



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

**CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE:
FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y
COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 Y MP2.5**

.

Memoria para optar al título de Geógrafo

EDUARDO JAVIER GALLARDO PORTILLO

Profesora Guía: Pamela Smith Guerra

SANTIAGO – CHILE

2020

AGRADECIMIENTOS

A Alejandra, mi madre, y lo valioso de haber compartido - y de compartir - ese infinito vaivén de este barco que más bien parecía bote, pero que en realidad era una puerta alta, delgada y astillada. No obstante, las maromas hicieron que esto fuera un mero detalle para hacer más divertida la travesía.

A Eduardo, mi padre, y su paciencia monumental y cariño incondicional que me han mantenido en pie frente a unas cuantas tormentas en vasos de agua cuyas bravezas residuales a veces azotaban contra su persona.

A Alejandro, mi hermano, y Franco, mi sobrino. Cada tanto recuerdo los ratos donde jugabas PS1 y verte jugar era más divertido que cualquier consola o pasatiempo. Hicimos que el tiempo pasara raudo entre nosotros, pero siempre hay tiempo para afinar las cuerdas.

A Helena, con todo mi corazón, por ser una gran amiga, compañera y un tremendo apoyo cuando la maña se desborda y pareciera hasta insostenible.

A mis amigas y amigos, por ayudarme directa e indirectamente a iluminar mi paso algo accidentado en lo que va de vida con chubascos de alegría y decepción. Con plena confianza y cursilería afirmo que las caídas y repuntes le dan todo el sabor - y algo de filtro - al asunto.

A la investigadora y académica Pamela Smith Guerra, quien fuera la profesora guía de este trabajo de investigación. Muchas gracias por su vasta paciencia y tiempo.

A Marco Acuña Briones por el tiempo y amabilidad, como también sus valiosos aportes y reflexiones en torno a la situación actual de la contaminación.

A María José Plá, por recibirme en su cálida morada y apoyarme en mis tímidos primeros días en Coyhaique.

A Héctor Córdova, por la buena onda e interés; quien incluso levantó el tema alcanzando dos diarios regionales.

RESUMEN

Este trabajo de investigación centra su estudio en las características y comportamiento histórico y espacial de la contaminación por material particulado (MP) de 10 y 2,5 micrómetros presente en la ciudad austral de Coyhaique. En el caso de las características, se realiza una recopilación de información obtenida mediante bibliografía y en terreno para describir los factores geográficos que inciden directamente en la concentración del material particulado; y de esta manera, contextualizar con cimientos básicos y suficientes que justifican la concentración de la contaminación. Luego, ahondando en una revisión histórica de los factores geográficos identificados, se presentan análisis del comportamiento temporal para cada uno de estos; y así, comprender el grado de relación existente entre las variables geográficas como - por ejemplo - el caso de las precipitaciones y la concentración de material particulado, entre otros. Finalmente, utilizando información recopilada en terreno mediante equipo especializado, se presenta el comportamiento espacial de la contaminación mediante la espacialización de las tomas de muestras realizadas en la ciudad. Así, esta investigación evita reiterar la responsabilidad de la combustión de leña dentro de la contaminación local, y más bien apunta a entender tanto las razones geográficas por las que se acumula tal nivel de material particulado, como también la forma en que ésta se desenvuelve en la ciudad con su estrecha relación a la planificación urbana.

Palabras Claves: *Contaminación atmosférica, Medioambiente, Material particulado, Plan de Descontaminación Ambiental, Institucionalidad Ambiental de Chile.*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE ANEXOS	9
CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN	10
1.1- INTRODUCCIÓN	10
1.2- PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	11
1.2- ÁREA DE ESTUDIO Y ANTEDECENTES GENERALES	13
1.3.1- Caracterización física de Coyhaique como antecedente de la contaminación local.	13
1.3.2- Caracterización sociodemográfica.....	18
1.3.3- Caracterización socioeconómica	20
1.4- OBJETIVOS	26
1.4.1- Objetivo general	26
1.4.2- Objetivos específicos.....	26
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	27
2.1- LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: DESDE SU GÉNESIS HASTA LA RELEVANCIA ANTRÓPICA	27
2.1.2- Origen y composición de la contaminación atmosférica	27
2.1.3- Material particulado o partículas en suspensión.....	28
2.2- DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA	32
2.2.1- Viento	32
2.2.2- Inversión térmica como fenómeno fundamental de la acumulación de material particulado en la tropósfera.	33
2.3- PLANES DE DESCONTAMINACIÓN AMBIENTAL COMO RESPUESTA INSTITUCIONAL FRENTE A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	39
2.3.1- El caso de Coyhaique	40
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	46
3.1- DISEÑO METODOLÓGICO	46

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES,
CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

3.2- INSTRUMENTOS UTILIZADOS	47
3.2.1- Contador de partículas HT-9600	47
3.2.2- GPS Garmin eTrex 30X	49
3.3- PASOS METODOLÓGICOS	51
Objetivo 1: Identificar y describir los factores que condicionan la calidad climática de Coyhaique.	51
Objetivo 2: Describir el comportamiento histórico de la contaminación por material particulado según su relación a otras variables meteorológicas.	52
Objetivo 3: Determinar y analizar el comportamiento espacial de la contaminación por material particulado en el área de estudio.....	53
Alcances de la investigación.....	55
 CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	 56
4.1- FACTORES CONDICIONANTES DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINACIÓN EN COYHAIQUE.....	56
4.1.1- Relieve.....	56
4.1.2- Viento.....	59
4.1.3- Precipitaciones	67
4.1.4- Inversión térmica.....	67
4.2- COMPORTAMIENTO HISTORICO DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES METEOROLÓGICAS PARA LA CIUDAD DE COYHAIQUE.	74
4.2.1- Episodios críticos	75
4.2.2- Media anual histórica.	76
4.2.3- Media mensual histórica.....	77
4.2.4- Media diaria histórica.....	79
4.2.5- Media horaria	79
4.2.6- Relación histórica con la temperatura.	80
4.2.7- El viento y su rol en la dispersión del material particulado.....	83
4.2.8- Precipitaciones	84
4.3- DESCRIPCIÓN Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO EN COYHAIQUE.....	86
4.3.1- Observaciones de material particulado capturadas en la caminata del 09/07/19	86
4.3.2- Resultados recorrido en vehículo	90
 CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	 95
 BIBLIOGRAFÍA.....	 100
 ANEXOS	 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Carta de Coyhaique y comunas aledañas.	13
Figura 2. Formaciones y pisos vegetacionales de Coyhaique.	15
Figura 3. Hidrografía de la comuna de Coyhaique.	16
Figura 4. Uso de suelo para la comuna de Coyhaique.	17
Figura 5. Comparación porcentual de la población de la comuna de Coyhaique según grupo de edad entre los años 1992 y 2017.	19
Figura 6. Tipo de combustible usado para calefacción en la ciudad de Coyhaique.	22
Figura 7. Tipo de calefacción principal utilizada en los hogares.	22
Figura 8. Calefacción principal según ingresos del hogar.	23
Figura 9. Cantidad de estufas por hogar.	23
Figura 10. Cantidad de estufas por hogar según ingresos.	24
Figura 11. Motivos de utilización de la leña según ingresos.	24
Figura 12. Comparación de tamaño del material particulado.	30
Figura 13. Representación de un anticiclón y un ciclón (borrasca).	34
Figura 14. Esquema referencial del anticiclón del Pacífico Sur (sistema de alta presión) y un sistema de baja presión.	34
Figura 15: Morfología de penachos de humo según nivel de estabilidad atmosférica.	36
Figura 16. Representación del comportamiento atmosférico entre una situación normal y otra con inversión térmica.	37
Figura 17. Fotografía de la ciudad de Coyhaique desde la Reserva Nacional Coyhaique.	37
Figura 18. Fotografía de la ciudad de Coyhaique durante episodio de contaminación.	38
Figura 19. Imagen referencial de Coyhaique y la zona saturada.	41
Figura 20. Número de recambios de calefactores por año entre 2011 y 2019.	42
Figura 21. Estado de avance histórico del programa de recambio de calefactores en Coyhaique.	43
Figura 22: Imágenes del equipo contador de partículas HT-9600.	48
Figura 23: Imágenes del equipo GPS Garmin eTrex 30X.	50
Figura 24: Ubicación de puntos de muestreo durante Terreno N°2 y estaciones SINCA y DGA en Coyhaique.	54
Figura 25: Carta de elevación para la zona aledaña a la ciudad de Coyhaique.	56
Figura 26: Carta de elevación para el área próxima a los límites urbanos de Coyhaique.	57
Figura 27. Modelo 3D de la topografía de la zona circundante de Coyhaique.	58
Figura 28. Perfil de elevación norte-sur del área urbana de Coyhaique.	58
Figura 29. Perfil de elevación oeste-este para la zona urbana de Coyhaique.	59
Figura 30: Carta de vientos promedio en invierno y verano más reciente para la comuna de Coyhaique y alrededores.	60
Figura 31. Registros diarios históricos de velocidad de viento en Estación Coyhaique I.	61
Figura 32. Rosa de vientos histórica (2010-2019) según Estación Coyhaique I.	62
Figura 33. Rosa de vientos histórica (2010-2019) según Estación Coyhaique II.	62
Figura 34. Rosa de vientos para todos los inviernos desde 2010 a 2019 según Estación Coyhaique I.	63
Figura 35. Fosa de vientos para todos los inviernos desde 2010 a 2019 según Estación Coyhaique II.	64

Figura 36. Distribución de frecuencia de vientos histórica (2010-2019) según Estación Coyhaique I.....	65
Figura 37. Distribución de frecuencia de vientos histórica (2010-2019) según Estación Coyhaique II.	65
Figura 38. Distribución de frecuencia de vientos para todos los inviernos (2010-2019) según Estación Coyhaique I.	66
Figura 39. Distribución de frecuencia de vientos para todos los inviernos (2010-2019) según Estación Coyhaique II.....	66
Figura 40. Evolución histórica de las precipitaciones acumuladas mensuales para Estación DGA Escuela Agrícola y Estación DGA Teniente Vidal entre 2007 y 2019.....	67
Figura 41. Perfiles WRF de presión, temperatura y altitud.....	69
Figura 42. Comportamiento horario de la temperatura, MP10 y MP2.5 desde la medianoche del 07 de julio de 2019 hasta la medianoche del 08 de julio de 2019 en las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II.....	71
Figura 43. Carta de presión pronosticada para el día 7 de julio de 2019.....	72
Figura 44. Comportamiento horario de la velocidad del viento para el día 7 de julio de 2019.....	73
Figura 45. Fotografía de la ciudad de Coyhaique desde la Reserva Nacional Coyhaique obtenida el día 7 de julio de 2019 a las 13:31 horas.	73
Figura 46. Fotografía de una cancha de fútbol en la esquina de Francisco Bilbao con Los Pilcheros (730450.89 UTM E / 4948434.12 UTM N) obtenida el día 7 de julio de 2019, a las 22:51 horas.	74
Figura 47. Cantidad de episodios de contaminación por MP10 según categoría.	75
Figura 48. Cantidad de episodios de contaminación por MP2.5 según categoría.	76
Figura 49. Media anual de contaminación por MP10 y MP2.5 para Coyhaique.	76
Figura 50. Promedio mensual histórico de la contaminación por MP10 en estación Coyhaique I.	78
Figura 51. Promedio mensual histórico de contaminación por MP2.5 en estación Coyhaique I.	78
Figura 52. Media diaria de contaminación por MP10 y MP2.5 en la estación Coyhaique I. ...	79
Figura 53. Registro horario promedio de contaminación por MP10 y MP2.5 entre 2013 y 2019.	80
Figura 54. Registros diarios históricos de contaminación por MP10 y temperatura entre 2015 y 2019.....	81
Figura 55. Promedios horarios históricos de temperatura y contaminación por MP10 entre 2015 y 2019.....	82
Figura 56. Promedios horarios históricos de temperatura y contaminación por MP10 de los inviernos entre 2015 y 2019.	82
Figura 57. Registros diarios de velocidad del viento y MP10 para Coyhaique entre 2015 y 2019.	83
Figura 58. Registros horarios promedio de velocidad de viento y contaminación por MP10 en Coyhaique.	84
Figura 59. Registros de precipitación acumulada mensual y concentración de material particulado promedio mensual entre 2007 y 2019.....	84
Figura 60. Cartografía de los puntos de análisis en el recorrido a pie.	86
Figura 61. Altitud y concentración de MP10 y MP2.5 para los puntos de muestreo obtenidos en el recorrido a pie.....	87

Figura 62. Temperatura y concentración de MP10 y MP2.5 para los puntos de muestreo en el recorrido a pie.	88
Figura 63. Registros horarios del viento para el día 9 de julio de 2019.....	88
Figura 64. Cartografía de los puntos de análisis en el recorrido en vehículo.	90
Figura 65 Interpolación IDW de puntos obtenidos en actividad en vehículo.	91
Figura 66. Altitud y concentración de MP10 y MP2.5 para los puntos de muestreo obtenidos en el recorrido en vehículo.....	92
Figura 67. Temperatura y concentración de MP10 y MP2.5 para los puntos de muestreo en el recorrido en vehículo.	93
Figura 68. Registros horarios de velocidad de viento para el día 7 de julio de 2019.....	93
Figura 69. Portada del diario El Divisadero (10/07/19).	99
Figura 70. Captura de entrevista en "Palabra de Radio" de Radio Genial (09/07/19) conducido por Mauricio Muñoz.	99
Figura 71. Nota en Diario de Aysén (10/07/19) sobre resultados de medición.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Temperaturas (°C) mínimas / máximas promedio 2000-2018 para Coyhaique y Puerto Aysén.	14
Tabla 2. Pisos vegetacionales de la comuna de Coyhaique.....	14
Tabla 3. Población por comuna en la Región de Aysén.	18
Tabla 4. Población y variación entre 2002 y 2017.	18
Tabla 5. Detalle de variación porcentual de población urbana y rural.....	19
Tabla 6. Población, pobreza y representatividad porcentual en Coyhaique.	20
Tabla 7. Estadísticas económicas a las empresas de Coyhaique.	20
Tabla 8. Fuentes de energía en el hogar según modo de uso.	21
Tabla 9: Vértices de la "Zona Saturada" de Coyhaique y puntos referenciales.....	40
Tabla 10: Documentos relacionados al establecimiento del Plan de Descontaminación Ambiental de Coyhaique.	41
Tabla 11: Fases del proceso cuantitativo en la investigación.	46
Tabla 12: Especificaciones técnicas de contador de partículas HT-9600.....	47
Tabla 13: Especificaciones técnicas de GPS Garmin eTrex 30X.	50
Tabla 14: Entrevistadas y entrevistados en primer terreno a Coyhaique.	51
Tabla 15. Tabla resumen de parámetros desarrollados en el Objetivo N°2.	52
Tabla 16. Tabla de datos sinóptica para los inviernos entre 2015 y 2019, y el día 07/07/2019.	68
Tabla 17. Recomendaciones OMS sobre exposición media anual y media diaria.....	74
Tabla 18. Categorías de calidad de aire para Coyhaique.	75
Tabla 19. Comparación de valores horario según SINCA y obtenidos en terreno fuera de estaciones oficiales para recorrido a pie.....	89
Tabla 20. Comparación de valores horario según SINCA y obtenidos en terreno fuera de estaciones oficiales para recorrido a pie.....	94

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Detalle de usos y sub-usos de suelo para la comuna de Coyhaique.	105
Anexo 2. Comparativa de grupos de edad según censos de 1992, 2002 y 2017.	106
Anexo 3. Delimitación de la zona saturada y ubicación de las estaciones DGA y SINCA en Coyhaique.	106
Anexo 4: Número de recambio de calefactores por año.	107
Anexo 5. Registro horario promedio de contaminación por MP10 y MP2.5 entre 2013 y 2019	107
Anexo 6. Tabla de datos de precipitación mensual acumulada para Estación Escuela Agrícola y Estación Teniente Vidal.	108
Anexo 7. Registros horarios de material particulado del 7 de julio de 2019 para las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II.	109
Anexo 8. Registro GPS y Contador de Partículas para recorrido a pie en la ciudad de Coyhaique.	110
Anexo 9. Registro GPS y Contador de Partículas para recorrido en vehículo en la ciudad de Coyhaique.	111

CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN

1.1- INTRODUCCIÓN

La contaminación por material particulado respirable de 10 y 2,5 micrones es uno de los principales problemas ambientales de la ciudad de Coyhaique, presente durante todo el año, aunque con un considerable aumento en los meses de invierno, explicado por la necesidad de la población de calefaccionar sus hogares, para hacer frente al implacable frío de la zona, donde la temperatura promedio invernal ronda los 4 °C. Si bien, dicha contaminación se explica principalmente por la combustión de la leña, es importante señalar que existen factores geográficos que, se relacionan con los niveles de concentración y la distribución espacial de estos agentes contaminantes.

En la presente investigación, se realizó una identificación de factores que condicionan la presencia de los altos niveles de contaminación por material particulado proveniente de la combustión de la leña; para posteriormente ahondar en su comportamiento histórico, temporal y espacial. Esta pequeña localidad austral posee la característica de concentrar altas concentraciones de contaminación por MP10 y MP2.5, superando con creces las recomendaciones de organismos internacionales, producto del masivo uso de la leña como combustible para la calefacción y cocina de los hogares.

En primer lugar, y para contextualizar desde una perspectiva geográfica, se identifican y describen los elementos que juegan un rol preponderante en la concentración del material particulado, tales como: el relieve del límite urbano, velocidad y dirección de los vientos, temperatura del aire, entre otros. A partir de lo anterior, se analizó el problema de una manera más amplia, más allá que sólo considerarla como una consecuencia de la combustión de la leña, considerando la coexistencia de factores que condicionan directamente la acumulación del material particulado.

Luego, y en base a la información generada en el punto anterior, se realizó una caracterización histórica de los factores geográficos identificados, para evidenciar, tanto un patrón temporal, como también la relación que pudiese existir entre dichos factores y variables climatológicas, como las precipitaciones o las temperaturas.

Finalmente, el tercer resultado obtenido fue la espacialización de la concentración de MP10 y MP2.5, según los datos medidos en terreno en el mes de julio del año 2019. De esta manera, se identificaron áreas donde los registros de contaminación son más elevados que en otras, lo cual da luces de una heterogeneidad en la distribución que no alcanza a ser observada a partir de las estaciones fijas existentes, Coyhaique I y Coyhaique II de la red SINCA, ambas localizadas en la misma ciudad, a una distancia de 800 metros entre ellas.

1.2- PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Actualmente, la contaminación atmosférica es uno de los principales riesgos ambientales presentes a nivel mundial, dado su impacto en la salud humana y por la extensión que presenta esta problemática en el planeta, cuyo origen es principalmente antrópico (OMS, 2019). Este tipo de contaminación, como su nombre lo indica, afecta a la atmósfera, que constituye una capa gaseosa de unos 2 mil kilómetros de espesor que rodea por completo a la Tierra (Orozco Barrenetxea, 2011). Esta a su vez, se encuentra dividida en capas de menor espesor que, en conjunto, representan un espacio contiguo donde ocurren una serie de procesos químicos que tienen un impacto directo en la superficie terrestre, principalmente asociados a la radiación solar, humedad relativa, temperatura atmosférica, presión y presencia de agentes contaminantes.

Estos últimos, en su mayoría, son productos de procesos y combustiones industriales, vehículos a motor y combustiones domiciliarias, cuyo resultado físico y químico se materializa en forma de material particulado (UC, 2001). Este material corresponde a un agente adverso para la salud cuando su diámetro es igual o menor a 10 micrómetros (PM_{10}), adquiriendo la denominación de partícula gruesa inhalables (Canales-Rodríguez et al., 2014). Usualmente, los efectos de dicho agente contaminante se estudian clasificándolo según tamaño, en material particulado de 10 (PM_{10}) y 2,5 micrómetros ($PM_{2,5}$). En relación con sus efectos sobre la salud, pruebas epidemiológicas han comprobado que existen efectos adversos del material particulado en exposiciones breves y prolongadas (OMS, 2005), y también que dicho elemento posee directa relación con la carga de morbilidad, derivada de accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas como el asma (OMS, 2019).

Más de la mitad de la población mundial depende de combustibles sólidos, tales como madera, residuos agrícolas y carbón; como también, de combustibles fósiles (OMS, 2018), como, por ejemplo, el petróleo y sus derivados. Generalmente, la población que utiliza masivamente estos combustibles se concentra en urbes con una alta concentración demográfica (como Santiago de Chile), lo cual – en un contexto de agentes contaminantes provenientes de autos, industrias, entre otros – provoca serios problemas de calidad atmosférica. Esta situación no es nada ajena a la realidad chilena, ya que en este país se encuentran nueve de las diez ciudades más contaminadas del continente (Greenpeace, 2019), entre las cuales destacan la conurbación Padre Las Casas/Temuco (Cortés & Ridley, 2014), Osorno y Coyhaique (World Atlas, 2018). En estos casos, los niveles de contaminación responden básicamente al uso de leña como material combustible, con el objetivo de calefaccionar el hogar o hacer uso de la cocina.

Coyhaique, que ocupa el tercer lugar en el ranking mencionado anteriormente, cumple con la particularidad de ser una ciudad más pequeña - tanto en área como en población - de la lista, no existe un masivo uso de automóvil como medio de transporte como es el caso de Santiago, sino que el origen es sólo el uso de leña. Sin embargo, son tan altos los niveles de contaminación alcanzados que se han puesto en marcha medidas especiales, tales como las insertas en el Plan de Descontaminación Ambiental 2019 (o PDA2.5) para hacer frente al problema desde la arista institucional.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

En resumen, la presente investigación se centrará en el caso de Coyhaique dada sus dimensiones espaciales como ciudad y por la gran problemática asociada que tiene la contaminación por material particulado en la zona. Este trabajo buscó comprender de forma detallada cual es la relación del entorno con el material particulado para así contextualizar de mejor manera el fenómeno de contaminación, con el fin de tener una perspectiva más allá del mero uso masivo de la leña como causante del problema. Las preguntas de investigación que se buscan responder son: **¿Cuáles son los factores geográficos que explican los elevados niveles de contaminación en Coyhaique?, ¿De qué manera se han comportado históricamente las variables que condicionan la contaminación en la ciudad? y, considerando el rol de cada variable y una eventual dispersión heterogénea de la contaminación en el área urbana, ¿cómo se distribuye espacialmente el material particulado de 10 y 2,5 micrómetros?**

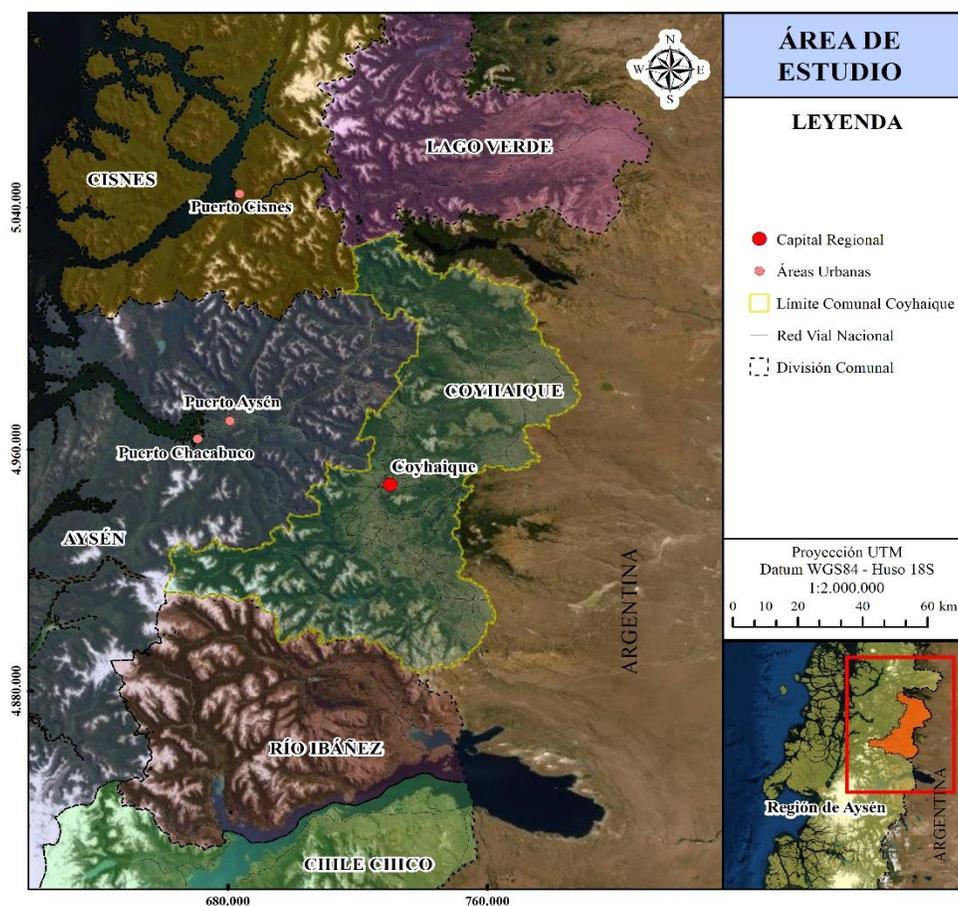
1.2- ÁREA DE ESTUDIO Y ANTEDECENTES GENERALES

1.3.1- Caracterización física de Coyhaique como antecedente de la contaminación local.

1.3.1.1- Características generales y límites político-administrativos.

El área de estudio se enmarca administrativamente en la comuna de Coyhaique, la cual es una de las 10 comunas que componen la Provincia de Coyhaique, emplazada a su vez en la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, en la zona austral de Chile. Su extensión aproximada es de 7.260 km², representando cerca del 6,7% del territorio regional. Tal como se aprecia en la Figura 1, Coyhaique limita al norte con las comunas de Lago Verde y Cisnes, al oeste con la comuna de Aysén, al este con la República Argentina, y al sur con la comuna de Río Ibáñez (BCN, 2019). Su única zona urbana corresponde a la ciudad de Coyhaique, la cual posee un área aproximada de 10 km². Además, la ciudad posee la particularidad de estar emplazada en el sector oriente de la Cordillera de Los Andes; no como la mayoría de las comunas a nivel nacional, junto con sus respectivas localidades urbanas, que se ubican y distribuyen al poniente de esta cadena montañosa.

Figura 1. Carta de Coyhaique y comunas aledañas.



Fuente: Elaboración propia en base a BCN (2019).

1.3.1.1- Clima y vegetación

Si bien la Región de Aysén está caracterizada por poseer un clima frío oceánico de bajas temperaturas, con abundantes precipitaciones, fuertes vientos y mucha humedad, sus particularidades topográficas provocan que dichas características climatológicas se vean mermadas en su intensidad, resaltando una clara diferencia entre el sector poniente y oriente de la Cordillera Patagónica (BCN, 2019).

Para comprender las diferencias entre ambos sectores y ahondar en las características propias del área de estudio hay que considerar, por ejemplo, que los promedios anuales de precipitación del sector poniente rondan los 2.940 mm (Puerto Aysén), mientras que en el lado oriental corresponden a unos 617 mm (Coyhaique). Otro factor que demuestra estas diferencias es la temperatura, como se observa al analizar los datos de la Tabla 1.

Tabla 1. Temperaturas (°C) mínimas / máximas promedio 2000-2018 para Coyhaique y Puerto Aysén.

	E	F	M	A	M	J	X	A	S	O	N	D
Puerto Aysén	10/18	10/18	9/16	7/13	5/10	3/8	2/7	3/9	4/12	6/14	8/16	10/18
Coyhaique	9/20	9/21	7/18	5/14	3/10	0/7	0/7	1/9	2/11	4/15	6/17	8/19

Fuente: Elaboración propia en base a NOAA (2019).

De acuerdo con los datos recién expuestos, es posible considerar que el sector poniente de la Región de Aysén posee valores de temperatura promedio mínimas y máximas menos extremos que su contraparte oriental, lo que puede ser fácilmente explicado por la presencia del océano en el primero y la ya mencionada topografía de la zona.

A continuación, en la Tabla 2, se presentan las tipologías vegetacionales presentes en Coyhaique, de acuerdo con la clasificación de formaciones y pisos vegetacionales realizada por Luebert & Pliscoff (2017):

Tabla 2. Pisos vegetacionales de la comuna de Coyhaique.

Piso vegetacional	Superficie (km²)
Bosque caducifolio	2651,2
Herbazal de altitud	1465,3
Estepas y pastizales	1160,1
Matorral caducifolio	1051,5
Bosque siempreverde	414,8
Sin vegetación	253,5

Fuente: Luebert, F. & Pliscoff, P. (2017).

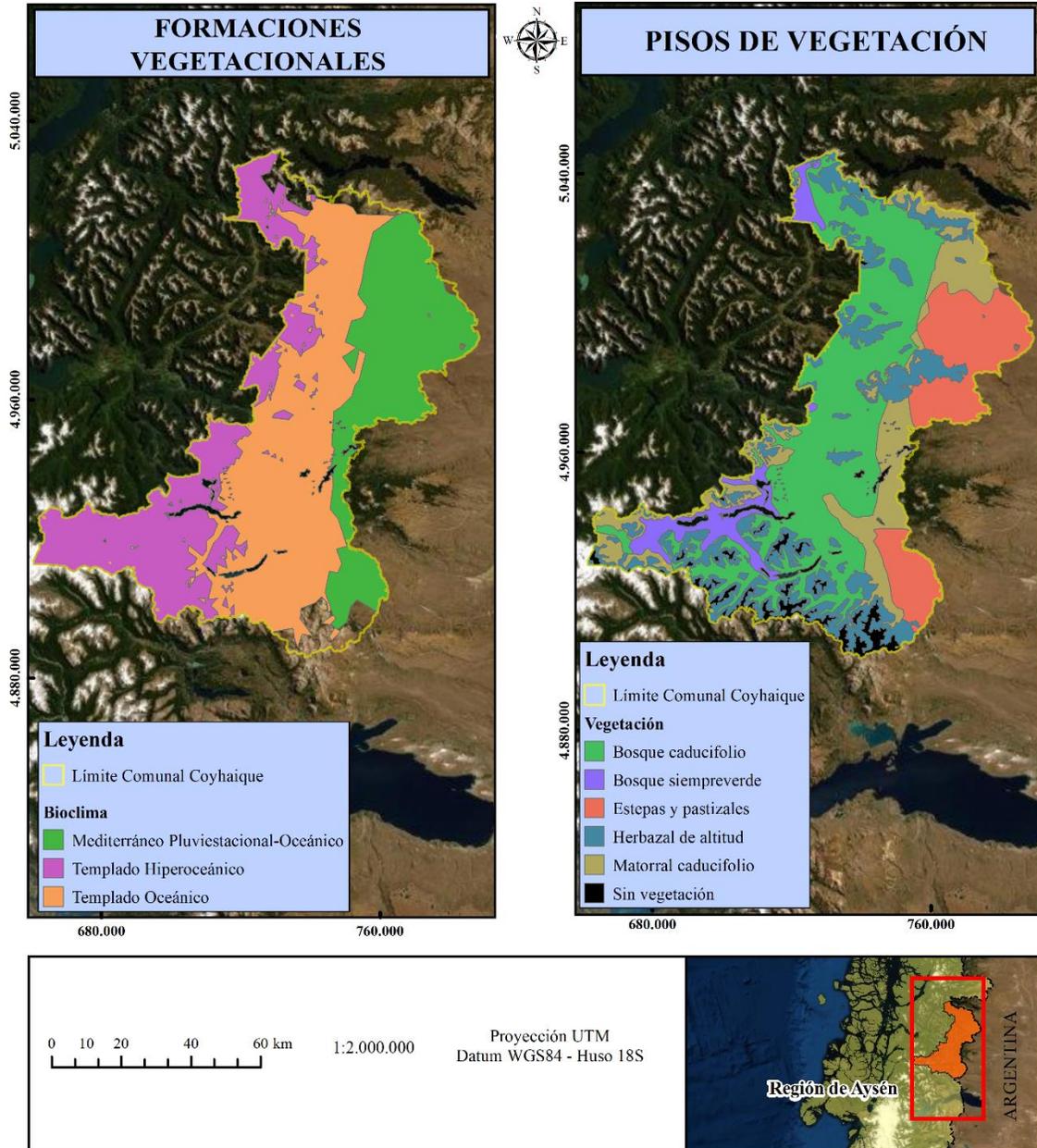
Destaca la presencia de bosque caducifolio con una superficie bastante superior a la ocupada por los pisos vegetaciones restantes. La distribución de estos pisos posee una clara similitud a la de los bioclimas (figura 2), donde – a grandes rasgos – predomina el piso de vegetación de bosque caducifolio en el centro de la comuna, extendiéndose levemente hacia el norte y sur.

Por otra parte, en cuanto a los pisos bioclimáticos (ver Figura 2), en la comuna se presenta Mediterráneo Pluvial-Oceánico, Templado Hiperoceánico y Templado Oceánico. En la zona

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

de estudio, estos se distribuyen secuencialmente y de forma casi paralela en dirección oeste-este, con una evidente relación con la topografía y la continentalidad.

Figura 2. Formaciones y pisos vegetacionales de Coyhaique.

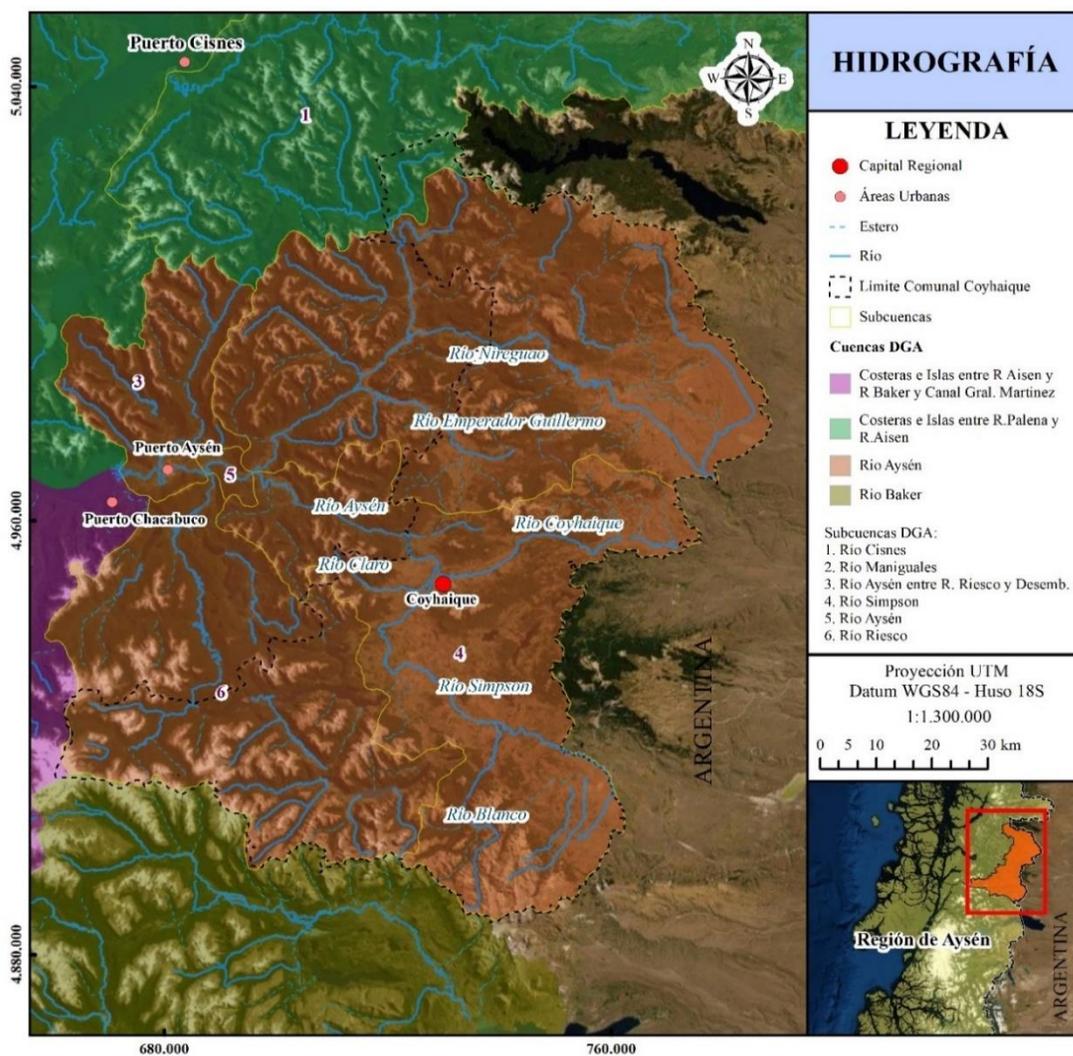


Fuente: Elaboración propia en base a Luebert& Plissock (2017).

1.3.1.2- Hidrografía

La comuna de Coyhaique se inscribe casi por completo en la Cuenca del Río Aysén y se emplaza en el oriente de esta misma. Esta cuenca se caracteriza por una abundancia de precipitaciones, gran disponibilidad de recursos hídricos que se manifiesta en la existencia de numerosos ríos y lagos, y por ser un sistema exorreico (cuyos ríos principales de recolección y desagüe desembocan en el mar). El río principal de esta cuenca, el Río Aysén, es una escorrentía superficial que se origina dentro de la comuna de Coyhaique como consecuencia de la confluencia del Río Simpson con el Mañihuales, para finalmente alcanzar la comuna de Aysén y desembocar en el océano Pacífico (DGA, 2004). A nivel estrictamente comunal, destacan los ríos Simpson y Coyhaique, ya que la ciudad de Coyhaique se emplaza al costado sur del punto de unión de estos ríos y, además, son los de mayor extensión. A continuación, en la Figura 3, se presentan las características hidrográficas más importantes del área de estudio.

Figura 3. Hidrografía de la comuna de Coyhaique.



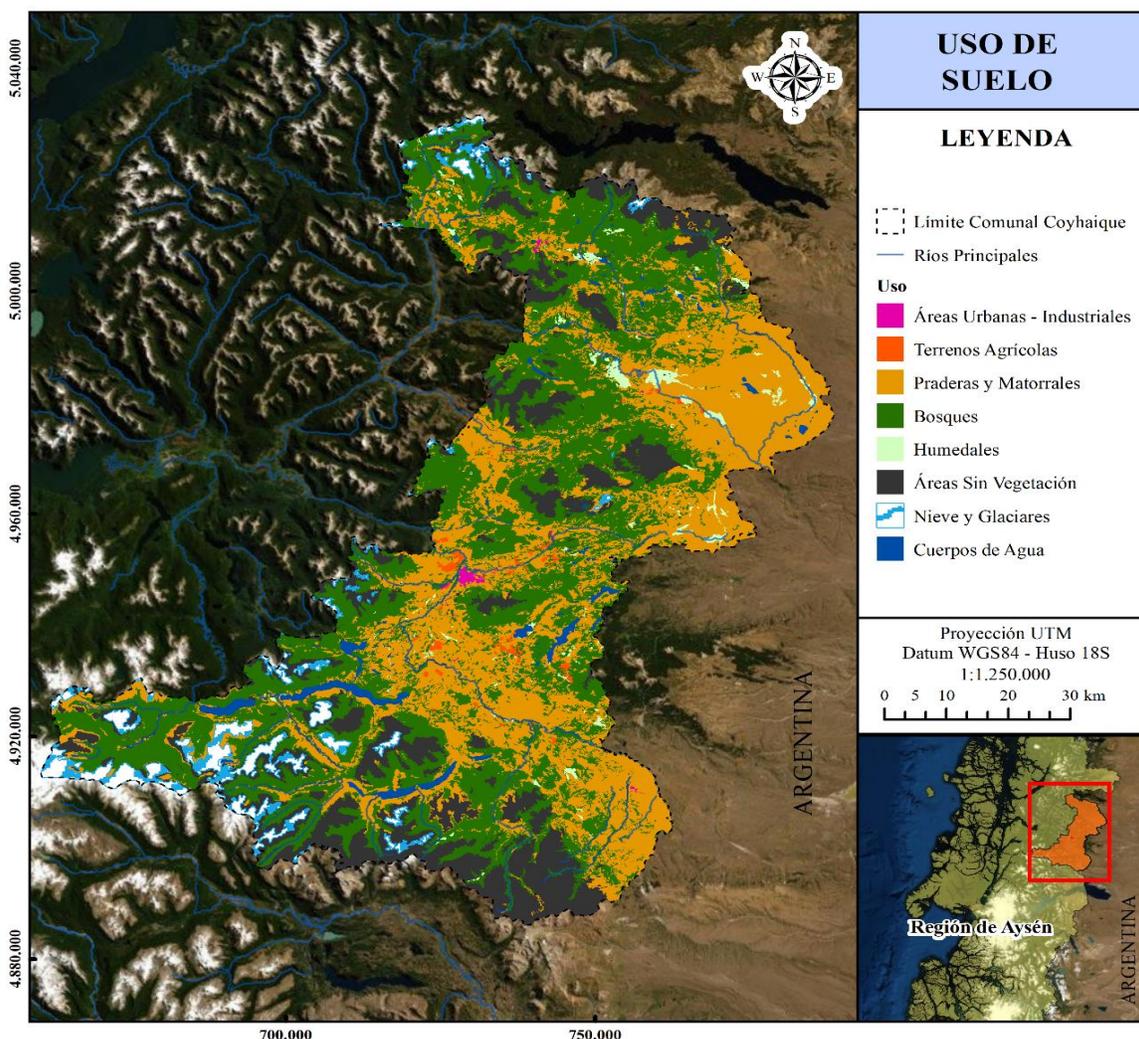
Fuente: Elaboración propia en base a BCN (2019).

