



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ciencias Químicas
Departamento Ciencias de la Tierra



**CARACTERIZACIÓN DE METALES Y METALOIDES
EN EL MATERIAL PARTICULADO FINO DE LA
CIUDAD DE COYHAIQUE, REGIÓN DE AYSÉN DEL
GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO, CHILE.**

Memoria para optar al título de Geóloga

Maritza Fernanda Aránguiz Ojeda

Profesora Patrocinante: Dra. Verónica Oliveros Clavijo
Profesionales Guía: Dra. Ana Valdés Durán
Dr. Dante Cáceres Lillo
Profesores Comisión: Dr. Alexey Novoselov
Dra. Javiera Gerding González

Concepción, 2025

*Dedicado a mis padres,
Mónica y Fernando.*

*A mi tierra querida, Coyhaique,
inspiración profunda de este trabajo.*

*En honor a la Patagonia y sus raíces,
cuya fuerza y belleza me han formado.*

ÍNDICE

Página

RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS	3
1.4. MARCO TEÓRICO	4
1.4.1. Conceptos de contaminación atmosférica	4
1.4.2. Metales y metaloides	7
1.4.3. Normas ambientales y calidad del aire	9
1.4.4. Estado del arte	11
1.5. FINANCIAMIENTO	14
1.6. AGRADECIMIENTOS	15
2. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO	16
2.1. CLIMA	16
2.1.1. Temperaturas.....	18
2.1.2. Precipitaciones.....	21
2.1.3. Humedad.....	23
2.1.4. Velocidad y dirección del tiempo.....	25
2.1.5. Inversión térmica.....	30
2.2. GEOMORFOLOGÍA	31
2.3. EVOLUCIÓN DEL MP_{2,5} EN COYHAIQUE	35
2.4. FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE MP_{2,5}	36
2.4.1. Fuentes antropogénicas	36
2.4.1.1. Combustión residencial.....	36
2.4.1.2. Calderas.....	37
2.4.1.3. Transporte.....	38
2.4.1.2. Quemadas agrícolas y forestales.....	39
2.4.2. Fuentes naturales.....	39
2.4.2.1. Incendios forestales.....	39
2.4.2.2. Erosión de material geológico.....	40
3. METODOLOGÍA	44
3.1. METODOLOGÍAS DE TOMA DE MUESTRAS	44
3.1.1. Concentraciones totales de MP _{2,5} y variables climáticas de la red SINCA.....	44
3.1.2. Concentraciones elementales de MP _{2,5} y variables climáticas en terreno.....	46
3.1.2.1. Preparación de campaña en terreno	47
3.1.2.1.1. Criterios de selección de puntos de muestreo... ..	47
3.1.2.1.1.1. Zonificación de la ciudad.....	47
3.1.2.1.1.2. Selección de viviendas.....	49

3.1.2.1.1.3. Pareamiento de viviendas.....	49
3.1.2.1.1.4. Asignación de códigos.....	50
3.1.2.1.2. Equipos de muestreo.....	51
3.1.2.1.2.1. PEM.....	52
3.1.2.1.2.2. DUST TRAK	53
3.1.2.1.2.3. EPAM5000.....	54
3.1.2.1.2.4. HOBO.....	56
3.1.2.1.3. Preparación de filtros de muestreo	56
3.1.2.2. Desarrollo campaña en terreno.....	57
3.1.2.2.1. Muestras blanco.....	57
3.1.2.2.2. Protocolo de instalación de equipos de muestreo.....	57
3.1.2.3. Posterior a la campaña en terreno	59
3.1.2.3.1. Cálculos de volumen por filtro.....	60
3.2. METODOLOGÍA DE LABORATORIO.....	60
3.3. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE DATOS	62
3.3.1. Datos de la red SINCA	62
3.3.1.1. Exploración y validación de datos	62
3.3.1.2. Procesamiento de datos de la red SINCA.....	62
3.3.1.2.1. Evolución de MP _{2,5} en la última década.....	62
3.3.1.2.2. Concentraciones totales de MP _{2,5} y variables climáticas.....	63
3.3.2. Datos de campaña en terreno	65
3.3.2.1. Exploración y validación de datos en terreno.....	65
3.3.2.1.1. Corrección con muestras blanco	67
3.3.2.2. Procesamiento de datos de terreno.....	67
3.3.2.2.1. Masa acumulada en filtros.....	67
3.3.2.2.2. Concentraciones totales, temperatura y humedad dentro y fuera de las viviendas	68
3.3.2.2.2.1. Variabilidad y distribución de concentraciones de MP _{2,5} en el interior y exterior de las viviendas.....	69
3.3.2.2.3. Concentraciones elementales de metales y metaloides dentro y fuera de las viviendas.....	70
3.3.2.2.3.1. Análisis de elementos mayores, traza y tierras raras: Interior y exterior.....	71
3.3.2.2.4. Cumplimiento de la normativa vigente de calidad del aire.....	72
4. RESULTADOS.....	74
4.1. DATOS RED SINCA	74
4.1.1. Evolución de MP _{2,5} en la última década	74
4.1.2. Concentraciones totales de MP _{2,5} y variables climática red SINCA.....	76
4.2. DATOS DE CAMPAÑA EN TERRENO	81
4.2.1. Masa acumulada en filtros	82
4.2.2. Concentraciones totales MP _{2,5} , temperatura y humedad dentro y fuera de las viviendas.....	84
4.2.2.1. Variabilidad y distribución de concentraciones de MP _{2,5} en el interior y exterior de las viviendas.....	104

4.2.3. Concentraciones elementales de metales y metaloides dentro y fuera de las viviendas	106
4.2.3.1. Elementos mayores	106
4.2.3.1.1. Elementos mayores al interior	107
4.2.3.1.2. Elementos mayores al exterior	115
4.2.3.1.3. Análisis de elementos mayores: Interior y exterior.....	122
4.2.3.2. Elementos traza y tierras raras.....	128
4.2.3.2.1. Elementos traza y tierras raras al interior.....	128
4.2.3.2.2. Elementos traza y tierras raras al exterior.....	136
4.2.3.1.3. Análisis de elementos traza y tierra raras: Interior y exterior	144
4.2.4. Cumplimiento de la normativa vigente de calidad del aire.....	152
5. DISCUSIONES	155
5.1. DATOS DE LA RED SINCA	155
5.1.1. Evolución de MP _{2,5} en la última década	155
5.1.2. Concentraciones totales y variables climáticas red SINCA	156
5.2. DATOS DE CAMPAÑA EN TERRENO	158
5.2.1. Masa acumulada en filtros.....	158
5.2.2. Concentraciones totales de MP _{2,5} , temperatura y humedad dentro y fuera de las viviendas.....	158
5.2.2.1. Variabilidad y distribución de concentraciones de MP _{2,5} en el interior y exterior de las viviendas	161
5.2.3. Concentraciones elementales de metales y metaloides dentro y fuera de las viviendas.....	163
5.2.3.1. Comparación de elementos mayores, traza y tierras raras	164
5.2.3.1.1. Patrones generales de concentración.....	164
5.2.3.1.2. Comparación interior versus exterior	167
5.2.3.1.3. Relación con fuentes de contaminación.....	169
5.2.4. Cumplimiento de la normativa vigente de calidad del aire	170
6. CONCLUSIONES	172
REFERENCIAS.....	175
ANEXOS.....	181

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1. 1.	Mapa de ubicación.....	3
1. 2.	Tabla periódica de los elementos.....	7
1. 3.	Tabla periódica de los elementos con metales pesados	8
1. 4.	Cuadro resumen de niveles de calidad del aire y episodios críticos a partir del ICAP	10
1. 5.	Número de investigaciones que tratan de aerosoles atmosféricos publicados hasta 2015	9
1. 6.	Mapa de zona saturada por MP _{2,5} en Coyhaique.....	13

2.	1.	Ilustración de la distribución general de los vientos en Sudamérica junto con la precipitación media anual	16
2.	2.	Mapa de clasificación de Köppen-Geiger (1980-2016) en la región de Aysén.....	17
2.	3.	Ubicación de estaciones meteorológicas en Coyhaique.....	18
2.	4.	Promedios anuales de temperatura ambiente (°C) registrados por la red SINCA (2015-2022)	19
2.	5.	Serie de tiempo de promedios anuales de temperatura mínima, media y máxima (°C) registrados en ATV (2011-2022)	20
2.	6.	Promedio mensual de temperaturas mínimas, medias y máximas (°C) en estación ATV (2011-2022)	21
2.	7.	Precipitaciones anuales acumuladas (mm) registradas en estación ATV (2011-2022)	22
2.	8.	Precipitaciones acumuladas mensuales (mm) en estación ATV (2011-2022)	23
2.	9.	Promedio anual de humedad relativa (%) en estaciones ATV, COYI, COYII (2011-2022)	24
2.	10.	Promedios mensuales de humedad relativa (%) en estación ATV (2011-2022)	25
2.	11.	Serie de tiempo de promedios anuales de velocidad del viento (m/s) en estaciones ATV, COYI y COYII (2011-2022).....	26
2.	12.	Rosa de los vientos verano a) estación ATV entre 2011-022, b) estación COYI entre 2011-2022 y c) estación COYII entre 2014-2022.....	27
2.	13.	Rosa de los vientos otoño a) estación ATV entre 2011-022, b) estación COYI entre 2011-2022 y c) estación COYII entre 2014-2022.....	27
2.	14.	Rosa de los vientos invierno a) estación ATV entre 2011-022, b) estación COYI entre 2011-2022 y c) estación COYII entre 2014-2022.....	28
2.	15.	Rosa de los vientos primavera a) estación ATV entre 2011-022, b) estación COYI entre 2011-2022 y c) estación COYII entre 2014-2022...	29
2.	16.	Variación mensual (a) y horaria (b) de las velocidades del viento en m/s (2013-2020).....	30
2.	17.	Representación gráfica de inversión térmica.....	30
2.	18.	Esquema a escala local de la representación de inversión térmica en Coyhaique.....	31
2.	19.	Unidades geomorfológicas de la región de Aysén según Börgel (1983)..	32
2.	20.	Mapa de elevación de Coyhaique y alrededores.....	33
2.	21.	Perfil topográfico de elevación A-A'	33
2.	22.	Mapa de pendientes de Coyhaique.....	34
2.	23.	Serie de tiempo de las concentraciones de MP10 (líneas azules) y MP2.5 (líneas rojas) para las estaciones en estudio.....	35
2.	24.	Mapa geológico de la ciudad de Coyhaique.....	41
3.	1.	Monitor BAM 1020.....	43

3.	2.	Ubicación de estaciones de monitoreo y puntos de muestreo de MP _{2,5} en Coyhaique.....	46
3.	3.	Mapa de zonas geomorfológicas locales o zonas prioritarias.....	48
3.	4.	Distribución de las viviendas seleccionadas y sus respectivos códigos...	49
3.	5.	PEM y sus partes.....	51
3.	6.	Bomba modelo Airchek Sampler universal 44XR Sample Pump.....	52
3.	7.	Dust Trak y sus partes.....	53
3.	8.	EPAM5000 y sus principales elementos.....	54
3.	9.	Modelo de HOBO utilizado.....	55
3.	10.	Balanza analítica modelo BOECO BAS 31 PLUS.....	56
3.	11.	Espectrómetro Thermo model Quant'X EDXRF.....	60
3.	12.	Gráfico de porcentaje de muestras con concentraciones cero.....	66
3.	13.	Gráfico de boxplot y sus partes.....	68
4.	1.	Promedios anuales de MP _{2,5} entre 2013 a 2023.....	74
4.	2.	Serie de tiempo de MP _{2,5} del 26 de febrero al 30 de marzo en COYI.....	76
4.	3.	Serie de tiempo de MP _{2,5} del 26 de febrero al 30 de marzo en COYII.....	77
4.	4.	Gráfico de niveles MP _{2,5} y parámetros climáticos en COYI.....	78
4.	5.	Gráfico de niveles MP _{2,5} y parámetros climáticos en COYII.....	79
4.	6.	Rosa de vientos combinada con niveles MP _{2,5} en COYI.....	80
4.	7.	Rosa de vientos combinada con niveles MP _{2,5} en COYII.....	80
4.	8.	Ubicación de los puntos de muestreo y sus códigos.....	81
4.	9.	Gráfico de masa acumulada en filtros de teflón.....	82
4.	10.	a) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en CR01. b) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en SR01.....	85
4.	11.	a) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en CR04. b) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en SR04.....	87
4.	12.	a) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en CR05. b) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en SR05.....	90
4.	13.	a) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en CR06. b) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en SR06.....	93
4.	14.	a) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en CR07. b) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en SR07.....	96
4.	15.	a) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en CR08. b) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en SR08.....	99
4.	16.	a) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en CR09. b) Serie de tiempo MP _{2,5} , temperatura y humedad en SR09.....	102
4.	17.	a) Boxplot de concentraciones de MP _{2,5} al interior de las viviendas. b) Boxplot de concentraciones de MP _{2,5} al exterior de las viviendas.....	103
4.	18.	Concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas de la zona centro	107

4.	19.	Concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Divisadero	109
4.	20.	Concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Mackay.	111
4.	21.	Concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas de las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique.	113
4.	22.	Concentraciones de elementos mayores al exterior de las viviendas de la zona centro	115
4.	23.	Concentraciones de elementos mayores al exterior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Divisadero.....	116
4.	24.	Concentraciones de elementos mayores al exterior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Mackay.....	118
4.	25.	Concentraciones de elementos mayores al exterior de las viviendas de las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique.....	119
4.	26.	Gráfico de diferencias de concentraciones (%).....	121
4.	27.	a) Gráfico de boxplot de elementos mayores al interior de las viviendas. b) Gráfico de boxplot de elementos mayores al exterior de las viviendas.	126
4.	28.	Concentraciones de elementos traza y tierras raras al interior de las viviendas de la zona centro.....	128
4.	29.	Concentraciones de elementos traza y tierras raras al interior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Divisadero.....	130
4.	30.	Concentraciones de elementos traza y tierras raras al interior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Mackay.....	132
4.	31.	Concentraciones de elementos traza y tierras raras al interior de las viviendas de las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique.....	134
4.	32.	Concentraciones de elementos traza y tierras raras al exterior de las viviendas de la zona centro.....	136
4.	33.	Concentraciones de elementos traza y tierras raras al exterior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Divisadero.....	138
4.	34.	Concentraciones de elementos traza y tierras raras al exterior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Mackay.	140
4.	35.	Concentraciones de elementos traza y tierras raras al exterior de las viviendas de las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique.....	142
4.	36.	Gráfico de diferencias de concentraciones (%) de elementos traza y La...	144
4.	37.	a) Gráfico de boxplot de traza y tierras raras al exterior de las viviendas. b) Gráfico de boxplot de elementos traza al exterior de las viviendas.....	150
4.	38.	Promedios de MP _{2,5} en 24 h a) interior y b) exterior.....	152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1.	1. Clasificación de los contaminantes	8
1.	2. Comparación de límites de MP de la OMS y Chile	10
3.	1. Zonas geomorfológicas con sus respectivos rangos de pendiente y elevación	47
3.	2. Distribución de los equipos al interior exterior de las viviendas	57

RESUMEN

Coyhaique enfrenta un complejo escenario de contaminación por $MP_{2,5}$ en los últimos años. Desde 2003 se han realizado diversas campañas de monitoreo de $MP_{2,5}$ que permitieron identificar la quema de leña como principal fuente de emisiones, aunque también se ha reconocido la influencia de factores climáticos y geomorfológicos. Hasta ahora los estudios se han enfocado únicamente en realizar mediciones de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ en la ciudad. Este trabajo es el primero en abordar la caracterización de este $MP_{2,5}$, en términos de sus concentraciones elementales, totales y dinámica de distribución, desde un enfoque intra y extra domiciliario.

