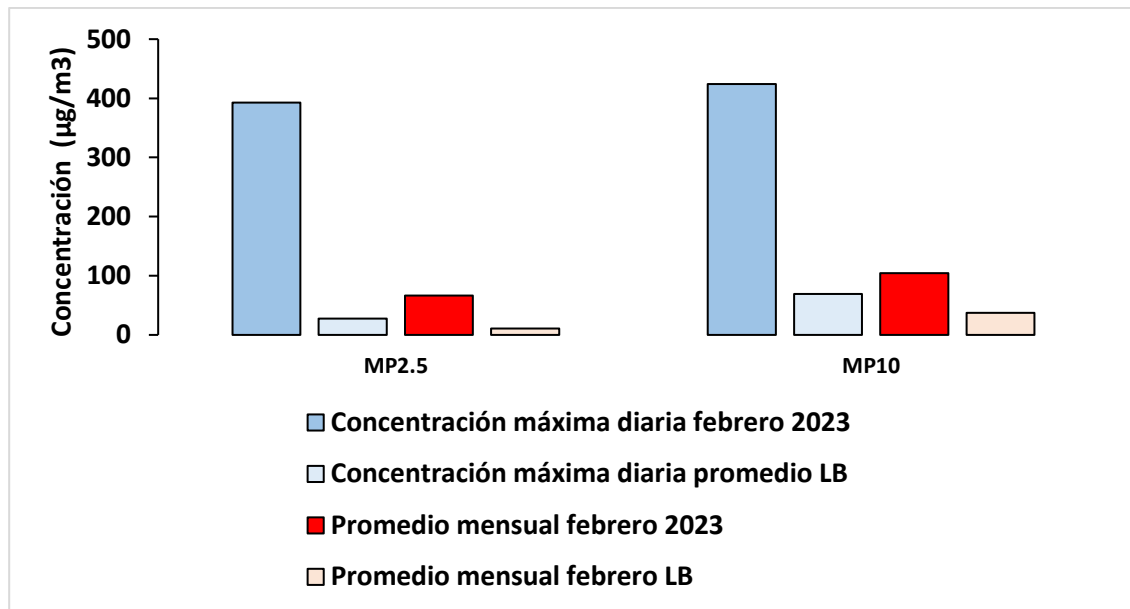


Figura 16. Análisis de concentraciones para MP10 y MP2.5 de línea base y mes de febrero de megaincendios. Estación Hualqui, Concepción.

Fuente. Elaboración propia.

En el mes de febrero de 2023 se presentaron altas concentraciones tanto de MP2,5 y MP10, alcanzado valores de 393 y 424 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. En las concentraciones máximas diarias promedio de la línea base se registró valores de 10,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el MP10, representando una alta variabilidad de las concentraciones de los dos periodos evaluados. Con respecto a las concentraciones promedio mensual de febrero 2023 el MP2,5 obtuvo una concentración de 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el MP10, por el contrario, estas concentraciones para el periodo de línea base se obtuvo 10,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en MP2.5 y 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Estación 21 de mayo, Los Ángeles.

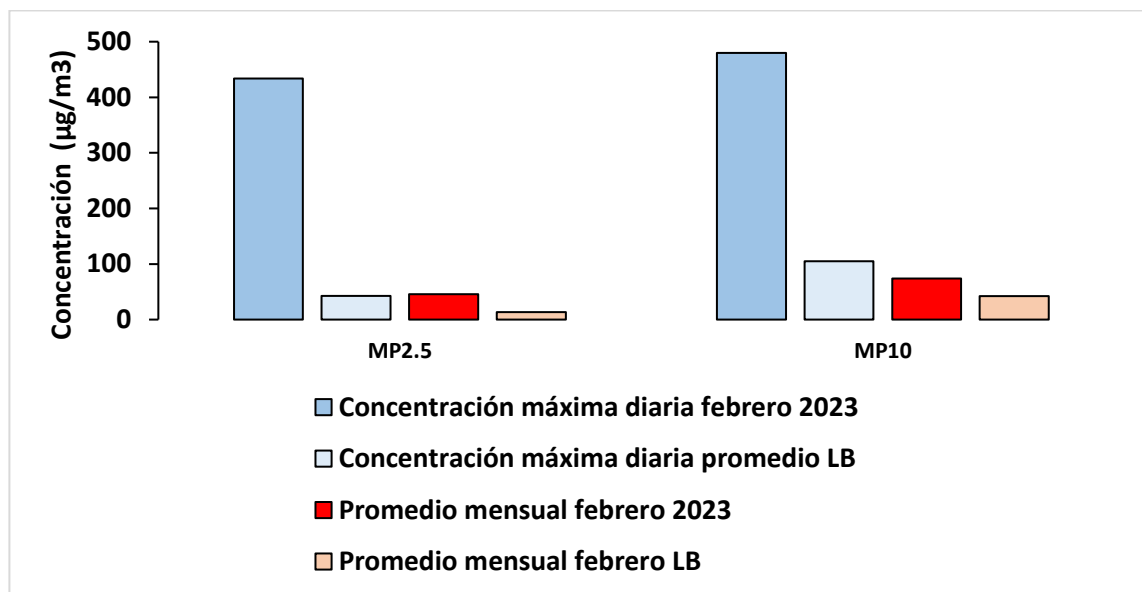


Figura 17. Análisis de concentraciones para MP10 y MP2.5 de línea base y mes de febrero de megaincendios, estación 21 de mayo, Los Ángeles.

Fuente. Elaboración propia.

La concentración máxima diaria de MP2,5 en el año 2023 fue significativamente mayor a la concentración máxima diaria promedio del período previo al megaincendio, asimismo ocurre para las concentraciones de MP10. La concentración máxima diaria tuvo un valor de 434 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y 480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10. También se ve una diferencia entre las concentraciones mensuales del periodo de línea base y 2023, la cual se obtuvo 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 2023 y 13,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para las concentraciones promedios mensuales de la línea base en el contaminante MP2,5 y para MP10, por el contrario las concentraciones promedio mensual en el periodo de megaincendio registró valores de 46 y 74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y MP10.

Estación INIA, Chillán.

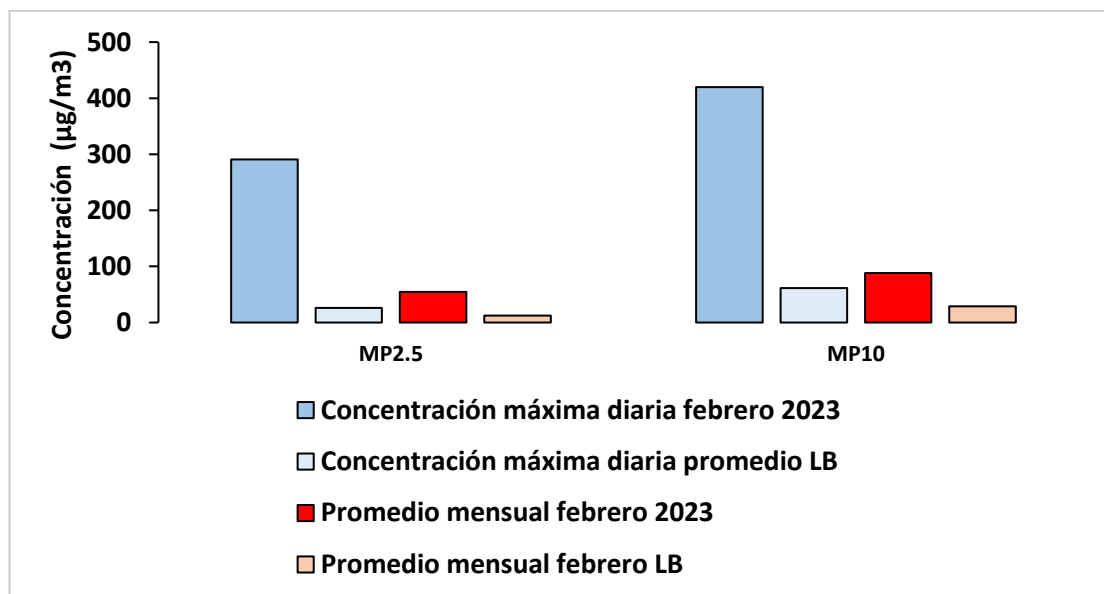


Figura 18. Análisis de concentraciones para MP10 y MP2.5 de línea base y mes de febrero de megaincendios, estación INIA, Chillán.

Fuente. Elaboración propia.

Las concentraciones máximas de febrero 2023 superaron el límite de ambas normativas de los contaminantes, registrando concentraciones de 291 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el MP2.5 y 420 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10, mientras que las concentraciones promedio máximas de febrero del periodo previo al megaincendio apuntaron valores de 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y MP10. Además las concentraciones promedio mensuales del periodo de línea base fueron de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado 2,5 y 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado 10, lo cual es bastante mayor a lo calculado para las concentraciones mensual del mes de febrero 2023 que registró 54 y 88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y MP10 respectivamente.

	Concentración máxima diaria febrero 2023 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentración máxima diaria promedio LB [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio mensual febrero 2023 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio mensual febrero LB [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
MP2.5	136	24.2	35.8	8.5
MP10	205	79.4	76	40.3

Tabla 4. Datos concentraciones MP2.5 y MP10 febrero 2023 y temporada de línea base, Estación Universidad de Talca

Fuente. Elaboración propia

	Concentración máxima diaria febrero 2023 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentración máxima diaria promedio LB [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio mensual febrero 2023 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio mensual febrero LB [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
MP2.5	114	21.6	37	13
MP10	172	72	90	50.2

Tabla 5. Datos concentraciones MP2.5 y MP10 febrero 2023 y temporada de línea base, Estación Rancagua I.

Fuente. Elaboración propia

	Concentración máxima diaria febrero 2023 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentración máxima diaria promedio LB [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio mensual febrero 2023 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio mensual febrero LB [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
MP2.5	80	29	31	18.3
MP10	164	83.4	89	59.2

Tabla 6. Datos concentraciones MP2,5 y MP10 febrero 2023 y temporada de línea base, Estación El Bosque

Fuente. Elaboración propia

En cuanto a las tres estaciones de monitoreo de calidad del aire; UTAL, Rancagua I y El Bosque, se observó que las concentraciones máximas registradas en 2023 fueron considerablemente más altas indicando niveles de alerta ambiental.

Las concentraciones máximas diarias promedio del periodo de línea base no superaron los límites dictados por las normativas. Al igual que las concentraciones promedio mensuales, tanto para los años de línea base como para como para el periodo del megaincendio.

Resumiendo, las concentraciones máximas presentadas en las estaciones ubicada en focos de incendios mostraron una mayor concentración de los contaminantes. La estación 21 de mayo, ubicada en Los Ángeles fue la que registró las mayores concentraciones, alcanzando 434 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en MP2,5 y 480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en MP10.

Aunque se registraron valores más bajos de concentraciones máximas en la estación de El Bosque, la comparación entre las concentraciones máximas promedio de la línea base revelan un delta mayor.

Además, durante febrero 2023 las concentraciones promedio mensuales fueron más altas en Hualqui. Alcanzando 67 y 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en MP2,5 y MP10 respectivamente, esto se debe a que la estación presentó concentraciones elevadas por un periodo más prolongado y la variabilidad entre las concentraciones diarias del mes no fue tan significativas.

4.3 Evaluación y jerarquización del impacto en la calidad del aire para distintas zonas pobladas en el área de influencia.

Para la realización del índice de impacto de la calidad del aire que causó el evento de los megaincendios, se evaluaron tres criterios; duración de los contaminantes mp10 y 2,5 sobre el límite de las normativas respectivas (DS N°12/2021 y DS N°12/2011) dentro de las zonas urbanas afectadas en el área de influencia atmosférica. Otro criterio evaluado para la generación del índice fue la intensidad del megaincendio, es decir, el aumento de las concentraciones de los contaminantes producto del evento, para ello se tomó en cuenta las

concentraciones máximas registradas en el mes de febrero 2023. Por último se consideró la población afectada dentro del área de influencia atmosférica.