1.3.1.3- Uso de suelo

El último catastro de uso de suelo realizado de forma oficial en la Región de Aysén corresponde al publicado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) en el año 2011 (ver Figura 4). Respecto a esta información, y en conjunto con el Anexo 1 que contempla un detalle profundo de cada uso y sus respectivos sub-usos, se destacan los siguientes puntos a nivel comunal:

- Se observa presencia de una única zona urbana, correspondiente a la ciudad de Coyhaique con una superficie aproximada de 10 km², que corresponde al 0,2% de la superficie de la comuna.
- Sólo un 0,5% de la superficie se destina para terrenos agrícolas, lo que puede estar condicionado por la accidentada topografía que caracteriza la comuna.
- Las tipologías con mayor superficie en la comuna son las de bosques, que también incluye plantaciones forestales en menor medida, y la de praderas y matorrales.

Figura 4. Uso de suelo para la comuna de Coyhaique.



Fuente: Elaboración propia en base a CONAF (2011).

1.3.2- Caracterización sociodemográfica

En este apartado se presenta la información recabada por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2018) mediante los censos realizados en los años 2002 y 2017, con la finalidad de analizar la distribución y características demográficas del área de estudio. A continuación, en la Tabla 3, se presenta la extensión territorial de cada comuna, habitantes y su variación demográfica entre los años 2002 y 2017.

Tabla 3. Población por comuna en la Región de Aysén.

	Censo 2002	Censo 2017	Variación (%)
Coyhaique	50.041	57.818	15,5
Región de Aysén	91.492	103.158	12,8
Chile	13.166.727	17.574.003	33,4

Fuente: Elaboración propia en base a INE (2018).

A partir de la tabla anterior, es posible observar la alta concentración demográfica en la comuna de Coyhaique, en la cual reside el 56% de las y los habitantes a nivel regional, además, es posible dar cuenta que el mayor aumento de población se da en la comuna de O'Higgins y Lago Verde, dos pequeñas comunas de la región. En el caso de las viviendas, en la comuna de Coyhaique existen 18.848 de estas unidades.

De acuerdo con la información disponible en las tablas 4 y 5, es relevante destacar lo siguiente:

- Entre los años 2002 y 2017 existió una gran variación positiva de población rural en la comuna de Coyhaique, cercana al 52%, lo que en términos absolutos representa un aumento de 2.672 habitantes. Sin embargo, es proporcionalmente bajo si lo comparamos con la población urbana que corresponde a un total de 49.955.
- Entre los años contemplados en la tabla, existe una ligera variación negativa para los porcentajes de población urbana y rural en la comuna, contrastándose con la situación a nivel nacional. Específicamente, mientras en 2002 la relación de población urbano-rural descrita era de 89,6% y 10,4%, en 2017 correspondería a 86,4% y 13,6%.
- La ciudad de Coyhaique concentra, estadísticamente, el 100% de la población urbana de la comuna homónima. Por otra parte, la población rural se reparte mayoritariamente entre las localidades de Balmaceda y Villa Simpson.

Tabla 4. Población y variación entre 2002 y 2017.

	Censo 2002			Censo 2017			Var. P. Urb. (%)	Var. P. Rural (%)
	P. Urbana	P. Rural	Total	P. Urbana	P. Rural	Total		
Coyhaique	44.850	5.191	50.041	49.955	7.863	57.818	11,4	51,5
R. de Aysén	73.607	17.885	91.492	82.114	21.044	103.158	11,6	17,7
Chile	11.140.405	2.026.322	13.166.727	15.429.975	2.144.028	17.574.003	38,5	5,8

Fuente: Elaboración propia en base a INE (2018).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

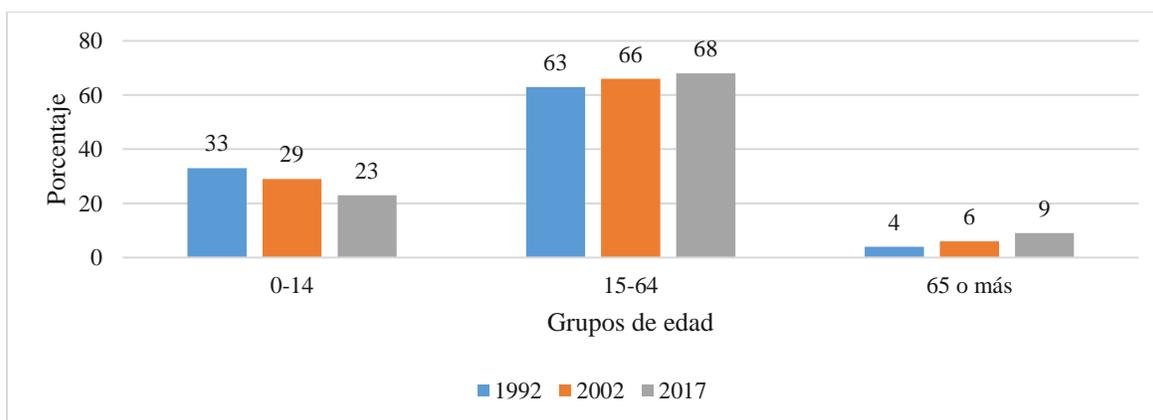
Tabla 5. Detalle de variación porcentual de población urbana y rural.

	Censo 2002		Censo 2017	
	P. Urbana (%)	P. Rural (%)	P. Urbana (%)	P. Rural (%)
Coyhaique	89,6	10,4	86,4	13,6
R. de Aysén	80,5	19,5	79,6	20,4
Chile	84,6	15,4	87,8	12,2

Fuente: Elaboración propia en base a INE (2018).

Otro aspecto importante que describir corresponde a las características etarias de la población coyhaiquina, ya que organismos internacionales han señalado que los grupos más vulnerables frente a los impactos negativos a la salud producto de la contaminación atmosférica son las niñas, niños y adultos mayores (OMS, 2014). Al respecto, es relevante reconocer, en base a INE (2018), un fenómeno de envejecimiento poblacional a nivel regional y comunal entre los años 1992 y 2017 (ver Anexo 2). A continuación, en la Figura 5, se presentan las variaciones porcentuales que posee cada grupo etario analizado, en los últimos tres Censos.

Figura 5. Comparación porcentual de la población de la comuna de Coyhaique según grupo de edad entre los años 1992 y 2017.



Fuente: Elaboración propia en base a INE (2018).

En síntesis, en la Provincia de Coyhaique la gran mayoría de la población se concentra en la comuna de Coyhaique. A su vez, en esta comuna, la totalidad de la población urbana se emplaza sólo dentro de los límites urbanos de la ciudad homónima, no existiendo otra localidad de similares características demográficas. Y, en cuanto a las características de la población comunal, existe un claro fenómeno de envejecimiento a lo largo de los años.

1.3.3- Caracterización socioeconómica

1.3.3.1- Pobreza

De acuerdo con los resultados de los estudios de pobreza, entregadas en la Encuesta de Caracterización Socioeconómica (CASEN) 2017 del Ministerio de Desarrollo Social y la Familia (MDS), la comuna de Coyhaique posee porcentajes bajos de personas pobres según ingreso en comparación con los promedios nacional y regional. A continuación, en la Tabla 6, se detalla la cantidad de personas que integran los dos indicadores de pobreza evaluados por CASEN y su respectiva representación comunal, regional y nacional.

Tabla 6. Población, pobreza y representatividad porcentual en Coyhaique.

	Población 2017	Personas Pobreza por Ingreso	%	Personas Pobreza Multidimensional	%
Coyhaique	57.818	1.646	2,8	1.048	1,8
Región de Aysén	103.158	4.840	4,7	19.414	18,8
Chile	17.574.003	1.528.271	8,7	3.530.891	20,1

Fuente: Elaboración propia en base a MDS (2019).

1.3.3.2- Economía comunal

De acuerdo con la información proporcionada por el Servicio de Impuestos Internos (SII, 2019), la comuna de Coyhaique concentra en su mayoría empresas ligadas al comercio al por mayor y menor, aquellas relacionadas a agricultura, ganadería, caza y silvicultura, y a la construcción (ver Tabla 7). En lo que respecta a la economía campesina sobre la obtención y venta de leña - que no aparece en los registros del SII - se ubica después de la ganadería, como una de las principales fuentes de ingresos de la comuna (INDAP, 2019). A nivel regional, este rubro mueve cerca de 17 millones de dólares anuales, posee unos 1.200 puestos de trabajo asociados y se estima que el 74% de familias campesinas asegura que el comercio de este recurso es una de sus principales fuentes de ingresos (INDAP, 2015).

Tabla 7. Estadísticas económicas a las empresas de Coyhaique.

Rubro	N° de Empresas	Ventas (UF)	N° Trabajadores
Comercio al por mayor y menor, repuestos de vehículos. automotores/enseñeres domésticos	1.356	4.490.464,3	2.448
Explotación de minas y canteras	23	2.857.572,3	894
Construcción	513	1.908.121,0	3.031
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	757	1.636.641,1	1.596
Enseñanza	33	1.018.534,9	1.780
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	428	908.018,7	565
Industrias manufactureras no metálicas	239	706.232,9	1.076
Actividades inmobiliarias, empresariales y de alquiler	430	579.044,6	3.401
Suministro de electricidad, gas y agua	17	452.798,3	284
Hoteles y restaurantes	312	371.654,8	758

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Otras actividades de servicios comunitarias, sociales y personales	201	285.988,2	374
Pesca	23	194.436,4	469
Industrias manufactureras metálicas	110	191.231,1	221
Intermediación financiera	22	89.618,0	28
Consejo de administración de edificios y condominios	0	0,0	0
Adm. Publica y defensa, planes de seguridad social afiliación obligatoria	10	*	1.250
Servicios sociales y de salud	68	*	191
Organizaciones y órganos extraterritoriales	1	*	10
Sin información	5	*	0

Fuente: Elación propia en base a SII (2019).

Respecto a los ingresos de la población de la ciudad de Coyhaique, y en base a MORI (2015), se destaca que el 65% tiene un ingreso igual o menor a \$500.000, el 30% entre \$500.001 y \$2.000.000, el 3% tiene un ingreso superior a \$2.000.000, y el restante 2% no sabe o no responde.

1.3.3.3- Viviendas y sus características

Según MORI (2015), existen antecedentes interesantes para comprender también la situación a nivel de vivienda en ámbitos de la percepción de quienes las habitan. De acuerdo con esto:

- La mayoría de las casas fueron construidas antes del 2000 (77%). Esto es mucho antes de cualquier política asociada a la contaminación local, ya que el primer decreto (DS 33) es del año 2012 y el primer plan (DS 46) es del 2016.
- A lo anterior, se suma que la mayoría de los encuestados reconoce que no se han hecho mejoras de aislación térmica en su vivienda (65%) y que tampoco está dentro de sus planes (66%).
- En general, los encuestados perciben y señalan que sus viviendas poseen buena aislación por lo que no consideran modificaciones al respecto.

1.3.3.4- Fuentes de energía y sus usos en la ciudad.

Según el Diagnóstico de Caracterización Socioeconómica de la Región de Aysén (GORE, 2018), el combustible o fuentes de energía más utilizados a escala regional en el hogar corresponden a los señalados en la Tabla 8:

Tabla 8. Fuentes de energía en el hogar según modo de uso.

Modo de uso	Fuente(s) de energía				
	Leña y derivados	Gas	Parafina o Petróleo	Electricidad	No usa / No tiene
Cocina	34,6%	64,9%	-	-	-
Calefacción	93,8%	3,3%	2,3%	-	-
Agua caliente	10,9%	73%	-	2,3%	13,6

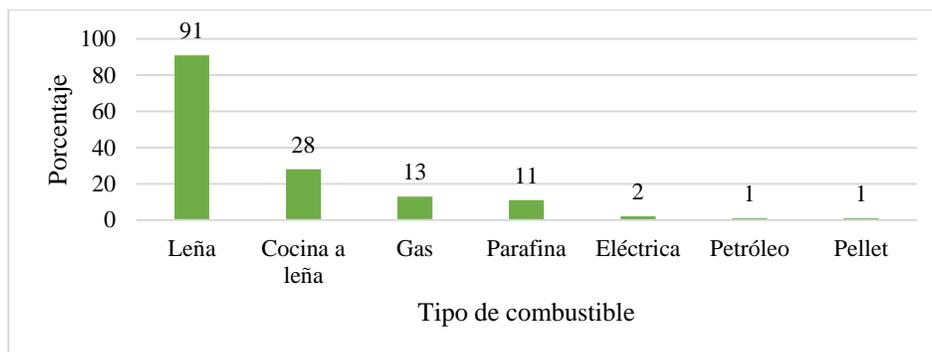
Fuente: GORE (2018).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

En particular, para la ciudad de Coyhaique, existen antecedentes interesantes obtenidos desde MORI (2015) para describir en detalle el comportamiento de la población y el medio de calefacción en la ciudad:

- En cuanto a los tipos de calefacción que utilizan las personas encuestadas en sus hogares (ver Figura 6), indistintamente si poseen otra de las opciones, el 91% usa leña, el 28% leña para cocina, un 11% parafina, y electricidad, petróleo y pellet sólo abarcan entre un 1 y 2%. Estos porcentajes suman más de 100% ya que existen hogares que poseen más de un sistema de calefacción, por lo que se deben considerar por separado sea utilizado frecuentemente o no.

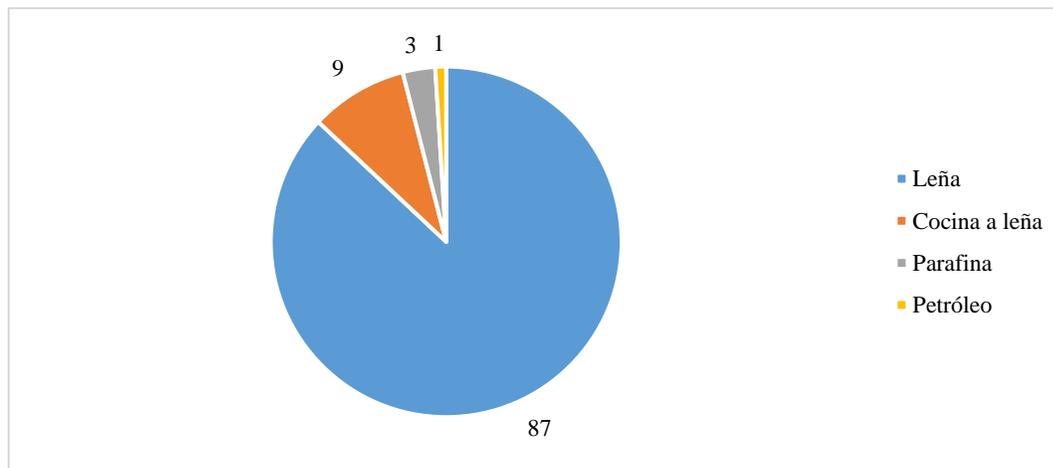
Figura 6. Tipo de combustible usado para calefacción en la ciudad de Coyhaique.



Fuente: MORI (2015).

- Ahora, a nivel general sobre la calefacción principal - cuya utilización predomina sobre las otras opciones que eventualmente se puedan poseer - de los hogares sigue una tendencia muy similar a la del punto anterior. Como se observa en la Figura 7, el uso de leña (tanto para calefacción y cocina) abarca la mayoría de las fuentes de calefacción en los hogares (sobre un 96%), dejando atrás a aquellas como la parafina (3%), petróleo (1%) y otras que ni siquiera logran un mínimo de presencia como carbón o pellet (0,3%).

Figura 7. Tipo de calefacción principal utilizada en los hogares.

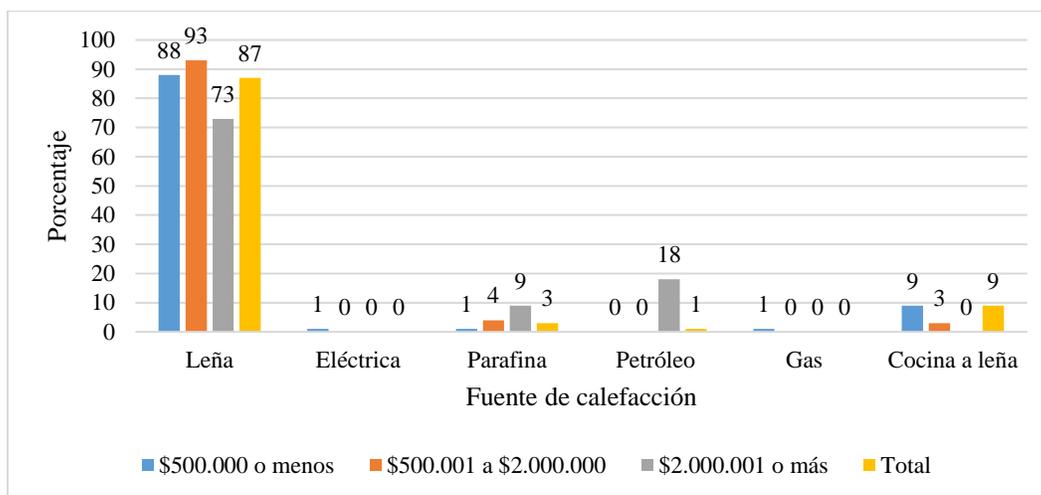


Fuente: Elaboración propia en base a MORI (2015).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Ahora, al observar los resultados respecto a cuál es la calefacción principal según ingresos del hogar, se aprecia un comportamiento clave a la hora de comprender el masivo uso de la leña. Tal como se aprecia en la Figura 8, existe una tendencia casi transversal a preferir la leña como medio de calefacción, pero es posible evidenciar que en el segmento más acomodado - con ingresos de \$2.000.001 o más - existe un porcentaje mayor de utilización de parafina o petróleo. De esta manera, es posible asociar estas dos fuentes a un precio de adquisición más elevado y que provoca que no se presente en los otros segmentos.

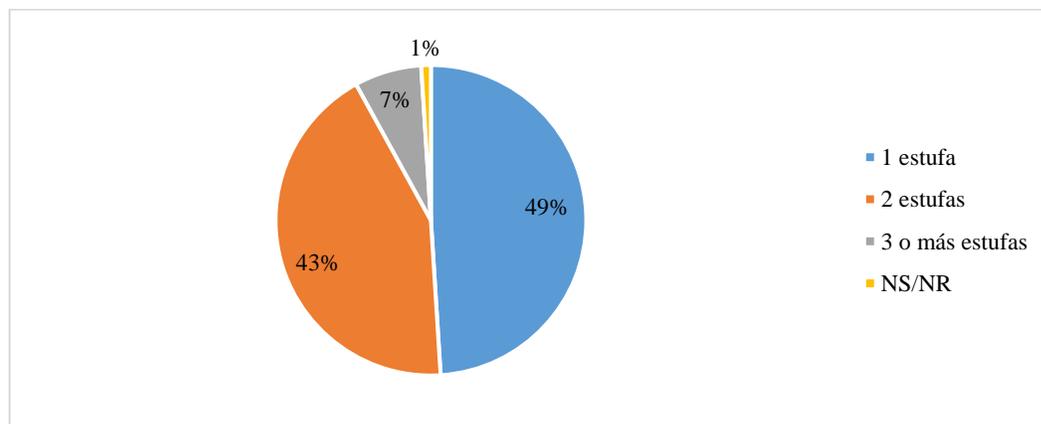
Figura 8. Calefacción principal según ingresos del hogar.



Fuente: Elaboración propia en base a MORI (2015).

La cantidad de estufas también es un elemento importante para considerar. Respecto a esto, y según la Figura 9, casi toda la población de la ciudad (99%) tiene al menos una estufa en su hogar. De este espectro, un 43% posee dos, y sólo un 7% tiene 3 o más. Si bien no existen datos específicos sobre el tipo de combustible que utilizan estas estufas, es posible asociar estos datos a lo observado en la Figura 7 donde predomina casi totalmente el uso de leña.

Figura 9. Cantidad de estufas por hogar.

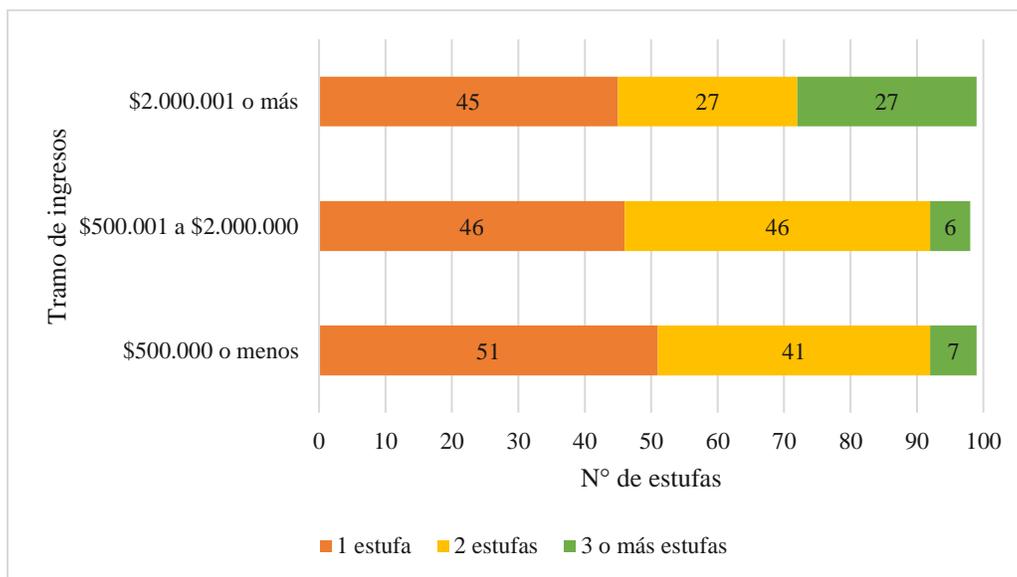


Fuente: Elaboración propia en base a MORI (2015).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

También es posible evidenciar una fuerte relación entre el nivel socioeconómico del hogar y la cantidad de estufas que este posee. Tal como se aprecia en la Figura 10, se aprecian diferencias serias cuando hablamos de 3 o más estufas, ya que mientras el 27% de quienes mayores ingresos posee dicha cantidad, sólo un 7% del tramo menor a 500 mil y un 6% del tramo hasta 2 millones posee tres de estos artefactos.

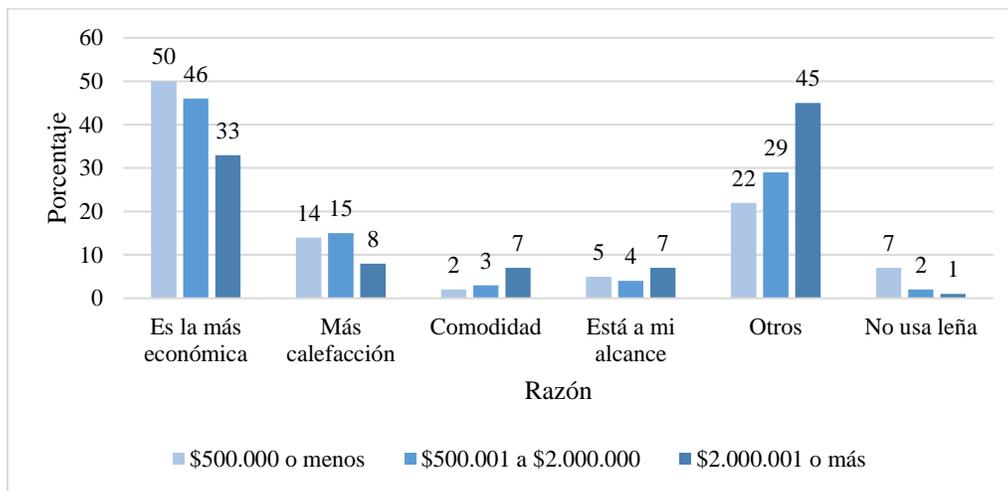
Figura 10. Cantidad de estufas por hogar según ingresos.



Fuente: Elaboración propia en base a MORI (2015).

En cuanto a la razón de elección de leña como medio de calefacción y su relación con el nivel socioeconómico, existe una clara tendencia a priorizar dicho recurso por su bajo costo en relación con otras fuentes de energía (ver Figura 11). Esto se condice con que un 64% de la población gasta 20% o menos de sus ingresos sólo en calefaccionar el hogar (MORI, 2015).

Figura 11. Motivos de utilización de la leña según ingresos.



Fuente: Elaboración propia en base a MORI (2015).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Los hábitos de calefacción también son diferentes según la estación del año. Un 71% de los entrevistados utiliza 1 estufa en verano, mientras que el 94% del total utiliza 2 estufas en invierno.

Esta encuesta también señala las diferencias que existen sobre la cantidad de horas que están prendidas las estufas en promedio. Por un lado, el 72% enciende las estufas entre 1 a 4 horas en verano, mientras que en invierno el 97% las enciende más de 8 horas.

En resumen, la utilización de la leña como combustible en la calefacción y cocina de los hogares responde, principalmente, a su bajo costo económico y por ser un recurso fácil de obtener en el mercado local. Por lo mismo, es que se ha declarado como urgente (La Tercera, 2019) la búsqueda de soluciones eficientes para mitigar este problema socioambiental.

1.4- OBJETIVOS

1.4.1- Objetivo general

- Evaluar los factores condicionantes de la contaminación por material particulado respirable, MP10 y MP2,5, de la ciudad de Coyhaique analizando su comportamiento histórico y espacial.

1.4.2- Objetivos específicos

- Identificar y describir los factores que condicionan la concentración de material particulado en Coyhaique.
- Describir el comportamiento histórico de la contaminación por material particulado según su relación con otras variables meteorológicas.
- Analizar el comportamiento espacial de la contaminación por material particulado en el área de estudio.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1- LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: DESDE SU GÉNESIS HASTA LA RELEVANCIA ANTRÓPICA

La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de agentes, materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y otros seres de la naturaleza, con el cuidado de delimitar las categorías de contaminación atmosférica de origen natural y la de origen antrópico (Aránguez *et al.*, 1999). Esta definición es similar a la utilizada en Chile, establecida en la Ley N° 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente (y su actualización con la Ley N° 20.417), aunque si pueden existir reparos en cuanto al ámbito práctico o de ejecución de la ley; sobre todo considerando que el primer artículo de esta ley establece el derecho “de vivir en un medio ambiente libre de contaminación(...)” y define dicho espacio como “aquel en el que los contaminantes se encuentran en concentraciones y períodos inferiores a aquéllos susceptibles de constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.”

Retomando el enfoque teórico, la atmósfera corresponde a la capa gaseosa que rodea la Tierra y posee un espesor aproximado de 2.000 kilómetros, dividida en 5 regiones: tropósfera, estratósfera, mesósfera, termósfera o ionósfera, y exósfera; donde cada una de estas regiones posee diferentes propiedades relacionadas a su densidad, temperatura, tipo de actividad química que se presenta, radiación solar incidente, entre otras. En el caso de esta investigación se estudia sólo la tropósfera, ya que es aquella ubicada inmediatamente encima de la corteza terrestre y donde ocurren los fenómenos meteorológicos relacionados a movimientos de masas de aire que inciden directamente en la dispersión de los contaminantes (Orozco Barrenetxea, 2011). v

2.1.2- Origen y composición de la contaminación atmosférica

El origen de la contaminación atmosférica puede ser natural o antrópica. Aquella que es de origen natural se relaciona a erupciones volcánicas, tormentas de arena, materia orgánica descompuesta o polen, entre otras; mientras que la antrópica está ligada a la utilización de materiales combustibles como fuentes de energía y sus residuos del proceso de combustión. Entre las fuentes emisoras antrópicas más comunes se encuentran los procesos de combustión como en industrias cementeras, canteras, minería, trituración de piedras y rocas, industrias siderúrgicas, tratamiento de residuos sólidos urbanos, etc. (Aránguez *et al.*, 1999).

Las fuentes de emisión de los contaminantes atmosféricos pueden ser de tipo puntual, las cuales son generalmente fijas y con un gran caudal de emisión (como alguna instalación industrial); o pueden ser zonales, aquellas que son una mezcla de fuentes fijas y móviles de diferentes entidades que están agrupadas en el espacio (Orozco Barrenetxea, 2011).

2.1.3- Material particulado o partículas en suspensión

Existen, según Orozco et al. (2011) dos grandes clasificaciones de contaminantes atmosféricos, los contaminantes gaseosos y las partículas en suspensión. Este trabajo aborda el estudio de las partículas en suspensión o material particulado. Tal como su nombre lo indica, este abarca al conjunto de pequeñas partículas sólidas o diminutas gotas de líquido que se encuentran en el aire a causa de una variedad de fenómenos y/o actividades. La nomenclatura usual para referirse a estas partículas varía entre MP (Material Particulado) o PM (del inglés *Particulate Matter*), y se acompaña de un número que indica el diámetro de la partícula en micrómetros (μg).

A continuación, se presentan los términos comúnmente usados para hablar de contaminación por partículas y sus respectivas definiciones para establecer las diferencias entre ellos (Orozco et al., 2011):

- Polvo: Suspensión de partículas sólidas, de forma irregular, que proceden de diversos procesos de disgregación de materiales sólidos como la trituración o pulverización.
- Niebla: Suspensión de pequeñas gotas líquidas originadas por la condensación de vapor de agua sobre partículas higroscópicas suspendidas en el aire, que actúan como núcleos de condensación.
- Humo industrial: Suspensión de partículas sólidas o líquidas producto de la condensación de vapores de origen industrial.
- Humo de combustión: Conjunto formado por partículas residuales procedentes de procesos de combustión (cenizas) e inquemados. Pueden ser sólidas o líquidas.
- Bruma: Suspensión de pequeñas gotas líquidas, originadas por condensación de vapores o por dispersión de agua o evaporación de aceites de la vegetación visibles a simple vista.

A diferencia de los agentes contaminantes nombrados anteriormente, el parámetro indicador del material particulado no es su naturaleza, sino que su concentración en la unidad de microgramos por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Por otro lado, estas partículas pueden ser primarias, emitidas directamente a la atmósfera, y secundarias, aquellas que son resultado de reacciones que tienen lugar en la atmósfera como los sulfatos a partir de SO_2 o los nitratos a partir de NO_x , entre otros (Aránguez, et al., 1999).

2.1.3.1- Composición química, forma y tamaño de las partículas contaminantes

Estos factores son importantes, ya que se relacionan con los efectos potenciales ocasionados por la contaminación por partículas, aunque generalmente no se hace distinción alguna respecto a la naturaleza química de estas, siendo el tamaño el factor fundamental para su categorización (Orozco et al., 2011).

a) Composición química

En el aire el material particulado puede tener muy diversas composiciones de carácter no biológico, tales como:

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

- Metales: Se encuentran en forma atómica o iónica (sales y óxidos). Los más abundantes son el calcio y el aluminio, provenientes de procesos de erosión de la corteza terrestre y de algunos procesos industriales; plomo, liberado por pinturas y por el uso como antidetonante en las gasolinas; y hierro como resultado de procesos siderúrgicos.
- Otros de tipo inorgánico: Se destacan los sulfatos y nitratos como contaminantes secundarios procedentes de los correspondientes óxidos de azufre y nitrógeno; cloruros, en aerosoles marinos; amonio, desde el amoniaco gaseoso; silicio, proveniente de la erosión terrestre y partículas carbonadas, tanto orgánicas o inorgánicas originadas de procesos de combustión incompleta.
- Compuestos de tipo orgánico: Se pueden categorizar según su origen. Por un lado, existen los naturales como los compuestos terpénicos y los aceites esenciales provenientes de la vegetación. Por otro, se encuentran los antropogénicos como los hidrocarburos alifáticos y aromáticos empleados como disolventes o combustibles, hidrocarburos aromatizados policíclicos generados en procesos de combustión, insecticidas agrícolas, nitratos de peroxiacilo formados en los procesos fotoquímicos, entre otros. También se hacen presente los famosos hidrocarburos aromáticos policíclicos o polinucleares (HAP) que constituyen sustancias químicas altamente contaminantes y que además figuran como carcinógenos humanos, ya que la exposición a esos productos está vinculada al cáncer de los pulmones, del hígado y de la piel (García Martínez, 2005).

En cuanto a la concentración de las partículas, esta será diferente respecto a si son emitidas de forma directa (primarias) o si son formadas con posterioridad en la atmósfera (secundarias), ya que mientras que la concentración de las primeras será mayor o menor según la distancia entre el punto de medición y la fuente emisora, las segundas se distribuyen, en general, de manera semejante sin diferencias geográficas contundentes (Muñoz et al., 2007).

b) Forma y tamaño

El tamaño de las partículas es un factor de suma importancia, ya que permite conocer que tanta facilidad de sedimentación poseen las mismas y lo relacionado a su eventual peligrosidad.

La forma de las partículas puede ser de formas muy diversas. Si bien en las líquidas siempre son esféricas, las sólidas - como es el caso del material particulado - varían entre formas poliédrica como el cuarzo, laminar como la mica, cilíndrica como el talco y fibrilar como la celulosa.

En cuanto al tamaño de las partículas, este se cuantifica según el *Radio de Stokes*. Este se define como el radio de una esfera que tenga la misma velocidad de caída e igual densidad de la partícula, lo cual puede o no ser idéntico al radio geométrico de esta. A pesar de que el rango del tamaño oscila entre límites tan amplios como 10^{-3} μm a más de 10^{-3} μm , se clasifican en los siguientes tres grupos:

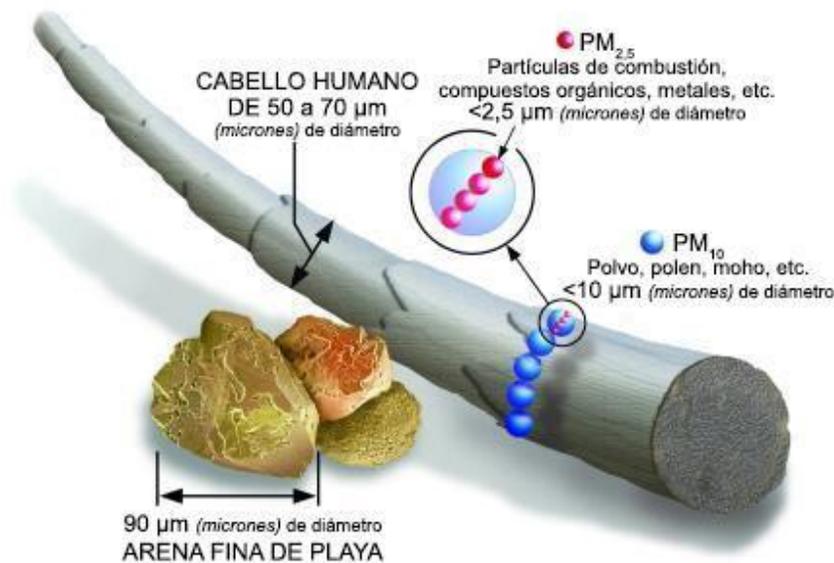
- Partículas de Aitken o finas: Tamaño inferior a 0,1 μm de diámetro. Poseen un comportamiento errático, con movimientos al azar, colisiones frecuentes y consiguientes coagulaciones.
- Partículas medias: Diámetro entre 0,1 y 10 μm .

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

- Partículas sedimentables o gruesas: Diámetro superior a 10 μm . Permanecen durante períodos de tiempo relativamente cortos con procesos de coagulación importantes.

Entonces, de acuerdo con lo anterior, las partículas que permanecen en suspensión en el aire son aquellas con tamaños comprendido entre 0,1 y 10 μm . Y, dentro de este rango mencionado, es común categorizar las partículas en dos grandes grupos: las $\text{PM}_{2,5}$, aquellas con diámetro inferior a 2,5 μm , y las PM_{10} , aquellas con diámetro inferior a 10 μm (ver Figura 12). Esta categorización se justifica básicamente en que ambos grupos poseen efectos distintos, ya que las $\text{PM}_{2,5}$ son más peligrosas por su reducido tamaño y facilidad en ingresar a las vías respiratorias.

Figura 12. Comparación de tamaño del material particulado.



Fuente: EPA (2019).

2.1.3.2- Evolución en la atmósfera

Todas estas partículas presentes en el aire, sin importar el tiempo que tome, terminan depositándose en la corteza terrestre, aunque las grandes poseen mayor facilidad que las más pequeñas. Este fenómeno, denominado deposición, condiciona su naturaleza según haya o no intervención del agua en la atmósfera:

- Deposición seca: Consiste en la deposición gravitacional por el impacto contra obstáculos que encuentran en su movimiento y donde finalmente permanecen estáticas. Este tipo de deposición es responsable de la eliminación de un 20% de partículas presentes en el aire.
- Deposición húmeda: Se refiere al arrastre hacia la superficie de las partículas por acción del agua de lluvia o nieve. Esta es la responsable de la eliminación de la gran mayoría de partículas.

2.1.3.3- Efectos sobre el entorno

En este apartado se profundizará sobre los efectos que genera la contaminación por partículas sobre los seres vivos y los materiales, aunque con énfasis en la población humana, por el enfoque del trabajo en general. También es importante añadir que se prescindirá de la naturaleza química de las partículas, tal como fue mencionado en párrafos anteriores.

a) Población humana y Animales:

La consecuencia más seria del material particulado sobre este grupo en especial se relaciona específicamente con sus efectos sobre el sistema respiratorio, donde la penetración del material en el ser vivo está determinada por el tamaño de la partícula y convierte a este factor en uno esencial para valorar los posibles daños. Las partículas grandes, aquellas mayores a 10 μm , no alcanzan a ingresar a los pulmones ya que son eliminadas atrapadas y filtradas por los pelos o mucosas de la nariz (EPA, 2019). Por lo mismo, no se consideran peligrosas, aunque pueden ser desencadenantes de algún otro tipo de afección, como las alergias.