Se obtuvieron datos en línea de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ y variables climáticas de las estaciones COYI y COYII de la red SINCA, a partir de los cuales se generaron gráficos de líneas, dispersión y series de tiempo. Además, entre febrero y marzo de 2022, se llevó a cabo una campaña de terreno en la que se recolectaron muestras de $MP_{2,5}$ en filtros de teflón, junto con registros de temperatura y humedad, dentro y fuera de 18 viviendas de la ciudad. Las muestras se obtuvieron durante un período de 48 horas por vivienda y se codificaron según el tipo de calefacción utilizado. Para definir las áreas de monitoreo, se priorizaron zonas según la elevación y pendiente del terreno, también se establecieron criterios específicos para la selección de viviendas. Los filtros fueron analizados mediante fluorescencia de rayos X (XRF) en *Chester LabNet*, Estados Unidos. Los elementos identificados fueron agrupados en elementos mayores, traza y tierras raras, en función de su abundancia relativa en el contexto de estudio. En base a estos datos, se elaboraron gráficos de series de tiempo para concentraciones de $MP_{2,5}$, temperatura y humedad en cada vivienda y gráficos de boxplot, además de gráficos de líneas y barras por zonas prioritarias con los metales y metaloides identificados.

Los resultados de los datos analizados de la red SINCA, muestran que la evolución de $MP_{2,5}$ en la última década está caracterizada por promedios anuales que tienden a homogeneizarse, sin embargo, siguen superando las normativas ambientales. Los resultados de la campaña en terreno, revelan que, tanto al interior como al exterior, las mayores concentraciones de $MP_{2,5}$ ocurren durante las mañanas, tardes y noches y que la temperatura ejerce un claro control de la humedad relativa. Además, se identificó la presencia de los siguientes metales y metaloides: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Pd, Ag, In, Sn, Sb, Ba, La, Hg y Pb, los que representan una pequeña fracción del MP circundante. Las zonas prioritarias de monitoreo mostraron diferencias significativas en relación a los metales y metaloides identificados, la zona centro presentó menores concentraciones de metales y metaloides, posiblemente debido a su topografía plana y características urbanas. Las zonas de pie de monte de los cerros Divisadero y Mackay y las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique, mostraron mayores concentraciones en general. Teóricamente, se propone que la mayoría de los elementos mayores podrían provenir de un aporte cortical. Por otro lado, gran parte del K provendría de la quema de leña en calefacción residencial. Los elementos traza más abundantes podrían estar asociados a fuentes antropogénicas. Durante el monitoreo, se registró en general buena calidad del aire en el interior y exterior de las viviendas, excepto en algunos casos que superaron las normativas nacionales e internacionales.

Se sugiere ampliar la red de monitoreo de SINCA para capturar mejor la variabilidad espacial y profundizar en el estudio de fuentes y procesos de emisión de los metales y metaloides identificados, así como su relación con factores climáticos. Esta investigación constituye un aporte significativo al conocimiento de la contaminación por $MP_{2,5}$ en Coyhaique y destaca la importancia de un monitoreo continuo y futuras investigaciones que evalúen el impacto en la salud pública.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Coyhaique, capital de la región de Aysén, se ubica en el sector oriental de los Andes Patagónicos a 310 m s.n.m., rodeada por los ríos Simpson y Coyhaique. Según el CENSO de 2017, cuenta con aproximadamente 57.818 habitantes. En 2016, Coyhaique se convirtió en noticia a nivel nacional e internacional debido a una situación alarmante: fue catalogada por la OMS como la ciudad más contaminada por Material Particulado Fino (MP_{2,5}) en América, dentro del grupo de países que monitorean y publican este tipo de datos.

El problema de contaminación en Coyhaique comenzó a visibilizarse en el año 2003, cuando comenzaron las primeras campañas de medición de Material Particulado (MP) en la ciudad (Silva y otros, 2017) por parte de la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). Estas iniciativas se vieron fortalecidas con la implementación de un monitoreo continuo en los años 2007 y 2013, a través de estaciones del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) del Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (Silva y otros, 2017).

En 2012 la ciudad fue declarada zona saturada por Material Particulado Respirable (MP₁₀) (Decreto Supremo N°33, 2012), lo que implicó el desarrollo de un Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante (Decreto Supremo N° 46, 2016). Posteriormente, en 2016 la ciudad es declarada zona saturada por MP_{2,5} (Decreto Supremo N°7, 2016), lo que obligó a actualizar el PDA vigente y pone urgencia a la elaboración de diversos estudios e investigaciones científicas sobre el comportamiento de este fenómeno de contaminación atmosférica.

Los estudios realizados hasta la fecha han identificado que el MP, corresponde en su mayoría a MP_{2,5} (EnviroModeling Ltda., 2009) y que el 99,7% del total de las emisiones de MP se originan a partir de la quema de leña, siendo esta la forma predominante de calefacción residencial en la zona (Silva y otros, 2017;Perez y otros, 2020; Ye-Li y otros, 2022). A pesar de que la fuente principal de contaminación esté identificada, esta problemática de contaminación atmosférica en la ciudad es multifactorial, ya que además del comportamiento antrópico, depende de factores como el clima y la geomorfología (relieve) del lugar (Ministerio del Medio Ambiente, 2016). Todos estos elementos interactúan y contribuyen al desarrollo de esta problemática, exigiendo un enfoque integral de acción para su resolución.

El desarrollo de investigaciones como las de Acuña (2014), Gallardo (2020), Muñoz & Cáceres (2020), Pérez y otros (2020), Solís (2021), Gómez (2022) y Ye-Li y otros (2022), han permitido comprender hasta ahora que la contaminación de MP_{2,5} en Coyhaique tiene: (1) un

marcado comportamiento estacional con aumento de los niveles de $MP_{2,5}$ en los meses de otoño e invierno, (2) un pronunciado comportamiento horario con aumento de concentraciones en las mañanas y tardes, (3) que el clima tanto a escala local como regional puede favorecer o dificultar la dispersión de contaminantes, y también (4) que ha habido un aumento de consultas por enfermedades respiratorias e incluso de consultas por cáncer cardiopulmonar en la ciudad (Acuña, 2014; Muñoz & Cáceres, 2020; Ye-Li y otros, 2022)).

A pesar de estos hallazgos significativos, hasta la fecha no se han realizado estudios que consideren la composición del $MP_{2,5}$ en la ciudad, a pesar de que esta recomendación fue planteada por EnviroModeling Ltda. (2009) en el primer inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos realizado en la zona. La ausencia de este tipo de análisis representa una brecha crítica en el entendimiento de esta problemática ambiental, subrayando la importancia de avanzar en este tipo de investigaciones.

En este contexto, el presente trabajo de memoria se enfoca en la exploración de la composición del $MP_{2,5}$ para identificar la concentración de metales y metaloides presentes en esta fracción y su posible proveniencia. Los datos empleados se obtuvieron durante una campaña de muestreo realizada entre febrero y marzo de 2022, donde se recolectaron muestras de $MP_{2,5}$ en 18 casas de la comuna, tanto dentro como fuera de las viviendas por un período continuo de 48 horas. Asimismo, la información se complementó con datos de la red SINCA, para obtener información sobre el registro diario y horario de $MP_{2,5}$ y variables climáticas como temperatura ambiente, humedad, velocidad y dirección del viento durante el período de muestreo. A través del análisis conjunto de estos datos, se busca mejorar la comprensión y caracterización del $MP_{2,5}$, con el propósito de enriquecer el conocimiento existente sobre la problemática de contaminación atmosférica en la ciudad.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Caracterizar el material particulado fino de la ciudad de Coyhaique, en términos de sus concentraciones elementales, totales y su dinámica de distribución.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar la evolución de $MP_{2,5}$ en la última década en la ciudad.
- Determinar las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ y su dinámica de distribución en la ciudad de Coyhaique.
- Comparar niveles de contaminación de $MP_{2,5}$ al interior y exterior de las viviendas.

- Identificar la composición y concentración de los metales y metaloides en el material particulado fino de Coyhaique.
- Comparar niveles de metales y metaloides al interior y exterior de las viviendas.
- Proponer teóricamente potenciales fuentes para los metales y metaloides identificados.
- Analizar el grado de cumplimiento de la normativa ambiental vigente respecto a la calidad del aire en la ciudad.

1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS

El área de estudio corresponde a los límites urbanos de la ciudad de Coyhaique comprendida entre los 45° 33' - 45° 35' latitud S y entre los 72° 05'-72° 01' longitud W, de la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, Chile. Las principales vías de acceso corresponden a la carretera austral o ruta 7 que conecta con las demás comunas de la región (Figura 1.1).

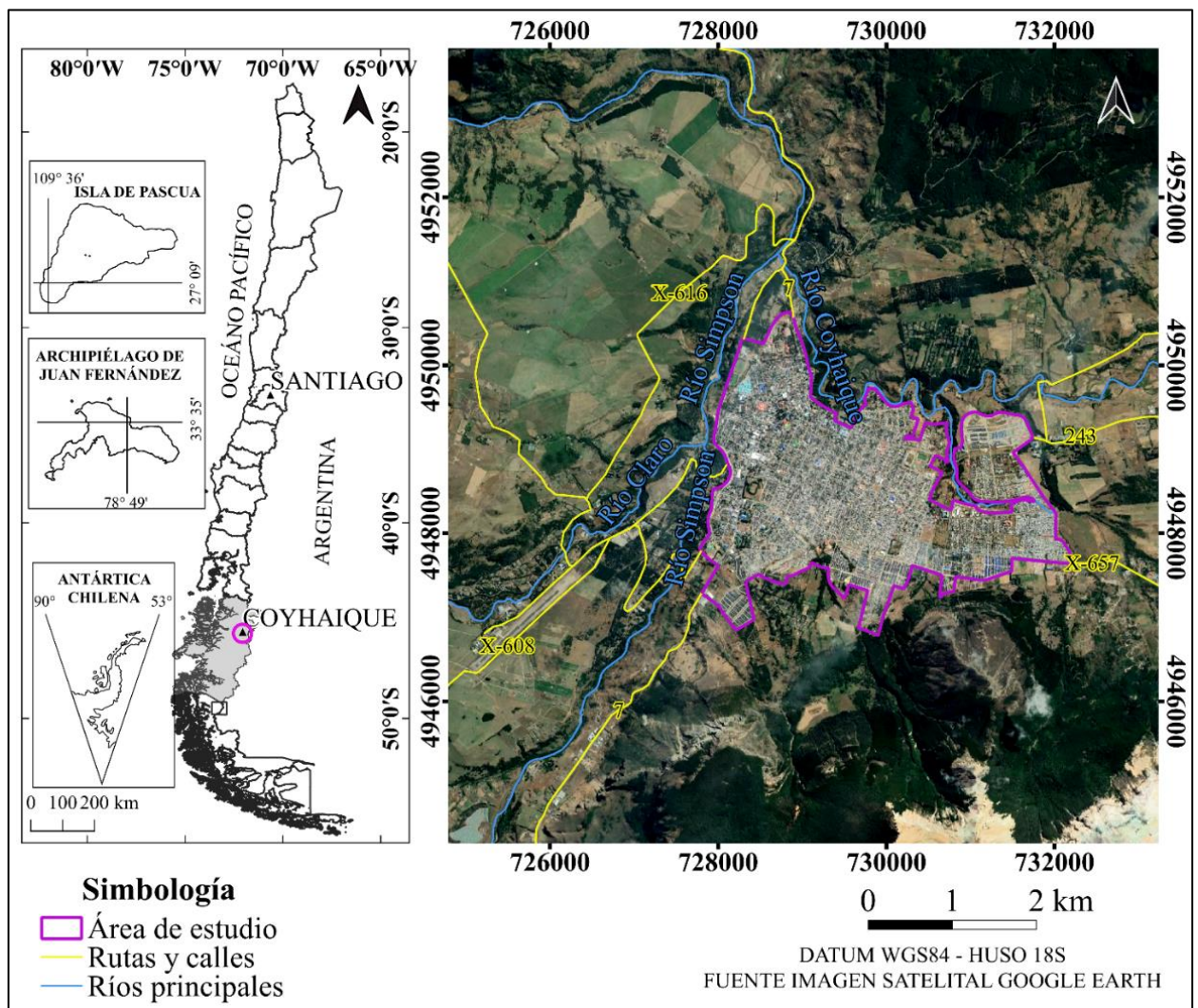


Figura 1.1. Mapa de ubicación. Elaboración propia.

1.4. MARCO TEÓRICO

1.4.1. Conceptos de contaminación atmosférica

La atmósfera es una capa gaseosa que envuelve a la litósfera e hidrósfera; aquí se desarrollan todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan al planeta (Seinfeld y Pandis, 2016). Se compone principalmente de gases como N₂ (78%), O₂ (21%), Ar (1%), además de otros gases en menor proporción como CO₂, He, Ne y O₃. Las abundancias de estos gases están controladas en escalas de tiempo geológicas por la biósfera, la absorción y liberación del material de la corteza y la desgasificación del interior de la Tierra (Seinfeld y Pandis, 2016). En los últimos años, esta composición natural ha sido modificada debido a las intervenciones humanas (Morales, 2016 en Carrasco 2018). Por lo tanto, actualmente la atmósfera debe entenderse como un reactor químico de grandes dimensiones que constituye un medio físico donde interactúan especies en diferentes fases (Morales, 2016 en Carrasco 2018).