4.3.1 Duración de los contaminantes en el periodo de megaincendio

La estación Laja fue la que registró más días consecutivos superando este límite de la normativa, alcanzando 10 días consecutivos. La estación Club de Empleados de la ciudad de Los Ángeles registró 9 días de superación de la normativa para el MP10, mientras que las estaciones evaluadas en la ciudad de Chillán también contabilizaron 9 días de superación de la normativa para el MP10. Por otro lado, las estaciones de Santiago fueron las que tuvieron menos registros de días en los que se superó este límite, contemplando de 1 a 2 días.

La figura 19. muestra una interpolación de la duración de la presencia de altas concentraciones del contaminante MP10, lo que representa una distribución geográfica de cómo se comportó este contaminante con respecto al tiempo.

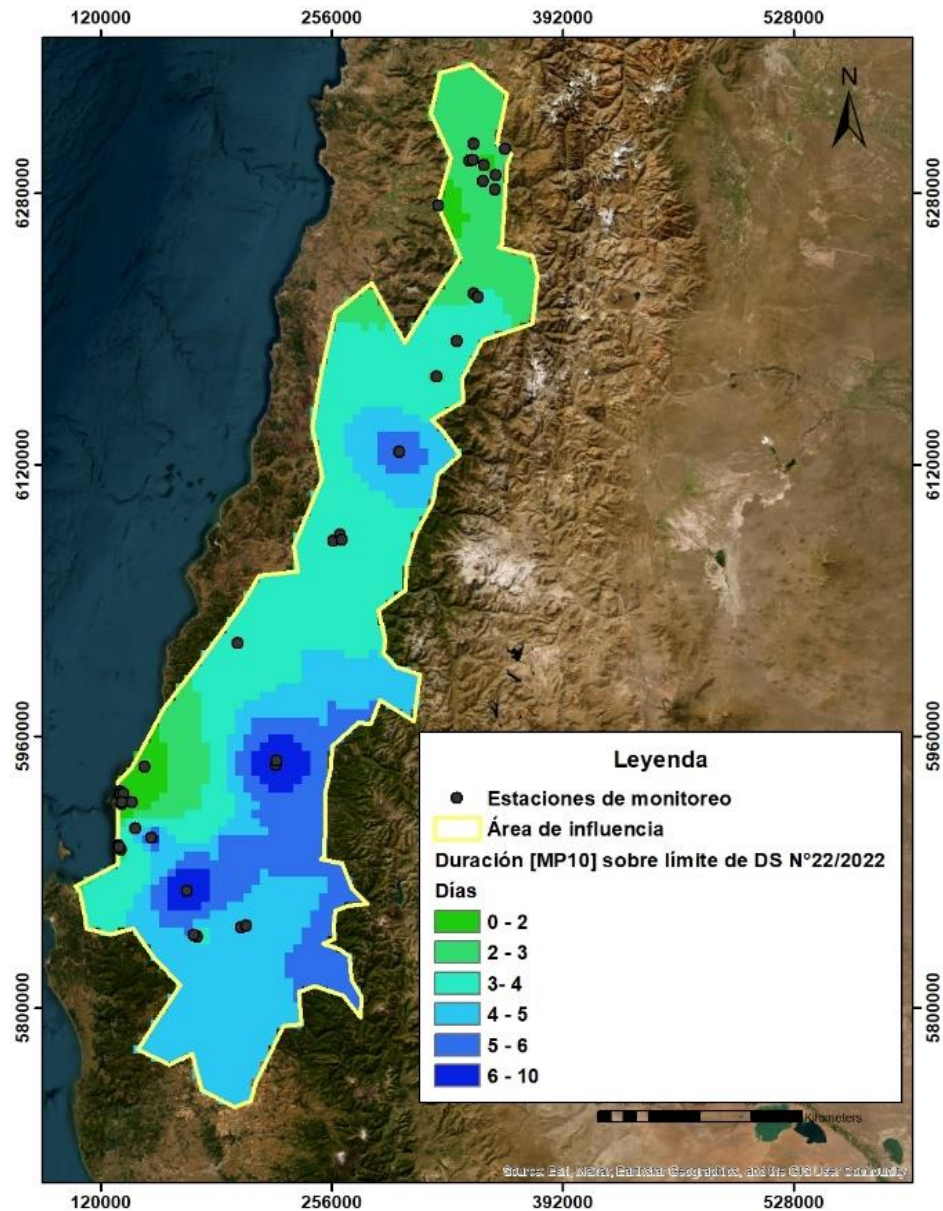


Figura 19. Mapa interpolación IDW, Promedio de días de concentración sobre el límite de normativa para el MP10
Fuente: elaboración propia

En cuanto al Material Particulado 2,5, se analizaron los días que superaban los límites establecidos por el DS N°12/2011, es decir, concentraciones mayores a

50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las estaciones que presentaron más días sobre este límite se registraron en Hualqui y Laja, contemplando 11 días consecutivos con concentraciones mayores a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las estaciones correspondientes a Punteras de la comuna de Chiguayante, INIA Chillán y San Carlos presentaron concentraciones mayores a límite por 8 a 10 días, mientras que las estaciones de la región del Maule registraron de 5 a 7 días con concentraciones mayores a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, la duración de MP2,5 presente en la ciudad de Santiago abarcó de 2 a 3 días.

La figura 20. muestra una aproximación de la distribución geográfica de los días con concentraciones superiores a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del contaminante MP2,5 en el área de influencia atmosférica.

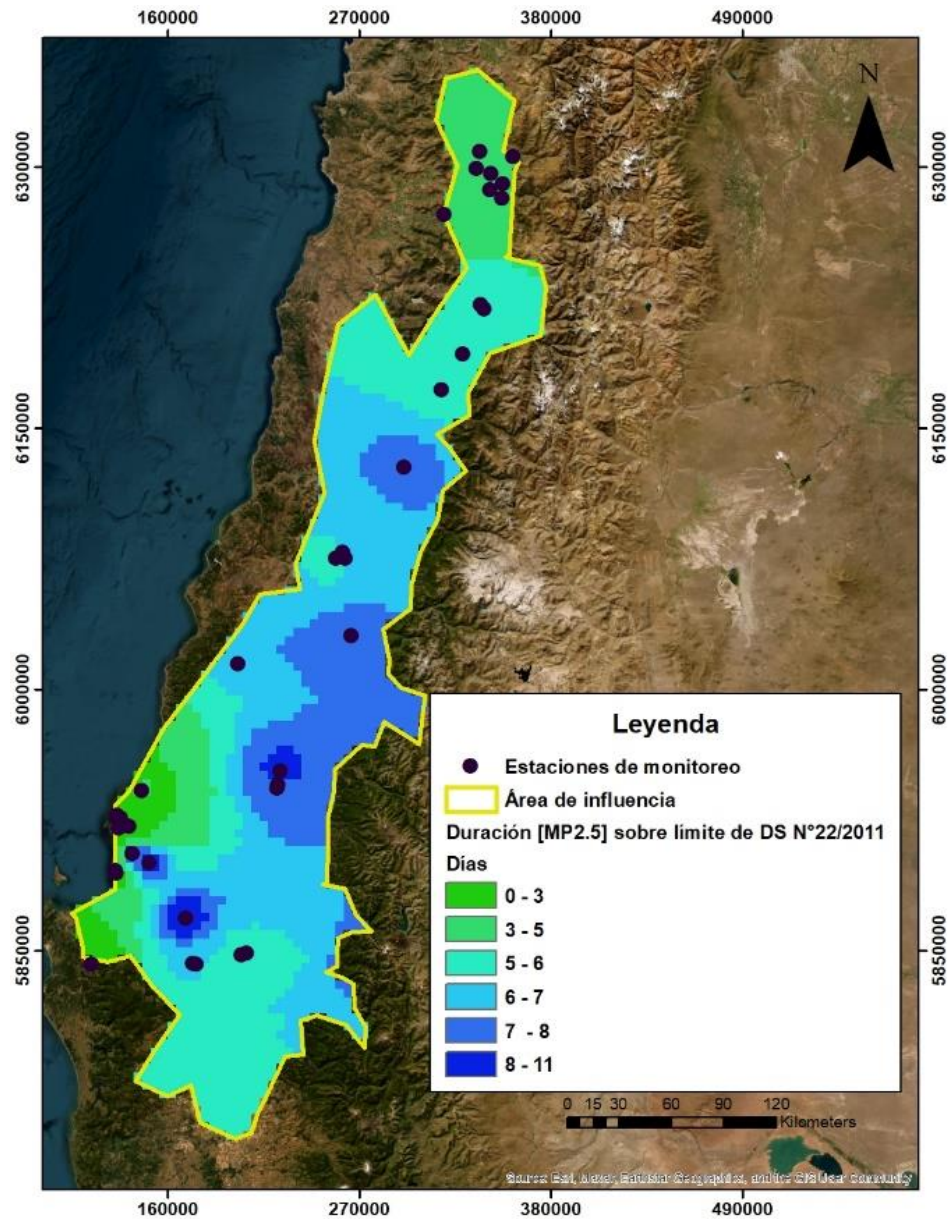


Figura 20. Mapa interpolación IDW, Promedio de días de concentración sobre el límite de normativa para el MP2,5
Fuente. Elaboración propia.

Con respecto a la duración, el MP2,5 presenta un máximo de días sobre el límite de la normativa correspondiente en la estación Laja, abarcando 11 días, igual

que para el MP10, mencionando que este último sólo contempla 10 días para esta estación. En ambos contaminantes, las menores duraciones se concentraron en la ciudad de Santiago

Con respecto a la distribución geográfica que se visualiza en las figuras, se puede presenciar que ambos contaminantes se comportaron de forma parecida en con respecto a este criterio. Solo cabe destacar que el MP2,5 en las estaciones registradas en la región del Maule permaneció por alrededor de dos días más, en comparación con el MP10.

4.3.2 Intensidad de la contaminación atmosférica producida por los megaincendios

Las concentraciones máximas registradas para el Material Particulado 10 se localizaron principalmente las áreas en que se encontraron los focos de los incendios, o más bien, a las cercanías de estos focos. La estación Laja registró una concentración de 560 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que las estaciones de la ciudad de Los Ángeles y Chillán también presentaron altas concentraciones, rodeando los 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, las ciudades de Rancagua y Santiago mostraron las menores concentraciones, sin embargo, se registraron valores altos en estas sobrepasando el límite de la normativa (130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