Las partículas finas, de diámetro inferior a 0,1 μm , tampoco se categorizan como peligrosas, ya que su ínfimo tamaño – similar al de las moléculas - facilita su eliminación del sistema respiratorio. Por otro lado, un grupo de las partículas medias, comprendidas entre 0,1 y 2,5 μm , sí son causantes de efectos graves por su facilidad para depositarse tanto en zonas periféricas del pulmón, área susceptible a lesiones, como también en los alveolos, lugar donde tienden a depositarse las partículas con un radio menor a 0,5 μm .

b) Plantas:

De manera general, las partículas se depositan sobre las hojas y obstaculizan el funcionamiento de las estomas para la absorción de dióxido de carbono (CO_2) y agua, impidiendo el desarrollo correcto de la planta.

c) Materiales:

La consecuencia más importante de la contaminación por material particulado sobre los materiales es la aceleración de la corrosión de estos, tanto por la naturaleza misma de las partículas que se depositan, como también, que estas absorban otros elementos de carácter corrosivo. También se identifican efectos como el aumento de suciedad o ennegrecimiento superficial.

Por último, las partículas también causan el efecto óptico de la disminución de la visibilidad, provocada por los fenómenos de absorción originados a causa de su presencia en la atmósfera en forma de dispersiones coloidales. Si la concentración de partículas está en el rango de 100 a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, rango frecuente en atmósferas urbanas, la visibilidad ronda los 10 km, pero si esa misma concentración se alza sobre los 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la visibilidad alcanza un aproximado de 1,5 kilómetros. Es importante destacar la importancia de la humedad relativa sobre esto, ya que si es muy alta pueden producirse fenómenos de condensación y, por consiguiente, la aparición de nieblas y brumas que limiten aún más la visibilidad del área en cuestión (Orozco Barrenetxea, 2011).

2.2- DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA

La dispersión corresponde, en palabras generales, al proceso de separación y posterior diseminación de un elemento en un espacio determinado, previamente consolidado, y es el mismo proceso que actúa una vez que los contaminantes atmosféricos son liberados desde su fuente de emisión hacia la atmósfera (Orozco Barrenetxea, 2011). De acuerdo con esto, existen condicionantes directamente relacionados al nivel de inmisión o grado de contaminación sobre un lugar o población receptora de el o los agentes contaminantes, los cuales pueden resumirse en aquellos de tipo climático, como el transporte vertical y horizontal del o los elementos, y aquellos de tipo geográfico.

Los factores geográficos hacen referencia básicamente a la topografía del terreno, la cual puede variar entre un lugar y otro, e incidir en la dispersión ya señalada. Por ejemplo, en el estudio topográfico se deben considerar, dependiendo de la escala o área de estudio, desde la presencia de cadenas montañosas hasta los edificios de una ciudad.

En el caso de los factores climáticos es posible señalar la gran variedad de ellos: velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa del aire, turbulencia, radiación solar, etc. Estos factores inciden directamente el grado de estabilidad atmosférica existente en un lugar y, por consiguiente, en el movimiento horizontal y vertical de las masas de aire.

2.2.1- Viento

El viento corresponde a un parámetro meteorológico sumamente relevante en el proceso de dispersión de los contaminantes del aire. Mediante una sencilla observación de un penacho de humo y una corriente artificial de aire relativamente controlada, es posible ahondar en cómo la variación de este parámetro incide fuertemente en el movimiento o rumbo del material. Para delimitar su influencia es importante conocer la magnitud, dirección y sentido, ya que serán estos dos últimos los indicadores del camino que seguirá el material particulado (Martín Vide, 1999).

Es posible identificar varias clases de vientos (Orozco et al., 2011): aquellos que se desarrollan en las zonas altas como el caso del viento geostrofico y el de gradiente, y aquellos más cercanos a la superficie terrestre. Los primeros son realmente modelos teóricos que actúan con una velocidad bastante constante siguiendo líneas de flujos paralelas a las isobaras ya que son originados por los movimientos de aire de las zonas de alta presión a las de baja presión, en conjunto con la fuerza de Coriolis producida por la rotación de la Tierra. Por otro lado, aquellos vientos más superficiales están fuertemente influenciados por las fuerzas de rozamiento con que interactúan en su movimiento. La magnitud de estas fuerzas dependerá de factores como la naturaleza del suelo, existencia o ausencia de árboles, densidad y tamaño de edificios, accidentes topográficos, entre otros (Rojano et al., 2016). En simples palabras, la consecuencia de estas fuerzas es la disminución en la velocidad del viento superficial.

2.2.2- Inversión térmica como fenómeno fundamental de la acumulación de material particulado en la tropósfera.

A modo de introducción al concepto de inversión térmica, es importante destacar previamente dos de las características más importantes de la atmósfera (Orozco Barrenetxea, 2011): la variación de temperatura a medida que se asciende o gradiente térmico, y la estabilidad atmosférica.

En primer lugar, el gradiente térmico es un factor fundamental para la dispersión de los contaminantes y, en las denominadas condiciones adiabáticas, la situación común corresponde a que exista una disminución constante de temperatura con la altura del orden de 1° C por cada 100 metros, también conocida como gradiente adiabático de temperaturas.

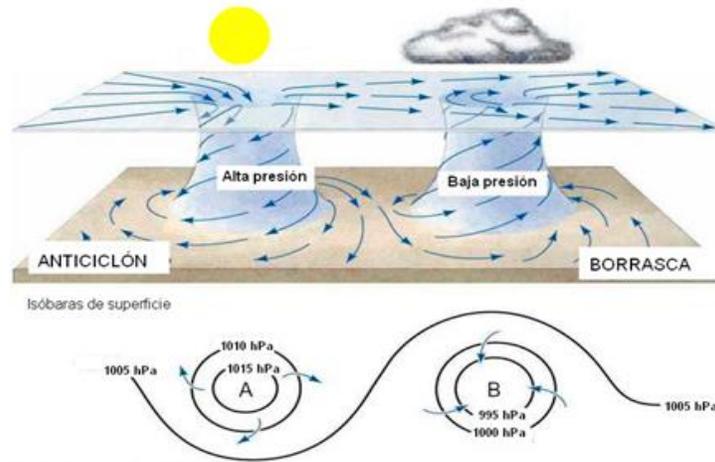
En cuanto a la estabilidad atmosférica, también entendida como la resistencia al cambio, es una característica del aire que se condiciona por factores externos y reduce las posibilidades de que exista movimiento vertical del aire y de los agentes contaminantes ahí presentes para su eventual dispersión. Se entiende si es estable o inestable en función de la diferencia térmica entre una masa de aire que asciende y el entorno que la rodea. El aire, al calentarse originalmente en el suelo, asciende, pierde densidad y disminuye su temperatura. Se dice que la atmósfera es inestable cuando la temperatura del entorno que rodea esta masa de aire es menor que la misma, dando pie a que siga ascendiendo. En cambio, una atmósfera es estable cuando la temperatura del entorno es mayor, por lo que la masa de aire no seguirá ascendiendo y volverá a descender, hasta donde vuelva a encontrar las condiciones para ascender nuevamente. Esto está estrechamente relacionado con la inversión térmica, la cual se detalla a continuación.

La inversión térmica corresponde al fenómeno que ocurre cuando la temperatura aumenta con la altitud en un determinado estrato atmosférico, el cual es reconocible mediante sondeos atmosféricos o por determinadas formas nubosas (Martín Vide, 1999). Otro autor complementa esa definición (Dorta Antequera, 1996) y la explica como un fenómeno donde se prioriza la circulación horizontal del aire por sobre la vertical, impidiendo su ascenso normal, con repercusiones tanto en la temperatura y humedad del área geográfica implicada. Es un cambio en la tendencia normal del aire a enfriarse con la altitud, dando pie a un aumento de temperatura conforme aumenta dicha distancia vertical. Una tercera y última definición (Martí Ezpeleta, 1990), señala a este fenómeno como el resultado de la interacción entre la presencia de un anticiclón de carácter frío con aire en calma y cielo sin nubes, dando pie a la variación térmica según altitud antes descrita.

Respecto a lo señalado por Martí Ezpeleta (1990), es importante el rol que protagonizan los anticiclones en el desarrollo del fenómeno de inversión térmica. En estricto rigor, hay que definir tanto anticiclón como ciclón (o borrasca): mientras el primero corresponde a un área de alta presión - que rota en el sentido contrario a las agujas del reloj - donde los vientos descienden desde el centro al exterior produciendo normalmente cielos despejados, el ciclón es un área de baja presión - que rota en sentido horario - hacia la cual soplan los vientos, generando una elevación del aire más húmedo y cálido, que origina nubes con probabilidad de precipitaciones (ver Figura 13). Entonces, los anticiclones inciden directamente en el descenso de masas de aire frío de la superficie, aumentando la presión atmosférica sobre un lugar y limitando las corrientes de aire. Si bien este anticiclón tiene una posición usual, suele experimentar desplazamientos en todas direcciones con implicancias directas en la estabilidad atmosférica de un lugar (Martín Vide, 1999).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 13. Representación de un anticiclón y un ciclón (borrasca).

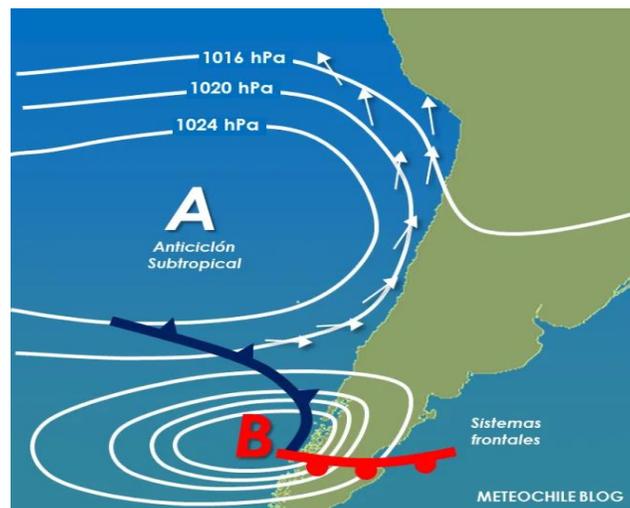


Fuente: Diario Sur (2019)

También, es importante agregar que frente a las costas chilenas está el Anticiclón Subtropical semipermanente del Pacífico Sur, el cual tiene como particularidad su posición casi inamovible. Por lo mismo, juega un papel fundamental en las características climáticas de nuestro país y cuyos efectos pueden resumirse - a grandes rasgos - en lo relativamente “tranquilo” (de estabilidad) que es el clima chileno (Dirección Meteorológica de Chile, 2018).

Los anticiclones tienen relación directa con las precipitaciones de los lugares donde se emplazan, ya que su característica estabilidad atmosférica implica inhibir los movimientos verticales, que forman nubes y, por ende, lluvias. Siendo esta última un fenómeno positivo para la dispersión de, por ejemplo, material particulado (Martín Vide, 1999). En la Figura 14, se observa un diagrama referencial de la ubicación del Anticiclón del Pacífico Sur frente a las costas de Chile.

Figura 14. Esquema referencial del anticiclón del Pacífico Sur (sistema de alta presión) y un sistema de baja presión.



Fuente: Dirección Meteorológica de Chile (2018).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

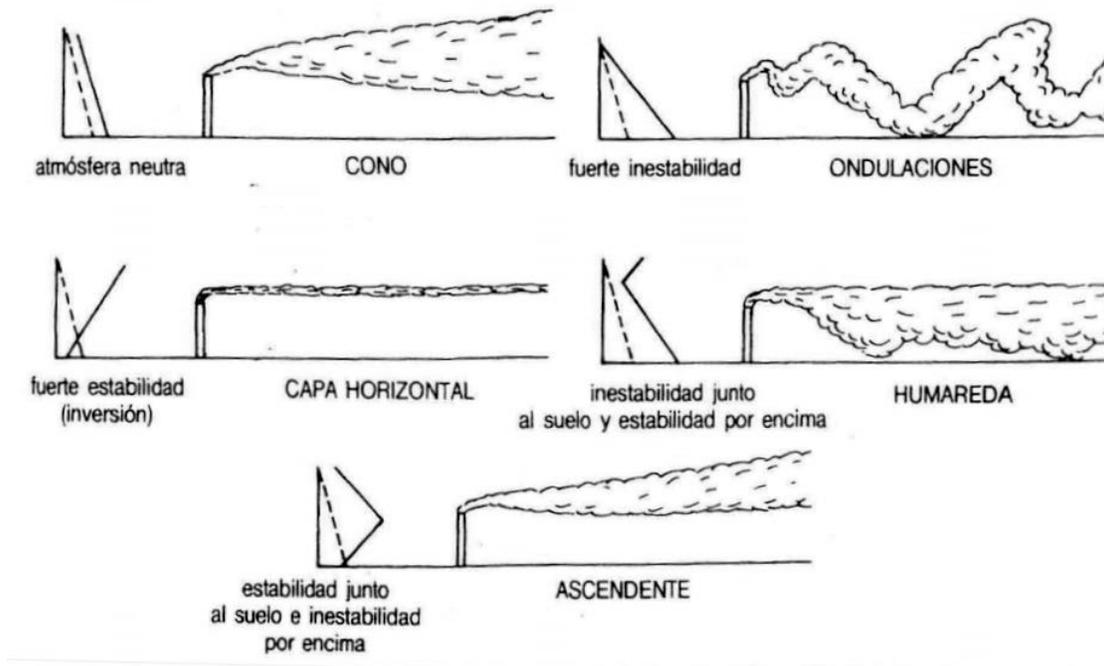
Ahora, la inversión térmica es un fenómeno que está directamente relacionado al transporte de contaminantes presentes en la atmósfera y que son emitidos en algún punto de la superficie (Rendón & Jiménez, 2008). De acuerdo con lo señalado por Martin Vide (1999), se pueden identificar cuatro tipos de inversión térmica:

- a) De tierra o de radiación: Se origina por el enfriamiento del aire que hay en contacto con el suelo por una intensa pérdida radiativa de éste, especialmente en noches invernales, despejadas y con viento en calma (alta presión). Se debe a que la tierra irradia el calor con más facilidad y en la noche se enfría con mayor rapidez que el resto. Este enfriamiento puede conllevar a una saturación del aire, produciéndose nieblas cuyo límite superior coincide con el de la capa de inversión, a partir del cual la temperatura y la humedad descienden con la altura. Es un fenómeno ocasionado por la diferencia de temperatura que tiene la superficie terrestre entre el día y la noche. Este es el tipo de inversión térmica que caracteriza a Coyhaique (Municipalidad de Coyhaique, 2019).
- b) Por subsidencia: Tiene lugar por un descenso lento y un calentamiento adiabático de una masa de aire sobre una zona de la atmósfera, lo que provoca que esta capa de aire actúe como una gran tapadera que impide la difusión de los contaminantes. Este tipo de inversión se suele situar a cierta altura respecto de la superficie terrestre y puede durar varios días si existe estabilidad atmosférica.
- c) Por turbulencia: Sucede cuando en una atmósfera con estratificación estable la turbulencia hace descender aire de las capas altas y ascender el de las bajas, siendo la forma de las curvas de estado y de puntos de rocío parecida a las de la inversión por subsidencia.
- d) Frontal: Se forma cuando una capa de aire relativamente frío cerca del suelo pasa por debajo de una capa de aire relativamente cálida y menos densa, lo cual hace que se desplace hacia arriba. Ocurre con el paso de un frente frío.

El mismo autor señala que según sea la estratificación del aire, la cual es una de las características del fenómeno de inversión térmica, el comportamiento de la atmósfera será distinto. De esta forma, se puede evidenciar gráficamente con penachos de humo, los cuales cambiarán su morfología de acuerdo con si existe o no estabilidad atmosférica (ver Figura 15).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 15: Morfología de penachos de humo según nivel de estabilidad atmosférica.



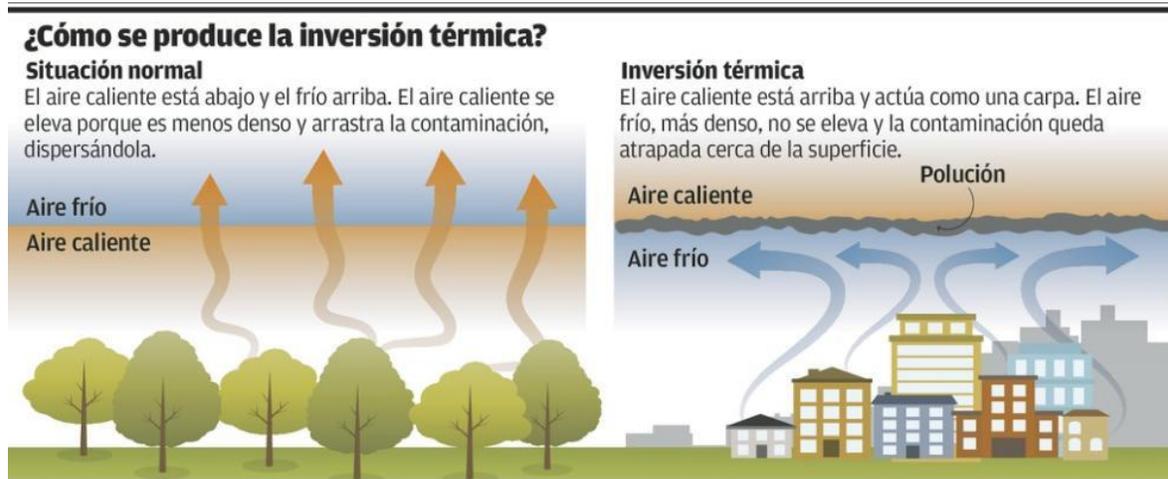
Fuente: Martín Vide (1999).

Respecto a las características geográficas de los sitios donde ocurre el fenómeno de inversión térmica, existen una variedad de estudios que lo vinculan a sectores continentales, predominantemente montañosos, valles de escasa circulación o cuencas cercanas a laderas de montañas. Sin embargo, también se presenta en territorios insulares como el caso del archipiélago de las Islas Canarias, donde el factor más importante de su ocurrencia es la acción del anticiclón subtropical de las Azores, el cual provoca una inversión de subsidencia (Dorta Antquera, 1996).

Un concepto asociado a este fenómeno es el tope de inversión térmica, el cual es fácilmente reconocible desde los perfiles térmicos como el punto donde la temperatura es máxima y donde se genera el quiebre de la tendencia térmica del espacio geográfico analizado (Rendón & Jiménez, 2008). Respecto a cuándo ocurren las inversiones térmicas, es importante destacar que se pueden dar a lo largo de todo el año, aunque tienden a destacarse más en las estaciones más extremas en cuanto a temperaturas mínimas, como es el caso del invierno (Martí Ezpeleta, 1990). A modo de demostrar visualmente este fenómeno se acompaña la Figura 16.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 16. Representación del comportamiento atmosférico entre una situación normal y otra con inversión térmica.



Fuente: La Nueva España (2016)

En Coyhaique, este fenómeno se presenta de manera frecuente en invierno y, especialmente, en aquellas noches despejadas. Entonces, existe una persistente acumulación de contaminantes sobre la superficie de la ciudad cuyo suelo se enfría más rápido que el aire sobre él, volviéndose más frío y pesado. Esto concentra el material y provoca una evidente estratificación del aire dependiendo del nivel de concentración (MMA, 2017) tal como se aprecia en la Figura 17 y en la Figura 18.

Figura 17. Fotografía de la ciudad de Coyhaique desde la Reserva Nacional Coyhaique.



Fuente: Obtenida en terreno.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 18. Fotografía de la ciudad de Coyhaique durante episodio de contaminación.



Fuente: Fundación Terram (2019)

2.3- PLANES DE DESCONTAMINACIÓN AMBIENTAL COMO RESPUESTA INSTITUCIONAL FRENTE A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Un Plan de Descontaminación Ambiental, también conocido como PDA, corresponde a una herramienta legal de gestión institucional con influencia en diversas instituciones tales como servicios públicos, ministerios y municipalidades, con límites geográficos de aplicación definidos, y que tiene por objetivo principal recuperar los niveles señalados en las normas ambientales de calidad de aire de una zona saturada (Ministerio del Interior, 2019).

Estos documentos se basan en diversos documentos legales de Chile, tales como:

a) Constitución Política¹:

Estos planes se basan legalmente en dos artículos de la Constitución Política de Chile actual, con énfasis en la responsabilidad del Estado sobre el bienestar de las personas y el medio ambiente que las rodea. Dichos artículos son los siguientes:

Artículo 19 numeral 8. *El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación. Es deber del Estado velar por que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza. La ley podrá establecer restricciones específicas al ejercicio de determinados derechos o libertades para proteger el medio ambiente.*

Artículo 19 numeral 9. *El derecho a la protección de la salud. El Estado protege el libre e igualitario acceso a las acciones de promoción, protección y recuperación de la salud y de rehabilitación del individuo. Le corresponderá, asimismo, la coordinación y control de las acciones relacionadas con la salud. Es deber preferente del Estado garantizar la ejecución de las acciones de salud, sea que se presten a través de instituciones públicas o privadas, en la forma y condiciones que determine la ley, la que podrá establecer cotizaciones obligatorias.*

b) Ley N° 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente (modificada por Ley N°20.417).

Artículo 1°. *El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental se regularán por las disposiciones de esta ley, sin perjuicio de lo que otras normas legales establezcan sobre la materia.*

Artículo 2° letra:

- c- Contaminación: *la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente.*
- d- Contaminante: *todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, luminosidad artificial o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda*

¹ Constitución Política de la República de Chile del año 1980. Disponible en <http://bcn.cl/1uva9>

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.

- Medio Ambiente Libre de Contaminación: *aquél en el que los contaminantes se encuentran en concentraciones y períodos inferiores a aquéllos susceptibles de constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental;*

c) Decretos Supremos

Otra orden legal en la cual que se fundamentan los Planes de Descontaminación Ambiental corresponde a los Decretos Supremos (DS). Estos son varios y, en su vasta mayoría, se decretan en base a un área geográfica determinada. No obstante, existe uno que establece las bases generales de los planes en cuestión:

Decreto Supremo N°39/11²: Este puede considerarse como el Decreto Supremo más importante al momento de hablar de la génesis de los PDA. Específicamente, el DS N° 39 es una actualización de una orden previa (DS N° 94/95) y establece tanto el procedimiento para la elaboración de los Planes de Prevención y/o Descontaminación, como también normas de emisión para los artefactos que combusionen leña y pellet de madera.

2.3.1- El caso de Coyhaique

La ciudad de Coyhaique comienza sus monitoreos de material particulado de 10 micrómetros el año 2007, bajo el emplazamiento de una estación de medición homónima a la ciudad. Las mediciones y estudios relacionados a esta son el puntapié inicial para lo que en 2012 se concretaría con la declaración de Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10. De este último, comienza la elaboración Plan de Descontaminación Atmosférica MP10 para Coyhaique y su Zona Circundante, el cual se materializa legalmente el año 2016. Este mismo año comienzan los trámites para dar forma a un nuevo instrumento de gestión ambiental que integre al MP2,5, siendo un proceso casi idéntico en sus etapas de elaboración hasta su formalización como tal el pasado 17 de julio de 2019 (Ministerio del Interior, 2019).

2.3.1.1- Área geográfica del Plan de Descontaminación Ambiental

En cuanto al área geográfica que abarcan los decretos y planes establecidos en la ciudad de Coyhaique, esta se identifica formalmente como “Zona Saturada” y corresponde a un polígono de unos 120 kilómetros cuadrados de superficie (ver Figura 19, Tabla 10 y Anexo 3).

Tabla 9: Vértices de la "Zona Saturada" de Coyhaique y puntos referenciales.

Vértice	UTM E	UTM N	Referencia
1	723486,04	4943078,20	Río Simpson
2	731818,56	4943603,91	Cerro Castillo
3	739907,45	4951444,12	Intersección R240/x-689
4	731661,85	4953758,26	Laguna Verde
5	725844,61	4954413,09	Central Eólica Alto Baguales

² Decreto Supremo N° 39 del año 2011, de Ministerio de Medio Ambiente, Norma de Emisión de material particulado para los artefactos que combusionen o puedan combusionar leña y pellets de madera. Disponible en <http://bcn.cl/1vgca>

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Fuente: Ministerio del Interior (2019).

Figura 19. Imagen referencial de Coyhaique y la zona saturada.



Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2018)

2.3.1.2- Etapas administrativas tras el Plan de Descontaminación Ambiental

En el ámbito institucional, los decretos y otras ordenes legales relacionadas a la evolución y establecimiento del Plan de Descontaminación Ambiental de Coyhaique se pueden observar en la Tabla 11, ordenados de acuerdo con su fecha de promulgación (MMA, 2018).

Tabla 10: Documentos relacionados al establecimiento del Plan de Descontaminación Ambiental de Coyhaique.

Documento	Nombre	Fecha Publicación
Res. N° 1.600	Resolución de la Contraloría General de la República: Fija normas sobre exención del trámite de toma de razón.	6 de noviembre de 2008
DS N° 33	Declaración Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP10, como concentración diaria y anual, a la ciudad de Coyhaique y su zona circundante.	20 de agosto de 2012
DS N° 46	Establece el Plan de Descontaminación Atmosférica para Coyhaique y su zona circundante.	28 de octubre de 2015
DS N° 15	Declaración Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP2,5, como concentración de 24 horas, a la ciudad de Coyhaique y su zona circundante.	30 de mayo de 2016
Res. Ex. N° 1.097	Da inicio al proceso de elaboración de un Plan de Descontaminación Atmosférico para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante	17 de octubre de 2016
Res. Ex. N° 103	Da inicio al proceso de actualización del Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Coyhaique y acumula este procedimiento con el de elaboración del Plan de Descontaminación Atmosférica por material particulado fino respirable MP2,5, para esa misma zona saturada.	21 de febrero de 2017
Res. Ex. N° 718	Aprobación anteproyecto.	28 de julio de 2017
Otro	Opinión sobre anteproyecto del plan del Consejo Consultivo del Ministerio del Medio Ambiente	28 de septiembre de 2017

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Acuerdo N° 45	Análisis de las observaciones ciudadanas del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad.	14 de diciembre de 2017
DS N° 7 ³	Establece el Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante	17 de julio de 2019

Fuente: Elaboración propia en base a BCN (2019).

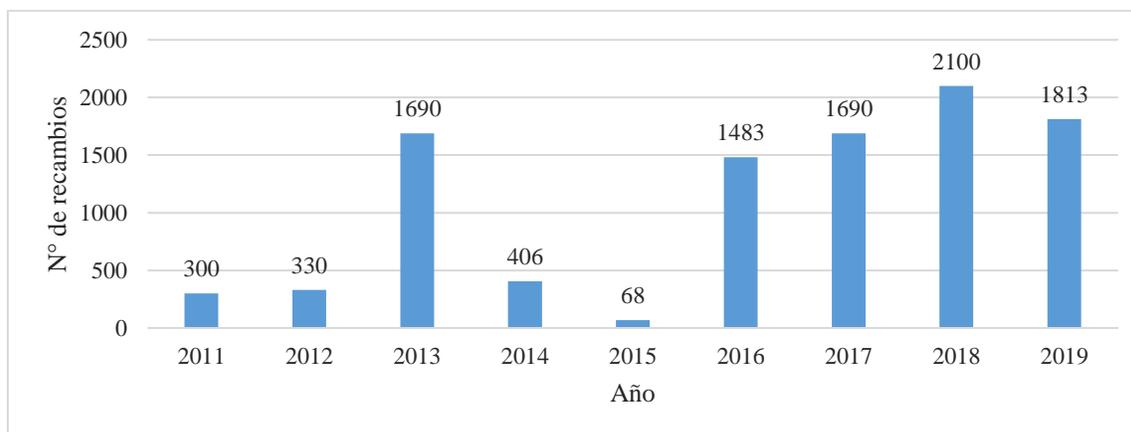
2.3.1.3- Principales medidas asociadas al Plan de Descontaminación Ambiental de Coyhaique.

Dentro del PDA de Coyhaique existen una serie de medidas que busca mitigar los efectos de la contaminación ya existentes sobre la ciudad y prevenir eventuales problemas como consecuencia de esta (Aire Coyhaique, 2018). No obstante, se abordan otras temáticas específicas las cuales son las siguientes:

a) Recambio de calefactores:

Esta es una medida gubernamental implementada continuamente desde el año 2011, a cargo del Ministerio de Medio Ambiente. El objetivo principal de este programa es reducir las emisiones generadas producto de la combustión de la leña a nivel domiciliario y consiste en intercambiar, mediante un copago que fluctúa entre 30 a 60 mil pesos, un calefactor antiguo/obsoleto por una estufa más moderna y con menos emisiones. Si bien, es un programa vigente en 10 zonas geográficas entre las regiones de O'Higgins y Aysén, sólo en Coyhaique se concentraba el 25% del total nacional de recambios de calefactores hasta el año 2017 (Centro de Sistemas Públicos, 2019) contabilizando 5.967 recambios efectivos hasta ese año. Es importante recordar que en Coyhaique las emisiones domiciliarias de combustión de leña por calefacción y cocina son responsables del 94% del material particulado de la zona (MMA, 2017); y que un 96% de las viviendas utiliza dicho recurso natural (Municipalidad de Coyhaique, 2019). A continuación, en la Figura 20, se presenta la evolución en el número de recambios desde la fecha de creación del programa, con el cual - hasta el año 2019 - se han recambiado un total de 9.880 artefactos (ver Anexo 4).

Figura 20. Número de recambios de calefactores por año entre 2011 y 2019.



Fuente: Elaboración propia en base a Centro de Sistemas Públicos (2019), Municipalidad de Coyhaique (2019) y MMA (2019).

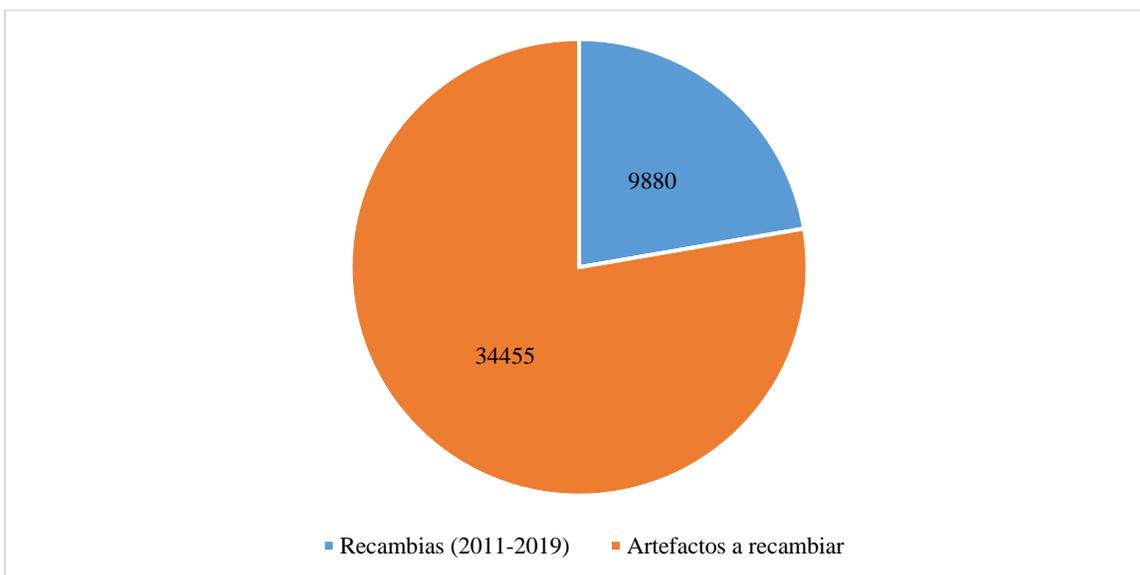
³ Decreto N° 7 de 2019: Actualización del Plan de Descontaminación Ambiental de Coyhaique. Disponible en: <http://bcn.cl/2aru9>

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

En la misma línea, este programa busca recambiar unos 34.455 artefactos obsoletos de circulación (Municipalidad de Coyhaique, 2019) que se encuentran repartidos en 23.999 viviendas (INE, 2018), lo cual da un promedio de 1,43 estufas por vivienda en la zona urbana de Coyhaique. Los 9.880 artefactos recambiado hasta ahora representan un 27,8% del total de artefactos que señala la Municipalidad (ver Figura 21 y Anexo 4). Eso implica que entre 2011 y 2019 se han recambiado 1.098 calefactores por año.

De acuerdo con información reciente (Diario Aysen, 2019), el Ministerio del Medio Ambiente tiene como meta recambiar 15 mil unidades, en un plazo de ocho años - desde 2020 - gracias a un abultado financiamiento de parte del Gobierno Regional de Aysén; es decir, 1.875 equipos por año. Siendo esta última cifra una meta considerablemente más alta de la cantidad promedio recambiada hasta 2019 mencionada en el párrafo anterior.

Figura 21. Estado de avance histórico del programa de recambio de calefactores en Coyhaique.



Fuente: Elaboración propia en base a Centro de Sistemas Públicos (2019), M. de Coyhaique (2019) y MMA (2019).

b) Subsidio acondicionamiento térmico de viviendas.

Este subsidio consiste en proveer de aislación a las viviendas, específicamente a sus muros y/o techos, para contribuir en la disminución de gasto de energía para calentar los hogares, disminuyendo los niveles de contaminación y el gasto que implica la calefacción en las familias. Este beneficio estatal aplica a todo el territorio nacional, aunque existen determinadas mejoras que sólo aplican al sur de Chile (MINVU, 2018) dado que se caracteriza por sus temperaturas más bajas.

c) Uso y mejoramiento de calidad de la leña

Si bien el uso de la leña emite grandes cantidades de material particulado a la atmósfera, existen diferencias de dichos aportes entre la leña húmeda y seca. Por lo mismo, mediante el Sistema Nacional de Certificación de Leña se promueve y realiza la certificación de este recurso destinado a productores, comerciantes y consumidores (Sistema Nacional de Certificación de Leña, 2019). La certificación contempla cuatro principios principales: cumplimiento de legislación nacional y local, origen sustentable, calidad del producto - que posea un máximo de 25% de humedad - e información adecuada al consumidor (Ministerio de Energía, 2019).

d) Control de emisiones a nivel domiciliario, calderas de uso residencial, industrial y comercial, y transporte.

Corresponden a los lineamientos principales y normas que deben considerar las y los habitantes, comerciantes, secretarías ministeriales y gobierno local en general respecto a las emisiones asociadas a cada una de estas tres categorías. En el caso domiciliario, se centra en el tipo de artefacto y sus emisiones, en la calidad de la leña utilizada y en la materialidad de las viviendas para una aislación térmica eficiente. En cuanto a las calderas, establece límites de emisiones según sea su potencia térmica nominal tales como 50 mg/m³ de MP para menos potentes (75 kWt) y 30 mg/m³ para aquellas que superen dicho valor. Por último, en transporte, indica que el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, se encargará de elaborar e implementar un método de control de emisiones en la vía pública de vehículos diésel que permita detectar eventuales deterioros de motor y /o falta de mantenimiento.

e) Compensaciones de emisiones en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Establece que todos aquellos proyectos o actividades, que ingresen al SEIA y generen emisiones iguales o superiores a 1 ton/año de MP, respecto de la situación base (previo al proyecto), deban compensar el 120% de sus emisiones totales anuales, directas o indirectas (SEREMI MMA O'Higgins, 2014). El método de compensación debe ser propuesto por el titular del proyecto, acreditando que en su implementación se cumpla con lo señalado (Superintendencia del Medio Ambiente, 2014).

f) Gestión de los episodios críticos de contaminación.

Corresponde a la elaboración e implementación de un plan operacional, que funcione desde el 1 de abril hasta el 30 de septiembre de cada año. En general, su estructura contendrá lo siguiente:

- Sistema de seguimiento de la calidad de aire para MP10 y MP2.5
- Sistema de pronóstico de la calidad de aire para MP10 y MP2.5
- Plan comunicacional de difusión a la ciudadanía
- Procedimiento para la declaración de episodios

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES,
CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

- Medidas de prevención y mitigación durante el periodo de gestión de episodios.

g) Educación, difusión ambiental y arborización urbana.

Ordena a la Secretaría Ministerial del Medio Ambiente, de Educación y de Salud, a desarrollar un programa de difusión y educación para la población para concientizar y sensibilizar a los distintos públicos objetivos sobre los efectos de la contaminación atmosférica y las buenas prácticas que apunten a la descontaminación del aire. Incluye también a la Secretaría Ministerial de Agricultura para desarrollar un plan de arborización urbana.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1- DISEÑO METODOLÓGICO

Esta investigación prioriza un enfoque cuantitativo, incluyendo un enfoque cualitativo para el tercer y último objetivo. Considerando que el enfoque cuantitativo corresponde a aquel de tipo secuencial, representado por un conjunto de etapas donde la idea desarrollada va acotándose conforme se avanza en estas en que esta investigación, a grandes rasgos, parte describiendo aspectos físicos del área de estudio – para contextualizar el porqué de la acumulación de contaminación - y luego, en base a una serie de muestras recolectadas *in situ* y procesamiento posterior de dicha información, se obtiene la espacialización del problema con directa relación a los aspectos determinados previamente.

Entonces, los dos primeros objetivos aquí desarrollados utilizan la recolección de datos para probar una determinara hipótesis - la relación entre las características geográficas con la distribución espacial de la contaminación -, luego se analiza el Plan de Descontaminación Ambiental de Coyhaique, desde un enfoque geográfico, para, finalmente, establecer pautas de comportamiento o conclusiones (Sampieri Hernández, 2014). A continuación, en la Tabla 12, se presenta de forma resumida la relación entre las fases del proceso cuantitativo y la temática abordada en este trabajo.

Tabla 11: Fases del proceso cuantitativo en la investigación.

	Fases del proceso cuantitativo	Resumen de relación con investigación
1	Idea	Abordar la contaminación en Coyhaique desde una perspectiva geográfica. Espacializar el problema.
2	Planeamiento del problema	Coyhaique, principalmente en invierno, posee altos niveles de contaminación por material particulado producto del uso de la leña como combustión.
3	Revisión bibliografía y desarrollo marco teórico	Contaminación atmosférica, material particulado, inversión térmica, otros.
4	Visualización del alcance del estudio	Definir límites tanto respecto al área donde se llevarán a cabo los muestreos, como también el tiempo a estudiar.
5	Elaboración de hipótesis y definición de variables	Además del mero uso de leña como combustible, ¿existen otras características geográficas que incidan en tales niveles de contaminación? De existir, ¿cuáles son y cómo alteran espacialmente la distribución de la contaminación?
6	Desarrollo del diseño de investigación	Lineamientos secuenciales para el correcto trabajo de gabinete y de terreno.
7	Definición y selección de la muestra	Muestra: Niveles de MP2.5 y MP10 en diversos puntos de la zona urbana de Coyhaique.
8	Recolección de los datos	Muestreo mediante equipo profesional en automóvil y a pie.
9	Análisis de los datos	Procesamiento mediante software Excel y ArcMap.
10	Elaboración del reporte de resultados	Investigación finalizada y pasmada en este trabajo.

Fuente: Elaboración propia en base a Sampieri Hernández (2014).

3.2- INSTRUMENTOS UTILIZADOS

En este punto se describen los equipos tecnológicos utilizados en el terreno para recolectar la información que posteriormente se procesaría mediante el uso de Excel y ArcMap para elaborar los resultados estadísticos y gráficos de este trabajo.

3.2.1- Contador de partículas HT-9600⁴

- **Descripción general**

El contador de partículas, también categorizado como sensor de calidad de aire, es un equipo profesional que posee la función de medir MP2.5 y MP10, temperatura y humedad relativa del aire. En cuanto a su estructura general, posee un puerto de detección de temperatura y humedad, una entrada de aire para muestreo, una rejilla de ventilación y una pantalla LCD para visualizar la información. Los sensores de este equipo funcionan bajo el principio de la optoelectrónica, el cual consiste en convertir la energía lumínica en energía eléctrica. Las partículas de polvo en el aire tienen la capacidad de dispersar la luz incidente, dispersión que está directamente relacionada con el tamaño mismo de la partícula. Entonces, una vez que se bombea aire al equipo, las partículas de polvo atraviesan una zona fotoactiva donde se iluminan y dispersan una determinada cantidad de luz. Esto se transforma en una señal que se envía a un fotosensor para amplificarse y obtener un pulso eléctrico que entrega la cantidad de partículas en un volumen determinado, el cual corresponde a microgramos de partículas por metro cúbico de aire. Por último, este instrumento categoriza de manera predeterminada los niveles de calidad de aire, pero son estándares ajenos a lo que estipula la institucionalidad ambiental chilena y, además, son meramente establecidos bajo criterio de la fábrica de este aparato.