El término “contaminación” y su sinónimo “polución” se entienden como la alteración de las condiciones normales de cualquier medio, que puede resultar nociva para los seres vivos, ecosistemas y objetos. Asimismo, por “contaminantes”, se considera a determinados agentes físicos, químicos o biológicos ajenos al medio, los cuales debido a su composición y proporción causan daño a este (Dávila, 2011; Sarmiento y otros, 2021).

En Chile ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente define como “contaminación” a la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente. La definición de “contaminante” corresponde a todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda 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.

Así, para efectos de este trabajo se entenderá por “contaminación atmosférica” a la presencia en el aire de uno o más contaminantes, o cualquier combinación de ellos en concentraciones o niveles tales que puedan constituir un riesgo a la salud de las personas, afectar la calidad de vida de la población o la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental.

Los contaminantes presentes en la atmósfera pueden originarse por procesos naturales o debido a las actividades humanas, así se definen dos tipos de fuentes: naturales (biogénicas/geogénicas) y antropogénicas (Morata y otros, 2008; Ministerio del Medio

Ambiente, 2016). Las fuentes naturales corresponden a eventos de contaminación producidos por fenómenos propios de la naturaleza, ya sean erosiones de suelo o roca, incendios forestales, erupciones volcánicas, descomposición de vegetación y tormentas de polvo, etc. Mientras que las fuentes antropogénicas están asociadas a intervenciones humanas, siendo la principal causa la combustión de materiales, ya sea por industrias, vehículos, hogares, vertederos, actividad minera, etc. Esta última categoría a su vez puede subdividirse en fuentes fijas, móviles y fugitivas (Ministerio del Medio Ambiente, 2016). Las fuentes fijas son aquellas situadas en lugar físico particular, las fuentes móviles aquellas que pueden desplazarse, y las fuentes fugitivas comprenden emisiones que no son canalizadas por ductos, chimeneas u otros sistemas hacia el exterior (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Los potenciales contaminantes más comunes en la atmósfera corresponden al Material Particulado (MP), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), plomo (Pb) y ozono troposférico (O₃). Según su procedencia estos contaminantes pueden clasificarse en primarios y secundarios (Tabla 1.1). Los primarios corresponden a aquellos que provienen directamente de fuentes de emisión como de artefactos de calefacción domiciliaria, chimeneas industriales y automóviles; los secundarios se originan mediante reacciones químicas que puedan ocurrir entre dos o más potenciales contaminantes primarios y elementos propios de la atmósfera (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Tabla 1.1. Clasificación de los contaminantes en el aire (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Óxidos de carbono (CO _x)	O ₃ (troposférico)
Compuestos nitrogenados (NO _x , NH ₃ , N ₂ O)	Hidrocarburos oxidados
Compuestos azufrados (SO _x y SO ₂)	Aerosoles orgánicos secundarios
Material Particulado (MP ₁₀ y MP _{2.5})	Sulfatos
Hidrocarburos	Nitratos
Metales	Material particulado secundario

En específico, el MP es un tipo aerosol constituido por partículas sólidas y líquidas suspendidas y dispersas en el aire (Seinfeld y Pandis, 2016). Se denomina material particulado respirable a todas las partículas sólidas suspendidas cuyo diámetro aerodinámico sea ≤ 10 micrones (μm) (MP₁₀), ya que esta es la fracción que tiene la capacidad para ingresar al cuerpo humano (Salini, 2014). A su vez, el material particulado respirable se puede clasificar según su tamaño como fracción gruesa o MP_{2,5-10} (10-2,5 μm) y fracción fina MP_{2,5} (< 2,5 μm), así esta

relación se puede expresar como $MP_{10} = MP_{2,5} + MP_{2,5-10}$ (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

El origen del material particulado primario de tipo MP_{10} se asocia al polvo en suspensión generado por el tráfico, la construcción, material geológico grueso, quemas agrícolas y de leña (Salini, 2014; Seinfeld y Pandis, 2016), mientras que el $MP_{2,5}$ proviene principalmente de la combustión residencial, los procesos industriales, material geológico fino y los vehículos gasolineros y diesel (Colville y otros, 2001 en Salini, 2014; Seinfeld y Pandis, 2016).

El material particulado secundario, se produce en la atmósfera como resultado de reacciones químicas a partir de gases precursores como compuestos inorgánicos SO_2 , NO_x y NH_2 y COV, este proceso tiende a dar como resultado partículas de tamaños $> 2,5 \mu m$, lo que contribuye a aumentar la masa total de $MP_{2,5}$ (Morales R. & Leiva-Guzmán M., 2005 en Solís, 2021).

El tiempo de vida o duración del MP en la atmósfera puede ser de días a semanas, alcanzando una distribución espacial de miles de kilómetros, lo que amplifica su impacto ambiental (US EPA, 1996 en Solís, 2021). En este contexto, los procesos que favorecen la remoción o dispersión de MP como la deposición húmeda o seca juegan un papel fundamental. Estos procesos están influenciados por factores como la dimensión de las partículas, su forma, composición química y densidad (Yu y otros 2018; Meng y otros, 2019 en Massimi y otros 2020).

La deposición seca corresponde al transporte de especies gaseosas y particuladas desde la atmósfera sobre las superficies en ausencia de precipitaciones; mientras que la deposición húmeda se asocia a los procesos naturales mediante los cuales los hidrometeoros atmosféricos, ya sea nubes, gotas de niebla, lluvia o nieve, recogen el MP y, en consecuencia, lo transportan a la superficie de la Tierra (Seinfeld y Pandis, 2016). Además, se considera la sedimentación de estas partículas como un proceso de remoción adicional, esta se produce por el campo gravitatorio y está asociada a la densidad de las partículas (Figueroa y Dávila, 2004 en Gómez 2022).

Los efectos del MP en la salud de las personas han sido ampliamente estudiados, y en función de sus propiedades se ha determinado que mientras menor sea el diámetro mayor será la capacidad de penetrar en el sistema respiratorio humano (Sarmiento y otros, 2021). El MP_{10} alcanza a ingresar hasta la zona de la nasofaringe generando procesos infecciosos agudos como faringitis, amigdalitis y rinofaringitis, pero las partículas de $MP_{2,5}$ penetran hasta los alvéolos pulmonares e ingresan directamente al torrente sanguíneo produciendo no solo problemas inflamatorios, sino que patologías como fibrosis pulmonar y neoplásicas como cáncer,

aumentando los riesgos de mortalidad prematura en la población. En el medio ambiente, se reconoce que altas concentraciones de MP puede también dañar a las plantas, inhibir el crecimiento de la vegetación y corroer materiales (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

1.4.2. Metales y metaloides

Los elementos químicos existentes se dividen en tres categorías, según sus propiedades físicas: metales, no metales y metaloides (Chang y Goldsby, 2017). Los metales se distinguen por ser buenos conductores del calor y la electricidad, en tanto que los elementos no metales generalmente son malos conductores del calor y la electricidad. Por otro lado, los elementos clasificados como metaloides presentan propiedades intermedias entre los metales y los no metales (Chang y Goldsby, 2017).

La Figura 1.2 corresponde a la tabla periódica moderna, en color verde se encuentran los elementos metálicos que corresponden a la mayoría de los elementos conocidos, en azul están los no metales que corresponden a 17 elementos y el restante corresponde a los metaloides (Chang y Goldsby, 2017).

1 1A																	18 8A																																																
1 H	2 2A											13 3A	14 4A	15 5A	16 6A	17 7A	2 He																																																
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																																																
11 Na	12 Mg	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 8B	10 8B	11 1B	12 2B	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																																																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																																																
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																																																
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																																																
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og																																																
			<table border="1"> <tr> <td>58 Ce</td> <td>59 Pr</td> <td>60 Nd</td> <td>61 Pm</td> <td>62 Sm</td> <td>63 Eu</td> <td>64 Gd</td> <td>65 Tb</td> <td>66 Dy</td> <td>67 Ho</td> <td>68 Er</td> <td>69 Tm</td> <td>70 Yb</td> <td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>90 Th</td> <td>91 Pa</td> <td>92 U</td> <td>93 Np</td> <td>94 Pu</td> <td>95 Am</td> <td>96 Cm</td> <td>97 Bk</td> <td>98 Cf</td> <td>99 Es</td> <td>100 Fm</td> <td>101 Md</td> <td>102 No</td> <td>103 Lr</td> </tr> </table>															58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																				
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																																																				
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																																																				
			<table border="1"> <tr> <td>Metales</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>Metaloides</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>No metales</td> <td colspan="15"></td> </tr> </table>															Metales																Metaloides																No metales															
Metales																																																																	
Metaloides																																																																	
No metales																																																																	

Figura 1.2. Tabla periódica de los elementos. Extraído de Chang y Goldsby (2017).

El término “metales pesados” se utiliza, en general, para referirse a un grupo de elementos químicos con cierta toxicidad para los seres humanos, este término ha sido considerado como una mala denominación por parte de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (Duffus, 2002), debido a su definición contradictoria y su falta de bases de coherencia científica, ya que muchas veces se nombran tomando como base la densidad, otras el número atómico, la masa atómica, y algunas sus propiedades químicas o de toxicidad (Duffus, 2002).

Ali y Khan (2017) realizan una revisión de las diversas definiciones desarrollando una más completa y científica, considerando así metales pesados a todos los metales que ocurren naturalmente, con un número atómico (Z) mayor que 20 y una densidad elemental mayor a 5 g/m³. La Figura 1.3 señala aquellos elementos que estarían dentro de la categoría de metales pesados en color verde según la definición de Ali y Khan (2017).

1 H																	2 He									
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne									
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar									
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr									
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe									
55 Cs	56 Ba											72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og										
Lantánidos		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu										
Actínidos		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr										

Figura 1.3. Tabla periódica de los elementos con metales pesados. Modificado de Ali y Khan (2017).

En este trabajo de memoria se hará referencia exclusivamente a “metales y metaloides”, debido a la diversidad de elementos presentes en el MP_{2,5} y para evitar las ambigüedades inherentes al término “metales pesados”. La clasificación de metales y metaloides ofrece un enfoque más claro y específico para este estudio.

1.4.3. Normas ambientales y calidad del aire

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que el aire limpio es un requisito básico de la salud y bienestar de los seres humanos, y que la contaminación de este medio representa una amenaza importante en la salud de todo el mundo. Bajo este concepto, esta entidad ha realizado evaluaciones respecto a los efectos en la salud de diversos contaminantes atmosféricos, las cuales han sido publicadas en las Guías de la Calidad del Aire (GCA), el objetivo de estas guías es respaldar medidas orientadas a conseguir una calidad del aire que proteja la salud pública en distintas situaciones.

Para el caso del MP la GCA actualizada en 2021, establece límites de concentración de MP_{10} indicando que la exposición media anual no debe superar los $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y que la media de 24 h debe ser $\leq 45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso del $MP_{2,5}$ una media anual de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para exposiciones de corta duración establece una media de 24 h $\leq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores son establecidos en función de los descubrimientos científicos recientes que advierten que habrá respuestas de mortalidad si se superan dichos valores de concentración (OMS, 2021). La OMS alienta a los países a examinar la adopción normas de calidad de aire más estrictas que la indicada en las GCA y hacer seguimientos de vigilancia para la reducción de emisiones y la disminución de concentraciones del material particulado.

En Chile la ley 19.300 establece en su artículo 32, la existencia de dos tipos de normas de calidad ambiental que establecen valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de los contaminantes, estas se dividen en: primarias y secundarias. Las primarias, son aquellas normas de calidad ambiental que tienen como objetivo proteger la salud de la población humana dentro del territorio nacional. Mientras que, las normas de calidad secundaria tienen por objetivo proteger o conservar el medio ambiente o la naturaleza y son de carácter local, y no necesariamente nacional.

Según lo anterior, tanto el MP_{10} como $MP_{2,5}$ cuentan con normas primarias de calidad del aire promulgadas en los decretos 59 en 1998 y decreto 12 en 2011, respectivamente. Para el caso de MP_{10} se establece como límite un valor promedio anual $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un valor máximo promedio de 24 h en $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el $MP_{2,5}$ se fijó un valor promedio anual $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un valor máximo promedio de 24 h de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1998 y 2011).

Si bien la normativa actual chilena en cuanto a MP fue elaborada en base a la GCA (2005) que establecía límites ligeramente más altos que los actualizados en 2021 (Tabla 1.2), existe una diferencia considerable entre lo recomendado por la OMS y la normativa chilena actual tanto para MP_{10} como $MP_{2,5}$, esto refleja la necesidad de actualizar dichos límites.

Tabla 1.2. Comparación de límites de MP de la OMS y Chile.

		OMS- 2005	OMS-2021	Normativa Chilena al 2024
MP₁₀	Promedio anual	≤ 20 µg/m ³	≤ 15 µg/m ³	≤ 50 µg/m ³
	Promedio 24 h	≤ 50 µg/m ³	≤ 45 µg/m ³	≤ 150 µg/m ³
MP_{2,5}	Promedio anual	≤ 10 µg/m ³	≤ 5 µg/m ³	≤ 20 µg/m ³
	Promedio 24 h	≤ 25 µg/m ³	≤ 15 µg/m ³	≤ 50 µg/m ³

A partir de las normas establecidas, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) puede clasificar zonas del país según el nivel de contaminación que presentan, estableciéndose zonas latentes y zonas saturadas. Las zonas latentes son aquellas en que la medición de la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo se sitúa entre 80% y el 100% del valor de la respectiva norma de calidad ambiental, aquí es posible desarrollar Planes de Prevención que buscan evitar que las normas ambientales sean superadas; Las zonas saturadas son aquellas en que se sobrepasa una o más normas de la calidad ambiental, en las zonas saturadas se desarrollan Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) que buscan reducir las concentraciones de contaminantes según lo indicado por las normas primarias (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Como medidas paliativas se han establecido la Gestión de Episodios Críticos (GEC), los cuales se decretan cuando las concentraciones de MP superan las establecidas en las normas de calidad primaria. Para establecer el tipo de episodio crítico se utiliza el Índice de Calidad de Aire por Partículas (ICAP) que lleva a una escala estándar el valor promedio de las concentraciones de MP, de acuerdo con lo que establece la norma para cada contaminante (Figura 1.4) (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Calidad del aire	Episodio Crítico	Índice Calidad del Aire por Partículas	Concentración MP ₁₀ [µg/m ³ N 24 hrs]	Concentración MP _{2,5} [µg/m ³ N 24 hrs]
Bueno		0 – 99	0 - 149	0 – 50
Regular		100 - 199	150 - 194	51 – 79
Malo	Alerta Ambiental	200 - 299	195 - 239	80 – 109
Crítico, Peligroso	Preemergencia Ambiental	300 – 499	240 - 329	110 – 169
Excede	Emergencia Ambiental	500 o +	330 o +	170 o +

Figura 1.4. Cuadro resumen de niveles de calidad del aire y episodios críticos a partir del ICAP. Extraído de Ministerio del Medio Ambiente (2016).