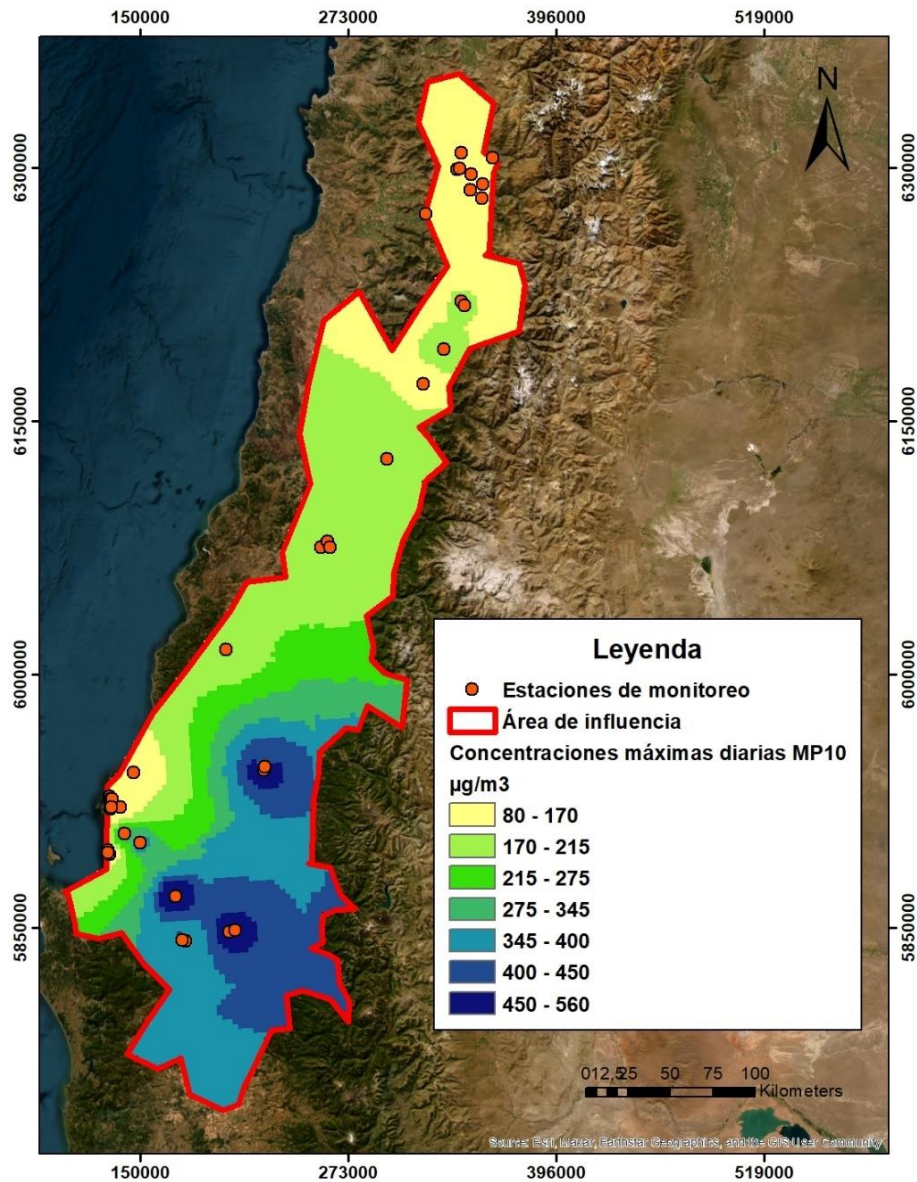


Figura 21. Mapa interpolación IDW de concentración máximas diarias para Material Particulado 10

Fuente. Elaboración propia.

La figura 19. visualiza la distribución de las altas concentraciones del Material Particulado 10 registradas en el mes de febrero. Se observa que las mayores concentraciones se presentan en las regiones del Biobío y Ñuble,

específicamente en las comunas de Laja, Los Ángeles, Angol, Santa Juna, Santa Barbara, Antuco, Quillón, Chillán, San Carlos, entre otras comunas que se encuentran dentro de la provincia del Bío-bío, Concepción, Ñuble, Itata y Punilla.

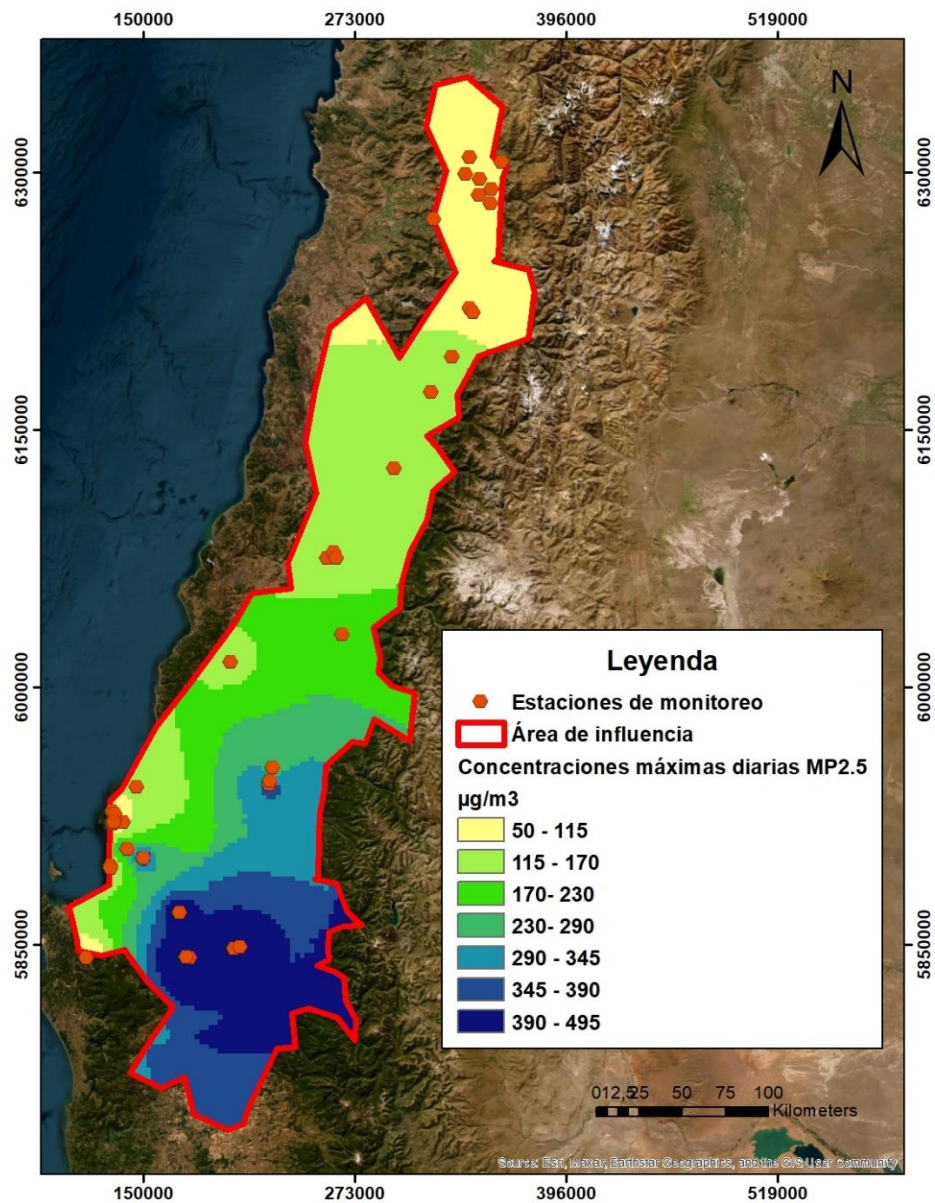


Figura 22. Mapa interpolación IDW de concentración máximas diarias para Material Particulado 2,5
Fuente. Elaboración propia.

En cuanto al Material Particulado 2,5, las concentraciones máximas se registraron en las mismas estaciones que para el MP10. La concentración máxima del contaminante se registró en la estación Lautaro, ubicada en la comuna de Nacimiento, alcanzando una concentración del 495 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la estación de Laja se registró 410 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en Hualqui 393 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, las estaciones de Los Ángeles se observaron concentraciones sobre los 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en la ciudad de Chillán se registraron concentraciones alrededor de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La figura 20 demuestra las distribuciones de las concentraciones del Material Particulado 2,5, destacando la localización de estos altos valores en las comunas como Laja, Los Ángeles, Nacimiento, Angol, Renaico, Santa Juana, Yumbel, entre otras comunas pertenecientes a la provincia de Malleco, Biobío y Ñuble.

A diferencia de la distribución del MP10, el material particulado 2,5 se presencia localizado principalmente en las provincias del Biobío y Malleco, mientras el material particulado 10 se distribuye también en provincias como Ñuble y Punilla.

4.3.3 Población afectada por la exposición a contaminantes asociados al megaincendio

Se consideró el criterio de la población expuesta a las altas concentraciones de los contaminantes por la importancia que hay detrás en incluir a los habitantes afectados a la hora de evaluar un impacto. Debido a que las personas sufren consecuencias directas a causa de eventualidades ambientales como lo es la contaminación atmosférica. Los contaminantes evaluados conllevan adversidades directamente a la salud de las personas provocando enfermedades respiratorias por la exposición a largo plazo y el aumento en el porcentaje de mortalidad por la exposición a altas concentraciones en un periodo corto (24h).

La distribución de los habitantes afectados dentro del área de influencia atmosférica se presencia en la figura 21, donde se aprecia que las mayores poblaciones se encuentran localizadas en las grandes ciudades, como Santiago, Concepción, Rancagua, Los Ángeles, Talca y Chillán.

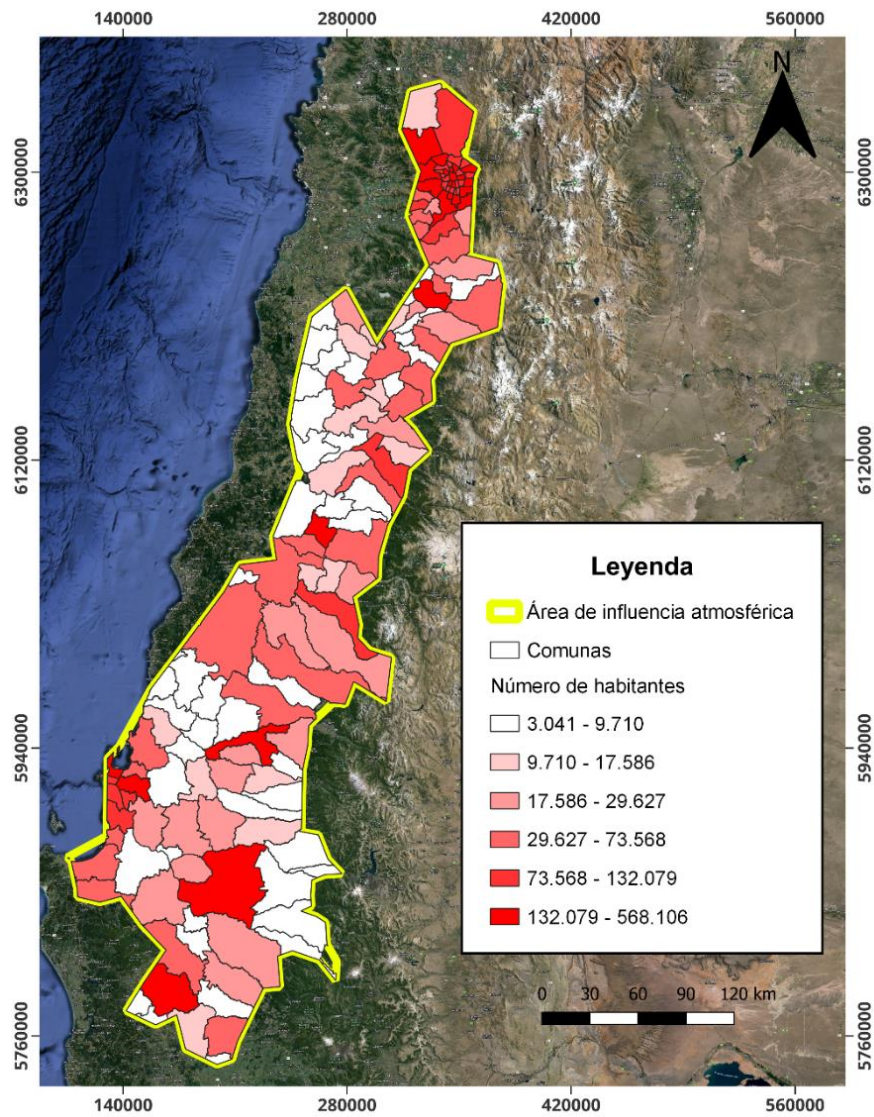


Figura 23. Determinación del número de habitantes de las comunas pertenecientes al área de influencia atmosférica del megaincendio febrero 2023.

Fuente. Elaboración propia mediante ArcGIS.

4.3.4 Magnitud de impacto en la calidad del aire de los megaincendios forestales del periodo febrero 2023

La determinación de la magnitud del impacto se realizó mediante la superposición de los mapas de duración de los contaminantes sobre el límite de la normativa e intensidad según las concentraciones máximas diarias registradas. A cada una de estas características se le aplicó un grado de importancia según ciertos criterios, con un valor de 0,5 tanto para el mapa de duración como para el de intensidad. La magnitud del impacto se caracteriza por estar en valores del 0 al 100, donde 0 representa una magnitud baja y 100 una magnitud alta.

La figura 24 representa la magnitud según la intensidad y duración del contaminante Material Particulado 10 (MP10), donde 24 comunas dentro del área de influencia atmosférica presentaron una magnitud alta entre valores de 61 a 100, estas corresponden a comunas pertenecientes a la provincia de Biobío, Concepción, Ñuble y Punilla, entre ellas se destacan: Santa Juana, Chillán, Arauco, Santa Bárbara, San Carlos, Laja, Los Ángeles, Nacimiento, entre otras.