- **Especificaciones técnicas**

Tabla 12: Especificaciones técnicas de contador de partículas HT-9600.

Principio de los sensores	Optoelectrónica
Método de muestreo	Bombeo
Fuente de luz	Láser
Canales para conteo de polvo	0,3 μm , 2,5 μm y 10 μm .
Caudal	1 L/min
Rango de medición	0 – 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

⁴ Toda la información técnica del equipo fue obtenida desde el manual de usuario y el sitio web del proveedor. Disponible en <http://proimeq.cl/#/producto/detector-monitor-calidad-aire-pm25-profesional/182>

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Sensibilidad de detección	1 μg
Tiempo de muestreo	50 s
Error de medición	< 5%
Unidad de concentración	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ y unidades/L
Rango de temperatura	0 – 50° C
Precisión de temperatura	$\pm 1^\circ$ C
Rango de humedad	10 – 90% HR
Precisión de humedad	$\pm 2\%$ HR
Almacenamiento	999 grupos de datos
Apagado automático	2 minutos
Fuente de alimentación	Batería de 9V
Tiempo de funcionamiento	3 horas de trabajo continuo
Tamaño de pantalla	2,8 pulgadas
Resolución de pantalla	320*240 pixeles
Dimensiones	245mm \times 85 mm \times 40 mm
Peso	325 gramos (batería incluida)

Fuente: Manual de usuario incluido en la caja del equipo.

- **Imágenes del equipo**

Figura 22: Imágenes del equipo contador de partículas HT-9600.

(a)



(b)



Fuente: (a) PROIMEQ / (b) Obtenida en terreno.

3.2.2- GPS Garmin eTrex 30X⁵

- **Descripción general**

Este dispositivo es una herramienta de geoposicionamiento global de alta calidad que, además de permitir establecer la posición en tiempo real según coordenadas determinadas por el usuario, añade la función de mostrar la altitud, lo cual es un dato muy valioso a la hora de trabajar en conjunto con el contador de partículas anteriormente descrito. Cualquier otra característica general corresponderá a la de un típico equipo GPS.

- **Especificaciones técnicas**

En este apartado sólo se muestran las especificaciones técnicas más relevantes en el contexto de la investigación, ya que existen otras funciones y características no utilizadas en el levantamiento. En este caso, las más importantes fueron el establecimiento de coordenadas y sensor de altimetría.

⁵ Toda la información técnica del equipo fue obtenida desde el manual de usuario y el sitio web de la empresa fabricante. Disponible en <https://buy.garmin.com/es-CL/CL/p/518048>

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES,
CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Cualquier otro cálculo de área o de ruta no fue establecido con este dispositivo y se señalará el método cuándo corresponda.

Tabla 13: Especificaciones técnicas de GPS Garmin eTrex 30X.

Dimensiones	5,4 × 10,3 × 3,3 cm
Tamaño de la pantalla	2,2 pulgadas
Resolución de la pantalla	240 × 320 píxeles
Peso	141,7 gramos (batería incluida)
Baterías	2 baterías AA
Autonomía	Hasta 25 horas
Sensores	Altímetro barométrico
	Brújula
Mapas	Waypoints y rutas
Almacenamiento	Tarjeta SD (no incluida)

Fuente: Manual de usuario incluido en la caja del equipo.

- **Imágenes del equipo**

Figura 23: Imágenes del equipo GPS Garmin eTrex 30X.



Fuente: Garmin

3.3- PASOS METODOLÓGICOS

La estructura metodológica de esta investigación se basa en tres objetivos específicos que se detallan a continuación.

Objetivo 1: Identificar y describir los factores que condicionan la calidad climática de Coyhaique.

La forma en la cual se determinaron los factores condicionantes de la contaminación por material particulado en la ciudad fue mediante recolección de información, tanto en formato gabinete como también en terreno. En el primer caso, se inició con una búsqueda bibliográfica relacionada con los conceptos de *contaminación atmosférica*, *material particulado* e *inversión térmica*, los cuales están estrechamente ligados y permitieron identificar los factores geográficos que podrían estar relacionados con el fenómeno en el área de estudio.

Respecto a la información obtenida *in situ*, se realizó un primer terreno a Coyhaique durante el mes de mayo del año 2019 (ver Tabla 15), con la finalidad de conocer la opinión de representantes de variados servicios públicos locales y recopilar información respecto a la percepción de las y los entrevistados respecto a la situación de la contaminación de la ciudad y su percepción sobre los factores geográficos que inciden en esta problemática. La razón principal para considerar la opinión de los actores clave fue para cautelar que todos los factores reconocidos a escala local fueran considerados.

Tabla 14: Entrevistadas y entrevistados en primer terreno a Coyhaique.

Fecha	Entrevistada(o)	Institución donde se desempeña
13/05/19	E1	Municipalidad de Coyhaique.
	E2	Ministerio de Medio Ambiente.
14/05/19	E3	Ministerio de Desarrollo Social.
	E4	Gobierno Regional (GORE).
16/05/19	E5	Gobierno Regional (GORE)-
17/05/19	E6	Ministerio de Salud.

Fuente: Elaboración propia en base a entrevistas.

Los 4 factores mencionados por entrevistados(as) fueron el relieve, el viento, las precipitaciones y la inversión térmica; los cuales se condicen con la información obtenida a nivel bibliográfico sobre la materia.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Objetivo 2: Describir el comportamiento histórico de la contaminación por material particulado según su relación a otras variables meteorológicas.

En un principio, la descripción del comportamiento histórico de la contaminación por MP10 y MP2.5 se realizó en base a los datos proporcionados por SINCA (2019) y DGA (2019), en formato de hojas de cálculos. Específicamente, se descargaron los datos más antiguos disponibles para cada uno de los parámetros meteorológicos, tanto en registros tipo diario como horario si corresponde. Con esta información, y un posterior procesamiento de los datos mismos, se presentan gráficos que no sólo muestran la evolución del o los parámetros por sí solos, sino que también permite identificar, por ejemplo, los momentos donde tiende a acumularse la contaminación, el comportamiento de los otros factores geográficos, y su coeficiente de correlación para evidenciar la dependencia entre ellos. El último registro fue establecido al día cuando se descargaron los datos y procesada la información en cuestión para realizar este trabajo.

Tabla 15. Tabla resumen de parámetros desarrollados en el Objetivo N°2.

Fuente	Estación	Parámetro	Primer registro	Último registro
SINCA	Coyhaique I	Material particulado MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	01-03-07	03-10-19
		Material particulado MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	01-03-13	03-10-19
		Humedad relativa del aire (%)	21-05-13	03-10-19
		Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	21-05-13	03-10-19
		Radiación global (W/m^2)	01-07-13	03-07-17
		Velocidad del viento (m/s)	24-12-09	03-10-19
		Dirección del viento ($^{\circ}$)	24-12-09	03-10-19
	Coyhaique II	Material particulado MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	01-09-13	03-10-19
		Material particulado MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	01-09-13	03-10-19
		Humedad relativa del aire (%)	01-10-13	03-10-19
		Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	01-10-13	03-10-19
		Velocidad del viento (m/s)	01-10-13	03-10-19
		Dirección del viento ($^{\circ}$)	01-10-13	03-10-19
		DGA	Coyhaique (Escuela Agrícola)	Precipitaciones (mm)
Teniente Vidal	Precipitaciones (mm)		01-01-13	03-10-19

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de correlación de variables.

Para estudiar la relación entre una y otra variable se utiliza el método de Análisis de Correlación de Pearson. Según Camacho-Sandoval (2008), corresponde al método más común para determinar si existe asociación lineal entre dos variables cuantitativas continuas y posee dos aspectos importantes a considerar: magnitud y signo. Por un lado, la magnitud evidencia la intensidad de la relación entre las dos variables y puede variar entre 0 (variables no asociadas) y 1 (variables completamente dependientes). Por otro lado, el signo refleja la manera en que se asocian. Si es positivo corresponde a una relación directamente proporcional (a valores altos de una variable corresponden valores altos de la otra y valores bajo de una, serán bajos en la otra), y si es negativo corresponde a una relación inversamente proporcional (a valores altos de una, bajos de la otra, y a valores bajos de una, altos de la otra).

De esta manera, cada vez que se estudien dos variables se complementará con un análisis de correlación para las mismas para ver la manera en que dichos elementos se relacionan.

Objetivo 3: Determinar y analizar el comportamiento espacial de la contaminación por material particulado en el área de estudio.

Para realizar este objetivo, se realizó un segundo terreno, entre los días 4 y 10 de julio de 2019. En esta oportunidad fueron utilizados para el análisis, tanto el contador de partículas HT-9600 y el GPS Garmin durante los recorridos, tanto a pie como en vehículo, dentro de los límites urbanos de Coyhaique. Por temas logísticos y de factibilidad – que involucraban el servicio de traslado en vehículo, la duración de las baterías del equipo de conteo y un intervalo de tiempo adecuado para la medición – los puntos elegidos para muestreo y el recorrido en general fue distinto para cada uno de medios de movilización (ver Figura 24).

Para las muestras a pie, realizadas el 9 de julio entre las 8:58 am y las 10:53 am, el recorrido inicia y termina en la dirección Gabriela Mistral #49, al norponiente de la ciudad, y se compone de 20 puntos de muestreo en total. En cuanto a la selección de calles, se eligieron varias vías principales y algunas de menor importancia vial que conectara con el punto inicial. En total fueron tres recorridos idénticos a pie.

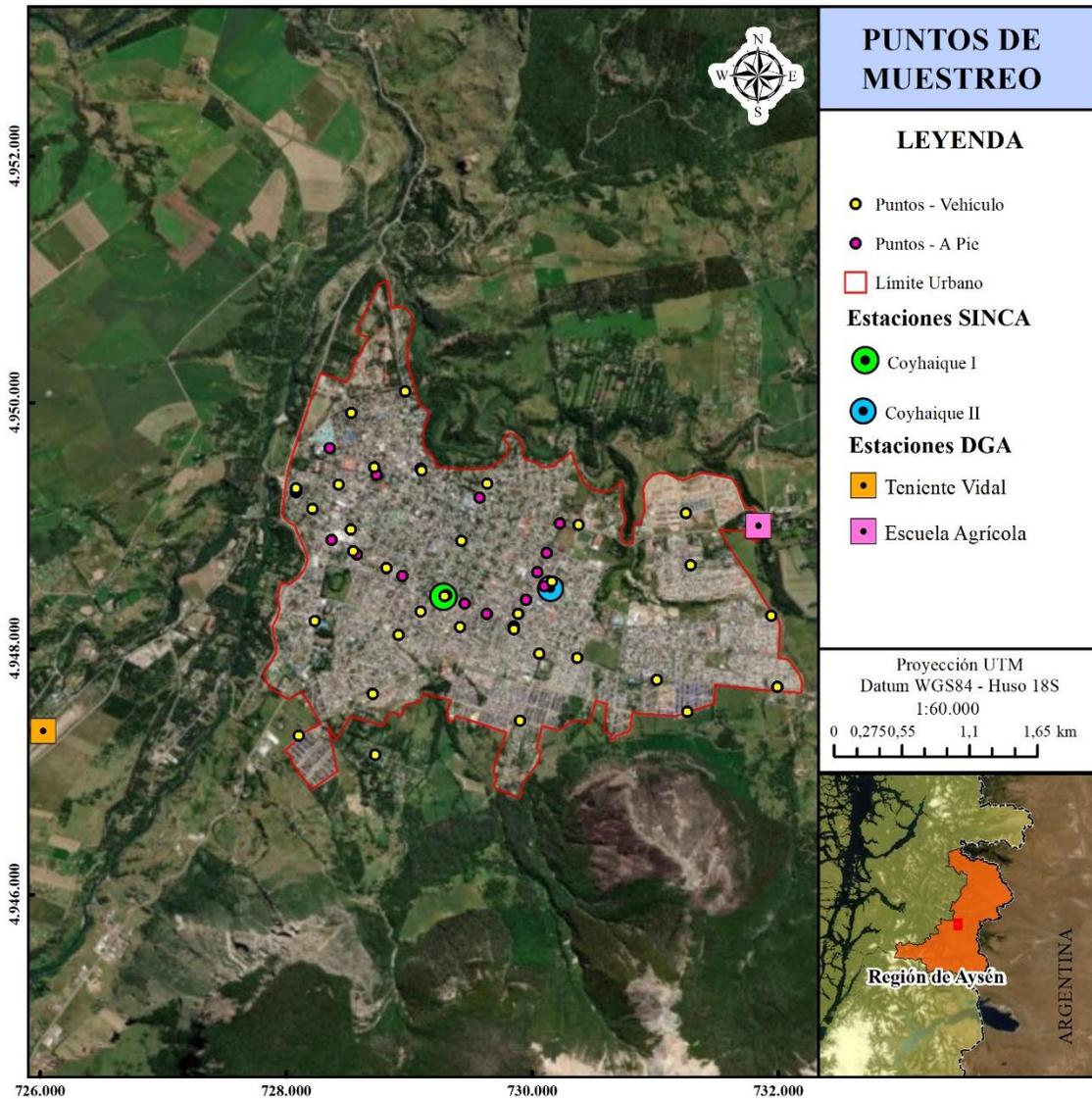
Respecto a las mediciones realizadas en vehículo, realizadas el 7 de julio entre las 20:55 pm y las 23:09 pm, este monitoreo se realizó en dos oportunidades diferentes y se utilizaron los mismos puntos en ambas. El criterio original con que se seleccionaron los puntos de muestreo se basó en una malla de puntos (herramienta *Fishnet* en ArcMap) equidistantes a 200 metros entre ellos. Por temas de dirección de calles, tiempo y batería del equipo, dicha malla sufrió modificaciones *in situ* a lo largo del muestreo en sí. En total, tal como se aprecia en la Figura 22, fueron 35 puntos de medición en este medio de transporte.

Para corregir la diferencia horaria que hay entre las tomas de muestra de ambas actividades que dan paso a los resultados de este objetivo, dichos resultados se complementan adecuadamente con la evolución de los parámetros meteorológicos y de contaminantes (desde SINCA) que caracterizaron el día de la actividad en cuestión. De esta forma, se evita asociar los resultados a valores estáticos, lo cual podría producir problemas a la hora de presentar la información. Por otra parte, no hay manera

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

para capturar la información de contaminación de los puntos al mismo tiempo para evitar lo recién mencionado.

Figura 24: Ubicación de puntos de muestreo durante Terreno N°2 y estaciones SINCA y DGA en Coyhaique.



Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos en Terreno N°2.

Alcances de la investigación

El presente trabajo de investigación no estuvo exento de limitaciones de diversa índole. A continuación, se detalla cada uno de los alcances en cuestión.

- Escala de estudio:

Si bien la contaminación no se limita por límites administrativos tales como lo urbano y lo rural, la toma de puntos para medir la contaminación y su respectiva concentración sólo se realizó dentro de los límites urbanos de la ciudad. La razón para dicha restricción espacial se fundamenta principalmente por razones de tiempo y por los costos asociados que involucran un estudio con mayor cobertura espacial a lugares donde, por ejemplo, no existe transporte público o hay caminos de difícil acceso para vehículos tradicionales dada la topografía local.

Otra consideración relacionada a las escalas de estudio es aquella ligada al tiempo de estudio y análisis. Por las mismas limitaciones anteriores, no es posible hacer un panorama mensual y menos semestral o anual. Por lo mismo, este trabajo se limita a hacer conclusiones en base a bibliografía y a dos terrenos de seis días cada uno, donde es imposible establecer patrones o conclusiones de carácter anual, pero si es posible obtener un panorama actualizado y real del comportamiento de los días donde se realizó las actividades en la ciudad de Coyhaique.

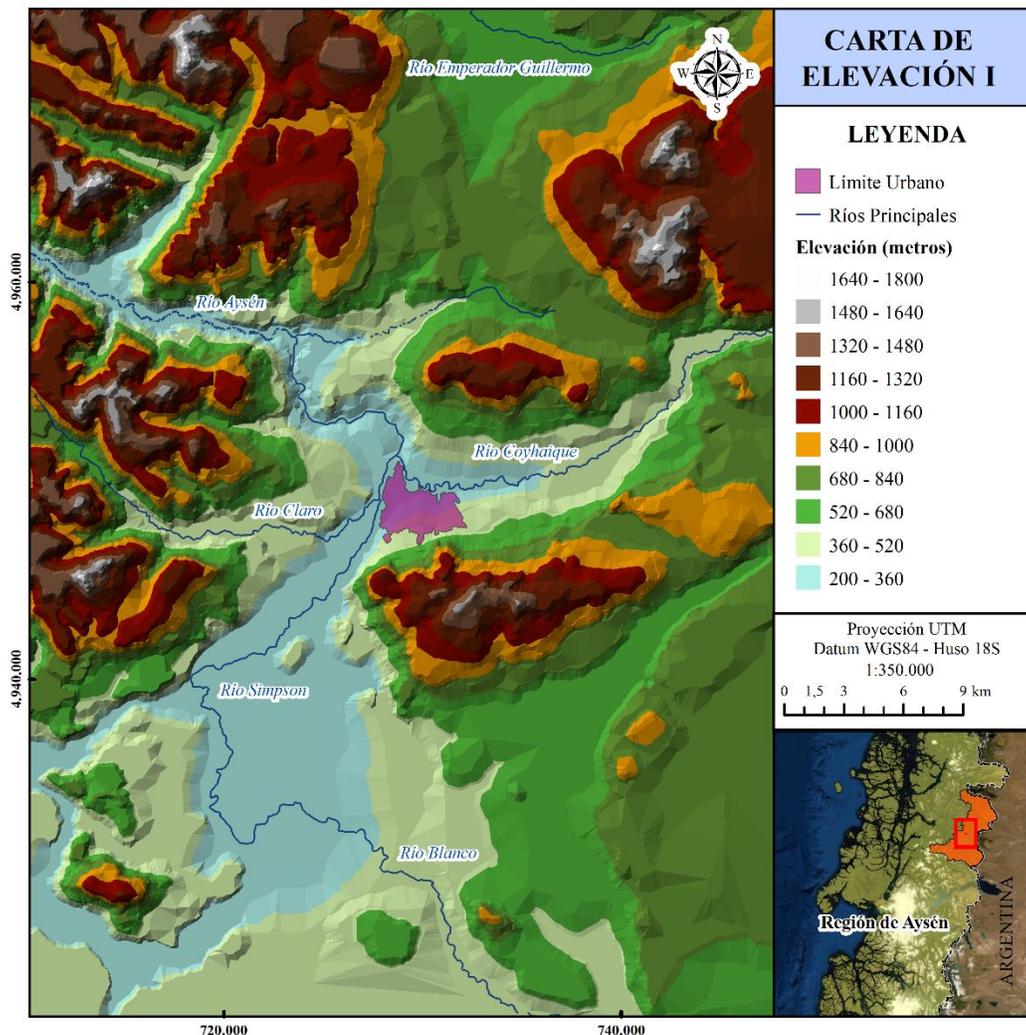
CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1- FACTORES CONDICIONANTES DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINACIÓN EN COYHAIQUE.

4.1.1- Relieve

La topografía del área circundante a los límites urbanos de la ciudad de Coyhaique es fundamental, ya que, en palabras simples, actúa como un conjunto de biombos que limitan la ventilación y consiguiente recambio de aire (Figura 25).

Figura 25: Carta de elevación para la zona aledaña a la ciudad de Coyhaique.



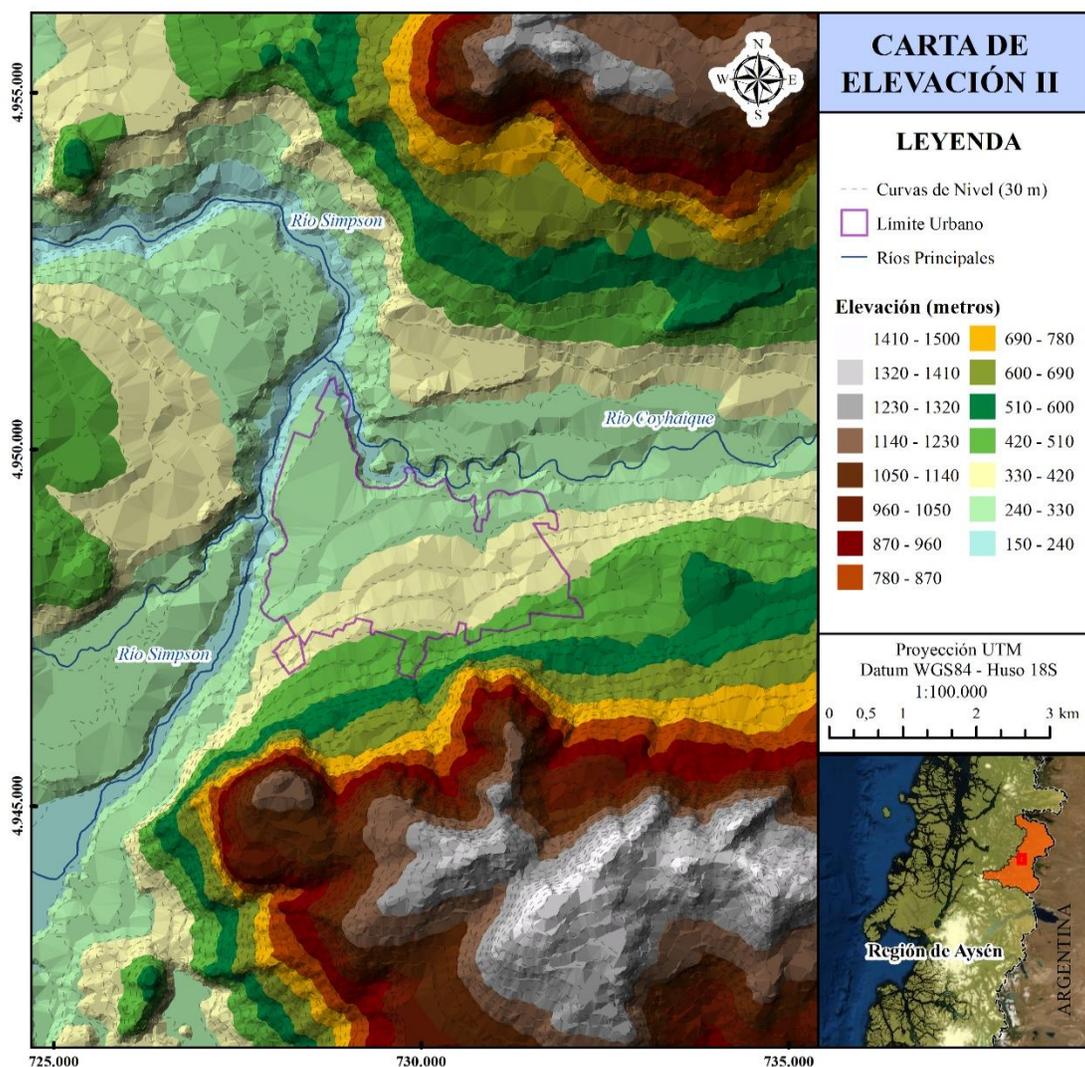
Fuente: Elaboración propia en base a SRTM (Farr, T.G. et al, 2007)

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

A simple vista, es posible evidenciar las claras diferencias que posee la ciudad de Coyhaique con la mayoría de los centros urbanos de Chile, los cuales tienden a estar ubicados en zonas costeras o en valles transversales perpendiculares a la Cordillera de Los Andes, en los márgenes de los ríos que ahí transitan. Sin embargo, la particularidad topográfica de Coyhaique se puede abordar desde dos aristas estrechamente relacionadas: una correspondiente al mencionado relieve que caracteriza al área de estudio, y otra sobre el modelado hídrico a cargo de los ríos Simpson y Coyhaique.

En primer lugar, la ciudad de Coyhaique no sólo se encuentra rodeada de un relieve accidentado que evidencia una posible disminución o alteración de las corrientes de aire para ventilar el área (tópico abordado en profundidad más adelante), sino que la misma ciudad se emplaza en un espacio con una clara pendiente positiva hacia el sureste. Eso se aprecia claramente en la Figura 26, donde se señala que su cota de elevación más baja corresponde aproximadamente a 240 metros y la más alta a aproximadamente 480 metros de altura.

Figura 26: Carta de elevación para el área próxima a los límites urbanos de Coyhaique.



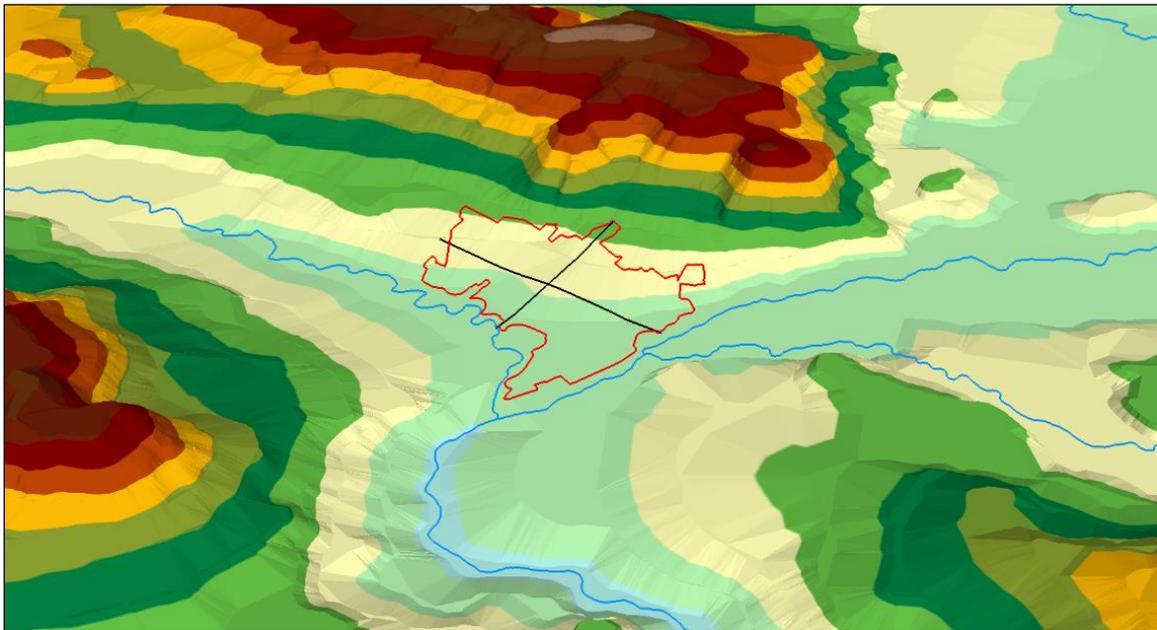
Fuente: Elaboración propia en base a SRTM (Farr, et al, 2007).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

En segundo lugar, y no menos importante, es relevante destacar la manera en que los ríos Simpson y Coyhaique, ubicados en las inmediaciones del área urbana homónima a este último, han modelado el relieve e impactando de una u otra forma en la particularidad de poseer diferencias topográficas muy notorias (ver Figura 27).

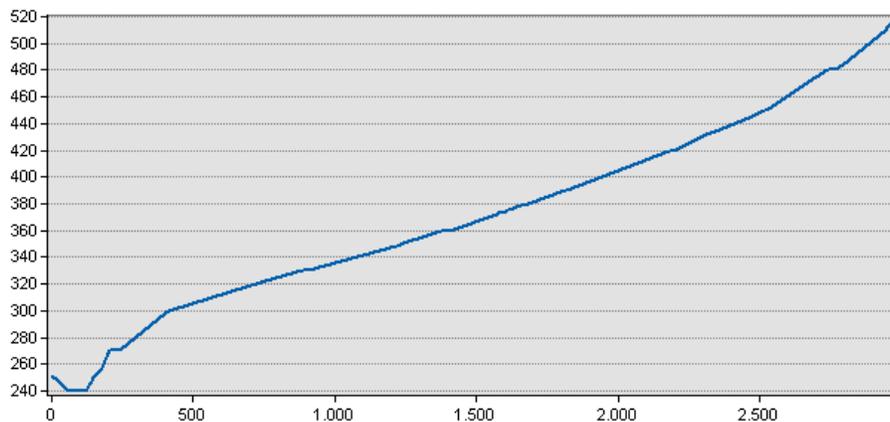
Otra manera de apreciar las diferencias topográficas de la ciudad es mediante perfiles de elevación Norte-Sur y Este-Oeste. A continuación, dichas diferencias de altitud se aprecian en la Figura 28 y Figura 29.

Figura 27. Modelo 3D de la topografía de la zona circundante de Coyhaique.



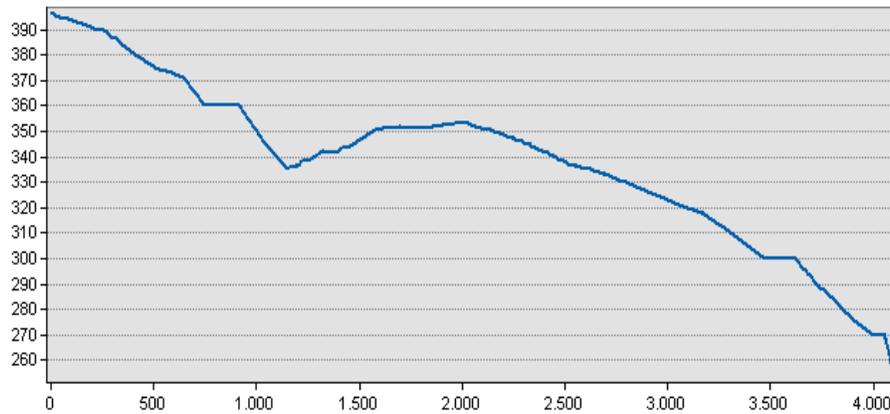
Fuente: Elaboración propia mediante uso de software ArcScene.

Figura 28. Perfil de elevación norte-sur del área urbana de Coyhaique.



Fuente: Elaboración propia en base a SRTM (Farr, T.G. et al, 2007) y ArcScene.

Figura 29. Perfil de elevación oeste-este para la zona urbana de Coyhaique.



Fuente: Elaboración propia en base a SRTM (Farr, T.G. et al, 2007) y ArcScene.

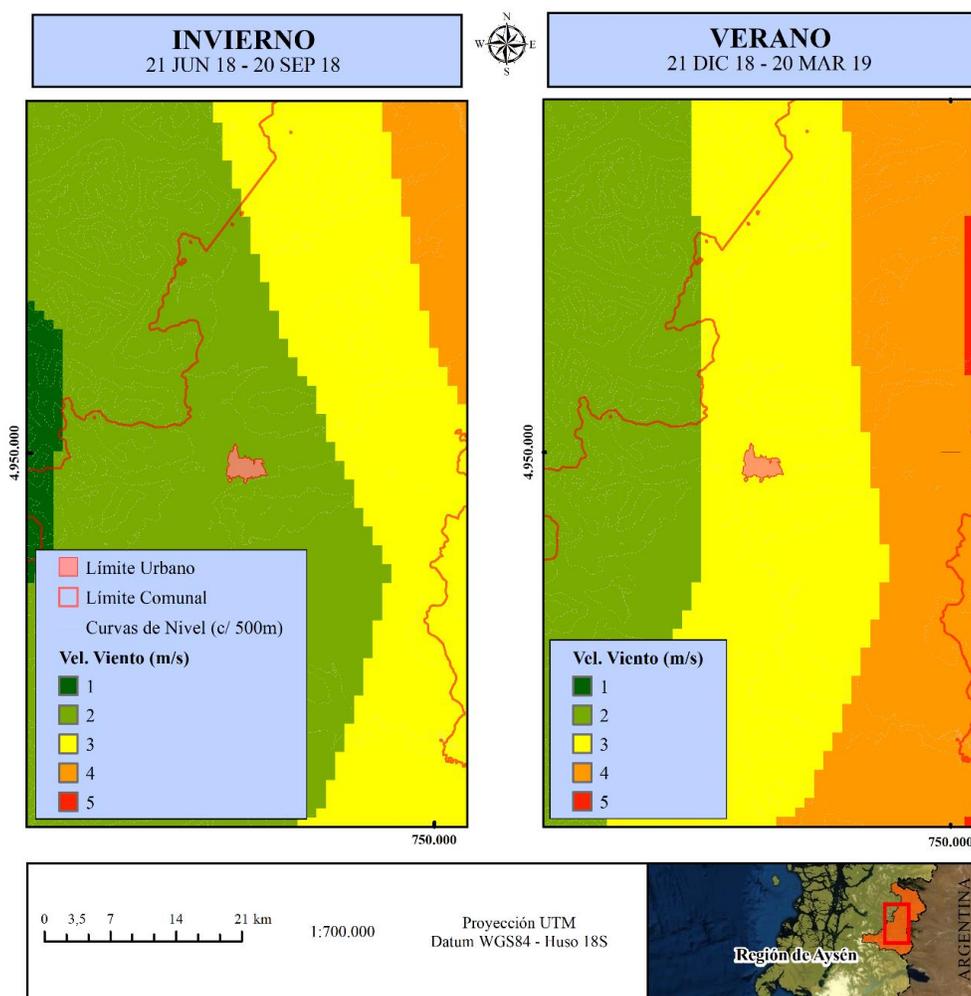
De esta forma, el relieve se transforma en una barrera natural para la ventilación del aire que se encuentra contaminado con material particulado. Sin embargo, para corroborar y profundizar más en esta aseveración, es importante añadir los resultados que acompañan a continuación relacionados a la presencia de vientos y su respectiva velocidad.

4.1.2- Viento

Si bien, el relieve se considera un elemento decisivo, su presencia y repercusión dentro de las dinámicas del material particulado en la ciudad actúan recíprocamente, junto con los vientos. Es importante destacar que hay una notable diferencia entre la velocidad promedio del viento entre las estaciones del año y es justamente en invierno donde hay una menor velocidad promedio y una mayor acumulación de contaminación por material particulado. A continuación, en la Figura 30, se presentan gráficamente las velocidades promedio para las estaciones de invierno de 2018 y verano de 2018-2019 de acuerdo con el modelo GLDAS (*Global Land Data Assimilation*) de NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) de resolución $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ($24,8 \text{ km}^2$) resampleado a 1 km^2 .

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 30: Carta de vientos promedio en invierno y verano más reciente para la comuna de Coyhaique y alrededores.



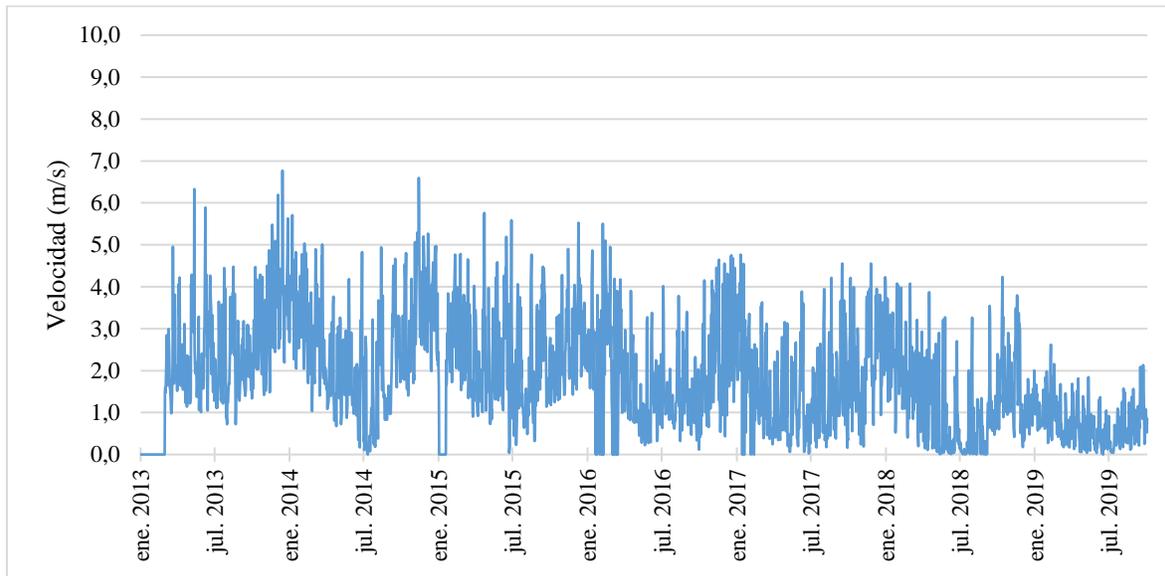
Fuente: Elaboración propia en base a Beaudoin, Rodell, & NASA/GSFC/HSL (2019).

En la figura anterior es posible destacar como el accidentado relieve que caracteriza el sector poniente de la comuna, detallado en el punto anterior, repercute directamente en las velocidades del viento para ambas estaciones en ese sector; y también es claro que, mientras en invierno se alcanzó - en el entorno al límite urbano - una velocidad del viento promedio de hasta casi 2 metros por segundo, en verano se alcanzó un máximo promedio de 3 metros por segundo. Entonces, además de la diferencia por las características topográficas, también hay una disminución sutil según la estación.

Sin embargo, si consideramos los registros históricos de la velocidad del viento según las estaciones de monitoreo del SINCA, se obtienen datos que aclaran de mejor manera las diferencias de este factor geográfico que varía claramente según estación del año (ver Figura 31).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 31. Registros diarios históricos de velocidad de viento en Estación Coyhaique I.



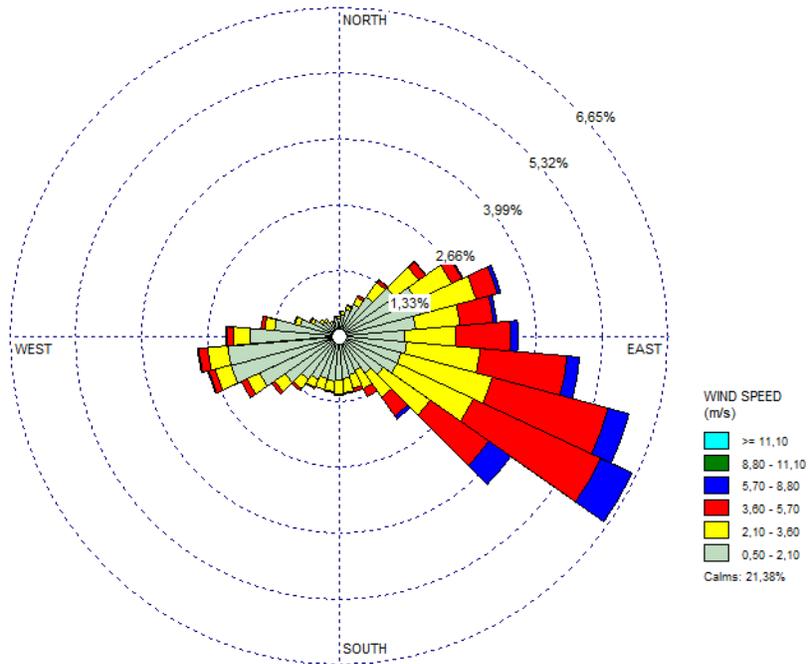
Fuente: Elaboración propia en base a SINCA.

De acuerdo con la figura anterior, se aprecia que - en general - las mayores velocidades de viento se alcanzan en épocas estivales, promediando unos 3,5 metros por segundo, y las menores en invierno (promediando unos 1,4 metros por segundo). También es interesante la tendencia a la disminución en velocidades desde 2013 a la actualidad, como también las alzas invernales concentradas, por ejemplo, durante 2015. En pocas palabras, las velocidades promedio de vientos de los inviernos en Coyhaique son bajísimas; convirtiendo a este factor en uno de los más importantes dentro de la poca dispersión de contaminantes en el lugar.