Mediante la aplicación de todas estas medidas mencionadas, se busca regular y resguardar la calidad del aire en Chile y así la salud pública de sus habitantes.

1.4.3. Estado del arte

El estudio del MP ha adquirido un importante auge a nivel mundial especialmente en los últimos 20 años, esto por los efectos que tiene este contaminante tanto en la salud de las personas como en el medio ambiente (Figura 1.5). El avance y desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido desarrollar metodologías de investigación que permitan caracterizar de mejor manera a estos contaminantes, sus fuentes y efectos (Fizzi y otros, 2015).

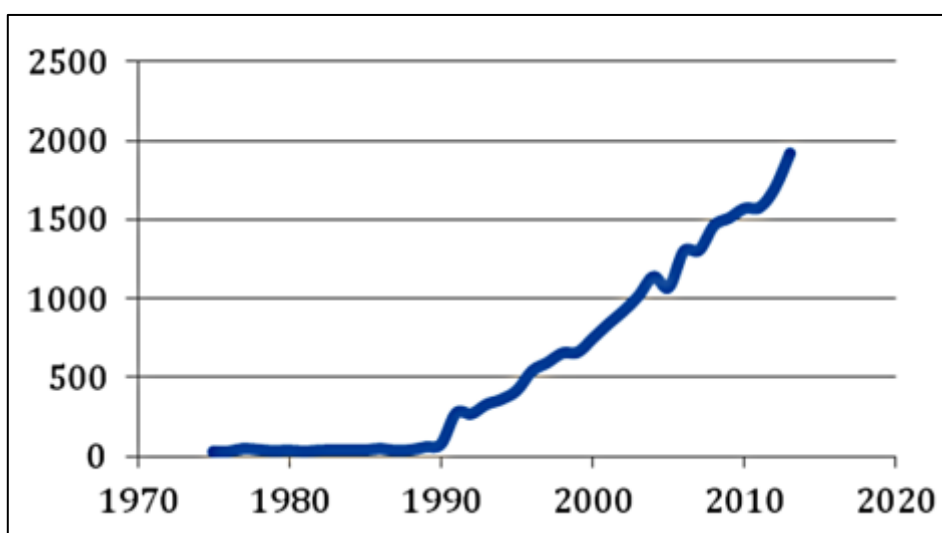


Figura 1.5. Número de investigaciones que tratan de aerosoles atmosféricos publicados hasta 2015 (ISI Web of Science database). Extraído de Fizzi y otros (2015).

En Chile los principales aportes en cuanto a la caracterización química de la atmósfera se han realizado desde la década de los 80's, destacando el aporte de Chiang y otros (1985) que determina los contenidos de Cd, Cu, Mn, Pb, Fe, Zn y As en la atmósfera de Quintero en la región de Valparaíso, indicando que la fundición de cobre en el complejo Ventanas correspondía a la principal fuente de As y otros metales tóxicos en la zona. Luego, Romo-Kröger y otros (1994) caracterizan los metales en la atmósfera originados en la mina El Teniente ubicada en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins, mediante el método *Proton-Induced X-ray Emission* (PIXE) para analizar partículas finas $< 2,5 \mu\text{m}$ y gruesas entre $2,5\text{-}15 \mu\text{m}$, determinando que los principales componentes de aerosoles atmosféricos corresponden a

S, Cu, Zn y As originados en la planta de fundición Caletones, que correspondería a la mayor fuente de contaminación del aire de la región.

La ciudad de Santiago cuenta con una gran cantidad de estudios en materia de caracterización de aerosoles y MP, destacando los aportes de Artaxo (1998), Artaxo y otros (1999), Leiva y otros (2005), Morata y otros (2008), entre otros. En particular, Morata y otros (2008) utilizan técnicas como *Scanning Electron Microscope* (SEM) en combinación con *Energy Dispersive X-ray microanalysis system* (SEM-EDX), además de PIXE, para la identificación composicional de diferentes tipos de partículas, sus formas y la cuantificación de sus proporciones en el MP atmosférico. Para el reconocimiento de las fuentes de MP emplean cálculos de Factor de Enriquecimiento (FE) en base a la metodología propuesta por Cong y otros (2007), este factor relaciona la concentración de los elementos presentes en los aerosoles con la composición de la corteza superior, y permite diferenciar si la fuente de estos es de tipo biogénica/geogénica o antropogénica. Siguiendo esta línea de investigación Valdés y otros (2013) utilizando ICP-MS para estudiar las características geoquímicas de los aerosoles en Santiago, reconociendo en base al FE que elementos como Mg, Y, Zr, U, Sr, Ca, Ti y V están relacionados a fuentes naturales y que los elementos como Rb, K, Cs, Fe, P, Ba, Mn, Ni, Cr, Co, Zn, Sn, Pb, Cu, Mo, Cd, As, Ag y Sb a fuentes antropogénicas.

Más al sur del país, en la ciudad de Chillán destacan los trabajos de Carvacho y otros (2004) que analizan la composición de MP₁₀ observando que el 55% de este material corresponde a polvo de suelo resuspendido, el 11% proviene a actividades de transporte asociados a la presencia de Br, Pb y V además de otros metales, el 19% corresponde a compuestos orgánicos asociados a hidrógeno y 3% corresponden a partículas de sulfato, advirtiendo la presencia de metales traza incluidos Mn, Zn, Cu, Ga, As y Sr que sugieren emisiones industriales; Celis y otros (2004) con un muestreo más extenso y en diversos puntos de la ciudad, indican que la mayor parte del MP₁₀ corresponde a carbón, nitrato, sulfato, amonio y componentes de la corteza pero en diferente proporción días y sitios.

Si bien, existen diversos estudios de caracterización química y geoquímica de material particulado en el centro-sur de Chile, la realidad de la ciudad de Coyhaique está muy alejada, ya que, las principales investigaciones en esta materia se han concentrado en la medición del MP total, su relación con el clima y su efecto en la salud de la población.

El primer estudio que alertó sobre la contaminación por MP en Coyhaique fue publicado en 2009 bajo el título "Análisis de emisiones atmosféricas en Coyhaique", realizado por EnviroModeling Ltda. para CONAMA. Este estudio abordó diversos contaminantes como MP₁₀, MP_{2,5}, NO_x, CO, COV y SO₂, entre otras sustancias relevantes. Sus hallazgos revelaron

que el 94% de las emisiones de contaminantes en el aire corresponden a MP_{10} , principalmente generado por el uso de leña para calefacción y cocina, donde la mayoría de este tipo de material particulado es $MP_{2,5}$. Asimismo, dentro de este informe, la empresa recomienda realizar una caracterización química del material particulado junto con un análisis de su distribución espacial.

El inicio del proceso para la elaboración del Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) en el año 2012, se focalizó en cuatro ejes principales: el mejoramiento térmico de las viviendas, fomentar uso de combustibles limpios, utilizar calefacción eficiente y realizar difusión y educación ambiental (Ministerio Secretaria General de Gobierno, 2016). Luego, en 2016, la ciudad fue declarada zona saturada de $MP_{2,5}$ (Figura 1.6), y es bajo este contexto que se agiliza la actualización del inventario de emisiones de 2009.

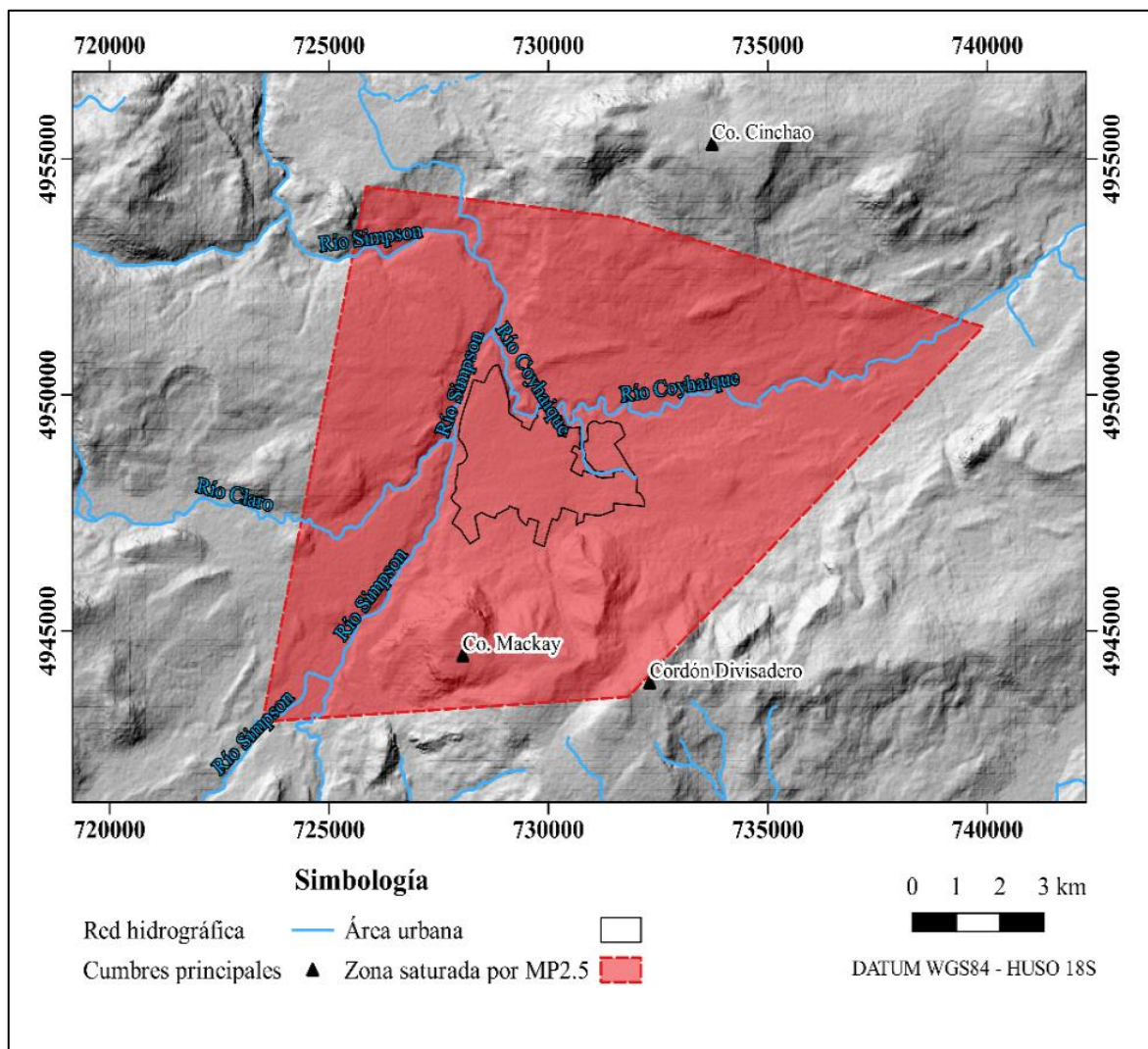


Figura 1.6. Mapa de zona saturada por $MP_{2,5}$ en Coyhaique. Elaboración propia.

Silva y otros (2017) llevaron a cabo un inventario de emisiones para el MMA en 2015, actualizando las metodologías utilizadas por EnviroModeling Ltda. (2009). Sus hallazgos reafirman que la principal fuente de emisión de MP_{10} y $MP_{2,5}$ es la quema de biomasa, y que el sector residencial contribuye con un 99,67% de las emisiones de $MP_{2,5}$, dado que el 96% de las viviendas en la ciudad utilizan leña para calefacción o cocina.

A estos estudios, se suman las diversas investigaciones que se han enfocado en conocer el comportamiento del $MP_{2,5}$ horario, diario y estacional (Molina y otros (2017), Pérez y otros (2020), Gallardo (2020), Jorquera y otros (2021), Solís (2021), Gómez (2022)) destacando que en los últimos años los niveles de $MP_{2,5}$ superan la normativa nacional y estacional; que los contenidos de $MP_{2,5}$ son mayores en las mañanas, disminuyen a medio día y aumentan sustancialmente en tardes y noche; y que la contaminación de MP_{10} es mayor en el sector sur y sureste de la ciudad coincidentes con zonas de relieve montañoso; que clima tanto a escala local como regional puede favorecer o dificultar la dispersión de contaminantes; y que las condiciones a escala sinóptica favorecen la inversión térmica y estancamiento atmosférico en los meses de invierno.

Por otro lado, las contribuciones de Acuña (2014), Muñoz & Cáceres (2020), y Ye-Li y otros (2022), han evidenciado que existe un aumento de consultas por enfermedades respiratorias e incluso de consultas por cáncer cardiopulmonar en la ciudad a consecuencia de la contaminación por $MP_{2,5}$.

A pesar de la recomendación de EnviroModeling Ltda. (2009) sobre realizar estudios de composición y distribución del MP en Coyhaique, el presente trabajo constituye la primera aproximación significativa para comprender la composición específica del $MP_{2,5}$ y su distribución en la ciudad. Es importante destacar que este estudio aborda, por primera vez, los niveles y la composición del MP tanto dentro como fuera de las viviendas en la comuna, representando así una contribución fundamental para comprender la calidad del aire en la zona.