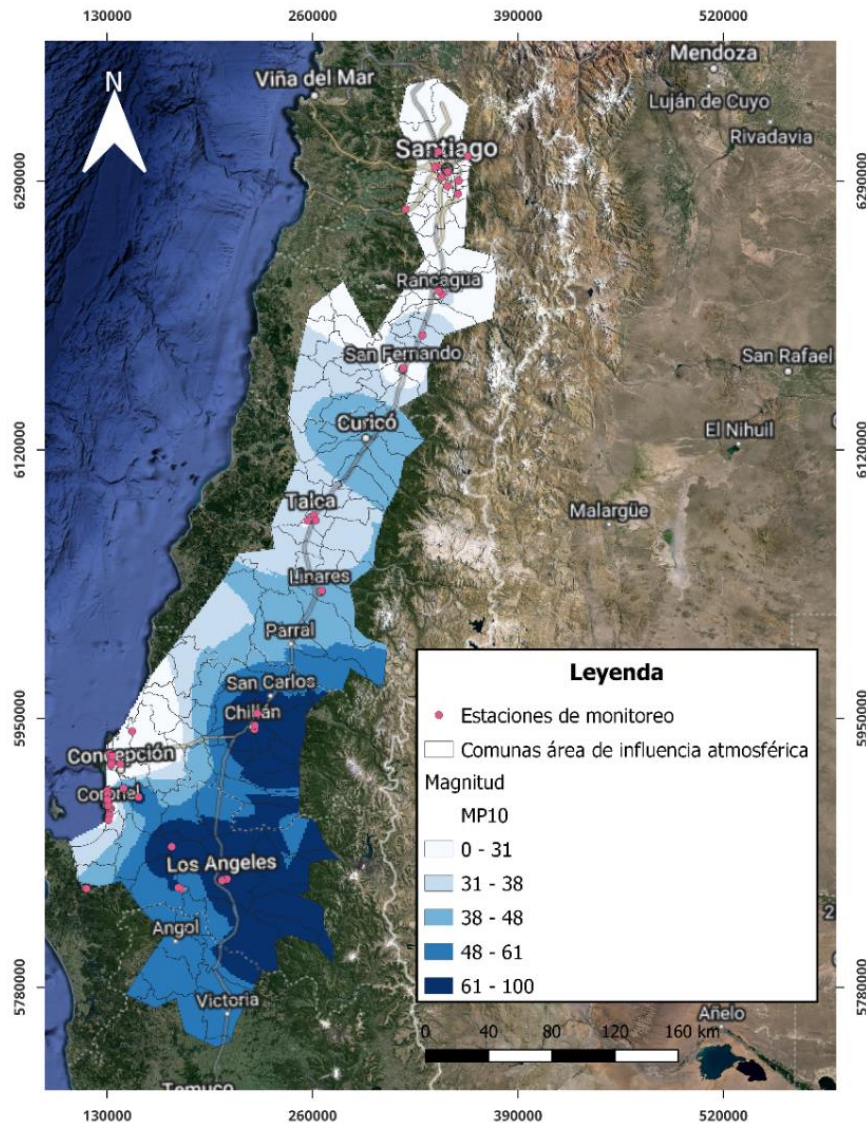


Figura 24 Mapa de magnitud según de concentración máximas diarias y duración de Material Particulado 10

Fuente. Elaboración propia.

La figura 25 representa la distribución geográfica de la magnitud (intensidad y duración) del contaminante atmosférico Material Particulado 2,5 (MP2,5) producto al evento del megaincendio de febrero 2023. Se identificó 97 comunas dentro del área de influencia presentaron una magnitud baja con una escala de

0 a 38. Además de las 154 comunas dentro del área de influencia, 27 presentaron una magnitud alta, evaluadas con valores de 65 a 100. Estas comunas corresponden a comunas pertenecientes a la provincia del Bío-bío, Concepción, Ñuble, Punilla y Malleco.

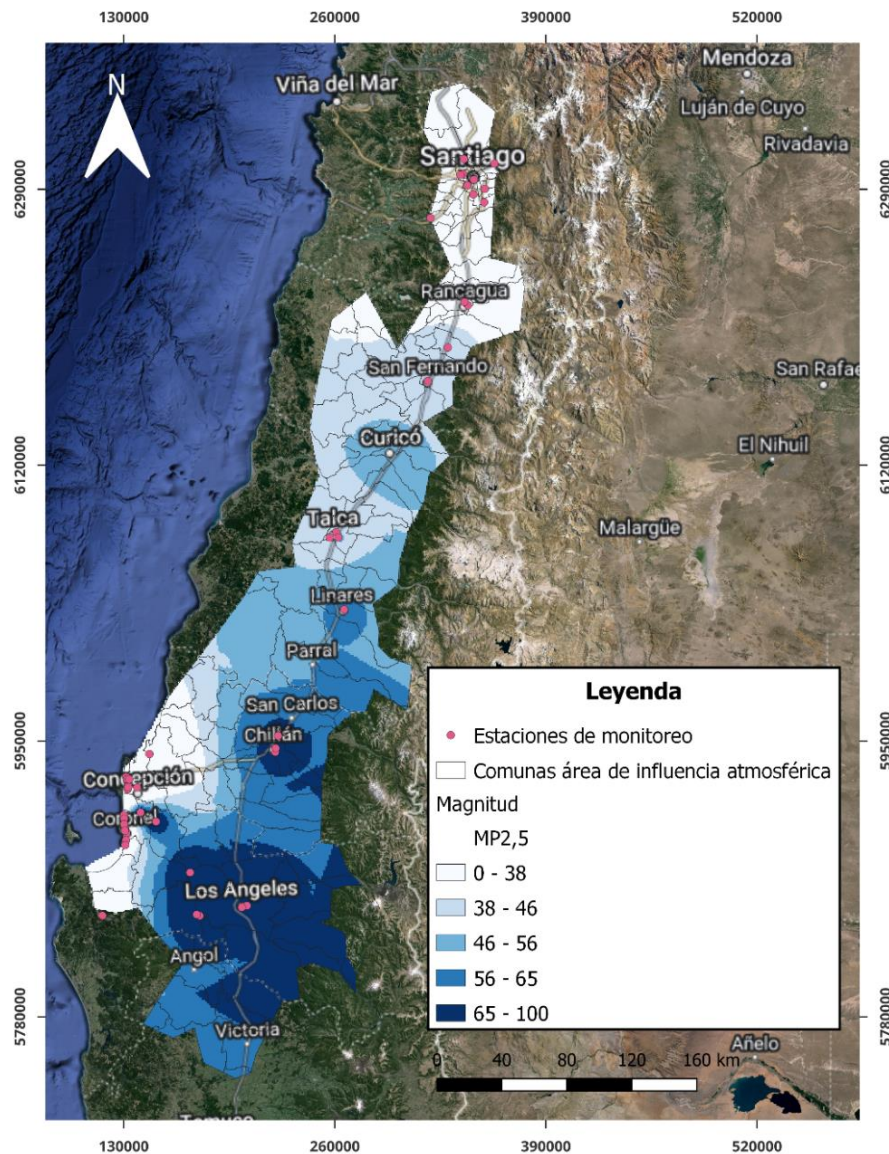


Figura 25 Mapa de magnitud según de concentración máximas diarias y duración de Material Particulado 2,5.

Fuente. Elaboración propia.

Tanto el MP10 como el MP2,5 presentan una alta magnitud en las comunas de pertenecientes a las regiones del Bío-bío y Ñuble, donde se encontraron altas concentraciones de estos contaminantes, con registros mayores a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un alto número de días de superación de la normativa, con alrededor de 6 a 11 días.

4.3.5 Índice de impacto en la calidad del aire de los megaincendios forestales en el periodo de febrero 2023

La realización del índice de impacto se determinó mediante las tres características de impactos mencionados, duración, intensidad y población afectada. A cada una de estas características se le aplicó un grado de importancia según ciertos criterios. Para la duración e intensidad se asignó un valor del 0,25 para cada uno y para la población afectada un valor de 0,5. La asignación del mayor grado de importancia a la población afectada se debe a que las personas son los que sufren las consecuencias directas debido a la exposición por estos contaminantes. Además existen normativas primarias de calidad de aire que evalúa estos contaminantes, cuya función resguardar la salud de las personas.

Las figuras 26 y 27 corresponden a los índices de impacto atmosférico elaborados mediante una metodología de impacto denominado cartografía ambiental. Los mapas demuestran la jerarquización del impacto en una escala del 0 al 1 en donde:

- 0 – 0,25: Impacto bajo
- 0,25 – 0,5: Impacto medio
- 0,5 – 0,75: Impacto medio alto
- 0,75 -- 1: Impacto alto

La figura 26. muestra el impacto generado por el Material Particulado 2,5. Se observa que la una parte de la superficie que comprende el área de influencia

atmosférica está calificada en una escala de impacto bajo a impacto medio, mientras que la otra parte corresponde a un impacto medio alto a alto.

Las provincias afectadas por la contaminación atmosférica del Material Particulado 2,5 corresponden a las provincias de: Malleco, Biobío, Concepción, Ñuble, Punilla, Linares, Talca, Curicó, Cachapoal y Santiago, consideradas con un impacto medio alto y alto

Mientras que un total de 56 de las 156 comunas consideradas en el área de influencia atmosférica experimentaron un impacto medio alto y alto. Entre aquellas comunas destacan Laja, Nacimiento, Santa Barbara, Concepción, Coronel, Hualqui, Talca, Linares, entre otras. Asimismo, las comunas que experimentaron impacto alto sólo corresponden a 6 las cuales son Los Sauces, Los Ángeles, Chillán, Santiago, Puente Alto y La Florida. Si bien, la distribución geográfica entre las cuatro comunas no corresponde a la misma región, se puede decir que las comunas de Chillán y Los Ángeles contemplaron altas concentraciones de los contaminantes y la presencia de esto en el tiempo, considerando también que son comunas que contemplan un gran número de habitantes y son comunas en donde se localizaron focos de fuego del megaincendio. Sin embargo, las comunas de La Florida, Santiago y Puente Alto no presenciaron concentraciones significativamente altas y presencia en el tiempo de los contaminantes en comparación a otras comunas, lo que destacó significativamente fue la gran cantidad de personas expuestas a el impacto de contaminación atmosférica.