En cuanto a la dirección del viento, es posible evidenciar diferencias tanto a nivel histórico por año completo como también considerando solo los inviernos entre 2010 y 2019. Respecto al espectro histórico, en las siguientes figuras, se evidencia que la tendencia de la dirección es este, aunque con sutiles diferencias entre las estaciones Coyhaique I (ver Figura 32) y Coyhaique II (ver Figura 33). De acuerdo con esto, en la estación Coyhaique II las velocidades promedio del viento son mayores y hay menos calmas que en Coyhaique I. Es decir, habría mejor ventilación.

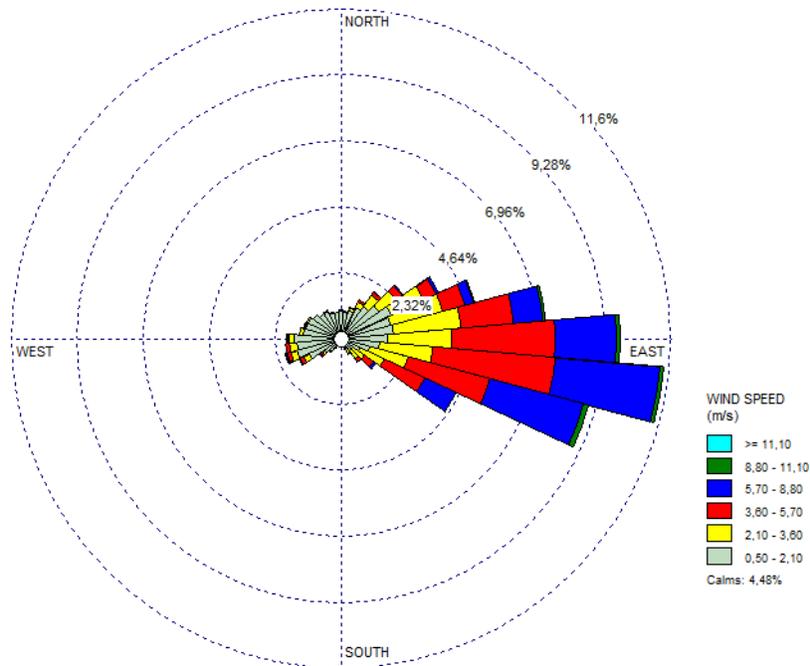
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 32. Rosa de vientos histórica (2010-2019) según Estación Coyhaique I.



Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019) y software WRPLOT.

Figura 33. Rosa de vientos histórica (2010-2019) según Estación Coyhaique II.

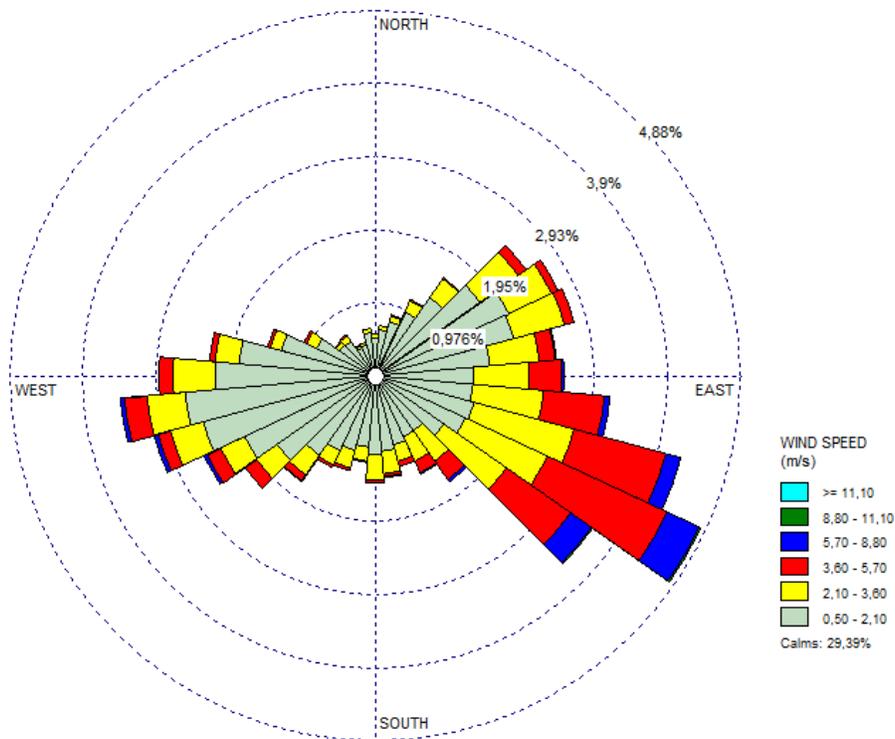


Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019) y software WRPLOT.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

En cuanto a los datos históricos de todos los inviernos entre 2010 y 2019, las diferencias son más evidentes tanto si se comparan con las figuras anteriores como entre las estaciones Coyhaique I (ver Figura 34) y Coyhaique II (ver Figura 35). En ambos casos deja de existir el predominio de la dirección este y se aprecia la presencia de vientos de otras direcciones. Sin embargo, nuevamente se aprecian diferencias tales como que en Coyhaique I hay presencia de vientos de más direcciones, pero de velocidades más suaves, mientras que en Coyhaique II hay un fuerte protagonismo de vientos dirección este y con mayores velocidades.

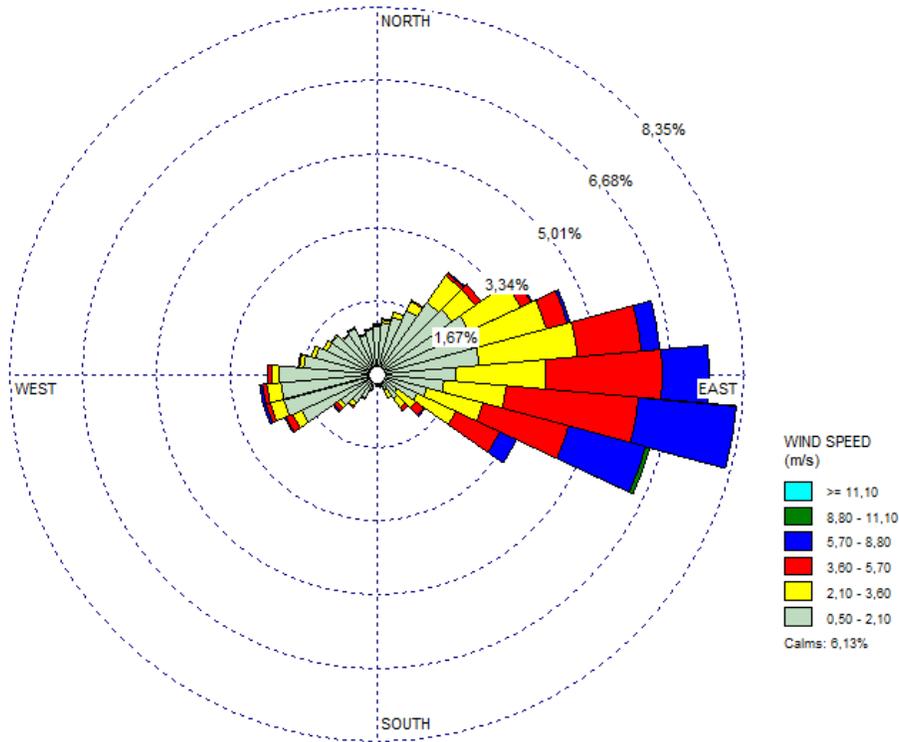
Figura 34. Rosa de vientos para todos los inviernos desde 2010 a 2019 según Estación Coyhaique I.



Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019) y software WRPLOT.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

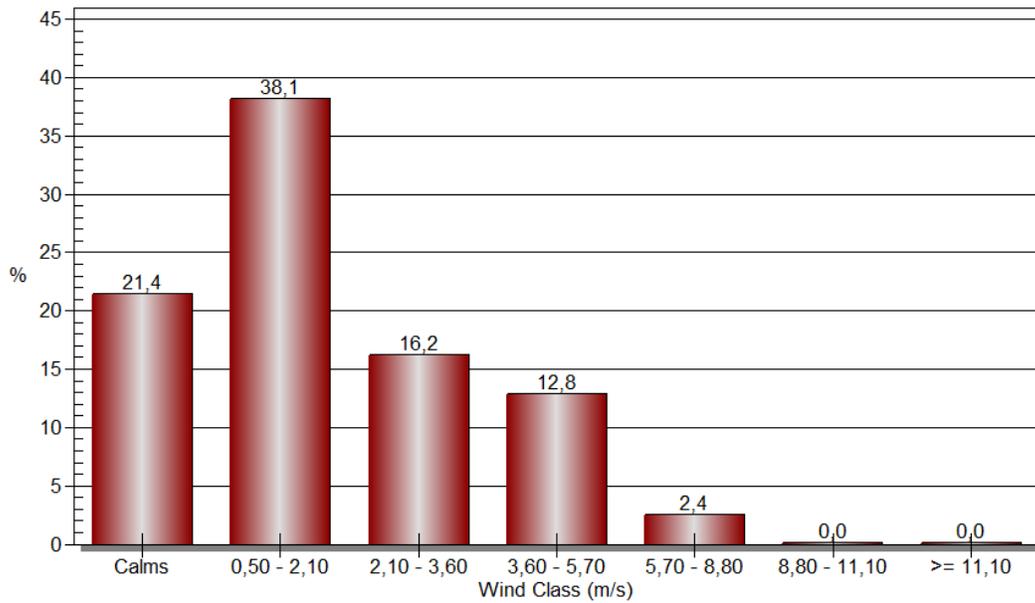
Figura 35. Fosa de vientos para todos los inviernos desde 2010 a 2019 según Estación Coyhaique II.



Por último, y en la misma línea, también es posible analizar la distribución de frecuencia de las velocidades. A nivel histórico, las velocidades iguales o menores a 2,1 m/s ocupan cerca de 38% del total de eventos registrados, aunque - en complemento con las rosas de los vientos históricas - es posible observar las diferencias entre estaciones de otra manera. Mientras que en la estación Coyhaique I la tabla de frecuencias muestra que las calmas corresponden a un 21,4% y que vientos entre 5,7 y 8,8 m/s ocupan un 2,4% (ver Figura 36), en la estación Coyhaique II los valores corresponden a 4,5% y 12,2% (ver Figura 37), respectivamente.

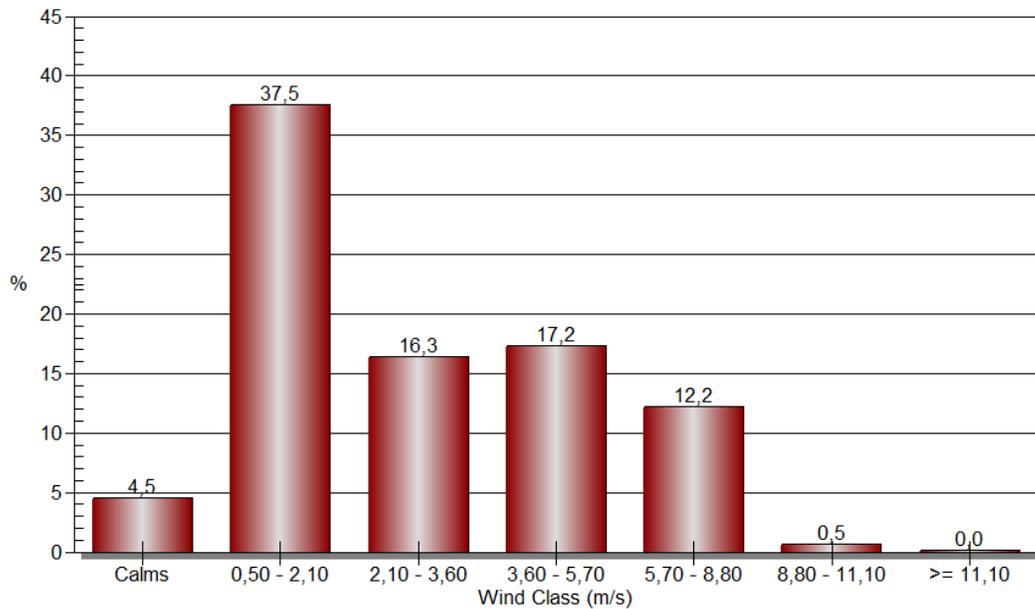
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 36. Distribución de frecuencia de vientos histórica (2010-2019) según Estación Coyhaique I.



Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019) y software WRPLOT.

Figura 37. Distribución de frecuencia de vientos histórica (2010-2019) según Estación Coyhaique II.

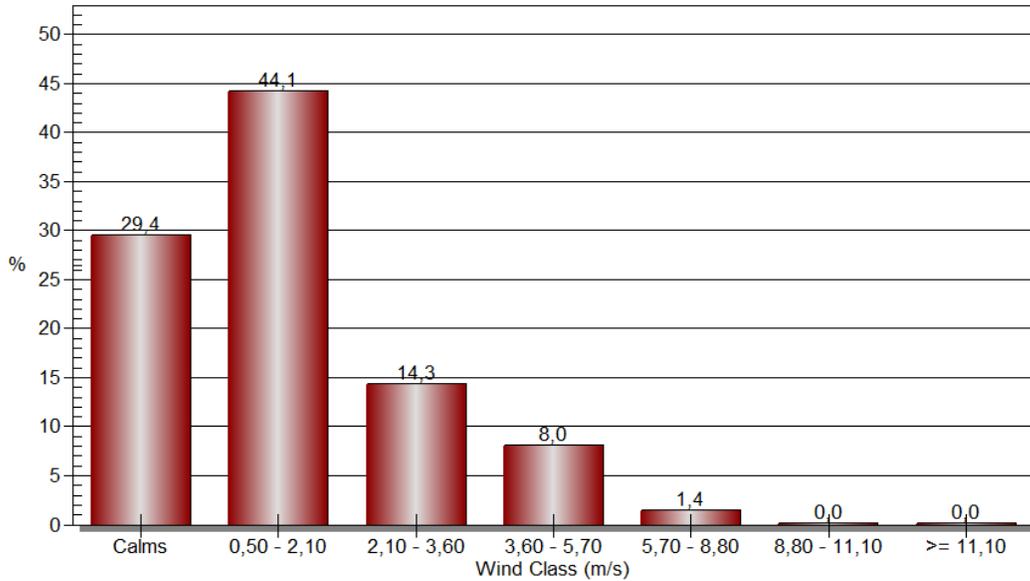


Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019) y software WRPLOT.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

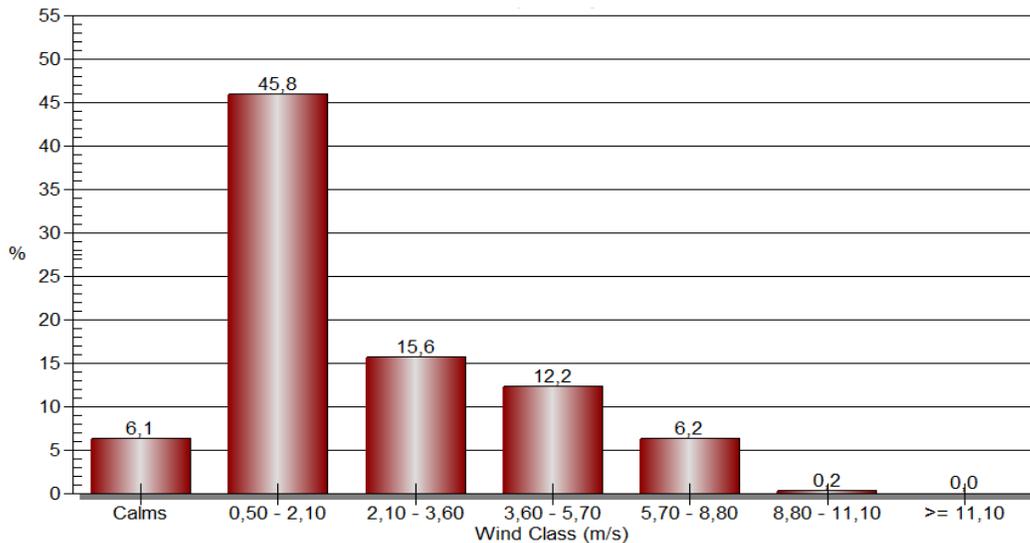
Por otro lado, en cuanto a los registros históricos invernales, existe una tendencia general donde más del 50% de las velocidades de los vientos registrados en ambas estaciones para dicho periodo son iguales o menores a 2,1 metros por segundo. No obstante, tal como se ha relatado en los párrafos previos, se reitera la diferencia entre los registros de las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II; siendo la primera la cual concentra las velocidades más bajas (ver Figura 38 y Figura 39).

Figura 38. Distribución de frecuencia de vientos para todos los inviernos (2010-2019) según Estación Coyhaique I.



Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019) y software WRPLOT.

Figura 39. Distribución de frecuencia de vientos para todos los inviernos (2010-2019) según Estación Coyhaique II.

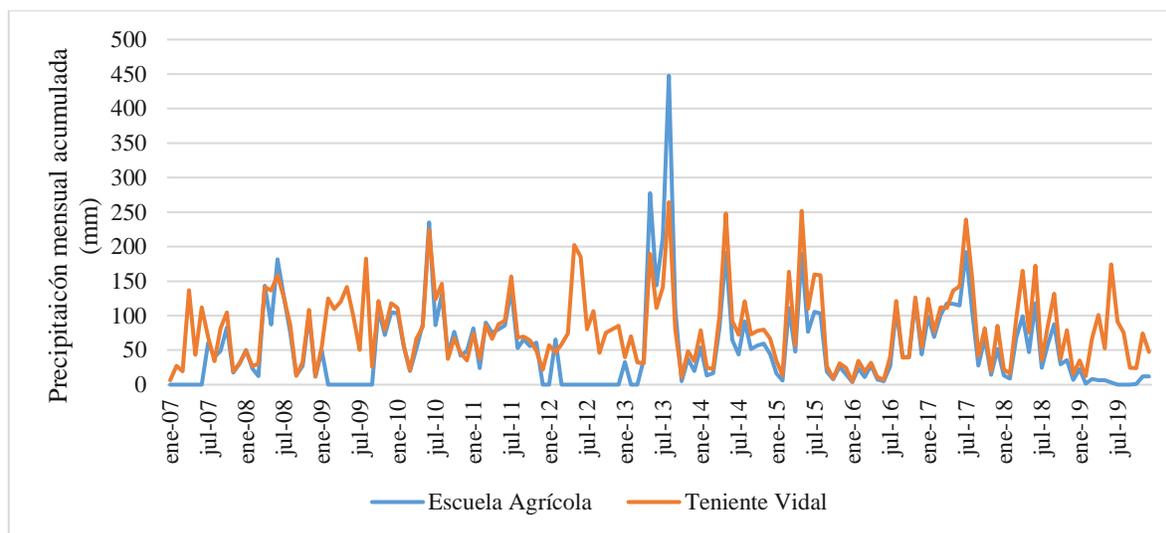


Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019) y software WRPLOT.

4.1.3- Precipitaciones

Otro factor geográfico que juega un papel importante dentro de la acumulación de contaminación son las precipitaciones. En Coyhaique, ciudad emplazada en una región que se caracteriza por ser una localidad lluviosa, las lluvias se hacen presente a lo largo de todo el año, aunque con diferencias en su intensidad según sea primavera, verano, otoño o invierno. A continuación, en la Figura 40 (ver Anexo 4), se presentan los datos históricos mensuales promedios de la DGA Escuela Agrícola (EA) y Teniente Vidal (TV). Para considerar, y en cuanto a ubicación geográfica, EA se ubica más cerca del área urbana (ver Anexo 3).

Figura 40. Evolución histórica de las precipitaciones acumuladas mensuales para Estación DGA Escuela Agrícola y Estación DGA Teniente Vidal entre 2007 y 2019.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de DGA en CR2 (2019).

Entonces, respecto a la figura anterior, es posible apreciar estadísticamente la fuerte presencia de las precipitaciones en el área de estudio y que los registros de precipitaciones en la Estación DGA Teniente Vidal (ubicada fuera del radio urbano) tienden a ser sutilmente mayores que los de la Estación DGA Escuela Agrícola.

4.1.4- Inversión térmica

Tal y como se esperaba, la inversión térmica juega un papel preponderante en la acumulación y concentración del material particulado de la zona. Si bien, este fenómeno se presenta en reiteradas ocasiones en el año por ser un proceso condicionado por las características geográficas del lugar (inversión térmica radiativa), para demostrar esto de manera concreta, a continuación, se utiliza un ejemplo directo del Terreno 2 del día 7 de julio de 2019. La elección de este día para describir la inversión térmica se enmarca por la información sinóptica obtenida previamente para desarrollar el tercer objetivo de esta investigación.

Para poder contextualizar mejor este día a considerar, a continuación, se acompaña la Tabla 17 con las principales características del día 7 de julio de 2019, como también de la época invernal en

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

diferentes años, y así contextualizar correctamente el día a abordar y ejemplificar el fenómeno de inversión térmica.

Tabla 16. Tabla de datos sinóptica para los inviernos entre 2015 y 2019, y el día 07/07/2019.

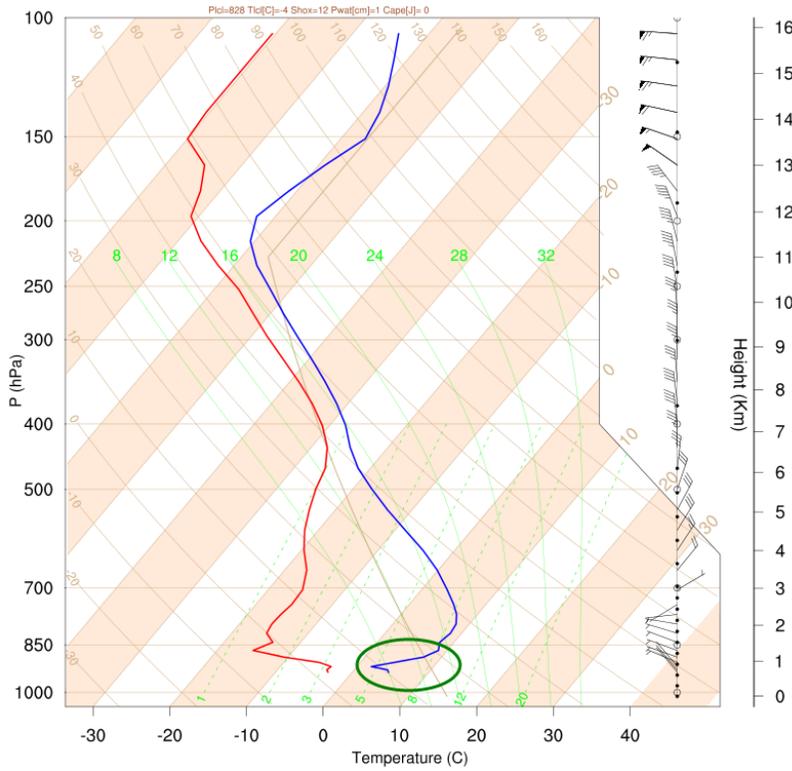
	MP10	MP2.5	Temp. Media (°C)	Humedad (%)	Viento (m/s)
Invierno 2015	104,2	81,9	4,7	72,3	2,2
Invierno 2016	125,8	100,9	5,3	71,5	1,4
Invierno 2017	94,2	75,2	4,6	72,1	1,4
Invierno 2018	139,0	104,7	4,1	70,4	0,6
Invierno 2019	80,3	73,4	4,6	70,7	0,6
7 de julio de 2019	245,0	242,0	4,0	80,3	0,05

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

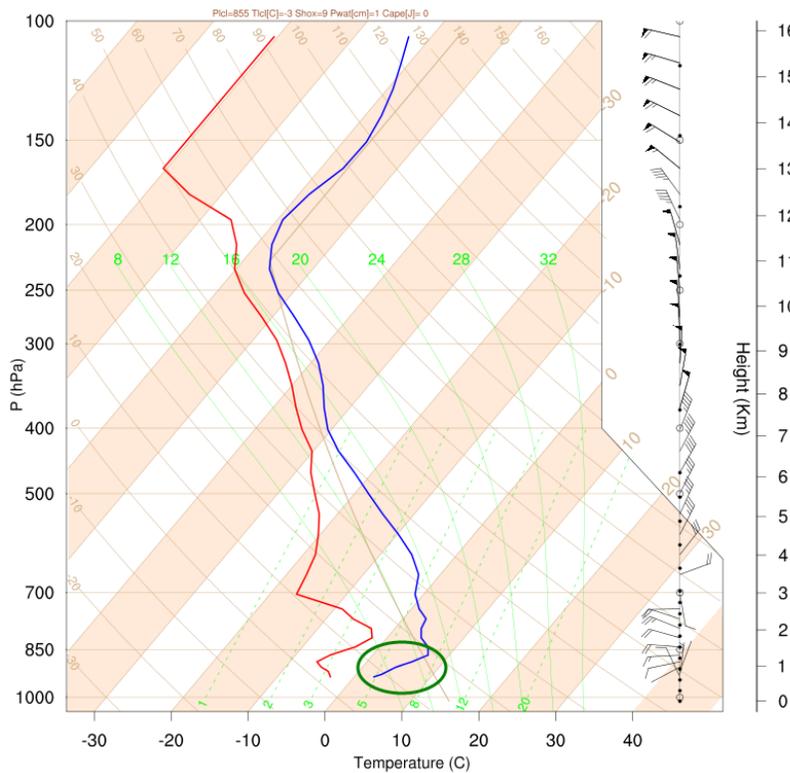
En general, los últimos cinco inviernos en Coyhaique se caracterizan por tener una temperatura media de entre 4 a 5 grados Celsius. Además, se puede considerar que dicha estación tiende a poseer un porcentaje de humedad relativamente bajo y con casi nula presencia de viento. En cuanto al día 7 de julio de 2019, se caracterizó por alcanzar altos niveles de contaminación, seguir la tendencia de la temperatura horaria media, y poseer un porcentaje considerablemente mayor de humedad que las estadísticas para los inviernos pasados. Si bien llama la atención la eventual relación entre la concentración de material particulado y el porcentaje de humedad, esta se desarrollará en el siguiente resultado de la investigación.

Respecto al fenómeno de inversión térmica del día de estudio, a continuación, se presentan cuatro perfiles WRF (*Weather Research and Forecasting*) que corresponden a modelos meteorológicos de temperatura, altitud y presión atmosférica para el día ya mencionado (Figura 41). Son cuatro perfiles donde cada uno representa una hora de medición en específico: (a)12, (b)15, (c)18 y (d)21 horas, respectivamente. Para identificar el fenómeno se debe encontrar una tendencia de aumento de temperatura (línea de color azul) conforme se aleja de la superficie, ya que es justamente esa tendencia la que rompe con lo que suele suceder térmicamente a medida que nos elevamos en la atmósfera.

Figura 41. Perfiles WRF de presión, temperatura y altitud.

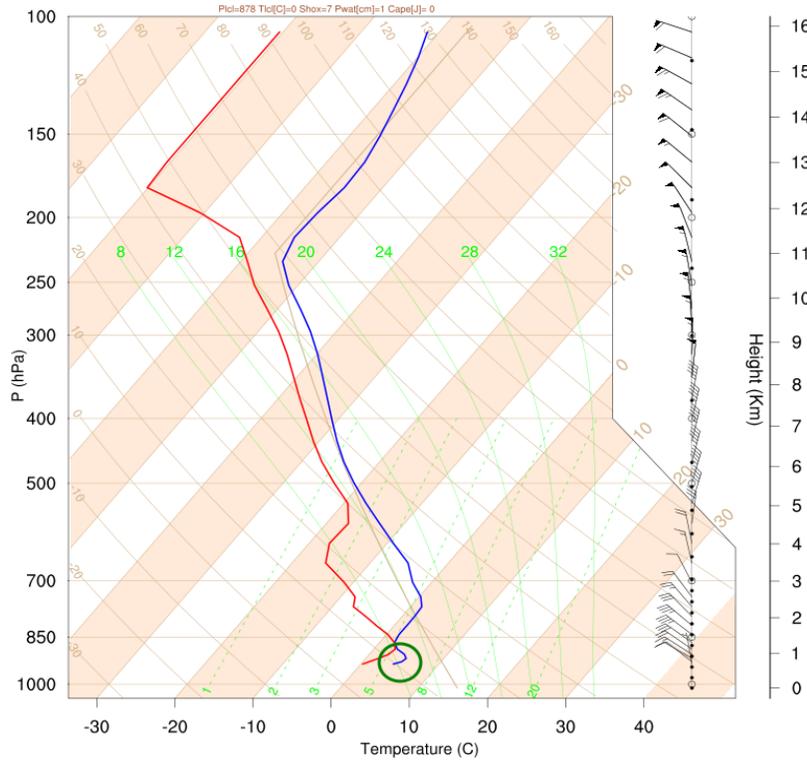


Perfil (a).

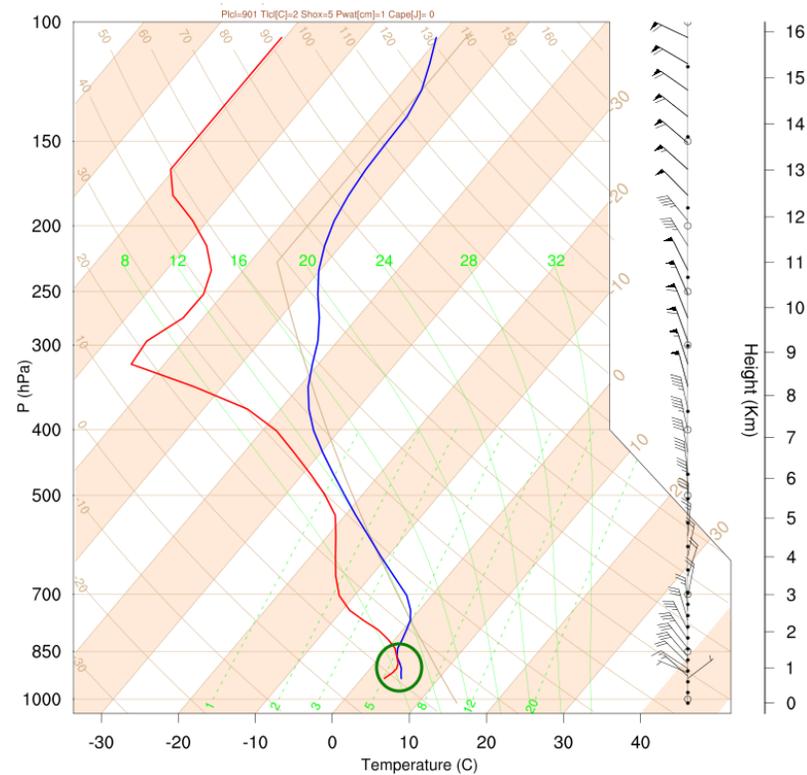


CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Perfil (b).



Perfil (c).



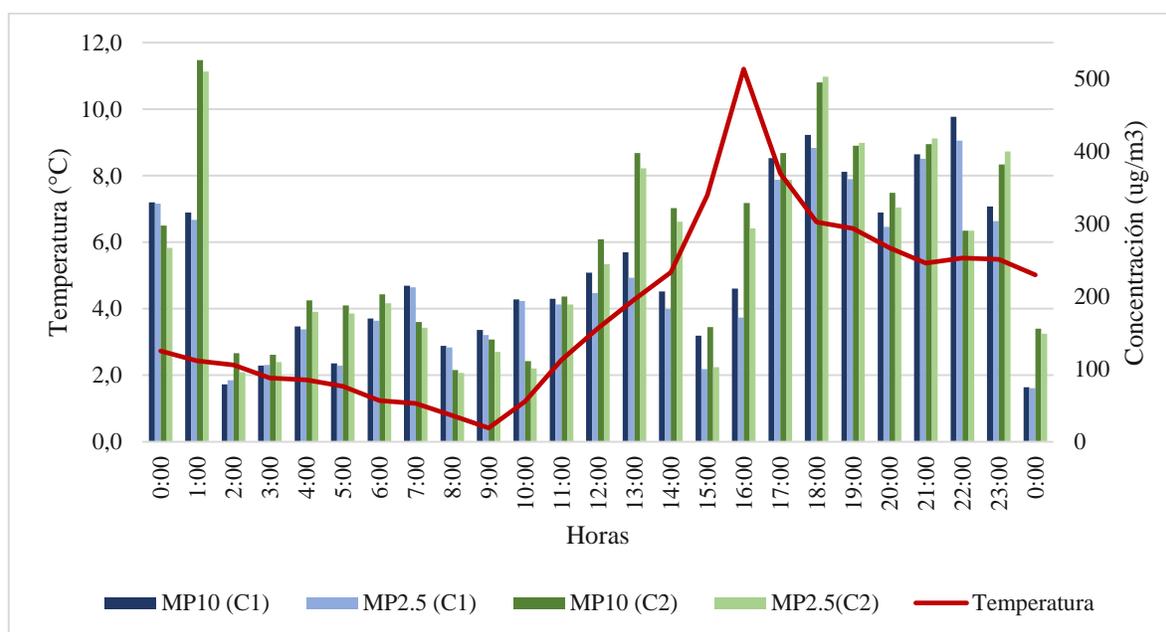
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Perfil (d).

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile (2019).

El aspecto más llamativo de los perfiles WRF previos, es el desarrollo evidente del fenómeno de inversión térmica a partir del perfil (b) de las 15 horas, el cual corresponde al momento horario donde - por pérdida radiativa del suelo o por acción de un sistema de alta presión – se comienza a perder temperatura provocando que el aire inmediatamente cercano a la superficie sea más frío y pesado. Dicho esto, es posible evidenciar la relación entre el comportamiento del perfil descrito y la contaminación al considerar la Figura 42 (ver Anexo 6). Esta corresponde a un gráfico con la evolución horaria desde la medianoche del 7 de julio de 2019 hasta la medianoche del 8 de julio de 2019 de la temperatura y el MP10, donde desde las 16 horas se aprecia un abrupto descenso de la temperatura y un consiguiente aumento de la contaminación. Si bien es esa hora señalada donde comienzan a elevarse los niveles de contaminación, es importante no omitir que desde las 17 horas en adelante – cuando las personas comienzan a retornar a sus hogares después del trabajo – se encienden los calefactores domiciliarios conforme comienzan a descender las temperaturas con la puesta de sol.

Figura 42. Comportamiento horario de la temperatura, MP10 y MP2.5 desde la medianoche del 07 de julio de 2019 hasta la medianoche del 08 de julio de 2019 en las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II.



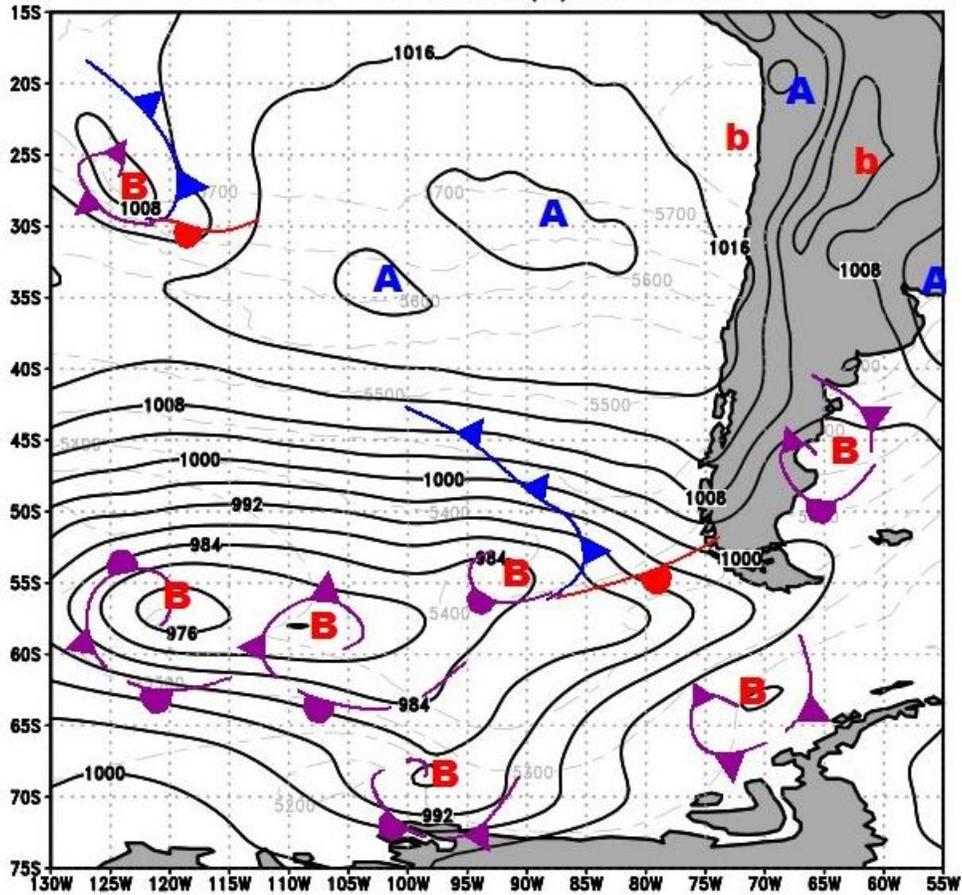
Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

Según lo anterior, se observa la existencia de una pérdida radiativa importante, condicionada principalmente por la topografía del lugar, lo cual genera tanto un enfriamiento del aire próximo a la superficie, como también la disminución del transporte de materiales en el aire dado su aumento de densidad y su estado térmico. Sin embargo, no se puede omitir el rol de la presión atmosférica en el fenómeno de la inversión térmica. Por lo mismo, en la Figura 43, se acompaña una carta de presión para el día 7 de julio, donde se observa que Coyhaique está inserta en el área de influencia de un sistema de alta presión (mejor conocida como dorsal anticiclónica) y, cómo se menciona previamente

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

en este documento, dichos sistemas se caracterizan por generar un descenso de aire frío a la superficie, limitando las corrientes de aire, por ende, el transporte de material en la atmósfera.

Figura 43. Carta de presión pronosticada para el día 7 de julio de 2019.

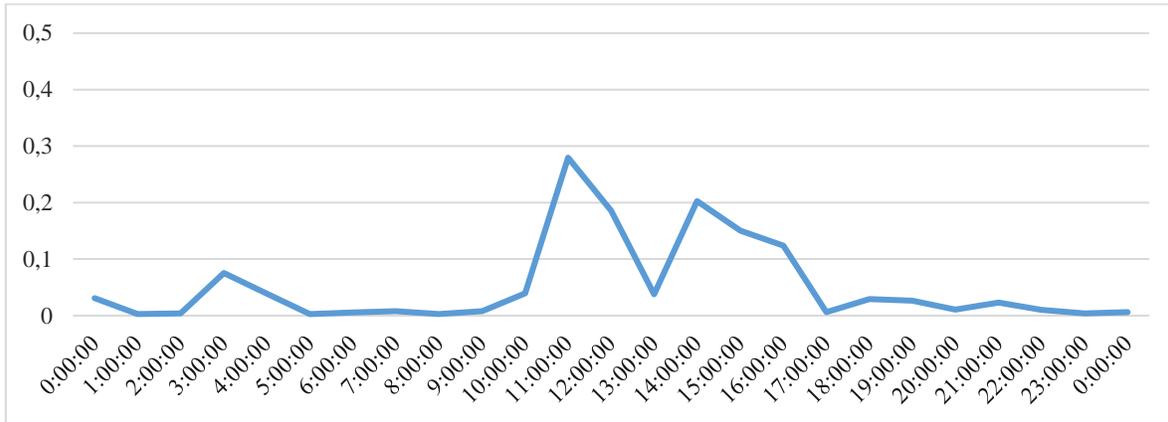


Fuente: DIRECTEMAR (2019)

Y, para complementar en lo último señalado sobre los vientos, en la Figura 44 se observa la casi nula presencia de éste en el día de 7 de julio de 2019.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 44. Comportamiento horario de la velocidad del viento para el día 7 de julio de 2019.



Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

Para finalizar esta sección, a continuación, se acompañan la Figura 45 y Figura 46, obtenidas durante el recorrido de este día de estudio, para medir y dimensionar cómo estaba el aire de la ciudad. A simple vista parece neblina, pero era una masa de humo que se desplazaba lentamente sobre la ciudad y cuyo movimiento paulatino era posible de observar bajo las luces del alumbrado público.

Figura 45. Fotografía de la ciudad de Coyhaique desde la Reserva Nacional Coyhaique obtenida el día 7 de julio de 2019 a las 13:31 horas.



Fuente: Eduardo Gallardo Portillo.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 46. Fotografía de una cancha de fútbol en la esquina de Francisco Bilbao con Los Pilcheros (730450.89 UTM E / 4948434.12 UTM N) obtenida el día 7 de julio de 2019, a las 22:51 horas.



Fuente: Eduardo Gallardo Portillo.

4.2- COMPORTAMIENTO HISTORICO DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES METEOROLÓGICAS PARA LA CIUDAD DE COYHAIQUE.

El comportamiento de la contaminación por material particulado en Coyhaique se caracteriza, tanto por superar los niveles establecidos por recomendaciones internacionales como la de OMS (ver Tabla 17) a nivel anual y diario, como también por evidenciar su relación antrópica con las horas en las que tiende a tener una mayor concentración. Además, existen claras relaciones entre la concentración de contaminación y factores como la lluvia, humedad, entre otros.

En este resultado, se ahonda en describir y analizar el comportamiento temporal del material particulado a modo de visualizar eventuales patrones o relaciones como las descritas.

Tabla 17. Recomendaciones OMS sobre exposición media anual y media diaria.

	Media anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Media diaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MP10	20	50
MP2.5	10	25

Fuente: OMS (2005)

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

4.2.1- Episodios críticos

Los episodios críticos y su cuantificación son una manera didáctica – y enmarcada en la normativa ambiental vigente – para comprender de otra forma la contaminación por material particulado de la ciudad. A continuación, en la Tabla 18, se presentan los rangos de contaminación y su respectiva categoría según la normativa nacional.

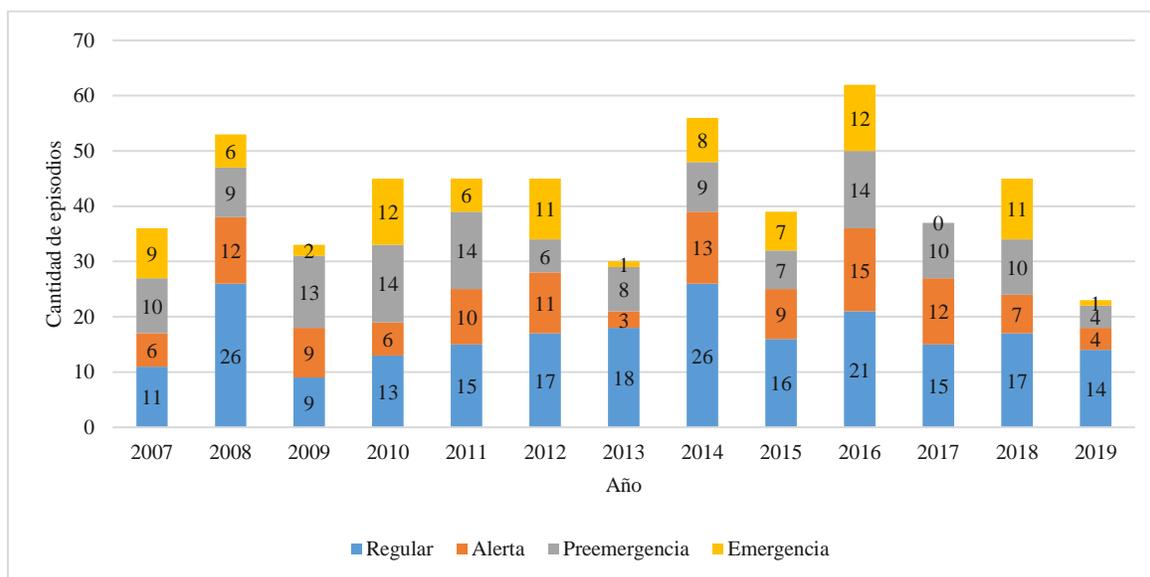
Tabla 18. Categorías de calidad de aire para Coyhaique.

Calidad de Aire	MP10 (ug/m ³)	MP2.5 (ug/m ³)
Bueno	0 -149	0 – 50
Regular	150 – 194	51 – 79
Alerta	195 – 239	80 – 109
Preemergencia	240 – 329	110 – 169
Emergencia	> 330	> 170

Fuente: Ministerio del Interior (2019).

Ahora, respecto al registro de la cantidad de episodios críticos en que se supera la norma, según las categorías señaladas, que se han presentado en la ciudad de Coyhaique, es difícil realizar una aseveración tajante en cuanto a si existe o no una tendencia a la disminución de estos. Mientras que los episodios críticos relacionados a MP10 (ver Figura 44) no parecen tener una tendencia clara, aquellos ligados al MP2.5 (ver Figura 45) sí muestran una disminución baja y paulatina de los episodios de emergencia; sin embargo, las categorías regular, alerta y preemergencia parecen no estar respondiendo o no verse afectados por las medidas de mitigación señaladas ejecutadas tras la puesta en marcha del PDA del año 2016.

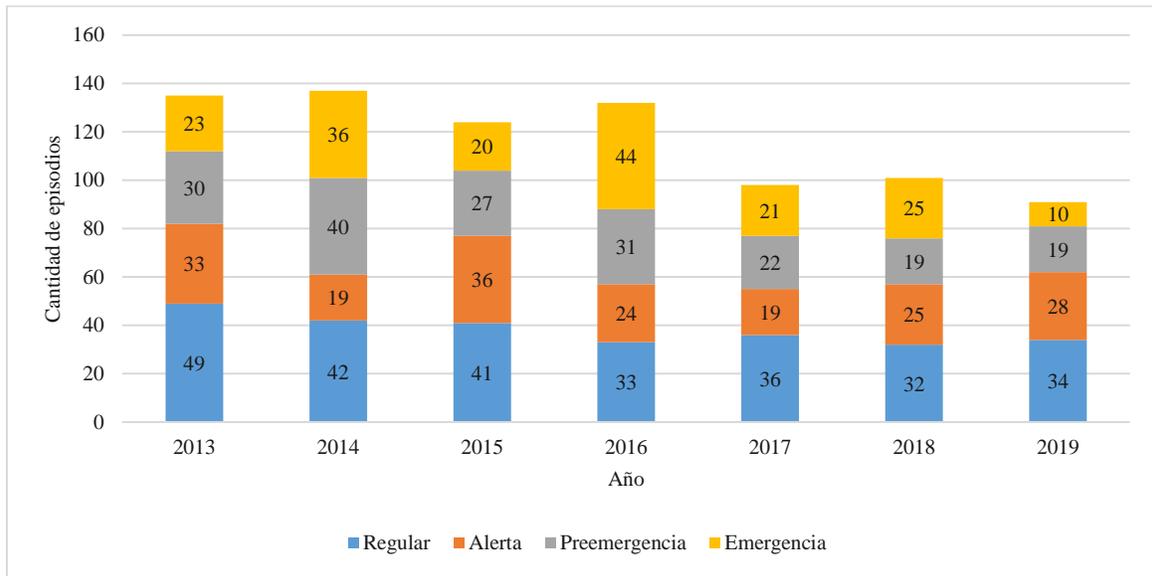
Figura 47. Cantidad de episodios de contaminación por MP10 según categoría.



Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 48. Cantidad de episodios de contaminación por MP2.5 según categoría.

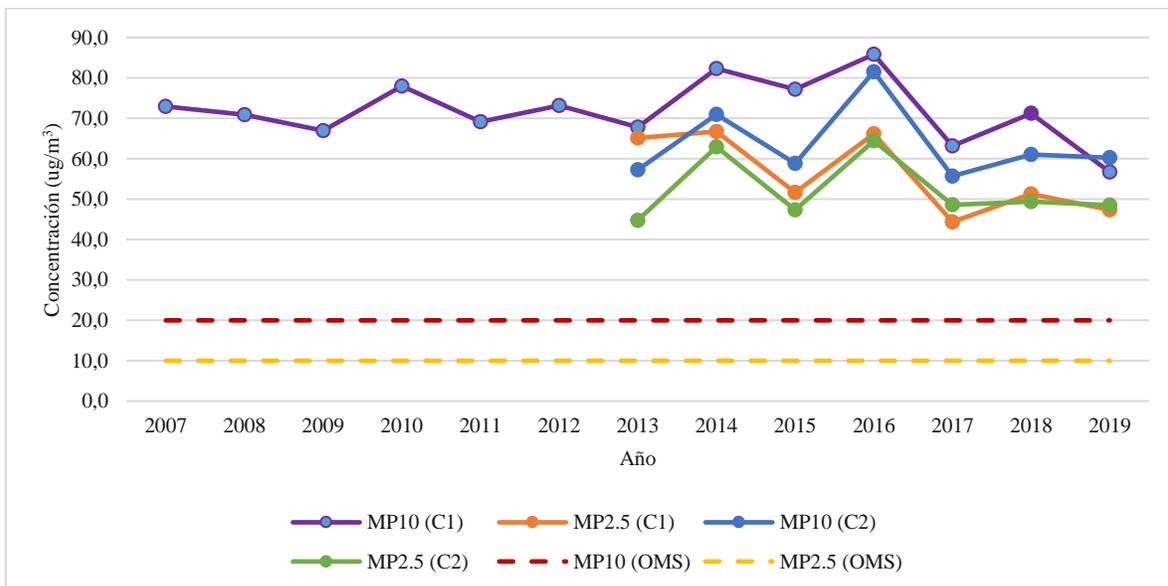


Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

4.2.2- Media anual histórica.

En primer lugar, en cuanto a la concentración promedio anual de material particulado, es importante recordar que, según la OMS (2005), la media anual recomendada para para MP10 y MP2.5 corresponde a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Estos valores recomendados distan bastantes de la realidad que vive Coyhaique en cuanto a su promedio anual histórico, tal como se puede apreciar en la Figura 49.

Figura 49. Media anual de contaminación por MP10 y MP2.5 para Coyhaique.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de OMS (2005) y SINCA (2019).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

El gráfico anterior entrega puntos interesantes respecto a la dimensión temporal de la contaminación local. Por un lado, se aprecia que, si bien es un problema presente desde antes de 2007, el valor promedio anual supera con creces, hasta por cuatro veces en el caso del MP10, la recomendación internacional, que estipula un umbral respecto a los efectos en la salud de la población. Ahora, sobre la normativa nacional, esta asume que el MP2.5 tiene una tendencia a la baja considerando como piso la categoría Regular (entre 51 y 79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que el MP10 y sus variaciones anuales sólo transitan por la categoría Bueno (entre 0 y 149 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Por otro lado, ahora considerando las dos categorías de material particulado y las dos estaciones de monitoreo, también se observan dos hitos en cuanto a los niveles de contaminación alcanzados en los años 2014 y 2016. Ahora, también es relevante señalar la interesante diferencia que existe según la estación de medición, considerando que la distancia que separa una de la otra no sobrepasa los 800 metros. La mayor diferencia alcanza casi los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el MP10 en la estación de medición Coyhaique I, aunque también es posible identificar otras de menor envergadura para los otros años.

Impacto del Plan de Descontaminación Ambiental de 2015.

El primer PDA se puso en marcha en octubre del año 2015 (ver Tabla 11) e implicó, en términos prácticos como los señalados en la Figura 49, que existiera una disminución considerable de los niveles de contaminación a partir del año 2017. La situación del año 2016 fue especial ya que era muy próximo al momento del arranque de este PDA y también fue un año particularmente poco lluvioso (ver Figura 40). Por lo tanto, los niveles de contaminación del 2016 fueron los más altos registrados desde que se comienza el monitoreo formal del material particulado.

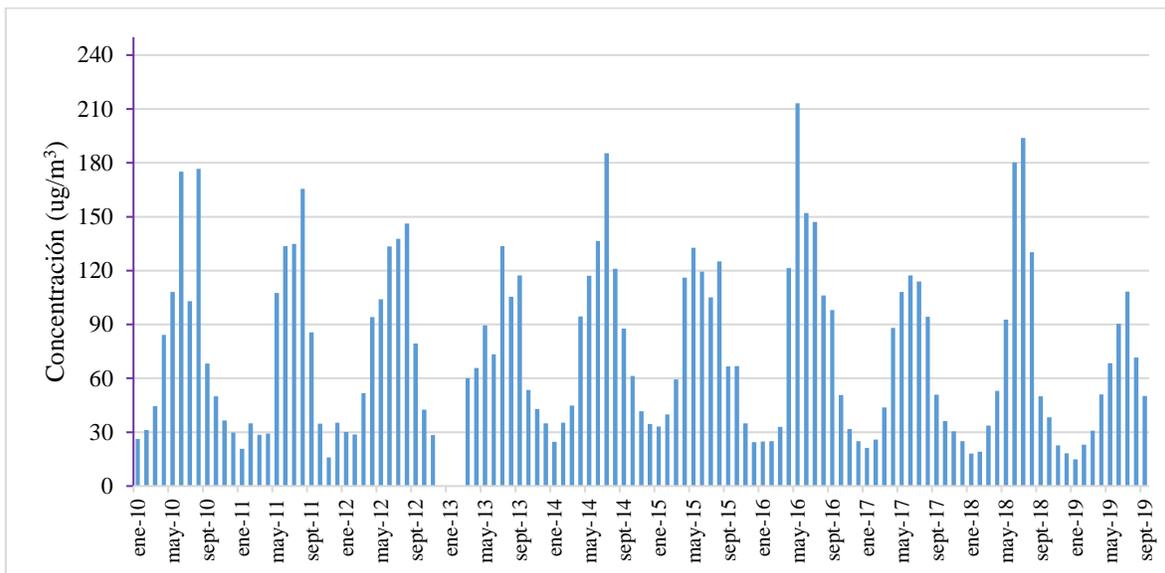
4.2.3- Media mensual histórica.

Otra manera de visualizar el comportamiento de la contaminación por material particulado es mediante la observación de la media mensual histórica de los registros de MP10 y MP2.5. Es importante añadir que según la OMS (2019) no existen parámetros guía para establecer recomendaciones respecto a estos agentes contaminantes a nivel mensual, al igual que para la normativa nacional.

En el caso del MP10, se reitera la afirmación de la presencia estival de este agente contaminante. Es decir, mientras es claro el aumento y *peaks* durante épocas de invierno a lo largo de los años, sigue siendo estable el nivel que alcanza dicho parámetro en verano con valores cercanos a los 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio mensual (ver Figura 50).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

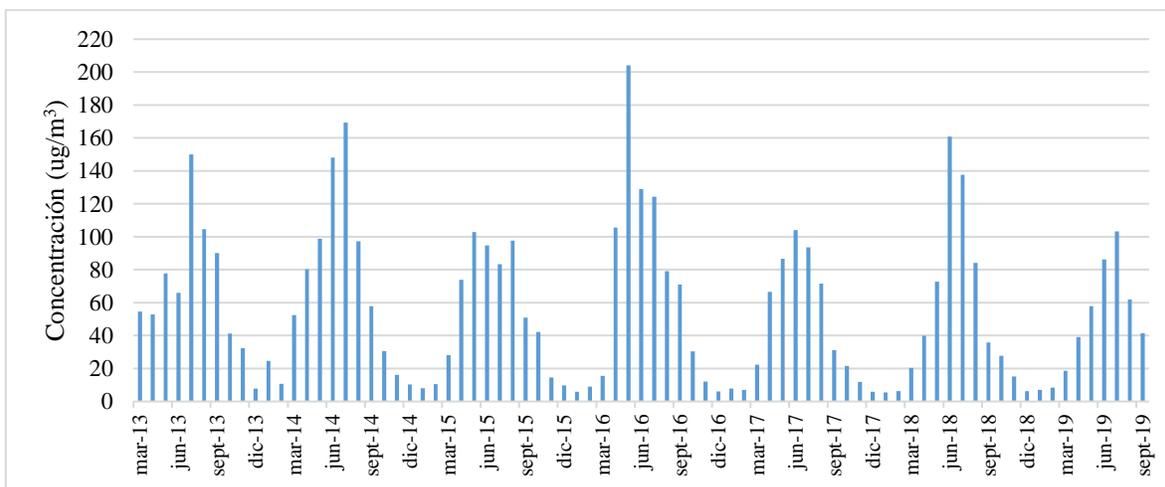
Figura 50. Promedio mensual histórico de la contaminación por MP10 en estación Coyhaique I.



Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

Respecto al comportamiento histórico mensual del MP2,5, éste es similar al descrito en el caso del MP10, ya que el MP10 “contiene” al MP2,5 dentro del espectro de material que se considera para dicha categoría. Según lo que se aprecia en la Figura 51, en meses de verano los niveles de MP2,5 alcanzan un promedio mensual cercano a los 10 ug/m³.

Figura 51. Promedio mensual histórico de contaminación por MP2,5 en estación Coyhaique I.



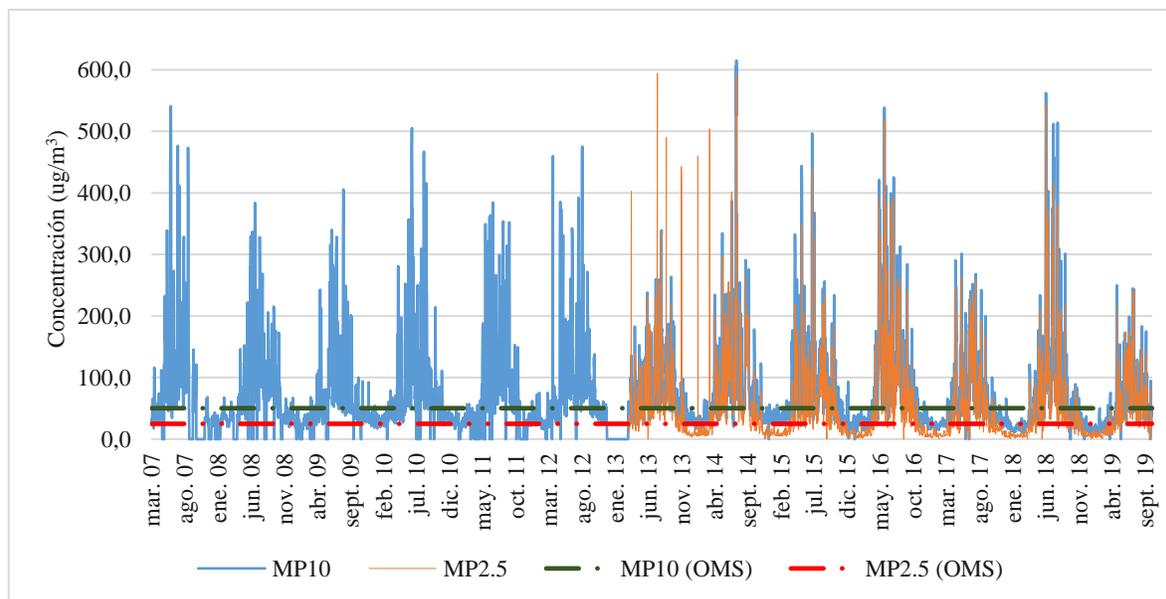
Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

4.2.4- Media diaria histórica

Una forma de hacer *zoom* a la información anterior es aproximar la caracterización a la escala diaria, ya que permite conocer comportamientos no tan generalizados, como si sucede con las medias anuales, porque no son cimiento suficiente como para comprender detalladamente el problema medioambiental del cual se trata esta investigación. La recomendación de la OMS en este caso corresponde a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2.5 y la situación diaria de Coyhaique se observa en la Figura 52.

Figura 52. Media diaria de contaminación por MP10 y MP2.5 en la estación Coyhaique I.



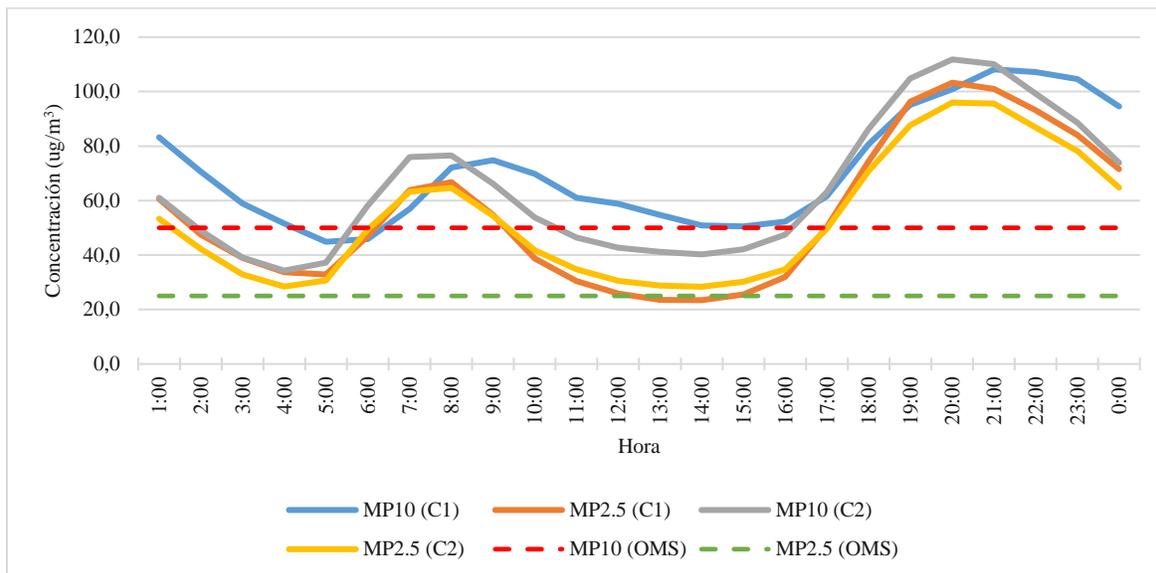
Fuente: Elaboración propia en base a OMS (2005) y SINCA (2019).

4.2.5- Media horaria

Al considerar el análisis del comportamiento por hora de la contaminación por material particulado, resulta llamativo el vaivén de las curvas de MP, ya que representa la fuerte relación entre los parámetros contaminantes y las actividades que se realizan en el hogar tales como calefacción o cocina (ver Figura 53 y Anexo 5). De acuerdo con esto, y considerando los límites recomendados por la OMS, las horas de mayor contaminación se pueden resumir en dos lapsos: entre 6 am y 9 am, y entre 6 pm y 2 am.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 53. Registro horario promedio de contaminación por MP10 y MP2.5 entre 2013 y 2019.



Fuente: Elaboración propia en base a OMS (2005) y SINCA (2019).

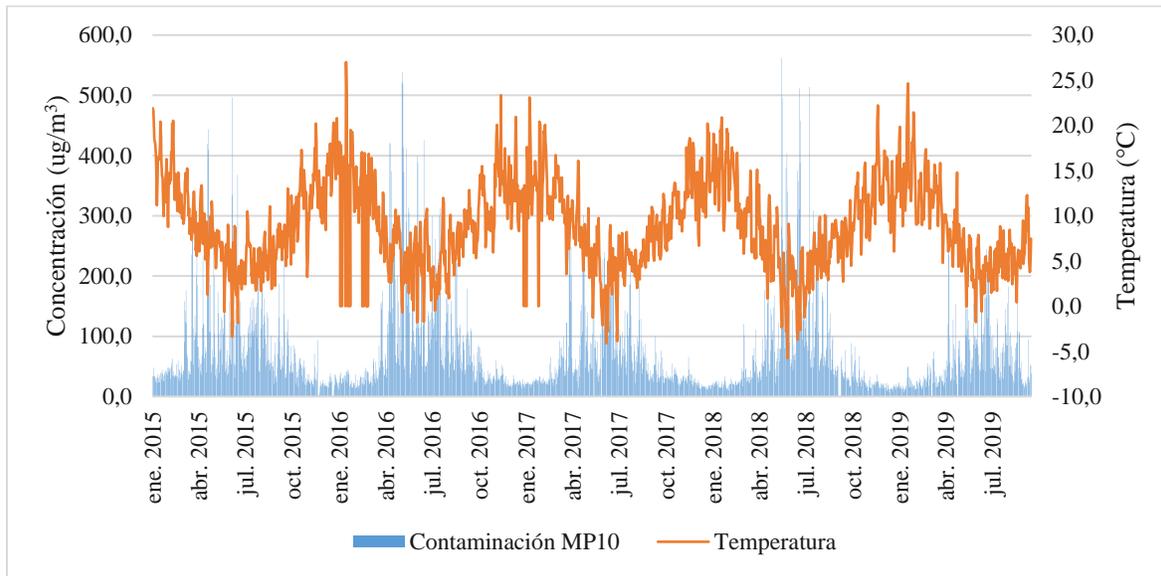
Un aspecto llamativo del gráfico anterior es la diferencia entre las mediciones de material particulado entre las estaciones de monitoreo del SINCA. Si bien no es raro que tengan diferencias entre ellas - sobre todo cuando están separada en cerca de 800 metros -, si es importante considerar que estas estaciones son las únicas dos fuentes oficiales de información ubicadas en un polígono urbano de casi 3 kilómetros de largo por 4 de ancho. Lo anterior, por las claras diferencias topográficas de la ciudad, puede implicar que existan zonas que concentren mayores (o menores) niveles de contaminación de los ya registrados. Si dicho monitoreo fuera más representativo, quizás se podrían orientar medidas específicas sobre un sector sobre exposición al MP o políticas de planificación territorial para nuevas viviendas o, sobre todo, de infraestructura crítica como un hospital.

4.2.6- Relación histórica con la temperatura.

Como ya se ha explicado previamente, el abultado uso de leña como material de combustión para calefacción se da como respuesta al insistente frío que caracteriza a Coyhaique. Sin embargo, tal como también se mencionó, las bajas temperaturas no sólo se hacen presente en invierno, sino que también es posible que se presenten en verano. A continuación, en la Figura 54 se observa el comportamiento histórico de la contaminación por MP10 y la temperatura entre los años 2015 y 2019. En dicha figura se aprecia cómo sigue presente la contaminación pese a que las temperaturas sean considerablemente altas durante las épocas estivales.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 54. Registros diarios históricos de contaminación por MP10 y temperatura entre 2015 y 2019.



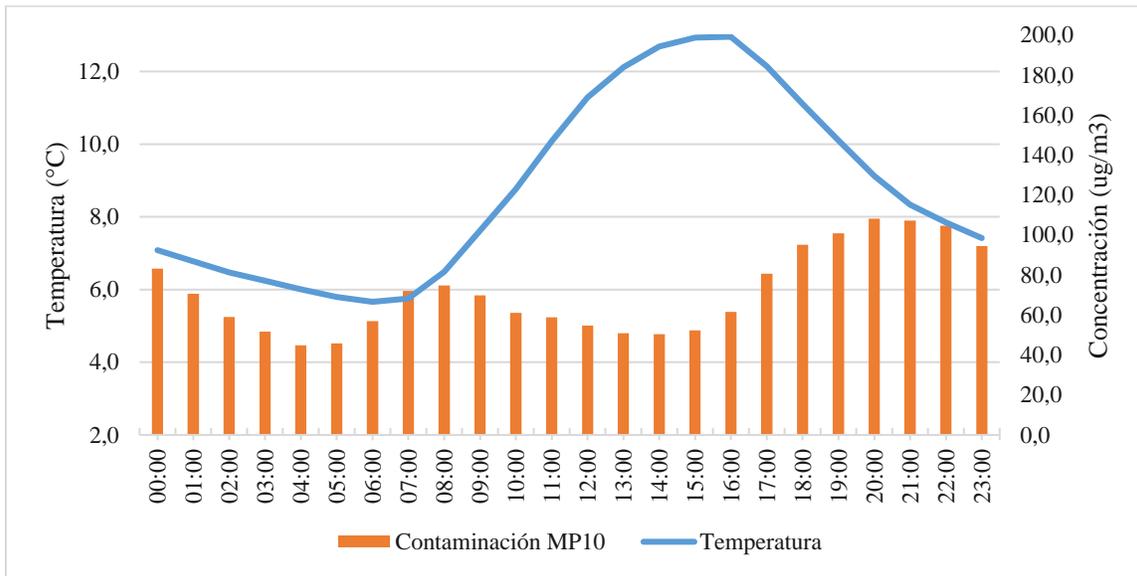
Fuente: Elaboración propia en base a SINCA.

El coeficiente de correlación entre las variables de temperatura y concentración de MP10 es de $-0,4$. Este valor corresponde a una correlación negativa (relación inversa) de tipo moderada. Este resultado confirma y reitera que, estadísticamente, las bajas temperaturas en Coyhaique son parte de la variable fundamental para comprender los altos niveles de contaminación. Esto significa que las medidas adecuadas, considerando la magnitud del problema, deben estar centradas netamente en el tipo de energía que se utiliza para la calefacción; como también que la velocidad de recambio de calefactores pareciera no tener un efecto concreto en el comportamiento histórico de las variables abordadas en la figura anterior.

También es de utilidad observar el comportamiento que posee la contaminación por MP10 y la temperatura del aire durante el día. Las Figura 55 y 56, retratan la relación entre la contaminación por MP10 y la temperatura a nivel histórico total e histórico de invierno respectivamente, encontrándose una relación moderadamente inversa entre las variables. No obstante, la Figura 53 muestra como las temperaturas son considerablemente más bajas y cómo la contaminación duplica sus valores en los horarios peak de 6 am a 9 am y de 6 pm a 2 am.

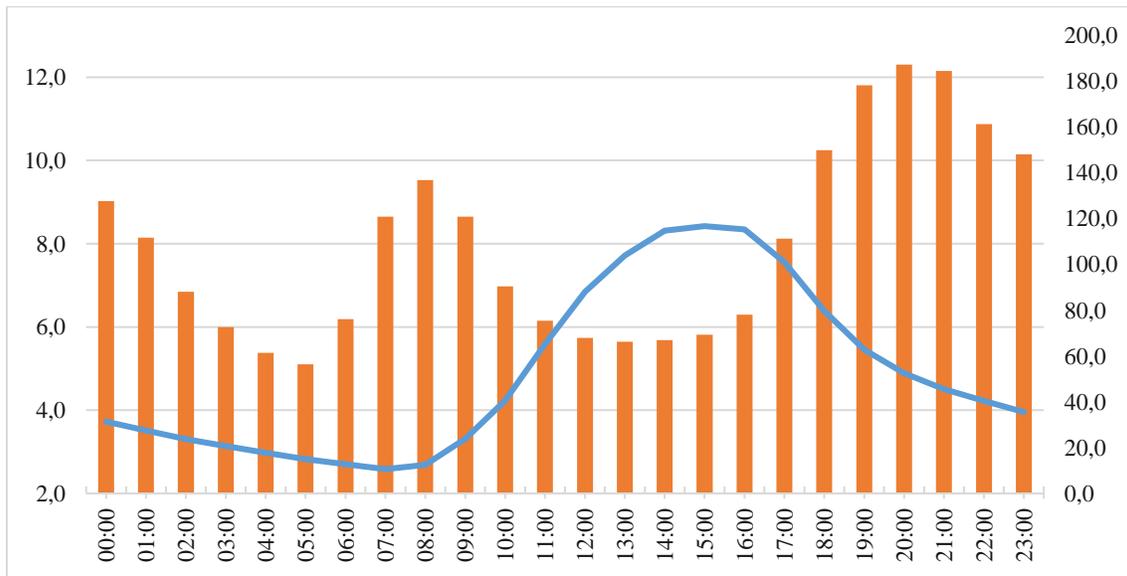
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 55. Promedios horarios históricos de temperatura y contaminación por MP10 entre 2015 y 2019.



Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

Figura 56. Promedios horarios históricos de temperatura y contaminación por MP10 de los inviernos entre 2015 y 2019.

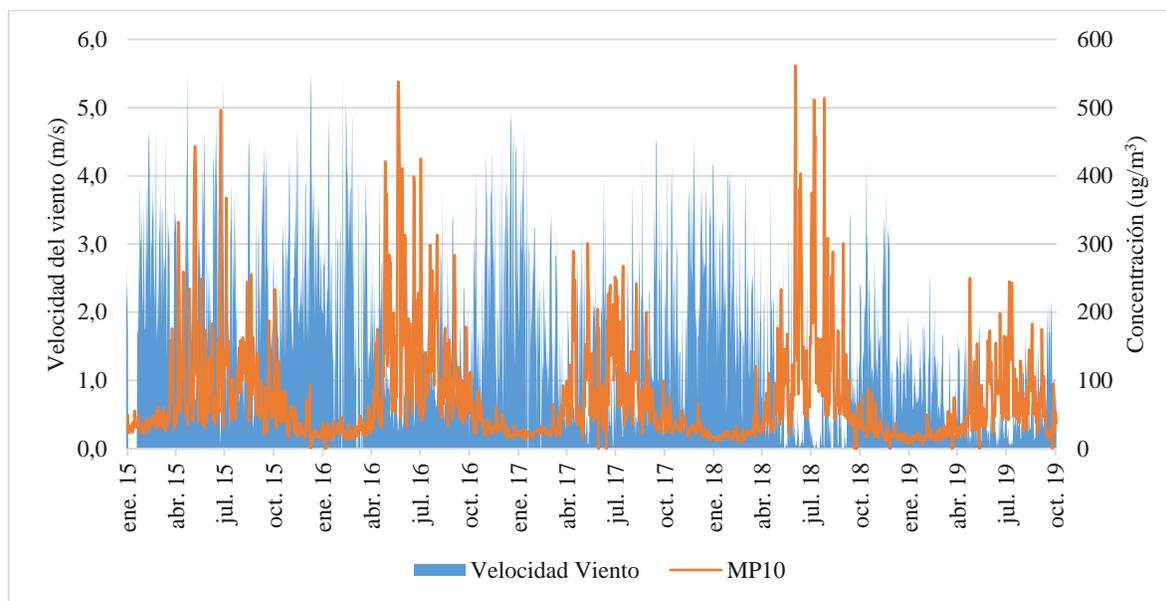


Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

4.2.7- El viento y su rol en la dispersión del material particulado

En general, el viento es crucial para la dispersión de esta. Por lo mismo, es importante conocer que tan protagonista es dicho factor meteorológico en la mitigación del MP10. A continuación, en la Figura 57, se presentan los registros diarios históricos de la velocidad de viento y del agente contaminante en la ciudad.

Figura 57. Registros diarios de velocidad del viento y MP10 para Coyhaique entre 2015 y 2019.



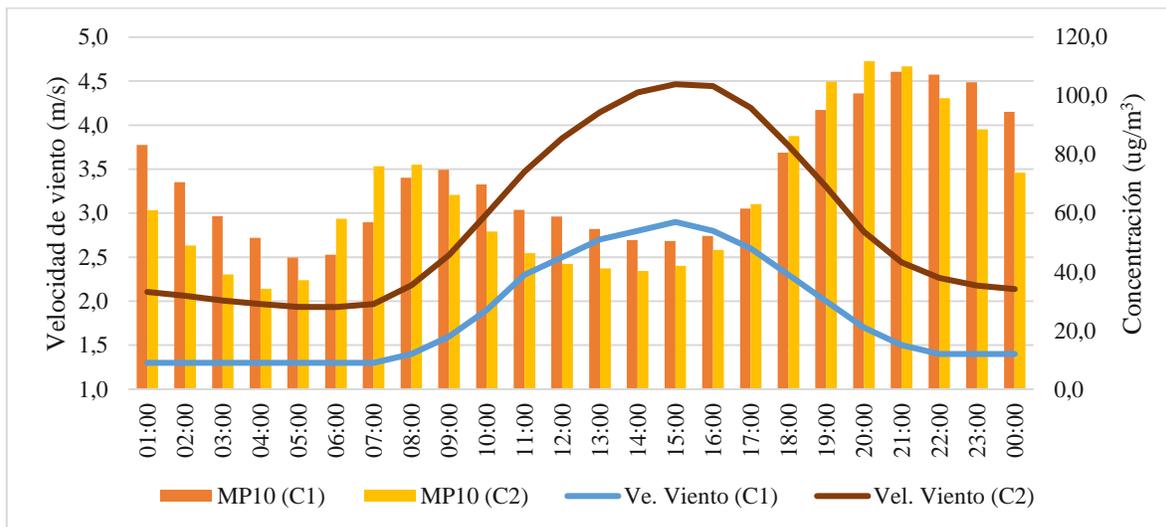
Fuente: Elaboración propia en base a datos de Estación Coyhaique I de SINCA (2019).

Si bien, se aprecia a simple vista que existe una relación inversa, en el ámbito estadístico el coeficiente de correlación entre la velocidad del viento y la concentración de MP10 en la ciudad de Coyhaique tiene un valor aproximado de $-0,2$. Esto significa que existe una relación inversa débil entre ambas variables. Es decir, entre mayor sea el viento, menos es la concentración de material particulado. Sin embargo, dada la realidad de Coyhaique, esto se limita fuertemente por el hecho de que los promedios de velocidad de viento son muy bajos.

Además, si consideramos la evolución horaria del viento y la contaminación, se identifica dicha relación inversa de baja intensidad (ver Figura 58). Un aspecto para considerar es la diferencia en los promedios de velocidad horario que existen entre las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II, las cuales - tal como se detalló previamente - se separan por unos 800 metros de distancia y se ubican en diferentes alturas topográficas.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 58. Registros horarios promedio de velocidad de viento y contaminación por MP10 en Coyhaique.

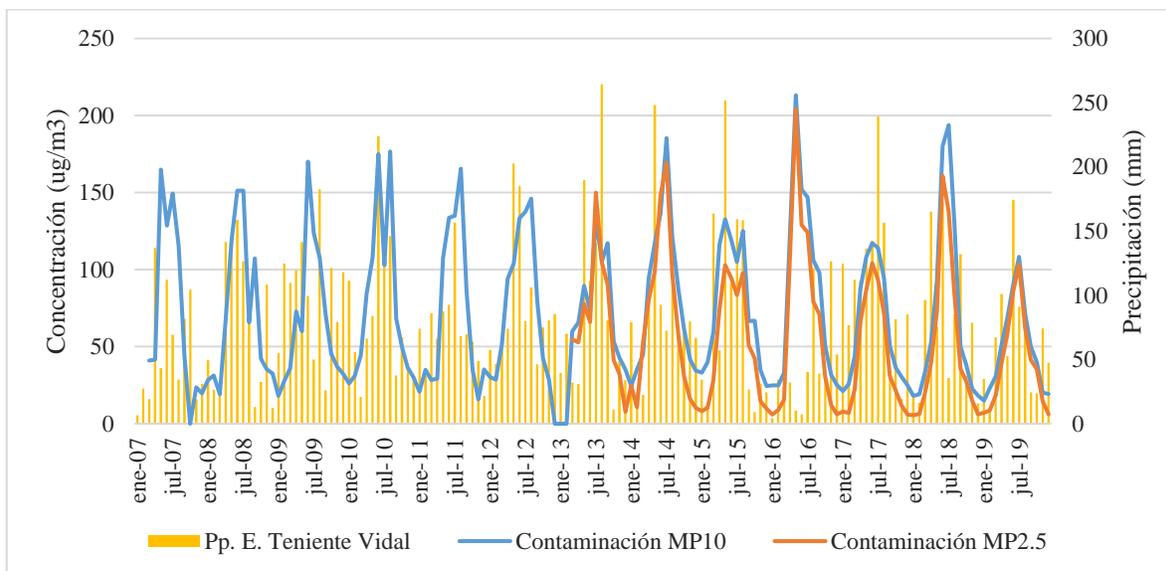


Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019)

4.2.8- Precipitaciones

La región en la cual se ubica el área de estudio se caracteriza por ser muy lluviosa en general y eso podría implicar una eventual relación inversa con la contaminación. Sin embargo, tal y como se aprecia en la Figura 59, a simple vista parece que no hubiera dicha asociación consistente ni considerable con el MP como para ligar de esta manera ambas variables.

Figura 59. Registros de precipitación acumulada mensual y concentración de material particulado promedio mensual entre 2007 y 2019.



Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

En ese sentido, y estadísticamente hablando, el coeficiente de correlación entre las variables de precipitación y de concentración de material particulado es, aproximadamente, de 0,4. Esto significa que existe una correlación positiva y se relacionan en sentido directo, por lo que - estadísticamente - mayor sea la cantidad acumulada de precipitación en un mes, mayor será la concentración de material particulado en el mismo periodo. Por supuesto, esto no implica que las precipitaciones aumenten esta última variable (ni viceversa), sino que la elevada concentración de MP10 se da en un contexto lluvioso, que - si bien reduce la contaminación - no alcanza a hacerlo de manera considerable como para asumir un efecto de dispersión eficiente. En otras palabras, existe dispersión producto de las precipitaciones, pero claramente no es la suficiente.

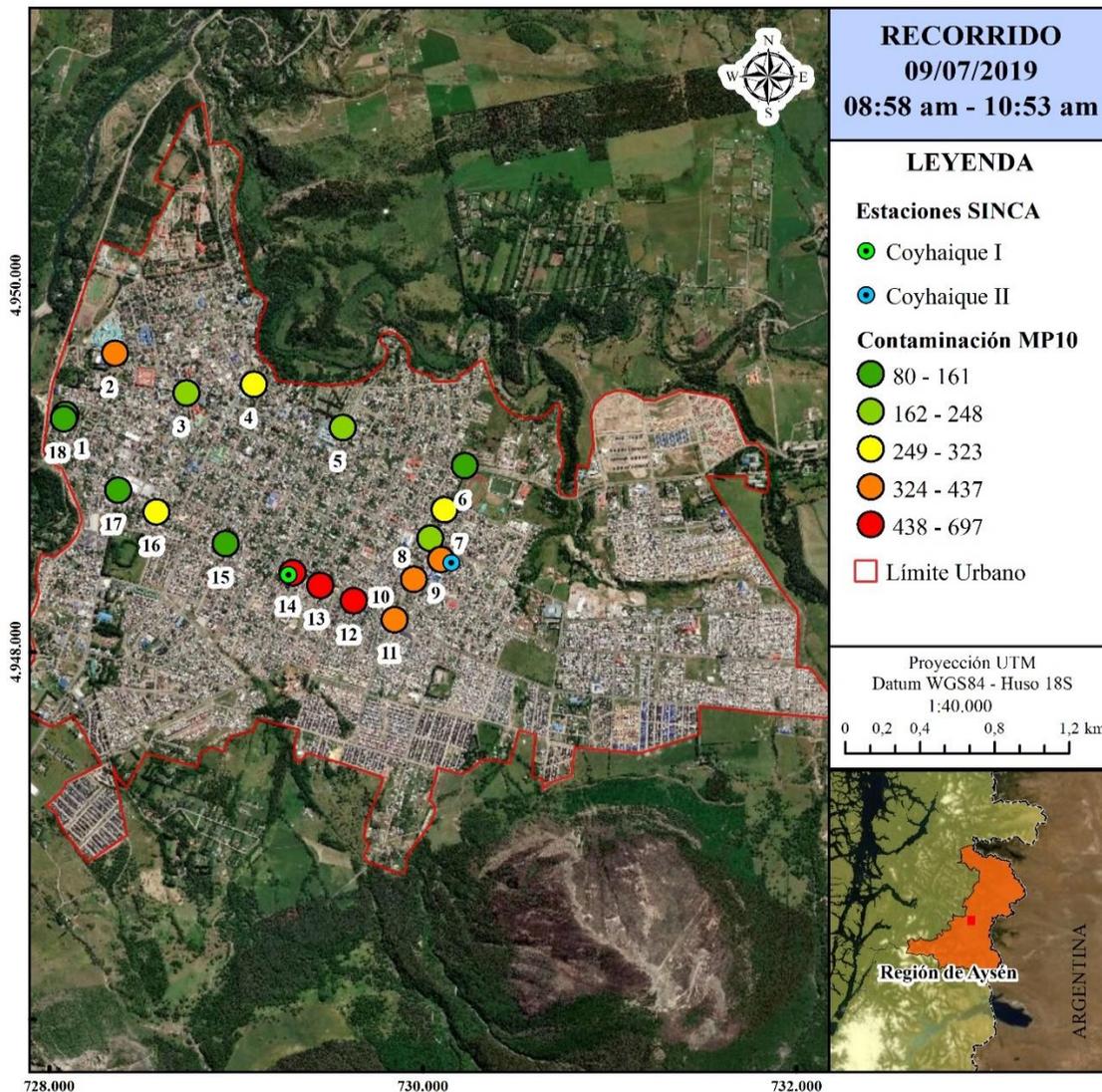
4.3- DESCRIPCIÓN Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO EN COYHAIQUE.

En esta sección se muestran los resultados de las actividades en terreno. Si bien el recorrido a pie se realizó dos días después del recorrido en vehículo, se opta por presentar primero la actividad a pie por las diferencias en las dimensiones de ambos. Además, ambas son actividades no relacionadas en el ámbito de la causalidad.

4.3.1- Observaciones de material particulado capturadas en la caminata del 09/07/19

Los resultados de este recorrido se observan a continuación (ver Figura 60 y Anexo 8):

Figura 60. Cartografía de los puntos de análisis en el recorrido a pie.



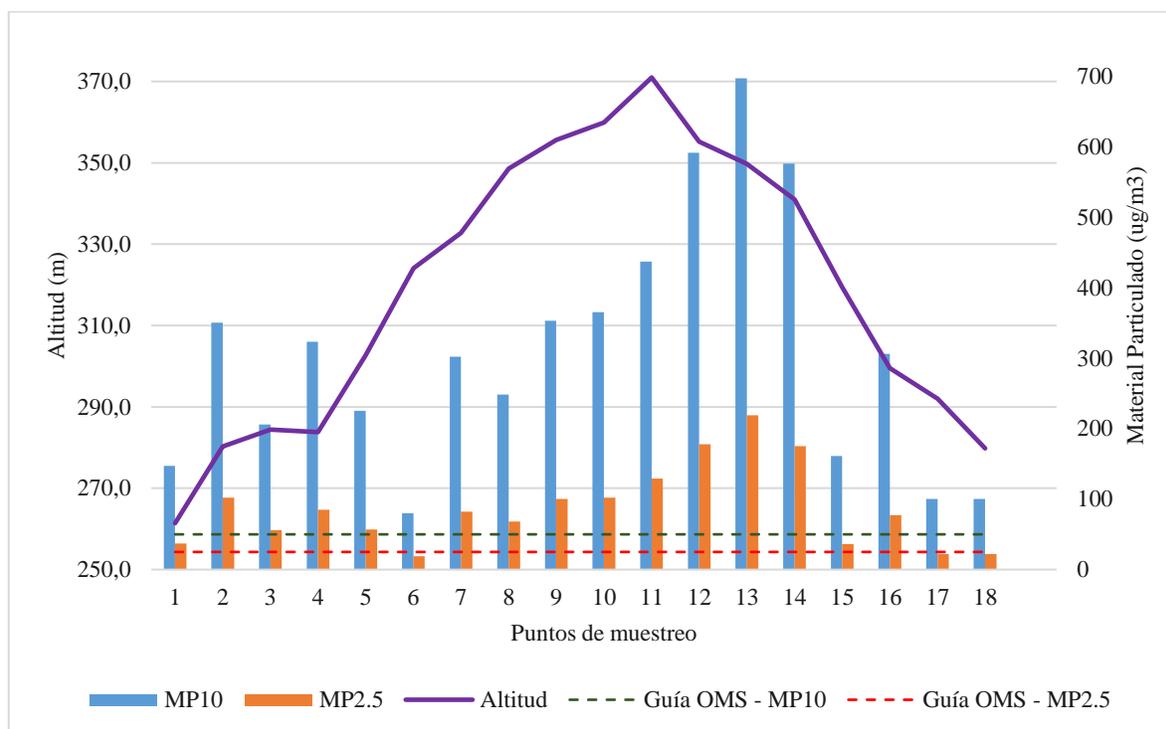
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en terreno.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

El recorrido tuvo una distancia total aproximada de 6 kilómetros, lo cual implica una separación promedio entre puntos de 33 metros. En la figura anterior es posible identificar una zona específica que destaca por tener los niveles más altos de contaminación por MP10. Estos corresponden a los puntos 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 (zona central del límite urbano), destacando sobre todo los tres últimos.

Respecto a la altura, obtenida mediante el GPS Garmin, resulta importante destacar que la máxima diferencia alcanzó unos 110 metros entre el punto 1 (261 msnm) y el 11 (371 msnm). De la misma forma en que se observan diferencias considerables de valores de contaminación en la Figura 60, se pueden evidenciar dichas diferencias complementadas con la altitud en la Figura 61.

Figura 61. Altitud y concentración de MP10 y MP2.5 para los puntos de muestreo obtenidos en el recorrido a pie.



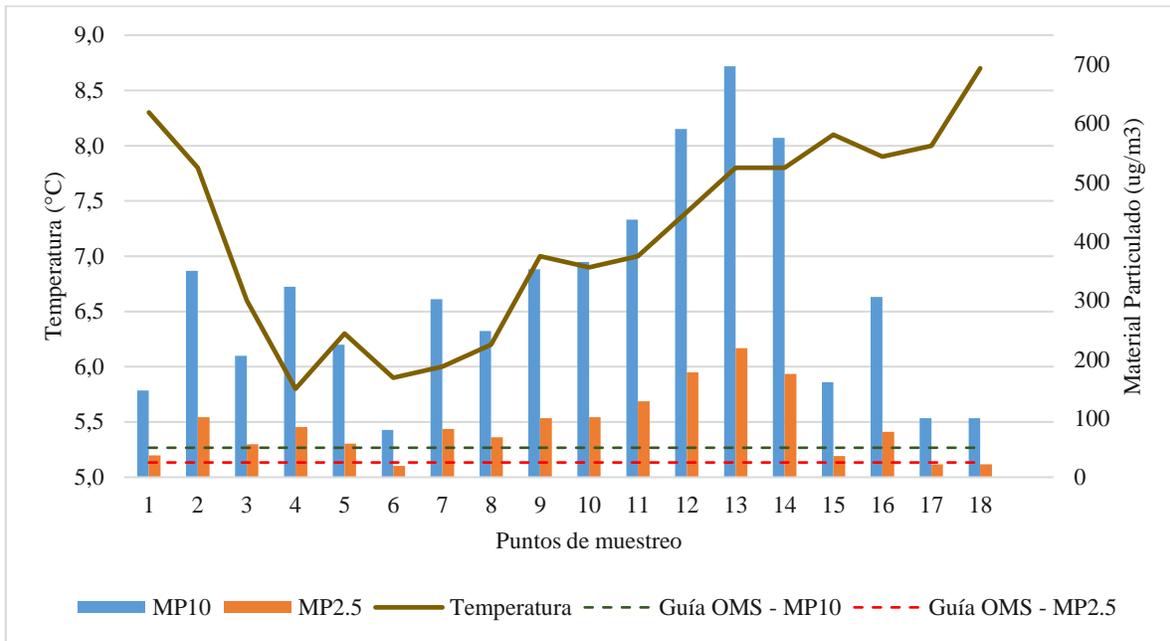
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en terreno.

En la figura anterior es clara la relación positiva que existe entre las dos variables. En simples palabras, y respecto sólo del día del recorrido a pie, la contaminación por material particulado se concentró en las zonas más altas del recorrido. Entonces, al considerar la altura, puede evidenciarse que la capa de material particulado se distribuye de manera dispereja en los límites urbanos de Coyhaique.

Ahora, considerando que también se obtuvieron valores de temperatura para cada uno de los puntos, la Figura 62 representa el comportamiento espacial de ambas variables.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 62. Temperatura y concentración de MP10 y MP2.5 para los puntos de muestreo en el recorrido a pie.

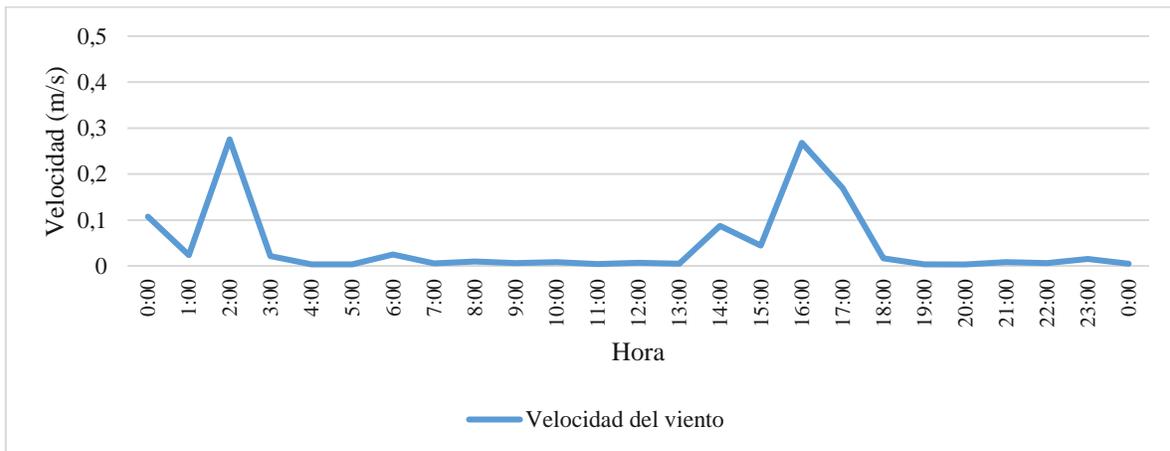


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en terreno.

Si bien la premisa principal de la contaminación es que a menor sean las temperaturas mayores serán las concentraciones por material particulado, en el recorrido a pie se pudo constatar que las zonas de más bajas temperaturas no concentraban los niveles más altos de contaminación.

Por último, y en cuanto al viento, su presencia fue prácticamente irrelevante en los horarios del recorrido a pie. El comportamiento que tuvo dicho factor en el día 9 de julio de 2019 se puede apreciar en su extensión horaria en la Figura 63 y, específicamente, entre las 9 am y las 11 am, el promedio de velocidad fue de 0,006 m/s.

Figura 63. Registros horarios del viento para el día 9 de julio de 2019.



Fuente: SINCA (2019).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Respecto a las estaciones SINCA emplazadas en el recorrido, también se realizó una toma de muestra afuera de cada una de estas durante la actividad. Es relevante mencionar que los sistemas de captura de información del SINCA no están a nivel del suelo, sino que a unos 7 metros de altura (ver Tabla 19).

Tabla 19. Comparación de valores horario según SINCA y obtenidos en terreno fuera de estaciones oficiales para recorrido a pie.

Estación SINCA	Parámetro	8 am	9 am	10 am	11 am	12 am
Coyhaique I	MP10	142	119	172	227	77
	MP2.5	140	131	165	223	69
Coyhaique II	MP10	165	120	147	190	191
	MP2.5	163	101	128	183	171
Valor tenido afuera de Coyhaique I (Punto 14 / 10:17 am)	MP10			246		
	MP2.5			175		
Valor obtenido en Coyhaique II (Punto 9 / 09:57 am)	MP10			213		
	MP2.5			100		

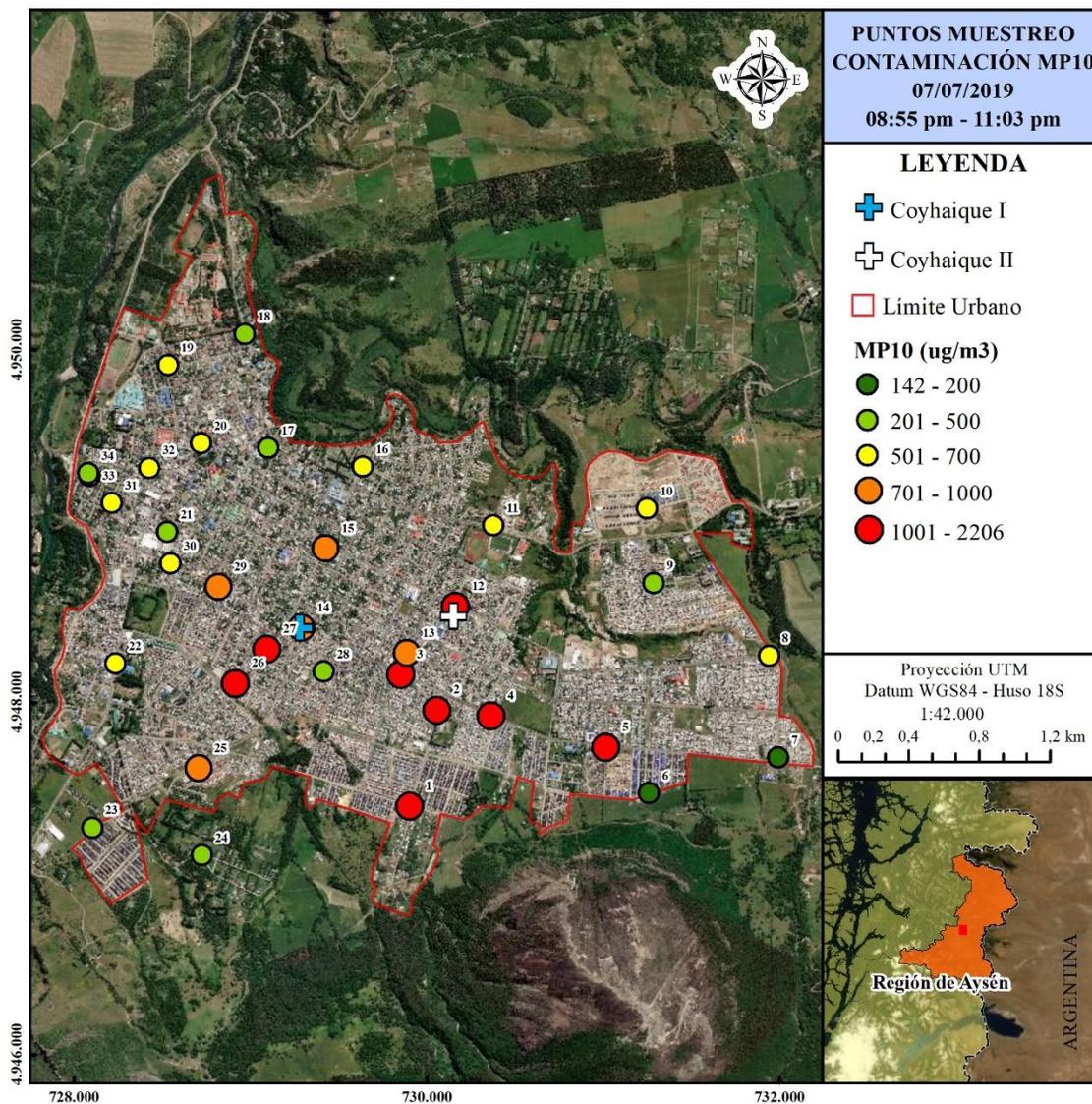
Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos en terreno y SINCA (2019).

Entonces, respecto al recorrido a pie y su respectiva toma de muestras, los valores obtenidos con el equipo no distan mucho de los valores que caracterizaron el rango de horas entre las cuales se realizó la actividad. También es importante considerar que, tal como se observa en la Figura 63, prácticamente no hubo viento por lo que este factor no actuó dispersando contaminantes.

4.3.2- Resultados recorrido en vehículo

Los resultados de este recorrido se observan a continuación (ver Figura 64 y Anexo 9):

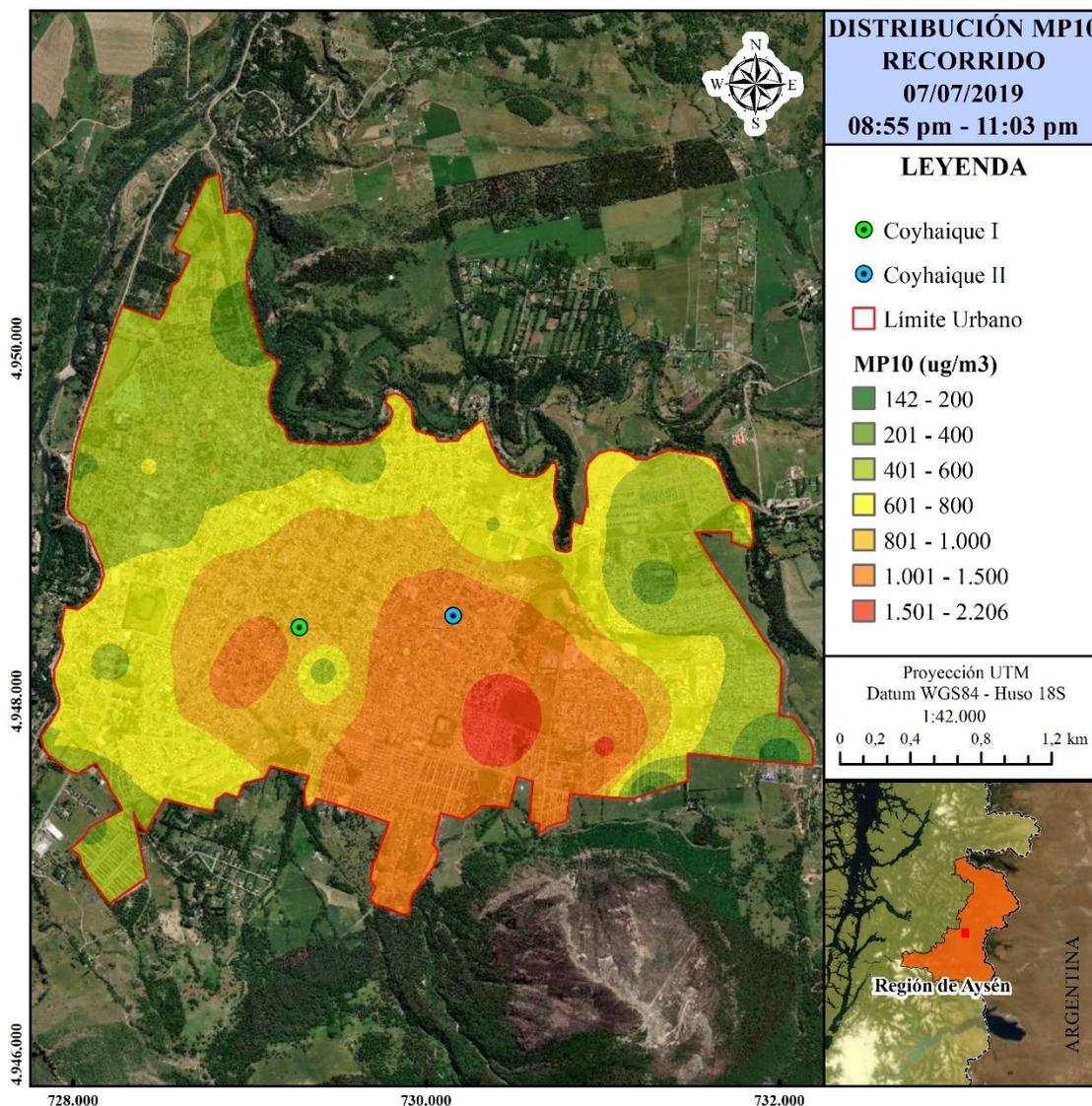
Figura 64. Cartografía de los puntos de análisis en el recorrido en vehículo.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en terreno.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 65 Interpolación IDW de puntos obtenidos en actividad en vehículo.



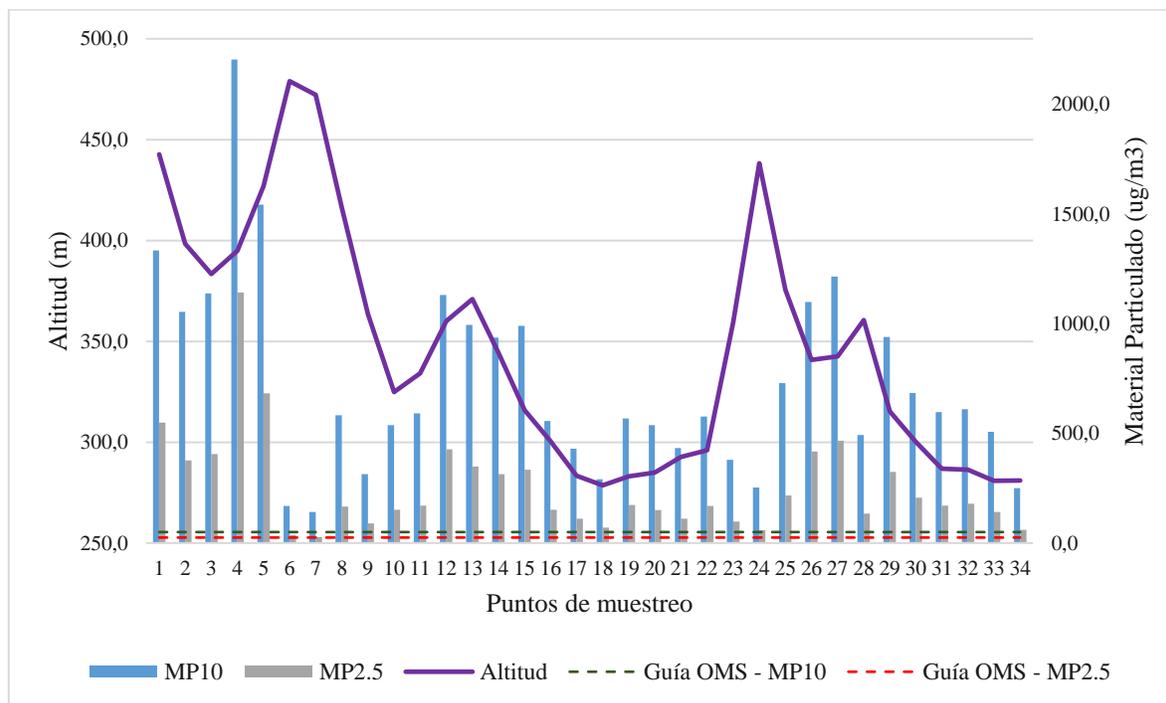
El recorrido tuvo una distancia total aproximada de 20 kilómetros y una separación promedio entre puntos de unos 300 metros. En la figura anterior se observa que los valores de contaminación son, en su amplia mayoría, muy altos; exceptuando un par de puntos ubicados cerca de los ríos Coyhaique y Simpson y otros en una zona alejada del sur de la ciudad. De manera similar a la actividad realizada a pie, los puntos con los niveles más altos de material particulado se emplazan en la zona central y sur del límite urbano. El valor promedio por hora obtenido en la actividad en vehículo ronda los 364,7 ug/m³ de MP10, lo cual significa que dicho registro supera siete veces la recomendación por hora (50 ug/m³) de la OMS (ver Tabla 17) y correspondió a una categoría horaria de Emergencia según la normativa local (ver Tabla 18).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

En la Figura 65 se observa, mediante el método de interpolación de datos, cómo los valores más altos obtenidos se concentran en la zona más alta de la ciudad y los más bajos se ubican en las áreas cercanas a los ríos Coyhaique y Simpson. Según la misma figura se evidencia, para ese momento específico donde se obtuvieron los datos, que tendría sentido una pequeña diferencia en los datos capturados entre las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II, ya que se ubican a diferentes alturas y lugar de la ciudad.

Sobre la relación con la altitud, los resultados pueden resumirse también en una relación positiva de altitud y contaminación. Es decir, los puntos más elevados tendrían a ser aquellos con mayor concentración de material particulado que aquellos en cotas más bajas. A continuación, en la Figura 66, se distingue que - a excepción de los puntos 6, 7, 23 y 24 - mayores niveles de contaminación y cotas elevadas son variables que van prácticamente de la mano. Si bien es una recomendación por día (ver Tabla 17), los valores obtenidos en terreno superaron con creces las recomendaciones OMS.

Figura 66. Altitud y concentración de MP10 y MP2.5 para los puntos de muestreo obtenidos en el recorrido en vehículo.

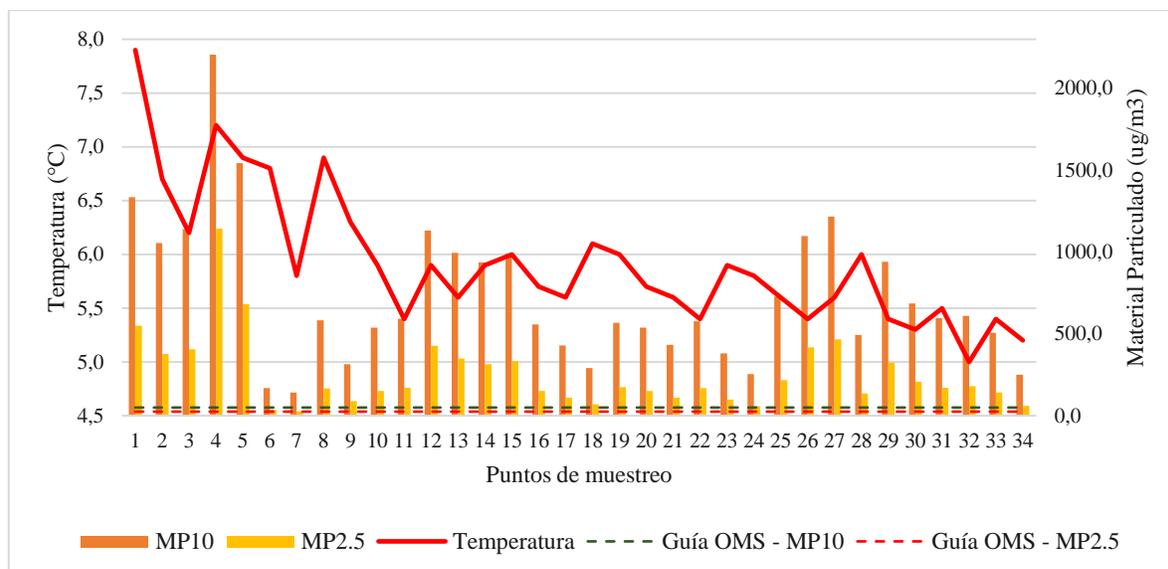


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en terreno.

En el caso de la relación de la temperatura con los niveles de MP registrados en la actividad, es posible observar nuevamente esa relación sutilmente proporcional, aunque no tan evidente como los resultados obtenidos en la actividad a pie (ver Figura 67). Por supuesto, estas diferencias se sustentan en que las experiencias se realizaron en distintos días, con diferentes comportamientos meteorológicos y en distintos órdenes de toma de puntos. Lo que se puede afirmar, sin lugar a duda, es que los puntos ubicados en la zona central y sur del límite urbano (y más altos topográficamente), concentran los valores más altos tal como la otra experiencia.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

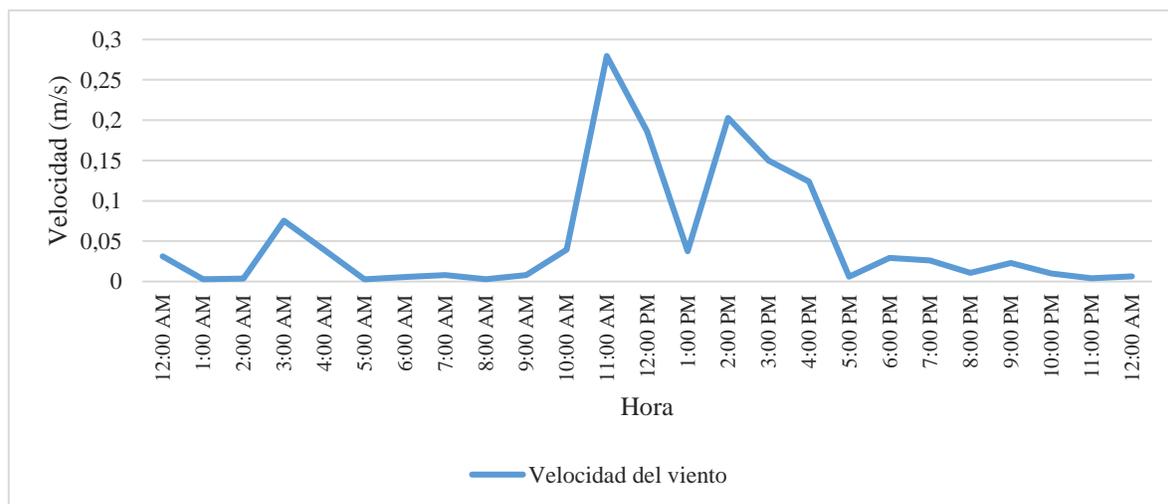
Figura 67. Temperatura y concentración de MP10 y MP2.5 para los puntos de muestreo en el recorrido en vehículo.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en terreno.

En cuanto al viento y sus registros horarios de velocidad (ver Figura 68), el día del recorrido en vehículo se caracteriza también por alcanzar velocidades muy bajas que poco y nada aportan en la dispersión del material particulado en la ciudad. Este contexto de viento se convierte en un factor primordial a la hora de entender por qué fueron tan altos los registros de contaminación obtenidos tanto en la toma de muestras a pie como en vehículo.

Figura 68. Registros horarios de velocidad de viento para el día 7 de julio de 2019.



Fuente: SINCA (2019).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

A continuación, en la Tabla 20, se presentan los valores horarios obtenidos en la actividad a pie y se comparan con los señalados por SINCA en sus estaciones Coyhaique I y Coyhaique II. En ambos recorridos se tomaron muestras afuera de las estaciones recién mencionadas y que están debidamente señaladas en la tabla que continúa.

Tabla 20. Comparación de valores horario según SINCA y obtenidos en terreno fuera de estaciones oficiales para recorrido a pie.

Estación SINCA	Parámetro	8 pm	9 pm	10 pm	11 pm	12 pm
Coyhaique I	MP10	316	396	448	324	75
	MP2.5	306	390	435	304	74
Coyhaique II	MP10	165	120	147	190	191
	MP2.5	163	101	128	183	171
Valor obtenido afuera de Coyhaique I (Punto 27 / 10:49 pm)	MP10			1016		
	MP2.5			467		
Valor obtenido en Coyhaique II (Punto 12 / 09:48 pm)	MP10			1131		
	MP2.5			428		

Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos en terreno y SINCA (2019).

Finalmente, respecto a esta actividad, se evidencia que los valores obtenidos en terreno son mucho más altos que los señalados por las estaciones de monitoreo SINCA. Las razones tras esta diferencia radican en:

- Actividad de monitoreo realizada en el marco de esta investigación se realizó a nivel de suelo, mientras que las estaciones en cuestión se encuentran a sobre los 8 metros de altura.
- El viento juega un rol fundamental para entender por qué en ambos días hay tanta contaminación, ya que sus velocidades no superan los 0,3 m/s.
- Es importante considerar que el valor horario señalado por SINCA corresponde a un promedio de los valores obtenidos por hora, mientras que el equipo de conteo de partículas toma un momento específico y ese valor es el señalado en este trabajo.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La problemática de la contaminación atmosférica en Coyhaique tiene muchas aristas sobre las cuales repercute. Sin embargo, es importante aclarar que en este trabajo de investigación se busca contextualizar tanto el origen como el comportamiento estadístico y espacial mismo de los parámetros contaminantes dentro de la ciudad. De esta manera, y con toda la información presentada, se compone un bloque firme para reiterar la suma importancia que debiese tener esta situación como para pensar en medidas de mitigación mucho más concretas.

Respecto a los factores presentados en esta investigación para considerarlos como elementos condicionantes de los altos niveles de contaminación presentes en la zona de estudio, dos fuentes bibliográficas importantes de información para conocer sobre los agentes en la dispersión del material particulado fueron los textos de Martín Vide (1999) y Orozco Barrenetxea (2011). De los nombrados en los resultados de esta investigación y su nivel de correlación con la contaminación, el único factor que no tuvo un nivel de relacionamiento similar a los otros fue la precipitación. En su caso se observó una relación directa y moderada, dando a entender que, estadísticamente, la precipitación acumulada en un día no disminuye la contaminación de ese mismo día en cuestión.

En cuanto a las normas que aplican para Coyhaique, estas son aplicadas en el contexto de un plan que busca mitigar y reducir la contaminación hasta niveles aceptados bajo normativa internacional. Es decir, la finalidad de establecer las cinco categorías (bueno, regular, alerta, pre-emergencia y emergencia) es facilitar el estudio histórico de los resultados de el plan de descontaminación en cuestión para comprobar la eventual disminución de los casos. Puntualmente, el caso del PDA 2015, el primero de la comuna, existió una baja considerable de casos de preemergencia y emergencia desde 2017 en adelante. No obstante lo anterior, las categorías presentadas para el caso nacional se alejan bastante de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud; y esta misma entidad señala que no existen resultados respecto a la exposición prolongada a altos niveles de material particulado (OMS, 2005).

- Representatividad de la información emitida por SINCA

Uno de los resultados principales de la etapa de toma de muestras y análisis de los valores señalados por las estaciones SINCA, es la diferencia que existe entre ambos resultados y la dudosa representatividad que implican las estaciones ubicadas en la ciudad. Como ya se mencionó en los resultados, estas estaciones se distancian a unos 800 metros entre ellas (en una ciudad de diferencias topográficas y donde el largo máximo de ésta son cerca de 4 kilómetros), lo cual implica que los resultados de concentración de material particulado no son representativos para la ciudad en general. A grandes rasgos, las zonas cercanas a los ríos Coyhaique y Simpson (nororiente de la ciudad) concentraban los valores más bajos de MP10 y MP2.5; no así las zonas altas de la ciudad ubicadas en el sur y poniente de la misma, ya que se evidenció una relación estrecha entre altitud y concentración de material particulado.

- Recambio de calefactores

Si bien en este documento no se realiza un estudio a la eficiencia de esta medida, sí se señala la evolución en el número de recambios que ha tenido el programa a lo largo de los años. Tal como se presenta, y siendo esta una medida que apunta literal y directamente a las fuentes originarias de las emisiones contaminantes, pareciera que abarcar actualmente el 27,8% del total de artefactos obsoletos

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

por recambiar no es un progreso tan sustancial si se considera que el programa lleva cerca de 9 años en pie.

- Composición de los agentes contaminantes

El principal aspecto que se estudia masivamente sobre el material particulado hoy en día corresponde a su tamaño. Esta característica, como se detalla en esta investigación, se hace presente tanto en la mayor parte de la bibliografía respecto a material particulado urbano de Chile y en los sistemas de monitoreo como el Sistema Nacional de Calidad de Aire (SINCA). Sin embargo, una dimensión que debería tener mayor relevancia - sobre todo en casos como el de Coyhaique u otras localidades con contaminación ligada a la combustión de leña - es la de la composición de las partículas que se libera como consecuencia de este proceso físico y químico. Un ejemplo puntual de compuesto peligroso que se debe tener en plena consideración para el caso de Coyhaique corresponde a unos pertenecientes al grupo de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) llamados hidrocarburos policíclicos aromáticos, los cuales están plenamente identificados y ligados como causantes de cáncer. Es altamente probable que un estudio de estos compuestos presentes en la insistente contaminación de Coyhaique cambiaría el tipo de medidas que se aplican y la urgencia con que se estas se tramitan.

- Implicancias espaciales producto del uso excesivo de leña como medio de calefacción

Al comienzo de este documento se presentaron - a modo de contextualizar brevemente la arista social de la leña en Coyhaique - resultados de una encuesta que evidenciaban la estrecha relación que posee el factor económico a la hora de elegir este recurso por sobre otros medios de energía para calefacción. Una consecuencia no abordada en este trabajo corresponde a la plantación excesiva de pinos en la zona dada la alta demanda que posee la leña de dicha especie, la cual - en un contexto de escasez hídrica en gran parte del territorio nacional y con señales más que evidentes de un cambio climático más presente que nunca - podrían ser agravantes de dichas problemáticas en un futuro cercano.