1.5. FINANCIAMIENTO

Esta memoria de título contó con el financiamiento del programa de Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) del Gobierno Regional de Aysén (GORE), dentro del proyecto “Innovación integral de Evaluación/Exposición a Contaminantes” cuyo responsable es Dante Daniel Cáceres Lillo, Profesor Asociado, Escuela de Salud Pública, Facultad de Medicina, Universidad de Chile.

1.6. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi sincero agradecimiento al Gobierno Regional de Aysén y su consejo por el financiamiento del proyecto “Innovación integral de Evaluación/Exposición a Contaminantes,” que hizo posible la realización de esta memoria de título. Agradezco especialmente a los responsables del proyecto y mis profesores guías, el Dr. Dante Cáceres Lillo y la Dra. Ana Valdés Durán, por depositar su confianza en mí y brindarme la oportunidad de llevar a cabo esta importante investigación en la ciudad que me vió nacer.

A la Universidad de Concepción, su cuerpo docente y funcionarios de la carrera de Geología, les debo un agradecimiento profundo por proporcionarme las mejores herramientas para mi formación profesional. De manera especial, extendiendo mi gratitud a la profesora Verónica Oliveros Clavijo por patrocinar mi memoria de título. También quisiera reconocer con mucho cariño a los funcionarios Don Raúl y Sra. Carolina, quienes desde mi primer día en el Departamento de Ciencias de la Tierra me brindaron no solo su apoyo, sino también su alegría, sus consejos y esas inolvidables pausas para compartir un cafecito.

A mi familia, mi mayor pilar, les agradezco desde lo más profundo de mi corazón. A mi madre Mónica y a mi padre Fernando, por su amor incondicional y por ser la fuerza que me impulsó a perseguir mis sueños. A mis queridos abuelos Marina, Abelino, Irma y Misael, por su constante aliento durante todos estos años de estudio. A mis hermanas Victoria, Millaray y Naomi, por ser una fuente constante de inspiración y motivación. A mis tíos y tías, quienes con gran esfuerzo también me brindaron su apoyo a lo largo de este camino.

Finalmente, a los amigos y amigas que se cruzaron en mi vida durante este viaje en GeoUdeC, les agradezco profundamente por cada risa, cada conversación y cada momento compartido. Gracias, Pauli, Mila, Pedro, Diego y Álvaro, por los mejores recuerdos y los carretes inolvidables. Un agradecimiento muy especial para Hernán, mi pareja y compañero de vida, por sostenerme en los momentos más difíciles, darme el amor y la motivación que necesitaba para culminar este trabajo.

Todas las personas mencionadas aquí tienen un lugar especial en mi corazón, y su apoyo será algo que siempre recordaré y atesoraré.

2. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. CLIMA

A escala regional, en la Patagonia domina la circulación general de vientos provenientes del oeste o “*Westerlies*” (WWB) en Figura 2.1, estos conforman una franja latitudinal centrada ~50°S, que también es conocida como “corredor de tormentas” (*storm track*), y se cree que esta condición ha prevalecido al menos desde el Cenozoico (~ 66 Ma) en este sector (Colwyn y otros, 2019). Los vientos del oeste, cargados de humedad oceánica, interactúan con la cordillera de los Andes Patagónicos, aquí el alzamiento del aire húmedo sobre las altas topografías provoca precipitaciones orográficas (Garreaud y otros., 2013; Colwyn y otros 2019). Este fenómeno genera una importante variabilidad longitudinal de las precipitaciones en esta región (Viale y Garreaud, 2015 en Gómez, 2022) produciendo climas húmedos en el sector del barlovento que pueden alcanzar los 5.000 mm al año y zonas áridas frías en el sector del sotavento hacia la pampa Argentina (Colwyn y otros, 2019; Garreaud, 2018 en Gómez, 2022).

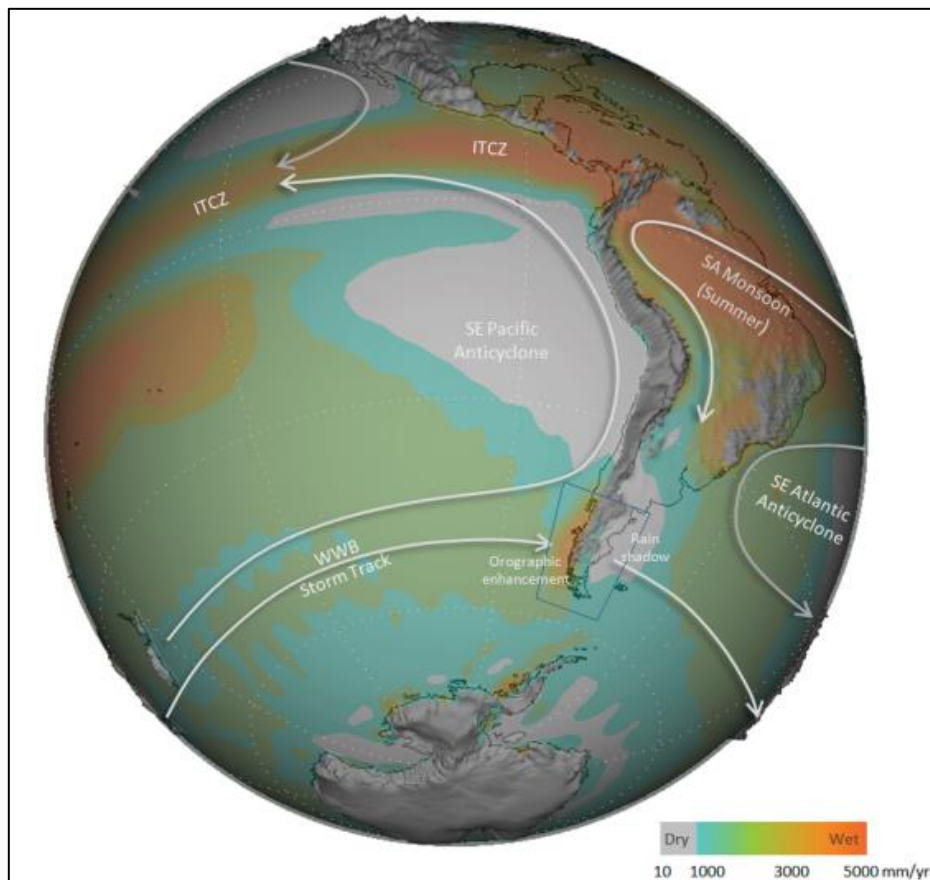


Figura 2.1. Ilustración de la distribución general de los vientos en Sudamérica junto con la precipitación media anual (datos NCEP-NCAR). Sector de la Patagonia resaltado en recuadro azul. Extraído de Colwyn y otros (2019).

Coyhaique se encuentra en una zona de transición climática. Según la clasificación climática de Köppen-Geiger (1980-2016), que utiliza las temperaturas y precipitaciones para caracterizar el clima, esta ciudad cuenta con un clima templado, sin estación seca con verano cálido y húmedo (Cfb en Figura 2.2) (Beck y otros, 2018 en Gómez, 2022).

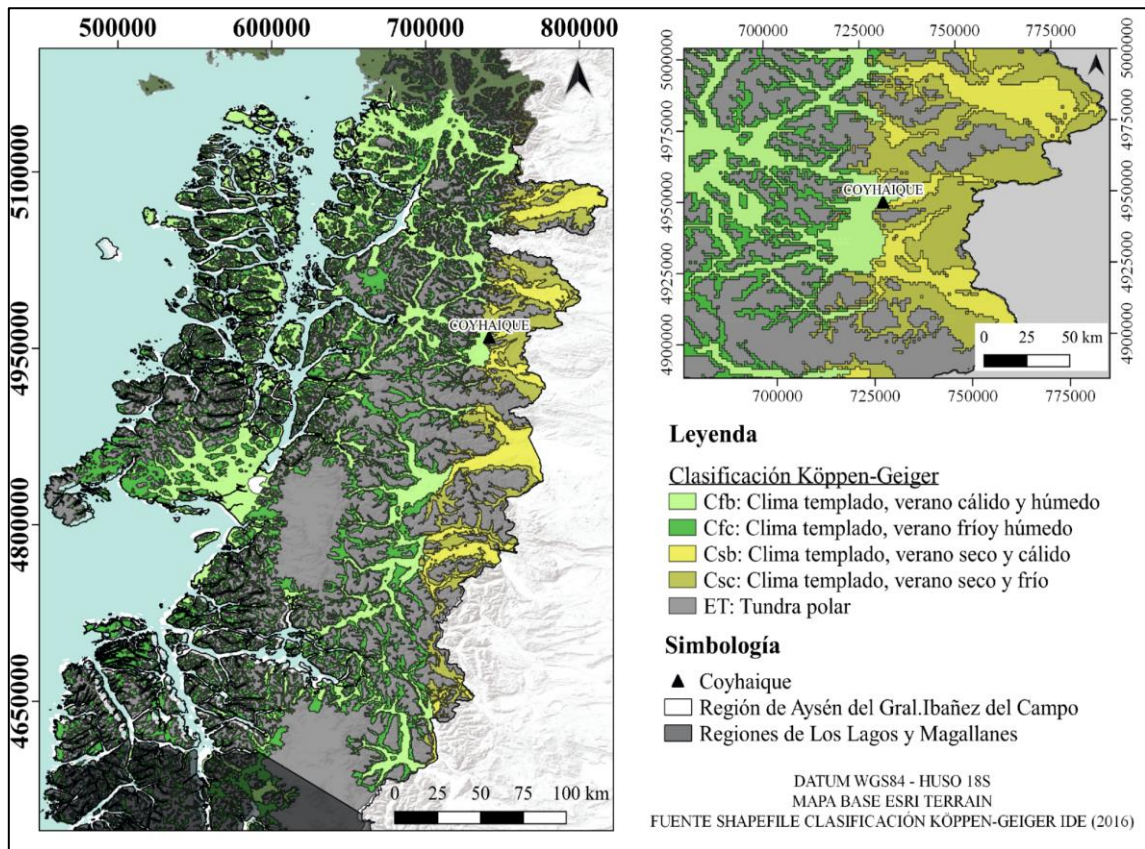


Figura 2.2. Mapa de clasificación climática de Köppen-Geiger (1980-2016) en la región de Aysén.
 Elaboración propia.

La ciudad cuenta con variadas estaciones de monitoreo meteorológico. La más antigua corresponde a la estación Aeródromo Teniente Vidal (ATV) de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) operativa desde 1943. Según datos de 1991 a 2019 la temperatura media anual de la ciudad es de $8,2 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ y las precipitaciones anuales alcanzan los 1.025 ± 181 mm/año (Gómez, 2022).

Las otras estaciones corresponden a Coyhaique I (COYI) y Coyhaique II (COYII), las que forman parte de la red SINCA, estas se ubican dentro de la ciudad (Figura 2.3) e iniciaron operaciones en 2007 y 2013, respectivamente, registrando parámetros como temperatura ambiente, humedad, dirección y velocidad del viento, además de los niveles de algunos contaminantes atmosféricos como MP_{10} , $\text{MP}_{2,5}$, NO , NO_2 , SO_2 y CO .

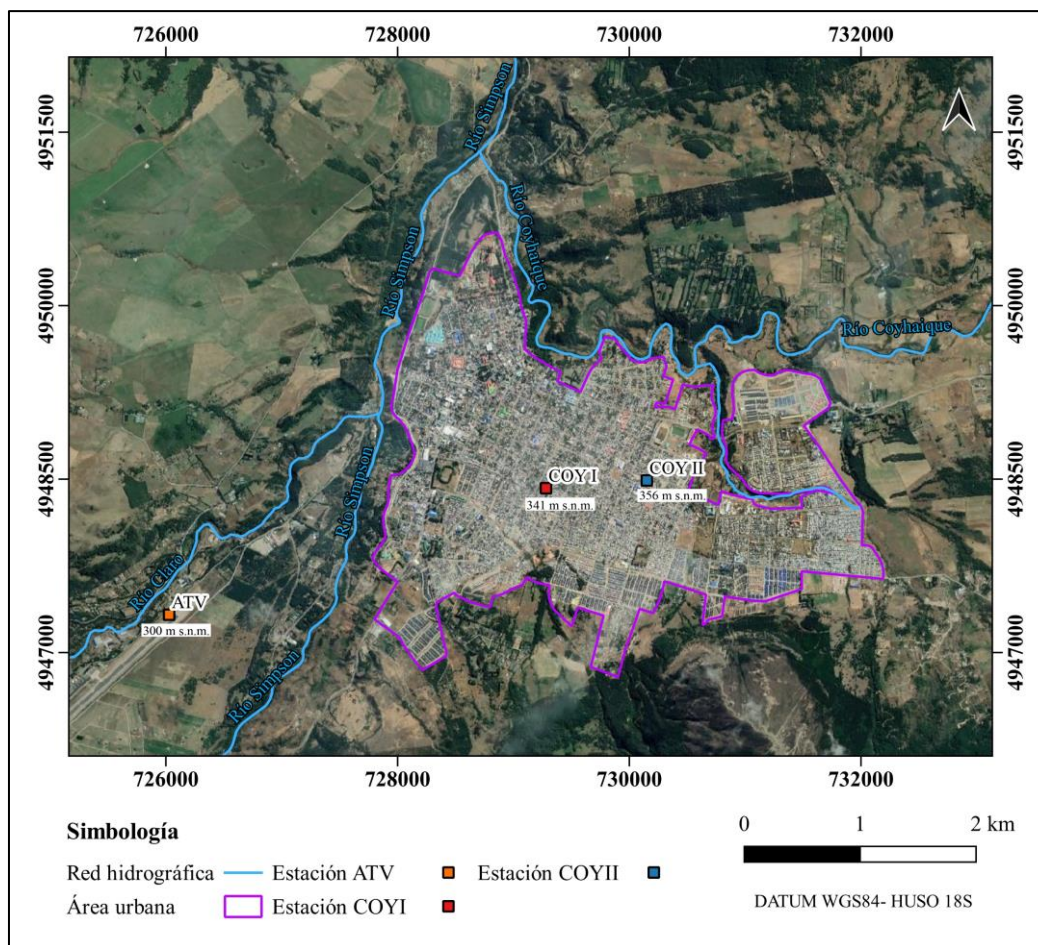


Figura 2.3. Ubicación de estaciones meteorológicas en Coyhaique. Elaboración propia.