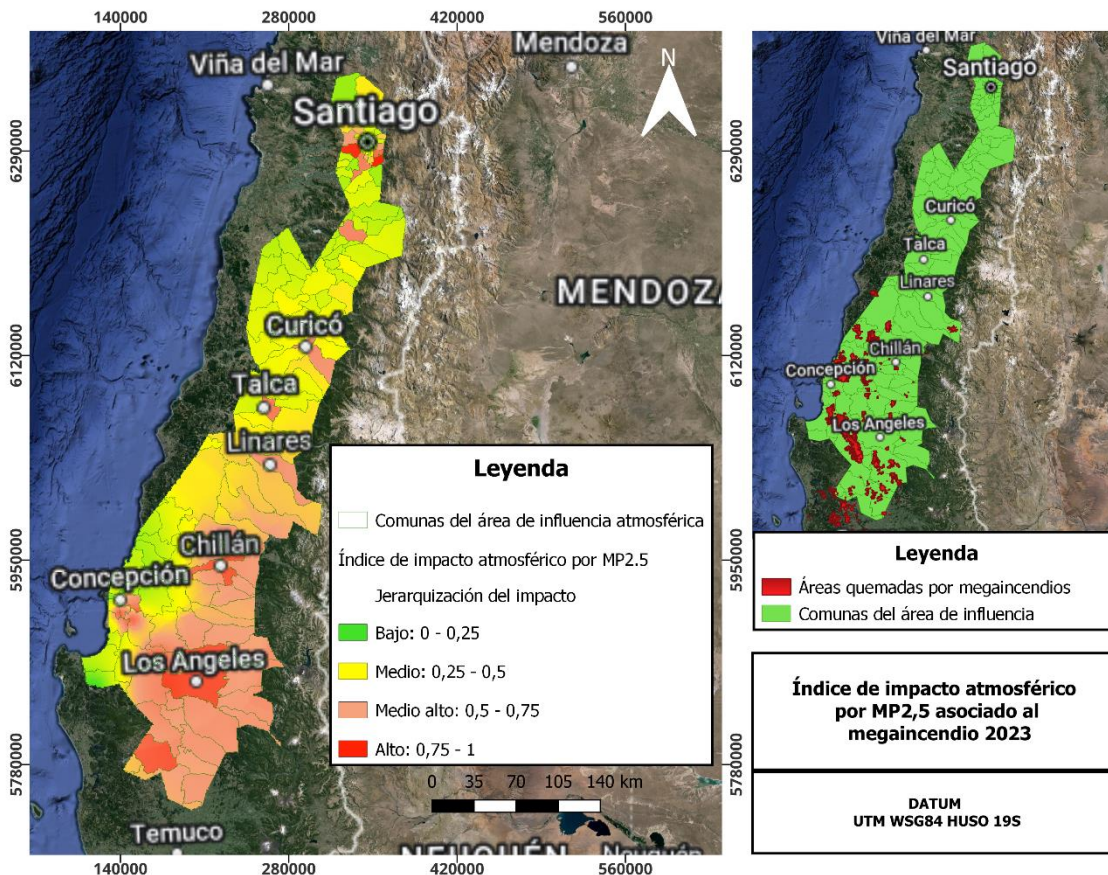


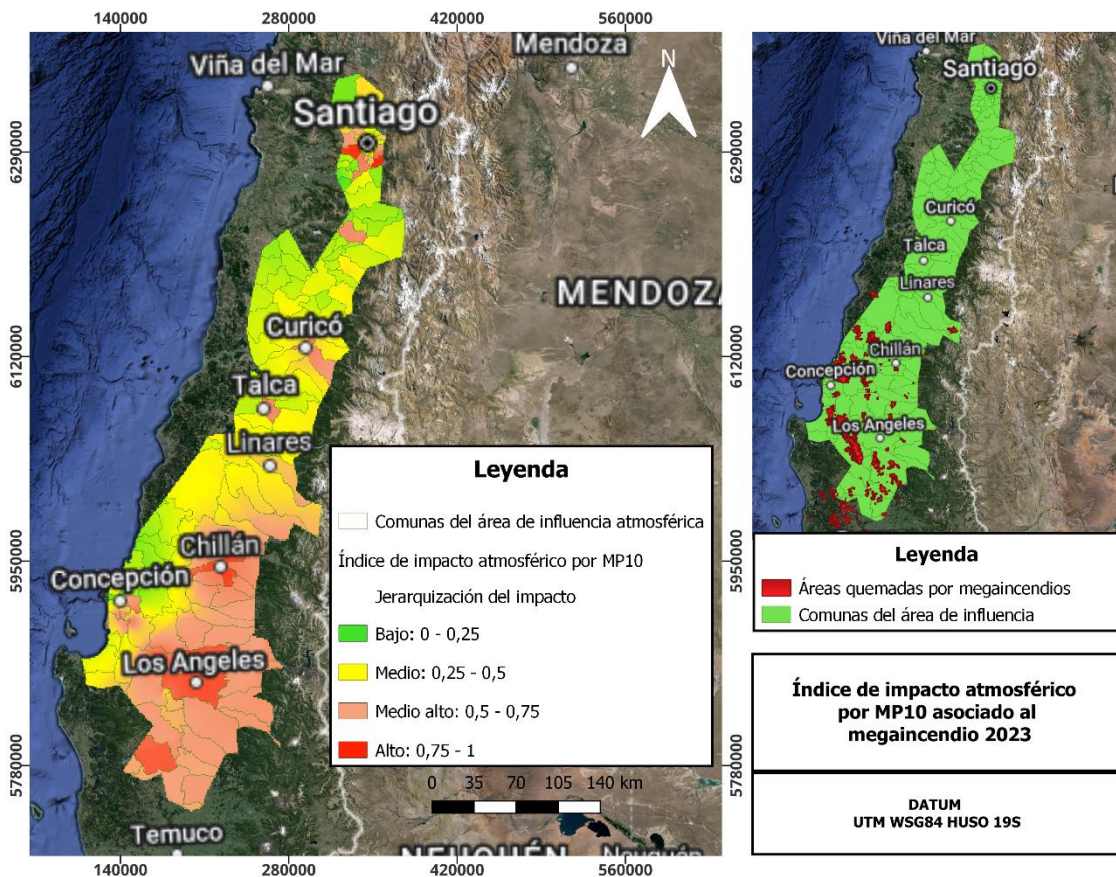
Figura 26. Mapa de distribución de Índice de impacto atmosférico por megaincendio de febrero 2023 para MP2,5

Fuente. Elaboración propia

La figura 27. corresponde al impacto provocado por la contaminación atmosférica debida al Material Particulado 10. La mayor distribución geográfica del impacto se clasifica como de impacto bajo y medio.

Las provincias afectadas por un impacto medio alto y alto debido a la exposición al MP10 corresponden a las mismas provincias afectadas por el MP2,5. Aunque el número de comunas afectadas por el MP10 fueron menores a la exposición por MP2,5, se identificaron 50 comunas con un estado de impacto medio alto y alto, considerando las mismas comunas afectadas por el MP2,5. Además, se

identificó 4 comunas con un impacto alto debido a este contaminante: Los Ángeles, Chillán, Puente Alto y La Florida.



Se puede observar que el Material Particulado 2,5 tuvo mayor impacto, ya que afectó a un mayor número de comunas con clasificaciones de impacto medio alto y alto, mientras que para el MP10 son más comunas que tuvieron un impacto bajo.

5. Discusión

Las imágenes satelitales son una gran herramienta que han aportado un avance significativo para la detección de sucesos atópicos, ya que tienen la capacidad de identificar y comprender las eventualidades que suceden en la troposfera terrestre. El satélite Sentinel-5P ha demostrado ser un recurso útil en la detección y monitoreo de los contaminantes atmosféricos, gracias a su índice espectral que permite identificar bastantes contaminantes. En el caso de estudio se utilizó el Índice de Aerosol (AI) para visualizar los niveles de concentración de M2,5 y MP10.

En el estudio realizado utilizando el índice espectral índice de Aerosol (AI) reflejado por el satélite Sentinel-5p, permitió identificar la ubicación, dispersión y duración de los contaminantes durante la temporada del megaincendio. Para evaluar si los valores del índice de aerosol (AI) reflejaban las concentraciones de los contaminantes MP10 y 2,5 medidos *in situ*, se llevó a cabo un análisis estadístico que reveló una relación media alta entre ambos criterios, con un coeficiente de correlación de Spearman (Rs) de 0.572 para MP10-AI y un Rs de 0.58 para MP2.5-AI.

El estudio de Arezoo Soleimany de año 2021, demostró correlaciones con resultados altos entre los Material Particulado evaluados y el Índice de Aerosol, obteniendo relaciones de 0.97 y 0.81 indicando una alta relación entre estas dos variables. Mencionando además que la relación entre el índice espectral AI y las concentraciones de los contaminantes fue significativamente más alta en comparación a la obtenidas por otros índices de otros satélites que reflejan estos contaminantes, MODIS/Terra y OMI/Aura (Soleimany et al., 2021).

Comparando con el estudio de Soleimany, la obtención de un valor de correlación medio pudo deberse a la extensión del área de estudio y al periodo de tiempo evaluado, que abarcó todo el mes de febrero. No obstante, los valores de correlación obtenidos fueron aceptables y permitieron identificar con precisión las

áreas con mayores concentraciones de MP2.5 y MP10, así como los valores del Índice de Aerosol que excedieron los niveles normales para la temporada de febrero (verano) para finalmente identificar el área de influencia atmosférica.

Sin embargo, es importante señalar que aunque las imágenes satelitales son una herramienta poderosa, su precisión puede verse afectada por la altitud desde la cual capturan las imágenes los satélites. Esta discrepancia entre lo reflejado por las imágenes y lo demostrado por los muestreos de los contaminantes *in situ* puede deberse a factores meteorológicos. Por lo tanto, es importante considerar que deben existir ciertos factores que impidan reflejar lo sucedido en la troposfera reflejando un margen de error en lo recopilado por las imágenes satelitales, variables como, cantidad de vapor de agua en la atmósfera, estabilidad atmosférica, velocidad del viento, etc (Ruescas & Castro, 2006).

Durante el megaincendio, las concentraciones de los contaminantes aumentaron significativamente, superando los límites establecidos por las normativas en al menos en un día del mes de febrero en todas las estaciones dentro del área de la influencia atmosférica. Las concentraciones promedio mensuales de febrero 2023 también aumentaron con respecto a las evaluadas en los años de la línea base. Sin embargo, en algunas estaciones de monitoreo, no se observaron cambios significativos en las concentraciones del cálculo del Percentil 98. Esto es debido principalmente ya que para el cálculo de este percentil es necesario contemplar todas las concentraciones diarias de un año calendario, es decir, se contabiliza la variabilidad de las concentraciones durante 360 aproximadamente.

La zona centro-sur y sur del país, que incluye el área de influencia evaluada, enfrenta una crisis con respecto a la contaminación del aire durante la temporada de invierno, debido al uso de calefacción. El principal método de calefacción es las estufas o cocinas a leñas, provocando emisiones de material particulado a la atmósfera debido al proceso de combustión de biomasa. Además, la deficiente

aislación térmica que comprenden las viviendas en el sur del país potencia el uso de este método de calefacción en los hogares (Boso, 2018).

Este gran factor potencia a que existan altas concentraciones de los contaminantes durante gran parte del año, provocando una superación en la normativa para el MP2.5 y MP10 en las estaciones evaluadas en los años de la línea base. Las estaciones principalmente de Chillán, San Carlos y Los Ángeles son las principales afectadas debido a la contaminación atmosférica en la temporada de invierno debido al uso de calefacción a leña (Celis *et al.*, 2007). Como se demostró en las figuras 14 y 15 del cálculo de los percentiles, todos los años (2018-2023) evaluado se sobrepasó la normativa DS N°12/2011 para MP2.5 y DS N°12/2021 para MP10.

La magnitud del impacto caracterizado por la duración e intensidad de los contaminantes representa las localidades que fueron afectadas por una mala calidad del aire debido a un aumento en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos producto de los megaincendios. Las comunas que presentaron mayores magnitudes en el periodo de febrero 2023 corresponden a localidades aledañas a los focos del megaincendios y además zonas que presentan una mala calidad del aire durante el periodo de invierno producto al uso de leña por calefacción doméstica (Celis *et al.*, 2007), lo cual afecta en la calidad del aire en el año del megaincendio (2023), aumentando las concentraciones anuales de contaminantes y afectando el cálculo del percentil 98.

Para la creación del índice de impacto atmosférico para el MP2.5 y MP10 se contempló tres características que identifican un impacto: duración, población afectada e intensidad. La importancia dada a la población afectada se basa en la necesidad de proteger la salud pública, respaldada por restudios que muestran la relación entre la mala calidad del aire y problemas a la salud.

Según la Guía de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS), múltiples estudios realizados verifican la incidencia de la mala calidad del aire con problemáticas que enfrentan la salud pública, estos estudios establecen un aumento en la mortalidad del 0,5% aproximadamente por cada incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en concentraciones de 24 horas para el MP10 (Guías De Calidad Del Aire et al., 2005).

Los resultados muestran que durante el megaincendio generó mayor impacto en las comunas de Chillán, Los Ángeles, La Florida y Puente Alto, comunas las cuales contemplan un alto número de habitantes. Cabe destacar, que las comunas de Los Ángeles y Chillán fueron las que fueron mayormente afectadas debido la magnitud del impacto por los términos de intensidad y duración de las concentraciones de los contaminantes, mientras que la comuna de La Florida y Puente Alto no se presenciaron tan fuerte estas características, pero eran las comunas con mayores habitantes en el área de influencia atmosférica, es decir, mayores habitantes sufrieron las consecuencias de las altas concentraciones de los contaminantes MP2.5 y MP10.