- Rol del mercado en zonas no atractivas para invertir

Actualmente, las tarifas de la energía eléctrica en la Región de Aysén son unas de las más caras del país⁶, las cuales se justifican principalmente por el poco atractivo que posee la región para las empresas que generan y distribuyen este tipo de energía y que, a su vez, se produce por la poca concentración demográfica y los costos asociados a la instalación de infraestructura producto del accidentado relieve local. Entonces, existiendo alternativas reales para reducir al mínimo el uso de la leña como combustible, el mercado y la laxitud de las normativas nacionales sobre el tema se transforman en barreras para pensar en soluciones concretas y a mediano-corto plazo.

- ¿A quiénes está afectando la contaminación en la ciudad?

Una arista clave para abordar esta problemática de manera social corresponde a la identificación de las personas afectadas por la contaminación. Es decir, conocer y determinar la existencia de eventuales grupos de riesgo (tales como la población adulta mayor o niñas y niños menores a 5 años, por dar ejemplos) o infraestructura crítica (hospitales, jardines infantiles, entre otras) asociada a estos

⁶ “Diputado Calisto pide a Presidente Piñera respaldo a “Ley Aysén” y rebajas en las tarifas eléctricas”. Disponible en <https://www.vientopatagon.cl/2019/07/diputado-calisto-pide-a-presidente-pinera-respaldo-a-ley-aysen-y-rebajas-en-las-tarifas-electricas/>

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

grupos. De esta manera, generar un catastro sólido para, por ejemplo, priorizar las medidas de mitigación como el reacondicionamiento térmico de los hogares de los grupos más vulnerables.

- El desarrollo de una ciudad contenida por barreras naturales

Coyhaique posee la particularidad de estar algo limitada por una serie de accidentes topográficos, tanto por los ríos Coyhaique y Simpson al norte y oeste, como también por las cumbres presentes en las cuatro direcciones cardinales. Entonces, el desarrollo de la ciudad tiende a ser en su mayoría hacia los sectores altos del sector sur y sureste (pertenecientes a la falda del Cerro Mackay y otras elevaciones vecinas) donde justamente - según los resultados de las actividades en terreno - son los sectores que más concentran contaminación.

- El ejemplo magallánico del 2011

En enero del año 2011, comenzaron amplias y fuertes protestas en la Región de Magallanes por una abrupta alza en las tarifas del gas natural, advertida por distintos gremios unos años antes de hacerse oficial. Sólo mediante insistentes movilizaciones de distintos sectores de la región se logró llamar la atención de la autoridad, dando pie a la cancelación del alza y el establecimiento de una tarificación especial para esta región patagónica⁷.

Este ejemplo es relatado para entender cómo una situación de alta sensibilidad social - como lo es un alza en la tarifa de un tipo de combustible en una región fría y aislada geográficamente - y sus posteriores consecuencias en las masivas movilizaciones que caracterizaron la zona, tuvieron como resultado el freno de la iniciativa y una medida prácticamente inmediata con extensión a largo plazo. Dicho esto, Coyhaique se enfrenta actualmente a un problema socioambiental serio que no puede seguir esperando dada sus claras repercusiones en la salud pública y que, considerando esta nueva sensibilidad social presente desde el 18 de octubre de 2019 a nivel nacional, su gestión tardía o poco eficiente podría generar un descontento social aún mayor en la zona. Por lo mismo, la idea de un cambio sustancial en la matriz energética de Coyhaique tiene más fuerza que nunca considerando el contexto de la ciudad. Eso podría generarse mediante la regulación y/o incentivos a empresas eléctricas para establecerse en la región y producir competencia real y precios más accesibles, o también a través del desarrollo y uso masivo de energías no convencionales.

⁷ “Tarificación de Magallanes”. Comisión Nacional de Energía (CNE). Disponible en: <https://www.cne.cl/tarificacion/hidrocarburos/tarificacion-magallanes/>

Conclusiones

Respecto a los resultados obtenidos y expuestos en este trabajo de investigación, se obtuvo lo siguiente:

En primer lugar, se pudo constatar que la contaminación atmosférica de Coyhaique alcanza dichos niveles tan elevados por dos motivos: la leña (como origen) y los factores geográficos que caracterizan la zona (como condicionantes). De esta manera, se comprende que las variables geográficas inciden directamente en la baja ventilación para un recambio del aire. Entonces, se establece que no existen atenuantes considerables que apoyen en una eventual mitigación el problema ambiental y que las medidas que se estudian y ejecutan en la zona deben ser lo suficientemente amplias y concretas para asumir fielmente la seriedad del asunto.

Luego, en cuanto al análisis histórico del comportamiento de la contaminación por material particulado y otras variables meteorológicas, se obtiene que los agentes contaminantes se presentan incluso en verano, lo cual ayuda a intentar dimensionar el permanente nivel de exposición de los habitantes de la zona afectada. Es decir, esta problemática es prácticamente inmune a los cambios de estación y a, por ejemplo, las relativamente constantes precipitaciones. Por otro lado, se presentan evidencias explícitas del fuerte nexo entre el transcurso de las jornadas de los habitantes el comportamiento horario de la contaminación.

En tercer lugar, respecto a la distribución del material particulado en el área de estudio según las dos actividades realizadas en terreno, queda en clara exposición las diferencias que existen dentro del límite urbano. Tanto así, que incluso se puede cuestionar la ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad de aire por su poca representatividad espacial de la contaminación. Además de las diferencias en los registros obtenidos con el contador de partículas y las estaciones mismas, también hay que considerar que estas estaciones se separan a 800 metros de distancia en una ciudad de unos 14 kilómetros cuadrados.

El objetivo principal de este trabajo es ser un aporte serio para masificar la problemática socioambiental de la contaminación en Coyhaique y apoyar en la difícil búsqueda de una solución concreta y eficiente para mitigar los problemas que genera y generará el material particulado.

A continuación, y finalizando este documento, se acompañan las Figuras 69, 70 y 71 para mostrar un poco más de la experiencia de los terrenos en la ciudad y dar cuenta de la relevancia social de la contaminación en Coyhaique.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Figura 69. Portada del diario El Divisadero (10/07/19).



Fuente: Diario El Divisadero (2019)

Figura 70. Captura de entrevista en "Palabra de Radio" de Radio Genial (09/07/19) conducido por Mauricio Muñoz.



Fuente: Obtenida desde página de Facebook "Radio Genial FM Coyhaique".

Figura 71. Nota en Diario de Aysén (10/07/19) sobre resultados de medición.

Tesis universitario monitoreó mala calidad del aire de Coyhaique obteniendo resultados que superan los estados de emergencia

"El joven estudiante de 27 años, registró altos índices de saturación por MP 2,5 de hasta 7 veces lo equivalente al estado de emergencia ambiental (170 ug/m3N).



Eduardo Gallardo es un estudiante de 27 años de la carrera de Geografía de la Universidad de Chile, quien se encuentra desarrollando su memoria de título en un estudio componentes de esta capa, propiciando así la acumulación de material producido por la combustión de la leña y otros". La metodología aplicada en este estudio.

Fuente: El Diario de Aysén (2019).

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña Briones, M. A. (2014). *Impacto de la contaminación del aire por MP10 en la morbi-mortalidad por enfermedad respiratoria, cardiovascular y algunos cánceres en la población de Coyhaique, 2009-2014*. Obtenido de <http://bibliodigital.saludpublica.uchile.cl:8080/dspace/handle/123456789/472>
- Aire Coyhaique. (2018). *Plan de descontaminación atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante*. Obtenido de https://airecoyhaique.mma.gob.cl/?page_id=6979
- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*(73), 123-132. Obtenido de <https://www.scielosp.org/pdf/resp/1999.v73n2/123-132/es>
- BCN. (2019). *Chile Nuestro País: Región de Aysén*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region11>
- Beaudoin, H., Rodell, M., & NASA/GSFC/HSL. (2019). *GLDAS Noah Land Surface Model L4 monthly 0.25 x 0.25 degree V2.1*. doi:10.5067/SXAVCZFAQLNO
- Camacho-Sandoval, J. (2008). Asociación entre variables cuantitativas: análisis de correlación. *Acta Médica Costarricense*, 50(2), 94-96. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0001-60022008000200005&script=sci_arttext
- Centro de Sistemas Públicos. (2019). *Evaluación Programa de Recambio de Calefactores a Leña del Ministerio del Medio Ambiente*. Universidad de Chile. Obtenido de http://www.dipres.gob.cl/597/articles-187242_informe_final.pdf
- CONAF. (2011). *Catastros de Uso de Suelo y Vegetación de Aysén*. Obtenido de Infraestructura de Datos Geoespaciales: tp://www.ide.cl/descargas/capas/conaf/Catastro_uso_suelo_y_vegetacion.rar
- CR2. (2019). *Explorador Climático*. Obtenido de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2: <http://explorador.cr2.cl/>
- DGA. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. (Cade-Idepe, Ed.) Obtenido de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Aysen.pdf>
- Diario Aysen. (2019). *Pese a quejas y dudas de postulantes y usuarios: 15 mil recambios de calefactores es la nueva meta para Coyhaique que impulsa el Ministerio del Medio Ambiente*. Obtenido de El Diario de Aysén: <https://diarioaysen.cl/2019/11/06/pese-a-quejas-y-dudas-de-postulantes-y-usuarios-15-mil-recambios-de-calefactores-es-la-nueva-meta-para-coyhaique-que-impulsa-el-ministerio-del-medio-ambiente/>
- Diario El Divisadero. (10 de Julio de 2019). Tesisista realizó monitoreo de la calidad del aire que arrojó alarmantes resultados. *El Divisadero: Auténticamente regional*.(7.470). Obtenido de <http://www.eldivisadero.cl/>

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

- Diario Sur. (2019). *El fenómeno de subsidencia*. Obtenido de Diario Sur: <http://blogs.diariosur.es/tormentas-y-rayos/2019/07/02/el-tiempo-en-malaga-andalucia-fenomeno-de-subsidencia/>
- Dirección Meteorológica de Chile. (2018). *Por qué nos importa tanto el Anticiclón del Pacífico Sur*. Obtenido de Meteochile Blog: <http://blog.meteochile.gob.cl/2018/10/18/por-que-nos-importa-tanto-el-anticiclón-del-pacífico-sur/>
- DIRECTEMAR. (2019). *Carta Pronosticada de Superficie*. Obtenido de Servicio Meteorológico de la Armada de Chile: <http://meteoarmada.directemar.cl/>
- Dorta Antequera, P. (1996). Las inversiones térmicas en Canarias. *Investigaciones geográficas*(15), 109-124. doi:10.14198/INGEO1996.15.01
- El Diario de Aysén. (10 de Julio de 2019). Tesista universitario monitoreó mala calidad del aire en Coyhaique obteniendo resultados que superan los niveles de emergencia. *El Diario de Aysén*(13.421), pág. 17. Obtenido de <https://issuu.com/diarioaysenpatagonia/docs/10072019>
- EPA. (2019). *Particulate Matter (PM) Pollution*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., . . . Seal, D. (Junio de 2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). doi:10.1029/2005RG000183
- Fundación Terram. (2018). *Colegio Médico exige enfrentar la contaminación de Coyhaique*. Obtenido de <https://www.terram.cl/2018/06/colegio-medico-exige-enfrentar-la-contaminacion-de-coyhaique/>
- García Martínez, M. J. (2005). *Los hidrocarburos policíclicos aromáticos asociados a combustibles fósiles. Caracterización, análisis y remediación*. Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/400/1/MARIA_JESUS_GARCIA_MARTINEZ.pdf
- GORE. (2018). *Diagnóstico de Caracterización Socioeconómica de la Región de Aysén*. Gobierno Regional de Aysén. Obtenido de https://www.goreaysen.cl/controls/neochannels/neo_ch95/appinstances/media204/Diagnostico_de_Caracterizacion_Socioeconomica_de_la_Region_de_Aysen.pdf
- Greenpeace. (2019). *Informe mundial: Ciudades chilenas encabezan ránking de las urbes con peor calidad de aire del continente el 2018*. Obtenido de Greenpeace: Clima y Energía: <https://www.greenpeace.org/chile/issues/climayenergia/1120/informe-mundial-ciudades-chilenas-encabezan-ranking-de-las-urbes-con-peor-calidad-de-aire-del-continente-el-2018/>
- INDAP. (2015). *Instituto de Desarrollo Agropecuario*. Obtenido de En plena construcción 35 galpones de secado de leña financiados por INDAP en Aysén: <http://www.indap.gob.cl/noticias/detalle/2015/01/05/en-plena-construccion-35-galpones-de-secado-de-le%C3%B1a-financiados-por-indap-en-ays%C3%A9n>
- INDAP. (2019). *Galpones de secado de leña: la apuesta de diversificación maderera de INDAP en Aysén*. Obtenido de Instituto de Desarrollo Agropecuario:

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

<http://www.indap.gob.cl/noticias/detalle/2019/07/31/galpones-de-secado-de-le%C3%B1a-la-apuesta-de-diversificaci%C3%B3n-maderera-de-indap-en-ays%C3%A9n>

INE. (2018). *Censo de Población y Vivienda*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadísticas: <https://www.ine.cl/estadisticas/censos/censos-de-poblacion-y-vivienda>

La Nueva España. (2016). *La inversión térmica, como una olla cuya tapa retiene el aire sucio*. Obtenido de Diario La Nueva España: <https://www.lne.es/aviles/2016/11/03/inversion-termica-olla-cuya-tapa/2007538.html>

La Tercera. (2019). *Coyhaique: aceleran cambio energético para "dejar fuera la leña"*. Obtenido de La Tercera: <https://www.latercera.com/nacional/noticia/coyhaique-aceleran-cambio-energetico-dejar-la-lena/579446/>

Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile* (Segunda ed.). Santiago: Editorial Universitaria.

Martí Ezpeleta, A. (1990). Las inversiones térmicas en la depresión de Sariñena. *Geographicalia*(27), 105-120.

Martín Vide, J. (1999). *Fundamentos de la Climatología Analítica*. Madrid: Síntesis.

MDS. (2019). *CASEN 2017: Serie de Datos de la Tasa de Pobreza Comunal*. Obtenido de Ministerio de Desarrollo Social y Familia: http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/indicadores/datos_pobreza_comunal.php

Memoria Chilena. (2019). *Exploradores y colonos en Aysén (1870-1927)*. Obtenido de Memoria Chilena: <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-620.html>

Ministerio de Energía. (2019). *Guía práctica para el buen uso de la Leña: Leña Seca - Leña Eficiente*. Obtenido de Ministerio de Energía: http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/guia_buen_uso_de_la_lena_web.pdf

Ministerio del Interior. (2019). *Establece Plan de Descontaminación atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante*. Obtenido de Diario Oficial de la República de Chile: <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2019/07/17/42405/01/1622287.pdf>

MINVU. (2018). *Acondicionamiento Térmico: un subsidio que ayuda a la economía familiar y el medioambiente*. Obtenido de Portal Ciudadano del Ministerio de Vivienda y Urbanismo: <https://atencionciudadana.minvu.gob.cl/acondicionamiento-termico-un-subsidio-que-ayuda-a-la-economia-familiar-y-el-medioambiente/>

MMA. (2017). *Guía de educación básica. Calidad del aire en la ciudad de Coyhaique*. Coyhaique. Obtenido de <https://airecoyhaique.cl/wp-content/uploads/2017/docs/AYSEN-EDUCACION-BASICA.pdf>

MMA. (2018). *Plan para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante*. Obtenido de Planes de Descontaminación Atmosférica del Ministerio del Medio Ambiente: <https://ppda.mma.gob.cl/aysen/pda-para-la-ciudad-de-coyhaique-y-su-zona-circundante/>

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

- MMA. (2019). *Programa de Recambio de Calefactores*. Obtenido de Ministerio del Medio Ambiente: <https://calefactores.mma.gob.cl/region/14>
- MORI. (2015). *Caracterización de artefactos de calefacción residencial en Coyhaique*. Obtenido de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/03/INFORME-RESULTADOS-ESTUDIO-CALEFACCION-COYHAIQUE-2016.pdf>
- Municipalidad de Coyhaique. (2014). *Plan de Desarrollo Comunal: Coyhaique 2014-2018*. Obtenido de Diagnóstico Comunal: https://www.coyhaique.cl/portalmunicipalidad/files/pladeco20142018/DIAGNOSTICO_PLADECO.pdf
- Municipalidad de Coyhaique. (2019). *Historia de Coyhaique*. Obtenido de Municipalidad de Coyhaique: <https://www.coyhaique.cl/portalturismo/historia.php>
- Municipalidad de Coyhaique. (2019). *Propuesta de proyecto municipal para mitigar la contaminación en Coyhaique*. Obtenido de Municipalidad de Coyhaique: <http://www.coyhaique.cl/portalmunicipalidad/files/prescontaminacion.pptx>
- NOAA. (2019). *Climate at a Glance: Worldwide climate monitoring*. Obtenido de National Centers for Environmental Information: <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/mapping>
- OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Organización Mundial de la Salud. Obtenido de https://www.who.int/phe/health_topics/AQG_spanish.pdf
- OMS. (2014). *7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/>
- OMS. (2018). *Contaminación del aire de interiores y salud*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- OMS. (2019). *Contaminación Atmosférica*. Obtenido de https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/es/
- Orozco Barrenetxea, C. (2011). *Contaminación Ambiental: Una visión desde la química*. Madrid, España: Paraninfo.
- Radio Biobio. (2019). *Decretan nueva alerta ambiental para el Maule y Talca por episodio crítico de contaminación*. Obtenido de Biobio Chile: <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-maule/2019/05/25/decretan-nueva-alerta-ambiental-para-el-maule-y-talca-por-episodio-critico-de-contaminacion.shtml>
- Rendón, Á., & Jiménez, J. (2008). Rompimiento de la inversión térmica en el Valle de Aburrá. En U. d. Medellín, & G. E. Morales Mira (Ed.), *Tendencias de la investigación en Ingeniería Ambiental* (págs. 163-173). Medellín, Colombia.
- Rivas-Martínez, S. (1 de diciembre de 2008). Recuperado el 24 de septiembre de 2019, de Centro de Investigaciones Fitosociológicas: https://webs.ucm.es/info/cif/book/bioc/bioc_2008_03.pdf

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

- Rojano, R., Mendoza, Y., & Arregoces, H. (2016). Dispersión de contaminantes del aire (PM10, NO2, CO, COV y HAP) emitidos desde una Estación Modular de Compresión, Tratamiento y Medición de gas natural. *Información Tecnológica*, 27(5), 99-110. doi:10.4067/S0718-07642016000500012
- Sampieri Hernández, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). México: McGraw-Hill.
- SEGPRES. (2019). *Constitución Política de la República de Chile 1980*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=242302>
- SEREMI MMA O'Higgins. (2014). *Manual de Orientación a titulares de proyectos ingresados al SEIA en la elaboración del Programa de Compensación de Emisiones establecido en el D.S. N° 15/2013 PDA del Valle Central de la Región de O'Higgins*. Obtenido de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/ManualOrientacion.pdf>
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000*. Obtenido de Servicio Nacional de Geología y Minería: <https://www.sernageomin.cl/geologia-regional/>
- SII. (2019). *Gestión y estadísticas: Estadísticas de Empresa*. Obtenido de Servicio de Impuestos Internos: http://www.sii.cl/sobre_el_sii/estadisticas_de_empresas.html
- SINCA. (2019). *Ficha de Estaciones de Monitoreo*. Obtenido de Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire: <https://sinca.mma.gob.cl/>
- Sistema Nacional de Certificación de Leña. (2019). *Sólo 23% de la leña que se consume en el sur de Chile tiene certificación*. Obtenido de Sistema Nacional de Certificación de Leña: <http://lena.cl/noticias/solo-23-de-la-lena-que-se-consume-en-el-sur-de-chile-tiene-certificacion/>
- SNCL. (2018). *Anuncian proyecto de ley que crea marco regulatorio para la leña*. Obtenido de Sistema Nacional de Certificación de Leña: <http://lena.cl/noticias/anuncian-proyecto-de-ley-que-crea-marco-regulatorio-para-la-lena/>
- Superintendencia del Medio Ambiente. (2014). *Evaluación del instrumento compensación de emisiones Región Metropolitana*. doi:<https://portal.sma.gob.cl/wp-content/uploads/download-manager-files/Estudio%20y%20planes%20de%20compensacio%CC%81n.pdf>
- UC. (2001). *Contaminación atmosférica*. Obtenido de Universidad Católica: http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/pobl/pobl081.htm
- World Atlas. (2018). *Cities with de worst aire quality in South America*. Obtenido de World Atlas: <https://www.worldatlas.com/articles/cities-with-the-worst-air-quality-in-south-america.html>

ANEXOS

Anexo 1: Detalle de usos y sub-usos de suelo para la comuna de Coyhaique.

Uso	Sub-Uso	Área Sub-Uso (km ²)	Área Uso (km ²)	%
Áreas Urbanas-Industriales	Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales	10,6	12,1	0,2
	Minería Industrial	1,5		
Terrenos Agrícolas	Rotación Cultivo-Pradera	12,8	38,8	0,5
	Terrenos de Uso Agrícola	26,0		
Praderas y Matorrales	Estepa Patagónica	835,0	2507,4	34,5
	Matorral	221,1		
	Matorral Pradera Abierto	228,1		
	Matorral Pradera Denso	2,3		
	Matorral Pradera Semidenso	158,0		
	Matorral Semidenso	173,7		
	Praderas Perennes	897,4		
Bosques	Bosque Nativo	2195,6	3009,2	41,5
	Bosques Exóticas Asilvestradas	0,6		
	Plantación	196,8		
	Renoval	624,3		
Humedales	Ñadis Herbáceos y Arbustivos	13,6	95,8	1,3
	Otros Terrenos Húmedos	8,5		
	Turbales	4,2		
	Vegas	68,5		
	Vegetación Herbácea en orillas de ríos	1,0		
Áreas Desprovistas de Vegetación	Áreas Sobre Límite Vegetación	907,1	1192,9	16,4
	Afloramientos Rocosos	244,9		
	Cajas de Ríos	24,9		
	Corridas de Lava y Escoriales	1,1		
	Derrumbes Sin Vegetación	5,5		
	Otros Terrenos Sin Vegetación	8,7		
	Playas y Dunas	0,8		
Nieves y Glaciares	Glaciares	1,3	271,6	3,7
	Nieves	270,3		
Cuerpos de Agua	Lago-Laguna-Embalse-Tranque	125,3	131,6	1,8
	Ríos	6,3		
Total Comunal		7259,5		100

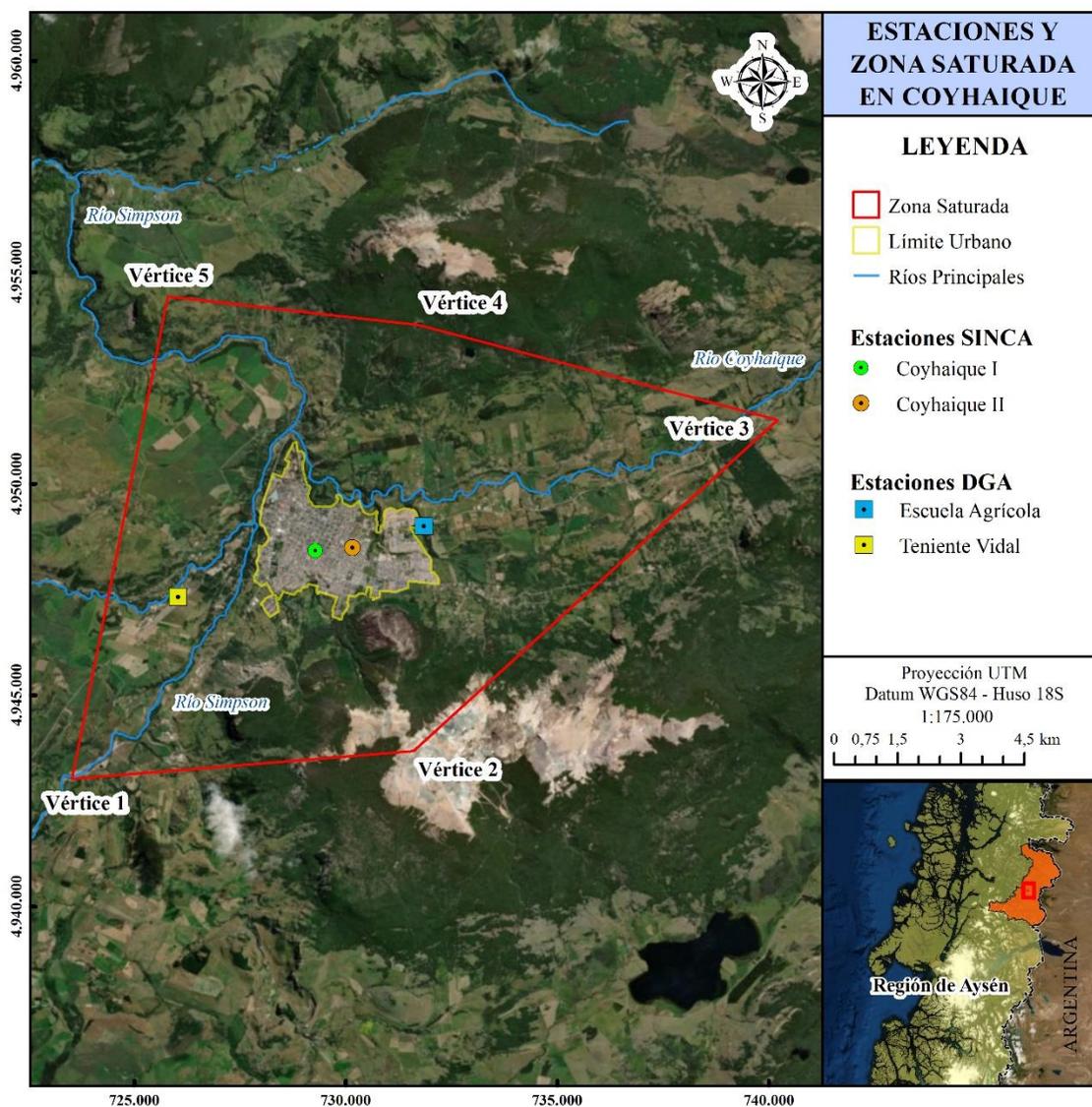
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Anexo 2. Comparativa de grupos de edad según censos de 1992, 2002 y 2017.

Grupos de edad	Censo		
	1992	2002	2017
0-14	33	29	23
15-64	63	66	68
65 o más	4	6	9

Fuente: INE (2018).

Anexo 3. Delimitación de la zona saturada y ubicación de las estaciones DGA y SINCA en Coyhaique.



Fuente: Elaboración propia en base a Ministerio del Interior (2018) y SINCA (2019).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES,
CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Anexo 4: Número de recambio de calefactores por año.

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
N° de recambios	300	330	1690	406	68	1483	1690	2100	1813
Total Realizados	9880								
Pendientes	34455								

Fuente: Elaboración propia en base a Centro de Sistemas Públicos (2019), Municipalidad de Coyhaique (2019) y MMA (2019).

Anexo 5. Registro horario promedio de contaminación por MP10 y MP2.5 entre 2013 y 2019

Coyhaique I		Coyhaique II		Recomendación OMS	
MP10	MP2.5	MP10	MP2.5	MP10	MP2.5
83,3	60,5	61,1	53,4	50,0	25,0
70,6	47,5	49,0	42,3		
59,0	38,9	39,1	32,9		
51,6	33,7	34,3	28,5		
44,9	32,8	37,1	30,6		
45,8	47,0	58,1	49,3		
56,9	63,9	75,9	63,3		
72,1	66,8	76,6	64,6		
74,8	54,7	66,2	54,4		
69,8	38,7	53,7	41,7		
61,1	30,4	46,4	34,7		
58,8	25,9	42,7	30,5		
54,7	23,5	41,2	28,7		
50,9	23,4	40,3	28,4		
50,5	25,5	42,1	30,2		
52,3	32,0	47,5	34,8		
61,6	50,2	63,1	49,6		
80,6	74,4	86,3	70,9		
95,2	96,3	104,9	87,7		
100,9	103,3	111,8	96,0		
108,2	101,0	110,1	95,6		
107,2	93,1	99,2	86,8		
104,7	84,0	88,6	78,2		
94,5	71,5	73,8	64,8		

Fuente: Elaboración propia en base a SINCA (2019) y OMS (2015).

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Anexo 6. Tabla de datos de precipitación mensual acumulada para Estación Escuela Agrícola y Estación Teniente Vidal.

Año	Mes	Pp. EA	Pp. TV
2007	ENERO	0	6,5
	FEBRERO	0	27,3
	MARZO	0	19,3
	ABRIL	0	137
	MAYO	0	43,2
	JUNIO	0	112,2
	JULIO	60,4	69,2
	AGOSTO	40	34,3
	SEPTIEMBRE	48,7	81,7
	OCTUBRE	82,9	104,4
	NOVIEMBRE	17,3	19,1
	DICIEMBRE	30,3	31,1
2008	ENERO	50,1	49,4
	FEBRERO	23,6	26,5
	MARZO	12,5	30,5
	ABRIL	143,2	141,7
	MAYO	87	136,6
	JUNIO	181,5	158,7
	JULIO	127,2	126,4
	AGOSTO	74,9	86,8
	SEPTIEMBRE	13,2	13
	OCTUBRE	27,4	32,6
	NOVIEMBRE	101,4	108,4
	DICIEMBRE	11,5	12,4
2009	ENERO	49,1	55
	FEBRERO	0	124,9
	MARZO	0	109,7
	ABRIL	0	119,7
	MAYO	0	141,4
	JUNIO	0	99,4
	JULIO	0	50
	AGOSTO	0	182,6
2010	SEPTIEMBRE	0	25,9
	OCTUBRE	109,7	121,4
	NOVIEMBRE	72	79,1
	DICIEMBRE	104,7	118
	ENERO	103,6	111,3
	FEBRERO	54	55,8
	MARZO	19,7	20,9
	ABRIL	52	66,4
	MAYO	87,6	83,9
	JUNIO	235,1	223,9
	JULIO	86,2	123,4
	AGOSTO	130,9	146,2
2011	SEPTIEMBRE	43,9	37,5
	OCTUBRE	76,4	67,3
	NOVIEMBRE	42,1	46,3
	DICIEMBRE	48,7	35,2
	ENERO	81,4	74,1
	FEBRERO	23,9	37,4
	MARZO	89,7	86,2
	ABRIL	74,9	66,2
	MAYO	80,3	87,5
	JUNIO	85,9	92,6
	JULIO	138,3	156,8
	AGOSTO	52,8	68,2
SEPTIEMBRE	65,6	69,6	
2012	OCTUBRE	55,8	63,9
	NOVIEMBRE	60,9	48,9
	DICIEMBRE	0	21,7
	ENERO	0	57,3
	FEBRERO	65,4	46,6
	MARZO	0	58,6
	ABRIL	0	74,1
	MAYO	0	202,5
	JUNIO	0	185,2
	JULIO	0	80
	AGOSTO	0	106,3
	SEPTIEMBRE	0	46,3
2013	OCTUBRE	0	75
	NOVIEMBRE	0	80,4
	DICIEMBRE	0	85,4
	ENERO	32,7	39,5
	FEBRERO	0	70
	MARZO	0	32,1
	ABRIL	36,4	30,9
	MAYO	277,6	189,6
	JUNIO	143,8	111,3
	JULIO	213	140,9
	AGOSTO	447,6	264,3
	SEPTIEMBRE	110,2	80,4
OCTUBRE	5,2	11	
NOVIEMBRE	37,3	48,6	
DICIEMBRE	19,6	33,9	
2014	ENERO	54	78,9
	FEBRERO	13,5	24,8
	MARZO	16,7	22,4
	ABRIL	82,7	100,1
	MAYO	191,3	248,2
	JUNIO	65	92,5
	JULIO	43,9	72,5
	AGOSTO	91,8	120,7
	SEPTIEMBRE	51,5	72,7
	OCTUBRE	56,9	77,7
	NOVIEMBRE	59,5	79,7
	DICIEMBRE	44,1	66,8
2015	ENERO	16	34,3
	FEBRERO	6	13,9
	MARZO	111	163,6
	ABRIL	47,8	57,2
	MAYO	189,8	251,8
	JUNIO	76,5	109,5
	JULIO	105,4	159,3
	AGOSTO	103,2	158,4
	SEPTIEMBRE	18,9	26,6
	OCTUBRE	7,6	9,1
	NOVIEMBRE	25,7	30,9
	DICIEMBRE	15,2	24,4
2016	ENERO	3,5	4,4
	FEBRERO	23,4	34,4

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES,
CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

	MARZO	10,9	18,9		JULIO	192,3	239,3		NOVIEMBRE	35,7	78,6	
	ABRIL	28	32		AGOSTO	108,7	156,6		DICIEMBRE	6,7	15,8	
	MAYO	7,4	10,4		SEPTIEMBRE	27,5	41,5		ENERO	22,7	34,8	
	JUNIO	5,1	7,4		OCTUBRE	67,6	81,4		FEBRERO	1,4	12,4	
	JULIO	26,5	40,4		NOVIEMBRE	14,4	19,2		MARZO	8,5	67,2	
	AGOSTO	109,9	121		DICIEMBRE	51,8	85,2		ABRIL	6,5	101	
	SEPTIEMBRE	39,9	39		ENERO	13,5	22,1		MAYO	6,4	52,6	
	OCTUBRE	40,2	39,8		FEBRERO	8,7	16,3		JUNIO	3	174,4	
	NOVIEMBRE	121,5	126,4		MARZO	68,3	96,3		JULIO	0	91,2	
	DICIEMBRE	43,9	53,8		ABRIL	99,2	165,2		AGOSTO	0	75,4	
	2017	ENERO	99,1		124,6	MAYO	46,8		75,4	SEPTIEMBRE	0	24,4
		FEBRERO	69,2		76,8	JUNIO	118,2		172,2	OCTUBRE	0,9	23,8
MARZO		100,4	112,1	JULIO	24,6	35,7	NOVIEMBRE	11,9	74,2			
ABRIL		117,3	111,2	AGOSTO	58	85,2	DICIEMBRE	11,8	47,6			
MAYO		117,2	136,4	SEPTIEMBRE	87,5	132						
JUNIO		114,8	142,4	OCTUBRE	29,7	37,2						

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA en CR2(2019).

Anexo 7. Registros horarios de material particulado del 7 de julio de 2019 para las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II.

Hora	MP10 (C1)	MP2.5 (C1)	MP10 (C2)	MP2.5(C2)	Temperatura
0:00:00	330	328	298	267	2,7
1:00:00	316	306	526	510	2,4
2:00:00	79	85	122	96	2,3
3:00:00	105	106	120	110	1,9
4:00:00	159	155	195	179	1,9
5:00:00	108	105	188	177	1,7
6:00:00	170	167	203	191	1,2
7:00:00	215	213	165	157	1,2
8:00:00	132	130	99	95	0,8
9:00:00	154	147	141	124	0,4
10:00:00	196	194	111	101	1,2
11:00:00	197	189	200	189	2,5
12:00:00	233	205	279	245	3,4
13:00:00	261	226	398	377	4,3
14:00:00	207	183	322	303	5,1

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES,
CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

15:00:00	146	100	158	103	7,4
16:00:00	211	171	329	294	11,2
17:00:00	391	361	398	361	8,1
18:00:00	423	405	495	503	6,6
19:00:00	372	362	408	412	6,4
20:00:00	316	296	343	323	5,8
21:00:00	396	390	410	418	5,4
22:00:00	448	415	291	291	5,5
23:00:00	324	304	382	400	5,5
0:00:00	75	74	156	149	5,0

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SINCA (2019).

Anexo 8. Registro GPS y Contador de Partículas para recorrido a pie en la ciudad de Coyhaique.

ID	Hora	Norte	Este	Altitud	MP2.5	MP10	Temperatura
1	8:58	4949296,2	728085,5	261,4	37	147	8,3
2	9:06	4949629,6	728353,0	280,2	102	350	7,8
3	9:19	4949412,8	728734,9	284,4	56	206	6,6
4	9:26	4949460,0	729094,9	283,8	85	323	5,8
5	9:35	4949223,6	729572,2	302,7	57	225	6,3
6	9:44	4949016,2	730225,3	324,1	19	80	5,9
7	9:48	4948776,3	730116,4	332,7	82	302	6,0
8	9:51	4948619,9	730040,8	348,5	68	248	6,2
9	9:57	4948503,9	730098,9	355,6	100	353	7,0
10	10:03	4948396,3	729951,7	359,9	102	365	6,9
11	10:07	4948176,5	729849,3	371,0	129	437	7,0
12	10:11	4948279,6	729630,5	355,2	178	591	7,4
13	10:15	4948362,9	729450,6	349,7	219	597	7,8
14	10:17	4948432,2	729304,4	341,0	175	376	7,8
15	10:33	4948590,3	728944,9	319,5	36	161	8,1
16	10:38	4948764,5	728573,8	299,5	77	306	7,9
17	10:42	4948881,5	728368,9	292,0	22	100	8,0
18	10:53	4949271,0	728078,3	279,8	22	100	8,7

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en terreno.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN COYHAIQUE: FACTORES CONDICIONANTES, CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO HISTÓRICO-ESPACIAL DEL MP10 y MP2,5.

Anexo 9. Registro GPS y Contador de Partículas para recorrido en vehículo en la ciudad de Coyhaique.

ID	Norte	Este	Altitud	Hora	MP2.5	MP10	Temperatura
1	4947410,97	729900,90	442,73	20:55	549,0	1335,0	7,9
2	4947955,92	730056,40	398,38	20:59	376,0	1055,0	6,7
3	4948156,96	729850,22	383,44	21:02	406,0	1138,0	6,2
4	4947922,34	730364,02	394,88	21:11	1143,0	2206,0	7,2
5	4947743,17	731014,04	426,97	21:14	683,0	1543,0	6,9
6	4947485,13	731259,29	479,00	21:15	37,0	169,0	6,8
7	4947687,05	731991,81	472,16	21:21	27,0	142,0	5,8
8	4948265,20	731940,85	416,25	21:29	166,0	583,0	6,9
9	4948678,18	731285,38	363,54	21:32	89,0	314,0	6,3
10	4949100,94	731248,98	324,80	21:35	152,0	538,0	5,9
11	4949005,46	730375,57	334,24	21:40	171,0	592,0	5,4
12	4948544,34	730161,09	360,05	21:48	428,0	1131,0	5,9
13	4948280,67	729886,49	370,89	21:50	349,0	995,0	5,6
14	4948423,92	729287,34	344,32	21:53	314,0	937,0	5,9
15	4948875,40	729425,54	315,83	21:56	334,0	991,0	6,0
16	4949337,83	729635,25	300,58	21:59	152,0	557,0	5,7
17	4949445,11	729100,39	283,35	22:04	111,0	430,0	5,6
18	4950091,56	728966,30	278,60	22:09	70,0	291,0	6,1
19	4949913,50	728530,27	283,11	22:11	174,0	568,0	6,0
20	4949471,35	728717,65	284,93	22:14	151,0	538,0	5,7
21	4948967,59	728527,12	292,73	22:18	111,0	434,0	5,6
22	4948221,98	728233,26	296,02	22:22	169,0	577,0	5,4
23	4947289,11	728101,50	359,47	22:26	98,0	380,0	5,9
24	4947132,86	728724,28	438,25	22:30	59,0	254,0	5,8
25	4947627,85	728704,28	375,52	22:35	217,0	729,0	5,6
26	4948107,92	728912,68	340,84	22:45	417,0	1099,0	5,4
27	4948301,71	729091,86	342,47	22:49	467,0	1216,0	5,6
28	4948175,61	729414,94	360,50	22:57	135,0	493,0	6,0
29	4948655,31	728816,63	315,21	23:01	325,0	940,0	5,4
30	4948789,40	728544,67	300,22	23:02	207,0	685,0	5,3
31	4949133,52	728211,53	286,81	23:04	171,0	597,0	5,5
32	4949331,53	728425,10	286,43	23:05	180,0	610,0	5,0
33	4949286,07	728085,53	280,84	23:06	141,0	508,0	5,4
34	4949299,88	728079,00	281,06	23:09	60,0	250,0	5,2

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en terreno.