El clima ejerce una influencia directa en los procesos de dispersión y remoción de contaminantes atmosféricos (Jacob y Winner, 2009). Por lo tanto, comprenderlo resulta fundamental para analizar el panorama de la contaminación en Coyhaique. Durante los últimos diez años, Coyhaique ha experimentado niveles críticos de contaminación por MP. Por esta razón, se ha recopilado información sobre variables meteorológicas locales (Anexo 1), como temperatura, precipitación, humedad, velocidad y dirección del viento, a partir de los datos disponibles en las estaciones meteorológicas durante el período de 2011 a 2022. El propósito es describir las condiciones climáticas predominantes durante la última década y bajo las cuales se realizó el presente estudio.

2.1.1. Temperaturas

Jacob y Winner (2009) señalan que la relación entre los niveles de MP y la temperatura es generalmente negativa, lo que indica que a bajas temperaturas tienden a aumentar las concentraciones de este contaminante.

Las estaciones COYI y COYII registran la temperatura ambiente (°C) que corresponde a la temperatura percibida en un entorno particular o la temperatura promedio del aire circundante (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

La Figura 2.4 muestra los promedios anuales de temperatura ambiente (°C) entre 2015 a 2022 en las estaciones COYI y COYII. En 2015, únicamente se contaba con información completa en la estación COYI, que alcanza como media anual los 9°C. El año siguiente, 2016, ambas estaciones presentaron un promedio de 8,6°C. No obstante, en 2017 se observaron notables disparidades entre las estaciones, con 8,7°C en COYI y 7,9°C en COYII. El patrón se repite en 2018, con 8,8°C en COYI y 7,8°C en COYII. A pesar de que estas estaciones cuentan con registros desde el año 2013, estos presentan considerables vacíos en los datos de los años 2013 y 2014 que impidieron realizar promedios anuales representativos para estos años.

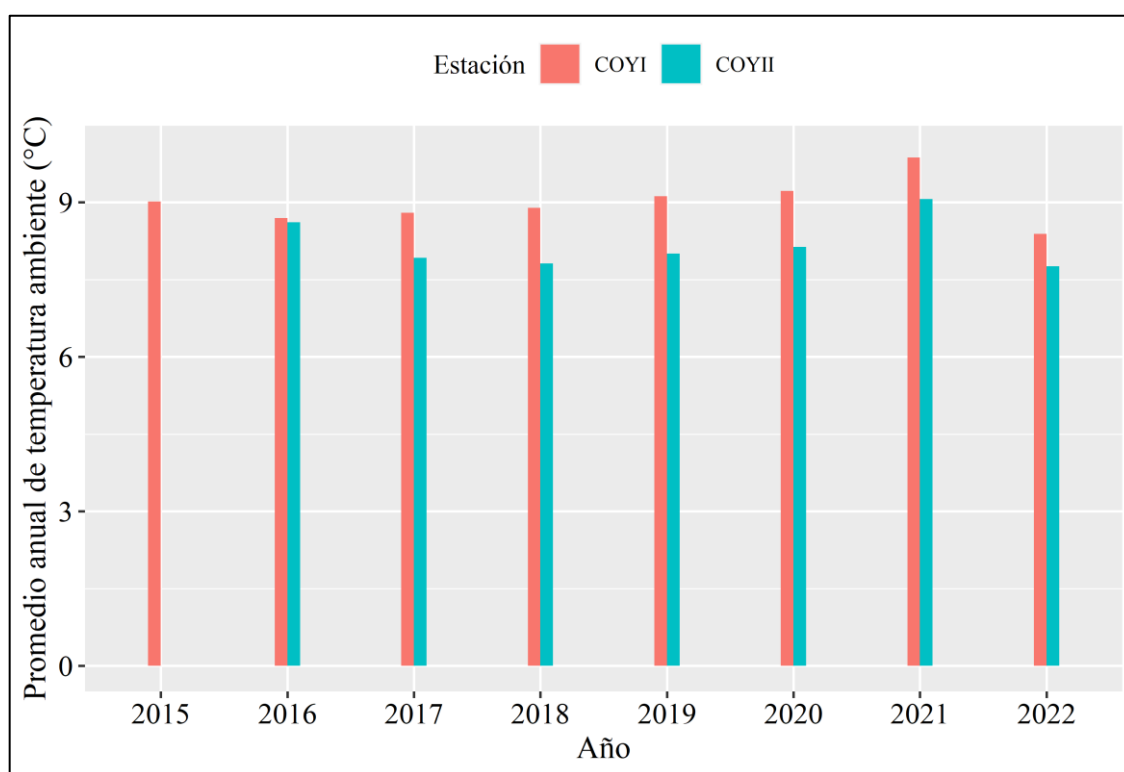


Figura 2.4. Promedios anuales de temperatura ambiente (°C) registrados por la red SINCA (2015-2022). Fuente de los datos: red SINCA. Elaboración propia.

Entre los años 2019 a 2021, en ambas estaciones se refleja un aumento en las medias anuales de temperatura ambiente, superando los 9°C en la estación COYI (Figura 2.4). En particular, el año 2021, corresponde al más cálido del período en ambas estaciones. En contraste, el año 2022 las medias disminuyen considerablemente con 8,3°C en COYI y 7,7°C, siendo los registros más bajos del período de estudio. Se observa una tendencia general en la estación COYI, la cual tiende a registrar temperaturas ligeramente superiores a las de COYII.

Esta diferencia podría atribuirse a la utilización de distintos sensores de temperatura en cada estación (MET ONE 83D en COYI y LASTEM DMA875 en COYII), así como a su ubicación geográfica dentro de la ciudad.

A diferencia de las estaciones COYI y COYII, la estación Aeródromo Teniente Vidal (ATV) registra las temperaturas mínimas, medias y máximas con datos que permiten evaluar la última década. La Figura 2.5 muestra los promedios anuales de temperatura mínima, media y máxima entre 2011 a 2022, se observa que los años con las temperaturas mínimas más bajas son 2016 y 2022, mientras que los años con las temperaturas máximas más altas son 2013, 2016 y 2021.

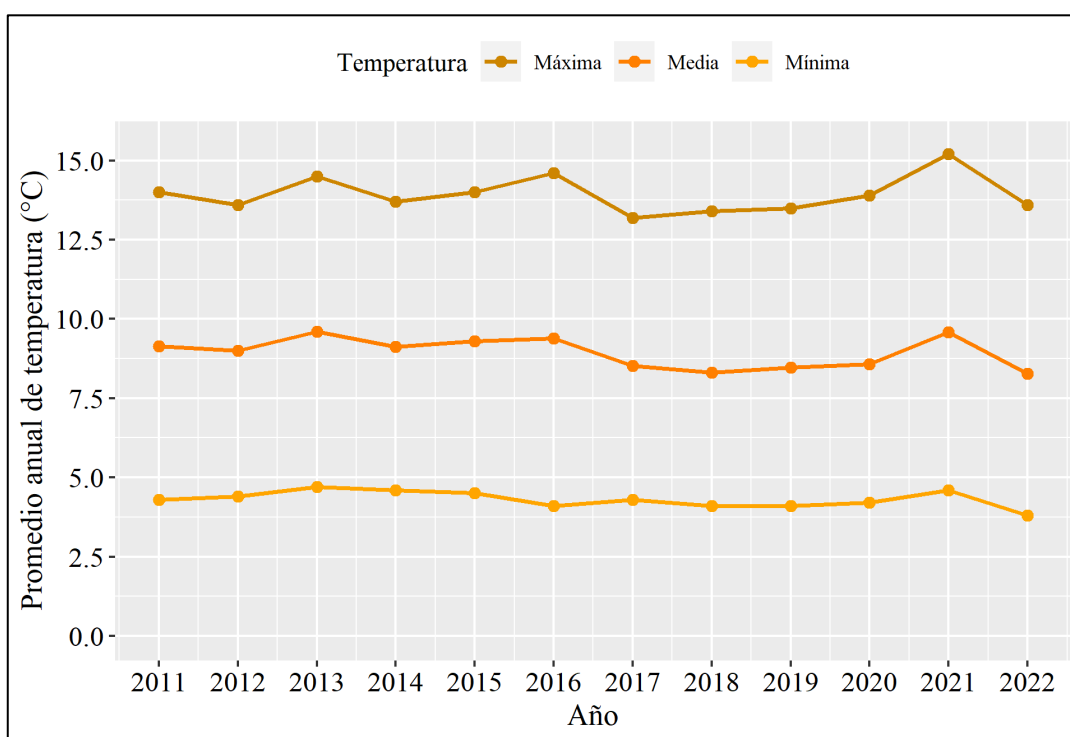


Figura 2.5. Serie de tiempo de promedios anuales de temperatura mínima, media y máxima (°C) registrados en ATV (2011-2022). Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile. Elaboración propia.

En relación con las temperaturas medias, el año 2013 experimenta un aumento considerable con 9,6°C con respecto a 2011 y 2012. Entre 2014 a 2016 las medias se mantienen sobre los 9°C, mientras que entre 2018 a 2020 no superan los 8,6°C. Posteriormente, en los años 2011 y 2021 se comportan de manera similar con promedios de 9,1°C y 9°C, respectivamente. Al igual que lo visto en la Figura 2.4 el año 2022 presenta diferencias substanciales en todos los tipos de temperatura respecto a 2021 con medias de 8,3°C en temperatura, 3,8°C en temperaturas mínimas y 13,6°C en temperaturas máximas, un comportamiento similar a los años 2012 y 2017 (Figura 2.5).

Se emplearon datos de la estación ATV, recopilados entre 2011 y 2022, para analizar el comportamiento mensual de las temperaturas. La Figura 2.6 indica los promedios de temperaturas mínimas, medias y máximas (°C). Las temperaturas mínimas varían entre 0°C en julio a 8,8°C en enero, siendo los meses junio, julio, agosto y septiembre, los que presentan las temperaturas más bajas.

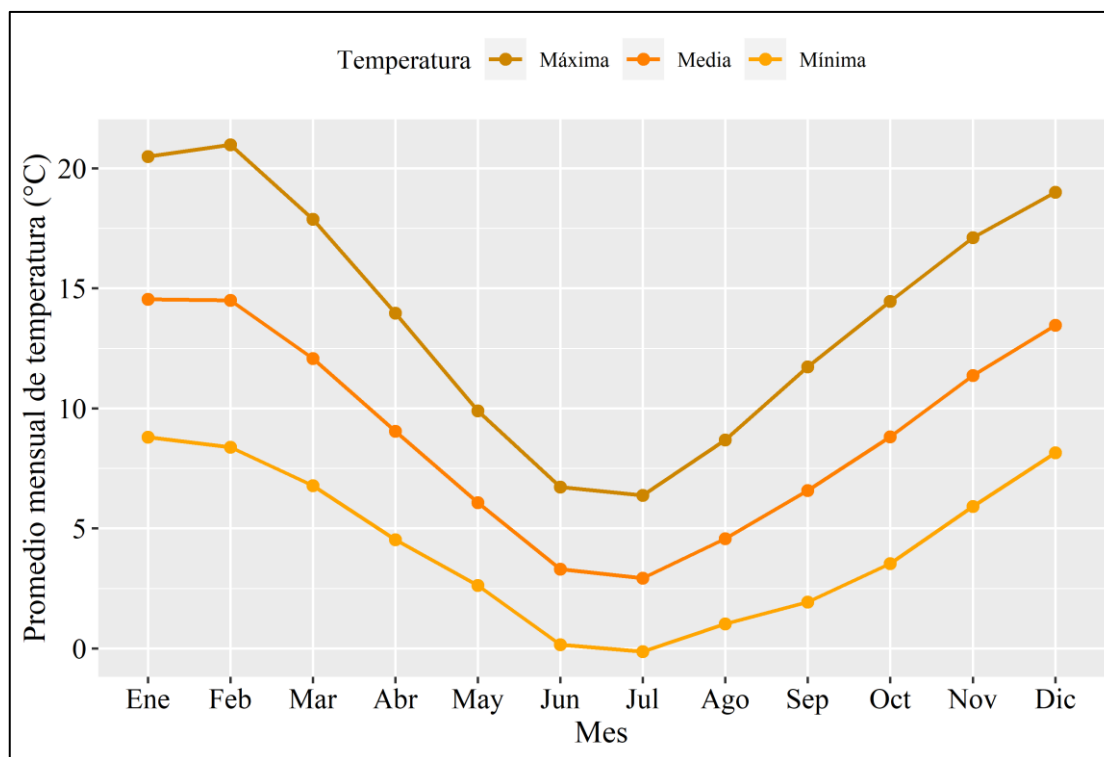


Figura 2.6. Promedio mensual de temperaturas mínimas, medias y máximas (°C) en estación ATV (2011-2022). Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile. Elaboración propia.

Las temperaturas máximas varían entre los 6,3°C en julio a 20,9°C en febrero. Respecto a las temperaturas medias, estas rondan los 2,9°C a 14,5°C, indicando que dentro de la última década los meses más fríos corresponde a junio y julio y los más cálidos enero y febrero. En general, estas tendencias de temperatura evidencian los cambios abruptos que ocurren entre las estaciones del año en la ciudad (Figura 2.6).

2.1.2. Precipitaciones

Las precipitaciones tienen una relación consistentemente negativa respecto a las concentraciones de MP (Jacob y Winner, 2009), favoreciendo la remoción de estas partículas de la atmósfera mediante el proceso como la deposición húmeda.

Entre las estaciones consideradas, ATV es la única que registra las precipitaciones en Coyhaique en la actualidad. Se ha calculado un promedio de precipitaciones de 958 mm/año a

partir de datos recopilados entre 2011 y 2022. La Figura 2.7 muestra el acumulado anual de precipitaciones, resaltando el año 2017 como el período de mayores precipitaciones, alcanzando 1326,7 mm, y el año 2016 como el de menor cantidad, con un registro de 527,9 mm, la línea segmentada indica el promedio del período. Los años 2019 y 2021 presentan niveles por debajo de la media con 783,2 mm y 720 mm. Por otro lado, entre 2012 a 2015, 2017, 2020 y 2022 se supera la media generalizada de precipitaciones.