6. Conclusiones

El estudio proporcionó una visión detallada del impacto en la calidad del aire causado por la consecuencia del megaincendio de febrero 2023, centrándose en los términos de extensión, intensidad y las zonas urbanas que fueron afectadas producto de la contaminación de los contaminantes Material Particulado 2.5 y 10. A través de un análisis geoespacial de imágenes satelitales obtenidas del satélite Sentinel-5P y su índice espectral de aerosoles (Índice de Aerosoles - AI), se identifica un preciso análisis sobre la distribución y extensión de los contaminantes en la atmósfera.

En cuanto a la identificación del área de influencia atmosférica, la utilización de las herramientas satelitales es un aporte en la identificación de donde se localizan las mayores concentraciones los contaminantes atmosféricos. Las rosas de los vientos generadas indicaban velocidades moderadas, alrededor de 20 a 28 km/h, mientras que los vientos se proyectaban en una dirección noreste. Al igual que las imágenes satelitales, demostró una dispersión de la columna de humo generada por los megaincendios en dirección noreste.

Las imágenes satelitales proyectaron una visualización de concentraciones mayores a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10, concentraciones por debajo al límite dictado por las normativas respectivas de dichos contaminantes, pero consideradas altas en el periodo de verano, ya que no existen eventos antropológicos o naturales que expliquen emisiones de concentraciones de contaminantes altas.

El área de influencia atmosférica se delimitó según los valores del índice entre 0,3 a 3, ya que el umbral de estos valores representa concentraciones sobre 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2,5 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10.

La propagación del megaincendio con relación a la calidad del aire fue extensa, debido a que los focos de los incendios fueron puntuales (provincias de Malleco, Concepción, Biobío y Ñuble) pero el impacto generado por la contaminación

producto de esta fue a nivel regional. El área de influencia atmosférica incluyó 154 comunas afectadas pertenecientes a 6 regiones a lo largo de la zona centro-sur del país: Metropolitana, O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío.

Las concentraciones de los contaminantes evaluados registraron concentraciones mayores a $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dentro del área de influencia atmosférica. Donde la mayor concentración diaria de los contaminantes atmosféricos se registró en la región del Bío-bío, específicamente de la estación Laja con $410 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{MP}_{2,5}$ y $560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} . Además la duración, en relación con los días de concentraciones de los contaminantes sobre el límite de la normativa, marcaron una duración máxima de 11 días consecutivos. La estación de Hualqui fue la que tuvo mayor impacto en términos de la intensidad y duración de las concentraciones de los contaminantes, ya que esta estación presentaba una calidad basal óptima durante todos los años de línea base, sólo el año 2023 se ve sobrepasada la normativa correspondiente al MP_{10} y 2.5 producto del evento de megaincendio.

Finalmente se concluye que el $\text{MP}_{2.5}$ tuvo un mayor impacto que el MP_{10} , afectando principalmente a las comunas de Chillán, Los Ángeles, La Florida y Puente Alto. Además, el impacto de la contaminación atmosférica por el Material Particulado 10 y 2,5 se caracterizó por ser medio alto a alto, esto es debido principalmente por la extensión que alcanzó la contaminación atmosférica provocado por este. Los focos del megaincendio se registraron principalmente en las provincias de Concepción y Bío-bío, es decir, en puntos locales pero el impacto generado fue a escala regional debido al transporte o dispersión de los contaminantes atmosféricos, desplazándose a distancias de 300 km aproximadamente en un transcurso de 3 días, alcanzando concentraciones de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los focos del megaincendios y sobre $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona afectada más alejada de estos focos.

Además cabe destacar que la población expuesta a las altas concentraciones de los contaminantes fue alrededor de 10.816.657 habitantes, lo que representa alrededor del 60% de la población del país expuesta a un impacto de bajo a alto debido a la contaminación atmosférica producto del megaincendio de febrero 2023.

7. Referencias bibliográficas

- Akdis, C. A., & Nadeau, K. C. (2022). Human and planetary health on fire. In *Nature Reviews Immunology* 22(11), 651–652. Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41577-022-00776-3>
- Armenteras, D., & De la Barrera, F. (2023). Landscape management is urgently needed to address the rise of megafires in South America. In *Communications Earth and Environment* 4(1). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00964-6>
- Attiwill, P., & Binkley, D. (2013). Exploring the mega-fire reality: A 'Forest Ecology and Management' conference. *Forest Ecology and Management*, 294, 1–3. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2012.12.025>
- Barmpoutis, P., Papaioannou, P., Dimitropoulos, K., & Grammalidis, N. (2020). A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing. *Sensors (Switzerland)*, 20(22), 1–26. <https://doi.org/10.3390/s20226442>
- Boso, A. A. B. (2018). Narrativas de resistencia al cambio energético sustentable: el caso de la calefacción y las cocinas a leña en las ciudades de Temuco y Padre Las Casas [Narratives of resistance to sustainable energy change: The case of heating and wood-burning stoves in the cities of Temuco and Padre Las Casas]. Recuperado de <https://www.lared.red/espacios-de-comunidad-y-resistencia/>
- 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>

- Bruno, Y., Gbodjinou, B., & Akoton, P. (2023). Contribution of Sentinel-5P satellite images for the monitoring of aerosol particles in Benin. Recuperado de <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2943529/v1>
- Castillo S., M., Saavedra S., J., & Brull B., J. (2019). Fire severity in mega wildfires in Chile in 2017: actions to improve the protection system. *Territorium: Revista Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança*, 26 (I), 5–18. https://doi.org/10.14195/1647-7723_26-1_1
- Celis, J. E., Morales, J. R., Zaror, C. A., & Carvacho, O. F. (2007). Contaminación del Aire Atmosférico por Material Particulado en una Ciudad Intermedia: El Caso de Chillán (Chile). *Información Tecnológica*, 18(3), 49-58. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642007000300007
- Chas-Amil, M. L., Touza, J., & García-Martínez, E. (2013). Forest fires in the wildland–urban interface: A spatial analysis of forest fragmentation and human impacts. *Applied Geography*, 43, 127–137. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2013.06.010>
- Chirinos, L. R., & Mallqui, C. G. (2016). Comparación entre Interpoladores Espaciales en el Estudio de Distribución de Partículas Sedimentables Insolubles en la Cuenca Atmosférica de Lima y Callao. *Informacion Tecnologica*, 27(4), 111–120. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000400012>
- Coria, I. D. (2008). El estudio de impacto ambiental: Características y metodologías. En 125 *Invento* (Vol. 11, N.º 20). https://www.researchgate.net/publication/26614576_El_estudio_de_impacto_ambiental_caracteristicas_y_metodologias
- De, F., Médicas, C., & Cabrera, E. (2009). Instituto Superior de Ciencias Médicas de La Habana (ISCM-H). In *Rev haban cienc méd La Habana*: 8(2). <http://scielo.sld.cu/pdf/rhcm/v8n2/rhcm12209.pdf>

- De la Barrera, F., Barraza, F., Favier, P., Ruiz, V., & Quense, J. (2018). Megafires in Chile 2017: Monitoring multiscale environmental impacts of burned ecosystems. *Science of The Total Environment*, 637–638, 1526–1536. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.05.119>
- D'Evelyn, S. M., Jung, J., Alvarado, E., Baumgartner, J., Caligiuri, P., Hagmann, R. K., Henderson, S. B., Hessburg, P. F., Hopkins, S., Kasner, E. J., Krawchuk, M. A., Krenz, J. E., Lydersen, J. M., Marlier, M. E., Masuda, Y. J., Metlen, K., Mittelstaedt, G., Prichard, S. J., Schollaert, C. L., ... Spector, J. T. (2022). Wildfire, Smoke Exposure, Human Health, and Environmental Justice Need to be Integrated into Forest Restoration and Management. In *Current Environmental Health Reports*, 9(3), 366–385. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40572-022-00355-7>
- Espinoza, G., Richards, B., Jure, J., & Alzina, V. (2001). Fundamentos de evaluación de impacto ambiental. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/fundamentos.pdf>
- González, M. . E. S. R. . , Gómez-G. S. Miranda. A. . . C., Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, & Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile. (2020). *Incendios en Chile: causas, impactos, resiliencia*. <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/01/Informe-CR2-IncendiosforestalesenChile.pdf>
- González, M., 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). 32(3), 215-219. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300002>
- Graham, A. M., Pringle, K. J., Pope, R. J., Arnold, S. R., Conibear, L. A., Burns, H., Rigby, R., Borchers-Arriagada, N., Butt, E. W., Kiely, L., Reddington, C., Spracklen, D. V., Woodhouse, M. T., Knote, C., & McQuaid, J. B. (2021). Impact

- of the 2019/2020 Australian Megafires on Air Quality and Health. *GeoHealth*, 5(10). <https://doi.org/10.1029/2021GH000454>
- Guías De Calidad Del Aire, O., Mundial, A., & Organización, S. (2005). Organización Panamericana de Salud. www.cepis.ops-qrng/sde/ops-sdelbvsde.shtml
- Guo, J., Zhao, M., Xue, P., Liang, X., Fan, G., Ding, B., Liu, J., & Liu, J. (2020). New indicators for air quality and distribution characteristics of pollutants in China. *Building and Environment*, 172, 106723. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.106723>
- Linley, G. D., Jolly, C. J., Doherty, T. S., Geary, W. L., Armenteras, D., Belcher, C. M., Bliege Bird, R., Duane, A., Fletcher, M. S., Giorgis, M. A., Haslem, A., Jones, G. M., Kelly, L. T., Lee, C. K. F., Nolan, R. H., Parr, C. L., Pausas, J. G., Price, J. N., Regos, A., ... Nimmo, D. G. (2022). What do you mean, ‘megafire’? *Global Ecology and Biogeography*, 31(10), 1906–1922. <https://doi.org/10.1111/GEB.13499>
- Mamić, L., Gašparović, M., & Kaplan, G. (2023). Developing PM2.5 and PM10 prediction models on a national and regional scale using open-source remote sensing data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11212-x>
- Marcelo, C., Bella, D., Posse, G., Beget, M. E., & Fischer, M. A. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. 17(3), 39-52. <https://www.researchgate.net/publication/39499476>
- Marino, L., Rodríguez, S., Alfonso, L., Jaramillo, E., & Capote, P. A. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. 45: 77-95. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022010000100006

- Michalijos, P. & Uboldi, J. (2013). Propuesta metodológica para la evaluación de áreas afectadas por incendios mediante el uso de imágenes satelitales (Sierra de la Ventana, Argentina). 56: 223-234. <https://www.scielo.cl/pdf/rgeong/n56/art12.pdf>
- Ministerio de medio ambiente. (2021). Decreto 12/2021. NORMA PRIMARIA DE CALIDAD AMBIENTAL PARA MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE MP10. (Vol. 12). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1176988&idParte=0>
- Otero, L., Casasola, F., Pereyra, C., Prieto, M., Brusca, S., & Ristori, P. (2020). Australian aerosol layers over argentine territory during november 2019. *Anales de La Asociacion Fisica Argentina*, 31(1), 1–6. <https://doi.org/10.31527/analesafa.2020.31.1.1>
- Othman, M., Latif, M. T., Hamid, H. H. A., Uning, R., Khumsaeng, T., Phairuang, W., Daud, Z., Idris, J., Sofwan, N. M., & Lung, S. C. C. (2022). Spatial–temporal variability and health impact of particulate matter during a 2019–2020 biomass burning event in Southeast Asia. *Scientific Reports* 2022, 12(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11409-z>
- Peña-Fernández, E., & Valenzuela-Palma, L. (2004). Memorias del Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global. En *Memorias del Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global* (pp. 595). Servicio Forestal de los Estados Unidos. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/34438>
- Ruescas, A. B., & Castro, S. (2006). Dependencia del efecto de los aerosoles saharianos en la extracción de la temperatura superficial del mar por satélite utilizando el índice de aerosoles del Toms y la profundidad óptica de aerosoles del AVHRR. *Revista de Teledetección*, 26: 18-24. <https://www.aet.org.es/revistas/revista26/AET26-05.pdf>

- Sandoval, B. D., Reyes, T., & Oyarzún, M. G. (2019). Mecanismos de los efectos nocivos para la salud de la contaminación atmosférica proveniente de incendios forestales. 35(1), https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-73482019000100049
- Shrestha, B., Brotzge, J. A., & Wang, J. (2022). Observations and Impacts of Long-Range Transported Wildfire Smoke on Air Quality Across New York State During July 2021. *Geophysical Research Letters*, 49(19). <https://doi.org/10.1029/2022GL100216>
- Silva Adrian & Godoy Gustavo. (2016). Modelado de la dispersión de material particulado en la ciudad de Los Ángeles (Chile) a partir de las estufas a leña en el período de invierno usando AERMOD. 20; 44-54. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-28132016000200004&script=sci_abstract
- Soleimany, A., Grubliauskas, R., & Šerevičienė, V. (n.d.). Application of satellite data and GIS services for studying air pollutants in Lithuania (case study: Kaunas city). 14; 411–429. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00946-z/Published>
- Ubeda Cartaña, X., Mataix-Solera, J., Francos, M., & Farguell, J. (2021). Grandes incendios forestales en España y alteraciones de su régimen en las últimas décadas 2;147–161. https://doi.org/10.34037/978-989-9053-06-9_1.2_11
- Ubilla, D., Carbone, C.; Manieri, E.; Zama, D.; Del Bono, C.; Betti, L.; Biagi, C.; Lanari, M. Outdoor Air Pollution and Childhood Respiratory Disease: The Role of Oxidative Stress. *Int. J. Mol.Sci.* 2016, 24, 4345. <https://doi.org/10.3390/ijms24054345>

8. Anexos

Percentil 98 en las estaciones de la provincia de Concepción.