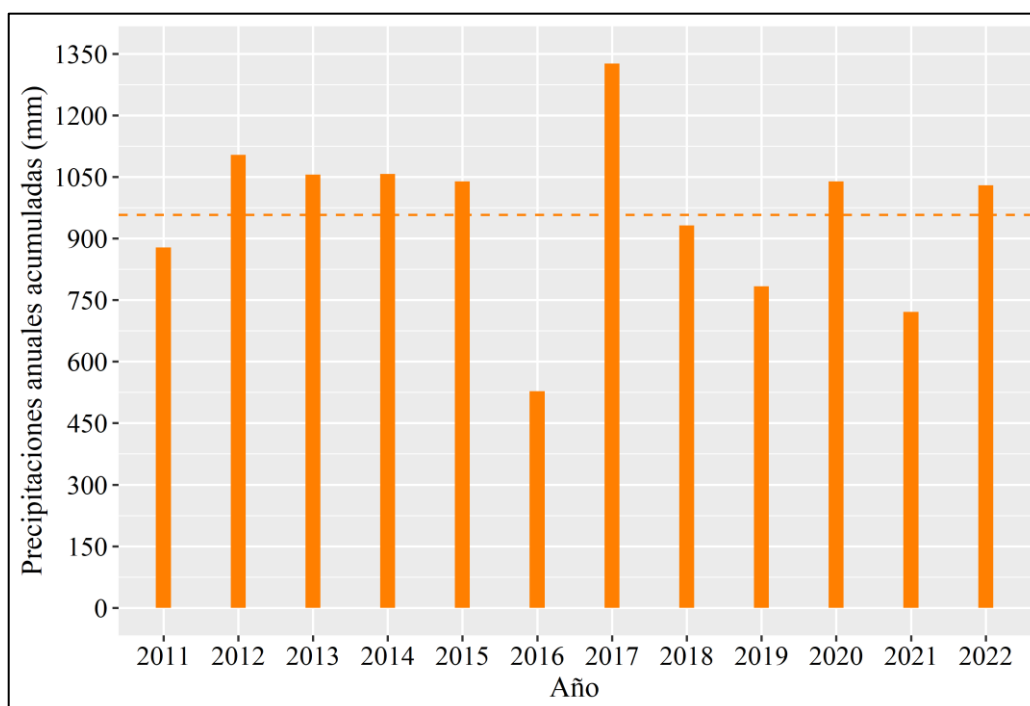


Figura 2.7. Precipitaciones anuales acumuladas (mm) registradas en estación ATV (2011-2022). Línea segmentada representa el promedio de precipitaciones de la década. Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile. Elaboración propia.

La Dirección Meteorológica de Chile (2016) explica que esta abrupta baja de precipitaciones evidenciada en 2016, se produce debido a un desvío de los sistemas frontales hacia la zona central que tuvo repercusiones notables tanto en Coyhaique como Balmaceda, que categorizaron a ambas localidades con intensa sequía.

La Figura 2.8 muestra las precipitaciones acumuladas mensuales durante el período de estudio, donde se reconoce que los meses de mayores precipitaciones son mayo, junio, julio y agosto con 1685,9 mm, 1503,6 mm, 1414,3 mm y 1452,7, respectivamente. Mientras que los meses de menores precipitaciones corresponden a diciembre y febrero que comprenden el verano acumulan precipitaciones del orden de 569,5 mm y 451,4 mm, respectivamente.

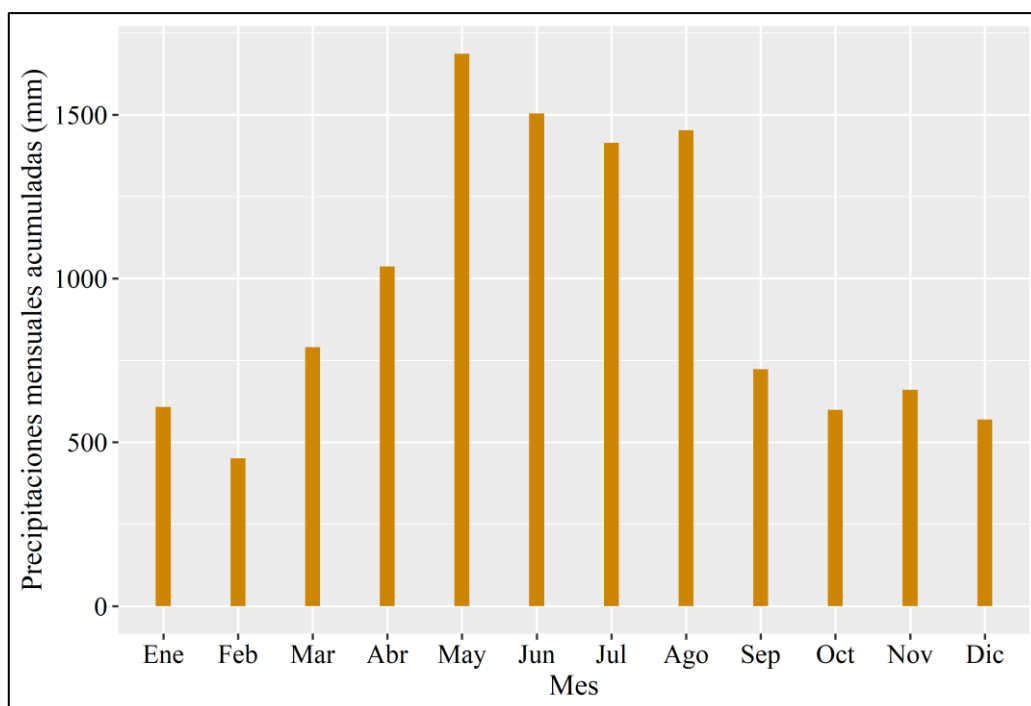


Figura 2.8. Precipitaciones acumuladas mensuales (mm) en estación ATV (2011- 2022).
Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile. Elaboración propia.

2.1.4. Humedad

La humedad relativa tiende a correlacionarse generalmente de manera positiva con las concentraciones de MP, lo que promueve niveles elevados de MP en condiciones de alta humedad (Jacob y Winner, 2009).

La Figura 2.9 muestra los promedios anuales de humedad relativa (%) en la ciudad en las estaciones ATV, COYI y COYII en función de los datos disponibles entre 2011 a 2022. La línea segmentada en naranja indica el promedio de humedad en la estación ATV que corresponde a 71,6%. Los valores promedio de humedad relativa del período varían entre 63% a los 75,8%. Entre los años 2012 a 2016 la humedad relativa varió levemente, aumentando en 2017 con 73,2% que coincide con el aumento de precipitaciones ese año, luego entre 2018 al 2021 se mantuvo nuevamente la humedad entre 70 a 71%.

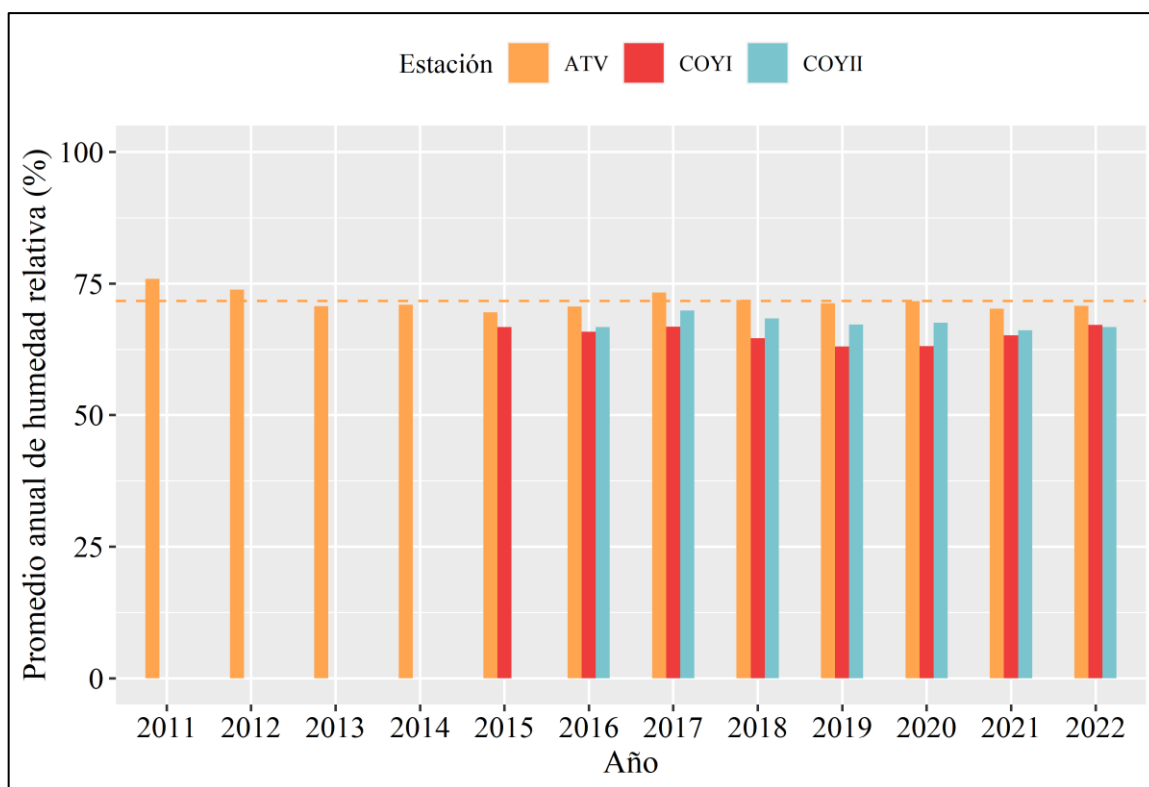


Figura 2.9. Promedio anual de humedad relativa (%) en estaciones ATV, COYI y COYII (2011 - 2022). Línea segmentada representa media de humedad en ATV. Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile y red SINCA. Elaboración propia.

Entre 2011 y 2021, se emplearon exclusivamente los datos de la estación ATV para analizar el comportamiento mensual de la humedad relativa (Figura 2.10). Esta estación, que posee el registro más completo entre las disponibles, revela un marcado aumento de esta variable durante los meses de otoño e invierno, con valores que oscilan entre el 70% en marzo y alcanzan un máximo de 83,1% en mayo y 82,9% en julio. Por otro lado, los meses de verano y primavera exhiben niveles menores de humedad, descendiendo hasta mínimos de 58,9% en enero.

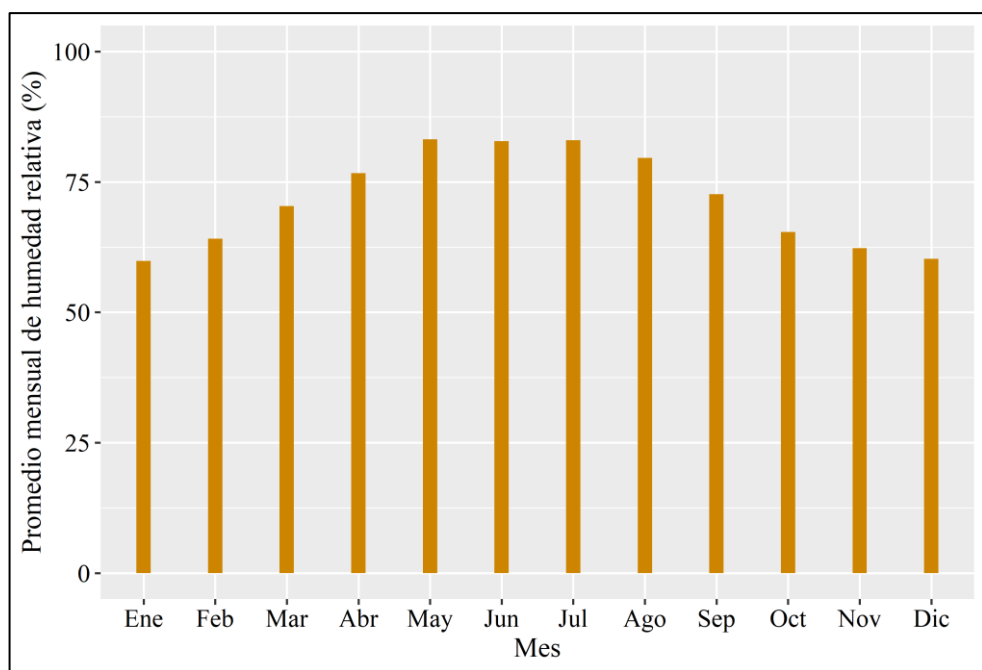


Figura 2.10. Promedios mensuales de humedad relativa (%) en estación ATV (2011-2022).
Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile. Elaboración propia.

2.1.3. Velocidad y dirección de los vientos

La velocidad del viento puede influir en las concentraciones de material particulado (MP), mostrando en muchos casos una correlación negativa, ya que vientos moderados favorecen la dispersión horizontal de los contaminantes, reduciendo su acumulación a nivel del suelo (Jacob y Winner, 2009). Sin embargo, otros estudios han señalado que, cuando la velocidad del viento supera ciertos umbrales (6–9 m/s), puede interrumpirse la circulación térmica vertical, lo que limita la mezcla atmosférica y puede contribuir a la retención de partículas en las capas más bajas de la atmósfera (Zhang y Li, 2012; Huang y otros, 2020). Por lo tanto, el efecto del viento sobre las concentraciones de MP depende de múltiples factores, como la velocidad, estabilidad atmosférica y características topográficas locales.

La Figura 2.11 señala los promedios anuales de velocidad del viento (m/s) entre 2011 a 2022 en las estaciones ATV, COYI y COYII. En la estación ATV, el promedio de la década varía entre 2,35 a 2,59 m/s, máxima alcanzada en 2016. La estación COYI muestra promedios en 2011 y 2012 de 1,5 m/s. Posteriormente, ocurre un aumento en 2013 que alcanza los 2,6 m/s de promedio. Este se mantiene hasta 2015, donde comienza una tendencia a la disminución en el promedio la velocidad del viento, siendo los años 2019, 2020, 2021 y 2022 los que presentan menores promedios de 0,80 m/s, 0,78 m/s, 0,76 m/s y 0,80 m/s, respectivamente. Para la estación COYII, sólo se contó con registros desde el año 2014, a pesar de esto dentro de las estaciones es la que muestra mayores promedios de velocidad del viento, entre los años 2014 y

2015 el promedio ronda los 3,25 m/s, luego en 2016 disminuye abruptamente alcanzando los 2,5 m/s, en 2017 se evidencia un leve aumento a 3 m/s, luego entre 2018 a 2022 se mantiene entre 2,75 m/s a 2,55 m/s.