P98 MP2.5

	Cerro Mequin	Consultorio San Vicente	Coronel Norte	ENAP Price	Hualqui	Indura	Inpesca	Junji	Kingstone Collage	Liceo polivalente	Nueva libertad	Punteras
Percentil 98- 2023	49	78	129	32	79	48	86	104	39	47	59	65
Percentil 98- 2022	40	95	116	38	59	45	105	113	38	45	76	50
Percentil 98-2021	48	83	98	34	64	51	96	105	43	46	67	57
Percentil 98- 2020	52	81	161	38	54	52	104	107	38	40	63	51
Percentil 98-2019	24	82	-	39	59	58	96	106	40	47	67	66
Percentil 98-2018	35	103	-	38	63	57	139	105	54	63	88	49

P98 MP10

	Cerro Mequin	Consultorio San Vicente	Coronel Norte	Coronel Sur	ENAP Price	Hualqui	Indura	Inpesca	Junji	Kingstone Collage	Liceo polivalente	Nueva Libertad	Punteras
Percentil 98 -2023	81	95	164	141	66	105	67	95	114	58	74	106	103
Percentil 98 - 2022	62	104	114	111	85	75	62	112	122	53	61	181	64
Percentil 98 - 2021	72	112	147	121	64	80	65	103	109	61	65	139	70
Percentil 98 - 2020	83	99	172	107	55	83	71	115	112	52	57	137	58
Percentil 98 - 2019	81	124	-	-	68	78	77	108	113	59	67	132	72
Percentil 98 - 2018	-	142	-	131	58	68	83	136	115	67	74	129	62

Días de alerta ambiental de la provincia de Concepción

MP2.5

Estaciones	Cerro Mequín	Consultorio San Vicente	Coronel Norte	ENAP Price	Hualqui	Indura	INPESCA	Junji	Kingstone Collage	Liceo polivalente
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	2	1	4	1	11	1	1	1	1	4
ALERTA	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
PREEMERGENCIA	1	0	1	0	3	0	1	0	1	1
EMERGENCIA	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0

MP10

Estación	Cerro Merquin	Consultorio San Vicente	Coronel Norte	Coronel Sur	ENAP Price	Hualqui	Indura	INPESCA	Junji	Kingstone Collage	Liceo polivalente	Nueva libertad
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	1	0	0	3	0	7	0	1	0	1	1	1
ALERTA	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
PREEMERGENCIA	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
EMERGENCIA	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Provincia de BíoBio

P98 –MP2.5

Año 2023	Balneario	Club de empleados	Laja	Lautaro	Los Ángeles Oriente	21 de mayo
Percentil 98 - 2023	94	115	139	181	60	139
Percentil 98 - 2022	86	57	-	151	56	130
Percentil 98 - 2021	77	87	-	179	57	137
Percentil 98 - 2020	56	119	-	172	46	122
Percentil 98 - 2019	77	-	-	-	69	140
Percentil 98 - 2018	109	-	-	-	-	187

P98 MP10

	21 de mayo	Los Ángeles oriente	Club de Empleados	Laja	Lautaro
Percentil 98 - 2023	161	89	150	165	226
Percentil 98 – 2022	135	107	86	69	105
Percentil 98 – 2021	149	85	95	66	212
Percentil 98 - 2020	133	73	92	66	-
Percentil 98 - 2019	162	87	-	-	-
Percentil 98 - 2018	217	-	-	-	-

Días de alerta ambiental para MP2.5

Estaciones	21 de mayo	Los Ángeles Oriente	Balneario Curanilahue	Club Empleados	Laja	Lautaro
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	6	6	0	7	11	6
ALERTA	2	2	0	1	3	3
PREEMERGENCIA	2	3	0	3	2	2
EMERGENCIA	1	1	0	2	4	1

Días de alerta ambiental para MP10

Estación	Club Empleados	Laja	Lautaro	21 de mayo	Los Ángeles Oriente
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	7	10	2	5	5
ALERTA	1	0	0	0	0
PREEMERGENCIA	3	2	1	0	1
EMERGENCIA	1	2	0	1	1

Región de Ñuble

P98 MP2.5

	INIA Chillan	Purén	San Carlos
Percentil 98- 2023	84	144	138
Percentil 98- 2022	58	114	81
Percentil 98- 2021	70	144	-
Percentil 98- 2020	46	117	-
Percentil 98- 2019	43	152	-
Percentil 98- 2018	77	195	-

P98 MP10

	INIA Chillan	Purén
Percentil 98-2023	153	166
Percentil 98-2022	62	121
Percentil 98-2021	86	158
Percentil 98-2020	65	139
Percentil 98-2019	96	172
Percentil 98-2018	121	220

Días de alerta MP2,5

Estaciones	INIA Chillan	Purén	San Carlos
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	8	7	10
ALERTA	2	1	3
PREEMERGENCIA	3	2	3
EMERGENCIA	3	3	3

Días de alerta por MP10

Estación	INIA Chillan	Purén
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	7	7
ALERTA	0	2
PREEMERGENCIA	2	1
EMERGENCIA	1	1

Región del Maule

P98 MP2,5

	Curicó	Florida	Linares	UC Maule	UTAL
Percentil 98-2023	98	105	-	72	83

Percentil 98-2022	75	97	93	52	52
Percentil 98-2021	93	120	127	76	69
Percentil 98-2020	79	117	127	67	64
Percentil 98-2019	80	92	108	63	65
Percentil 98-2018	111	131	138	77	85

P98 MP10

	Curicó	Florida	UC Maule	UTAL
Percentil 98-2023	132	132	101	113
Percentil 98-2022	98	105	68	87
Percentil 98-2021	114	139	91	96
Percentil 98-2020	96	119	84	79
Percentil 98-2019	107	117	85	100
Percentil 98-2018	128	139	93	95

Días de alerta por MP2,5

Estaciones	Curicó	Florida	Linares	UC Maule	UTAL
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	8	5	8	7	7
ALERTA	3	1	2	1	1
PREEMERGENCIA	3	3	2	3	3
EMERGENCIA	0	0	2	0	0

Días de alerta por MP10

Estaciones	Curicó	Florida	UC Maule	UTAL
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	6	3	3	4

ALERTA	2	0	1	1
PREEMERGENCIA	0	0	0	0
EMERGENCIA	0	0	0	0

Región Libertador Bernardo O'Higgins

P98 MP2,5

	Rancagua I	Rancagua II	Rengo	San Fernando
Percentil 98-2023	85	77	67	83
Percentil 98-2022	74	89	64	79
Percentil 98-2021	85	103	62	82
Percentil 98-2020	75	83	80	72
Percentil 98-2019	82	84	84	72
Percentil 98-2018	76	99	78	63

P98 MP10

	Rancagua I	Rancagua II	Rengo	San Fernando
Percentil 98-2023	139	112	111	105
Percentil 98-2022	121	98	100	93
Percentil 98-2021	130	132	126	97
Percentil 98-2020	123	96	102	90
Percentil 98-2019	133	124	116	114
Percentil 98-2018	113	132	109	100

Días de alerta por MP2,5

Estaciones	Rancagua I	Rancagua II	Rengo	San Fernando
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	6	6	6	6
ALERTA	3	2	3	3
PREEMERGENCIA	1	0	2	2
EMERGENCIA	0	0	0	0

Días de alerta por MP10

Estación	Rancagua I	Rancagua II	Rengo	San Fernando
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	4	0	4	3
ALERTA	0	0	1	0
PREEMERGENCIA	0	0	0	0
EMERGENCIA	0	0	0	0

Región Metropolitana

P98 MP2,5

	El Bosque	La florida	Las Condes	Parque O'Higgins	Pudahuel	Puente Alto	Quilicura	Talagante
Percentil 98- 2023	83	69	48	69	78	58	74	79
Percentil 98- 2022	86	70	50	68	79	60	72	71
Percentil 98- 2021	90	73	45	71	103	60	77	-
Percentil 98- 2020	65	49	36	57	69	45	58	-
Percentil 98- 2019	72	64	46	65	91	53	67	63
Percentil 98- 2018	81	60	44	66	79	53	62	64

P98 MP10

	El Bosque	La florida	Las Condes	Parque O'Higgins	Pudahuel	Puente Alto	Quilicura	Talagante
Percentil 98- 2023	161	134	99	160	164	136	145	120
Percentil 98- 2022	154	133	104	143	151	140	124	112
Percentil 98- 2021	167	139	109	137	176	144	150	-
Percentil 98- 2020	128	95	76	126	135	105	111	-
Percentil 98- 2019	158	142	106	158	182	126	149	116
Percentil 98- 2018	128	118	99	149	128	106	144	113

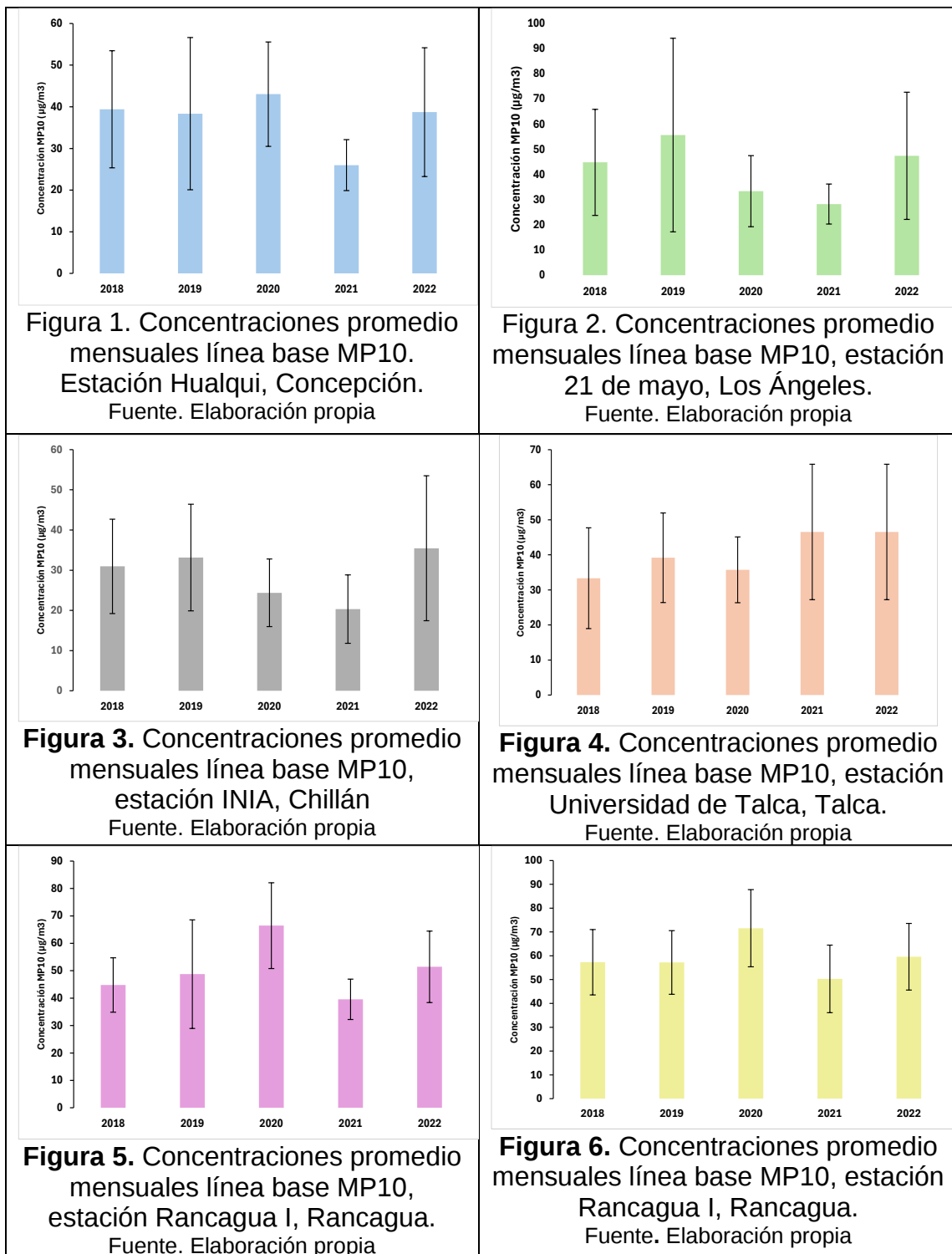
Días de alerta por MP2,5

Estación	El Bosque	La florida	Las Condes	Parque O'Higgins	Pudahuel	Puente Alto	Quilicura	Talagante
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	6	4	4	4	5	4	4	5
ALERTA	1	0	0	0	0	0	0	0
PREEMERGENCIA	0	0	0	0	0	0	0	0
EMERGENCIA	0	0	0	0	0	0	0	0

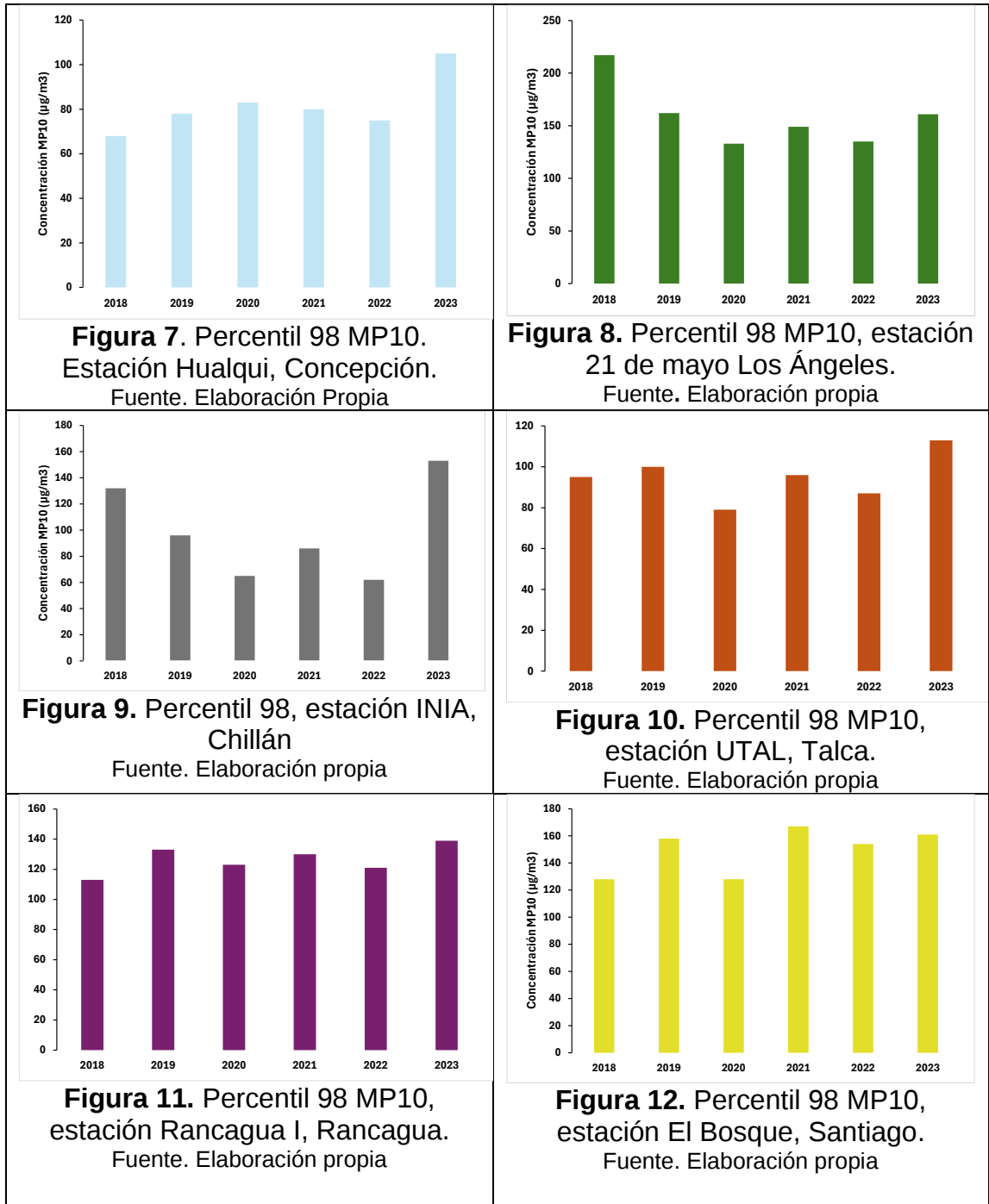
Días de alerta por MP10

Estación	Cerro Navia	El Bosque	La Florida	Las Condes	Parque O'Higgins	Pudahuel	Puente Alto	Quilicura	Talagante
SUPERACIÓN DEL LÍMITE DE NORMATIVA	2	4	2	0	1	3	2	2	0
ALERTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PEEREMERGENCIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EMERGENCIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Concentraciones mensuales febrero MP10, línea base.



Percentil 98 – MP10



Análisis de concentraciones de MP10 y 2.5 en temporada de megaincendio y previa a esta (línea base).

Estación Universidad de Talca, Talca.

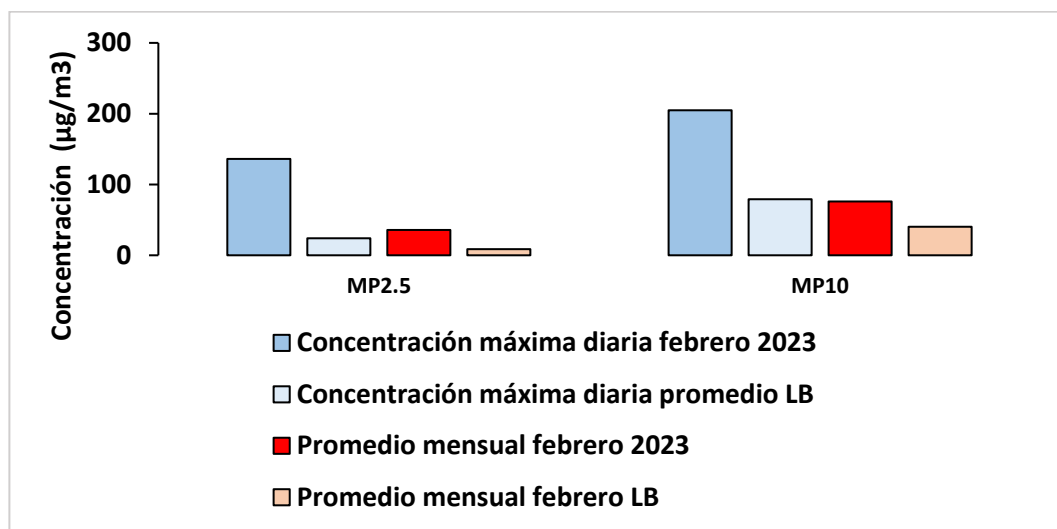


Figura x. Análisis de concentraciones para MP10 Y MP2.5 de línea base y mes de febrero de megaincendios, estación INIA, Chillán.

Fuente. Elaboración propia.

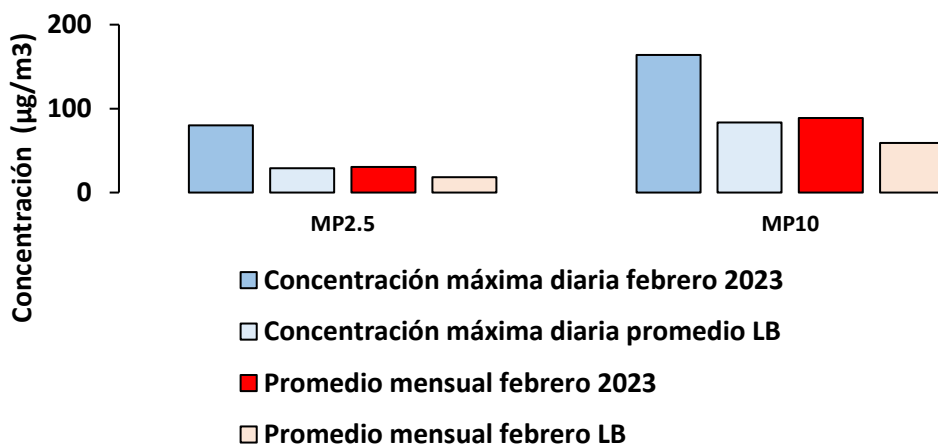


Figura x. Análisis de concentraciones para MP10 Y MP2.5 de línea base y mes de febrero de megaincendios, estación El Bosque

Fuente. Elaboración propia.

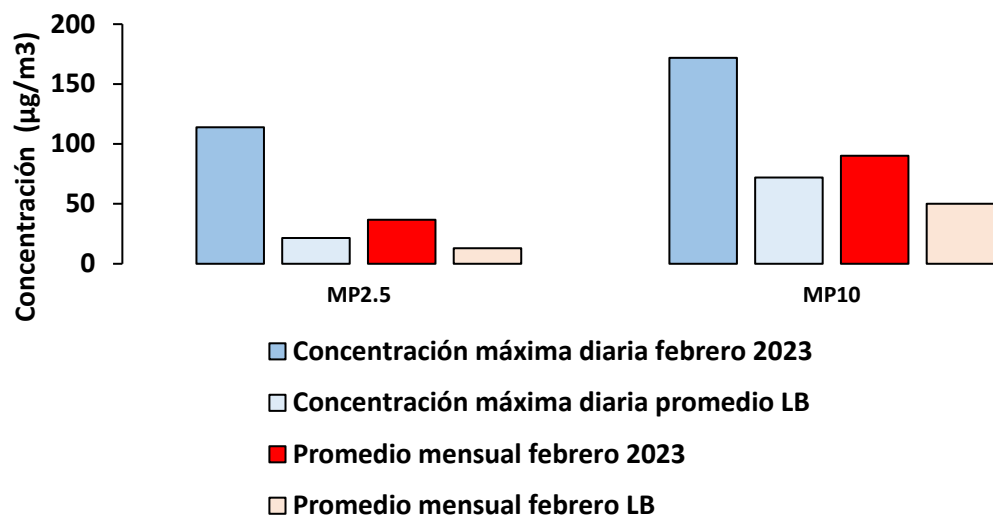


Figura x. Análisis de concentraciones para MP10 Y MP2.5 de línea base y mes de febrero de megaincendios, estación Rancagua I.

Fuente. Elaboración propia.