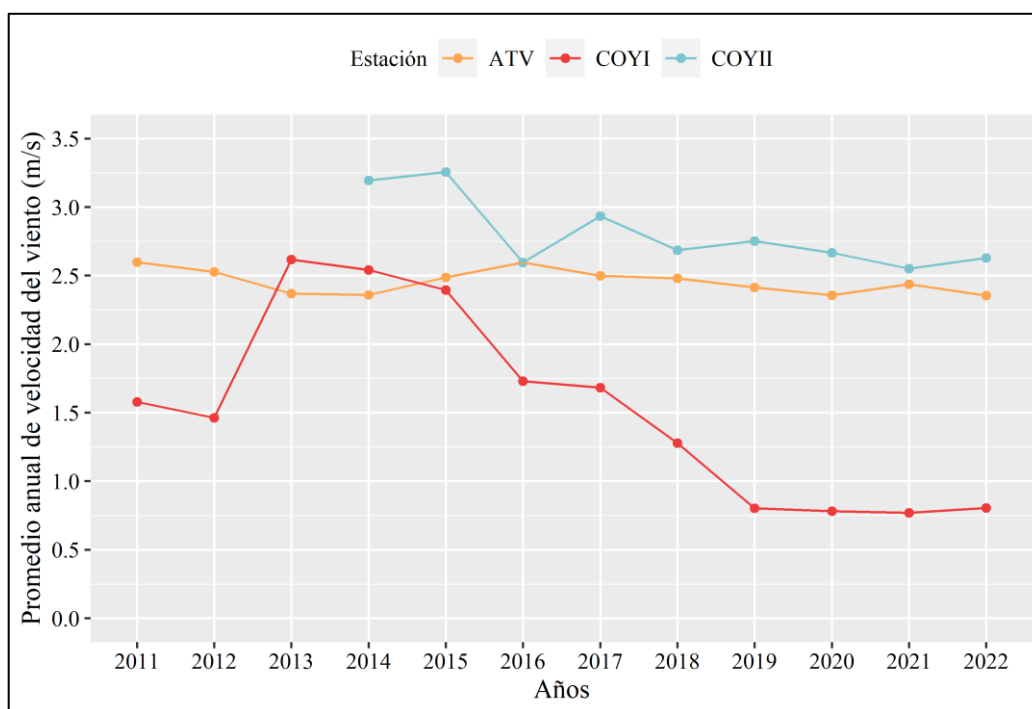


Figura 2.11. Serie de tiempo de promedios anuales de velocidad del viento (m/s) en estaciones ATV, COYI y COYII (2011-2022). Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile y red SINCA. Elaboración propia.

En base a los datos de dirección del viento de cada estación se elaboraron gráficos de rosa de vientos, en los cuales cada sección muestra la frecuencia o intensidad del viento proveniente de esa dirección en particular y la longitud de cada segmento de línea indica la frecuencia o fuerza del viento en esa dirección particular. Los gráficos se elaboraron con datos entre 2011 a 2022 para ATV y COYI, para COYII sólo se contaba con registro desde 2014.

La Figura 2.12 muestra la variación de dirección del viento en verano en cada estación. En ATV se registraron velocidades de viento que alcanzan los 10,2 m/s con una alta frecuencia de vientos de dirección oeste (W) y suroeste (SW). En COYI las mayores intensidades del viento alcanzan un máximo de 9,3 m/s en dirección noroeste (NW), oeste (W) y suroeste (SW). La estación COYII registra velocidades máximas del orden de 11,6 m/s con alta frecuencia de hasta 40% en dirección oeste (W).

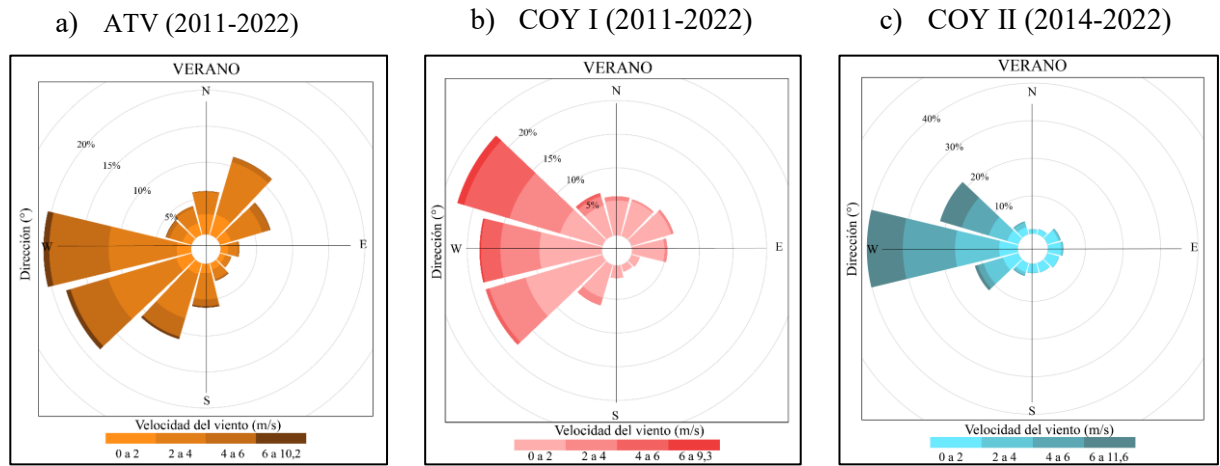


Figura 2.12. Rosa de los vientos verano a) estación ATV entre 2011-2022, b) estación COYI entre 2011-2022 y c) estación COYII entre 2014-2022. Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile y red SINCA. Elaboración propia.

La Figura 2.13 representa el comportamiento de la dirección del viento en otoño en cada estación. En ATV, se identifica una alta frecuencia de vientos en dirección noreste (NE) y velocidades de viento con máximas de 13,8 m/s, también existe una componente significativa de vientos en dirección norte (N), y en menor magnitud vientos en dirección suroeste (SW). En COYI se distingue una alta frecuencia de vientos con velocidad entre 2 a 4 m/s y una máxima velocidad de 9,9 m/s en dirección noroeste (NW), seguido de una fuerte componente oeste (W) y suroeste (SW), también se presentan frecuencias de 5% de vientos en dirección noreste (NE). La dirección de viento en COYII presenta una mayor frecuencia de vientos en dirección oeste (W) con máximas que alcanzan los 11,1 m/s, otras componentes en dirección noroeste (NW) y suroeste (SW) alcanzan frecuencias del 14%.

a) ATV (2011-2022)

b) COY I (2011-2022)

c) COY II (2014-2022)

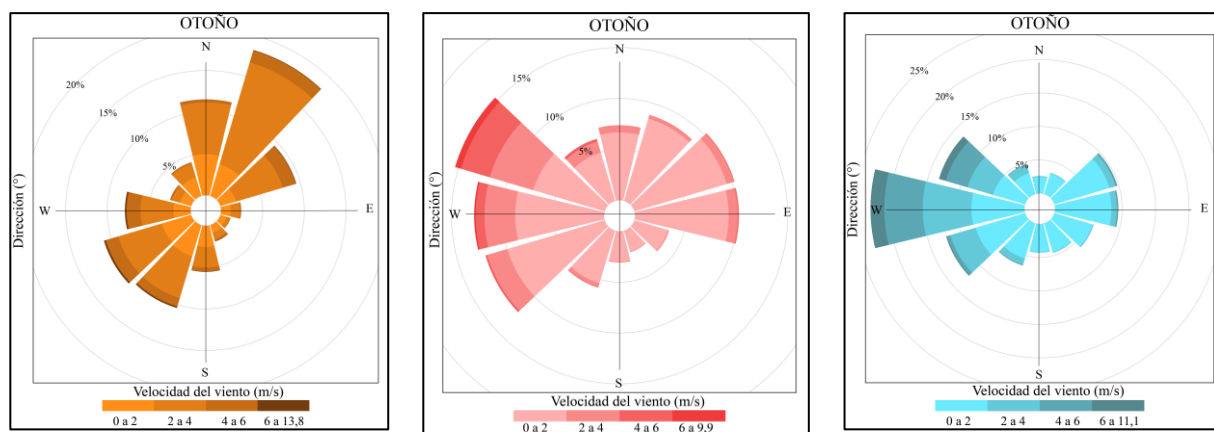


Figura 2.13. Rosa de los vientos otoño a) estación ATV entre 2011-022, b) estación COYI entre 2011-2022 y c) estación COYII entre 2014-2022. Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile y red SINCA. Elaboración propia.

La Figura 2.14 representa la variación de dirección y velocidad del viento en invierno en cada estación. En la estación ATV, se identifica un comportamiento similar al de otoño, con vientos en dirección predominantemente en dirección noreste (NE) y una presencia significativa de vientos en dirección norte (N) y suroeste (SW). Para COYI, se tiene que las mayores velocidades de viento alcanzan una máxima de 20,3 m/s en dirección noroeste (NW), seguido de frecuencias significativas de vientos en dirección suroeste (SW), noreste (NE) y este (E). En COYII se repite el comportamiento de otoño, con vientos principales en dirección oeste (W), donde alcanzan una velocidad máxima de 12,2 m/s.

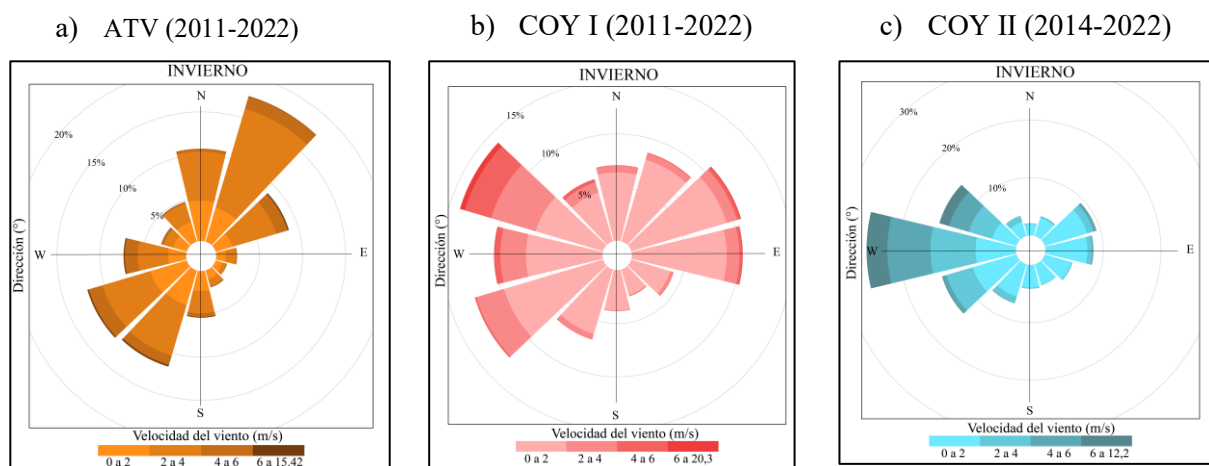


Figura 2.14. Rosa de los vientos invierno a) estación ATV entre 2011-022, b) estación COYI entre 2011-2022 y c) estación COYII entre 2014-2022. Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile y red SINCA. Elaboración propia.

La Figura 2.15 muestra la variación de velocidad y dirección del viento en primavera en cada estación. Aquí se distingue en ATV, que las mayores velocidades de viento alcanzan 16,9 m/s en dirección suroeste (SW), seguido de direcciones secundarias oeste (W) y en menor nivel

noreste (NE). En COYI, la dirección principal de viento es noroeste (NW) con velocidades que alcanzan los 9,6 m/s, como dirección secundaria se tiene suroeste (SW), seguido de una dirección oeste (W). Para COYII, al igual que en las últimas figuras, se refleja que la principal y dominante dirección del viento es oeste (W) con una frecuencia de aproximadamente 37%.

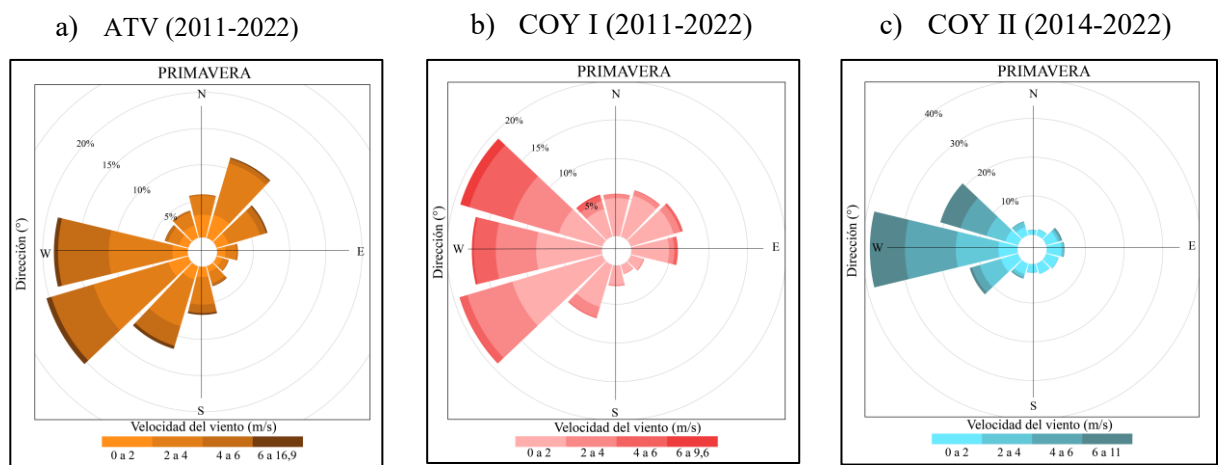


Figura 2.15. Rosa de los vientos primavera a) estación ATV entre 2011-022, b) estación COYI entre 2011-2022 y c) estación COYII entre 2014-2022. Fuente de los datos: Dirección Meteorológica de Chile y red SINCA. Elaboración propia.

En resumen, en los meses de otoño e invierno existe una dirección preferencial de vientos en dirección noreste (NE) para ATV, mientras que en COYI y COYII dominan los vientos en dirección noroeste (NW) y oeste (W). Para primavera y verano, en ATV existe una dirección de vientos preferencial del suroeste (SW), en COYI noroeste (NW) y COYII es predominantemente oeste (W) en todas las estaciones del año. Este comportamiento se condice con los antecedentes presentados previamente, que indican que la región se encuentra dominada por vientos que circulan en dirección oeste (W). Las variaciones de velocidad y dirección del viento entre estaciones pueden relacionarse a su ubicación y elevación en el terreno.

Solís (2021), analiza el comportamiento mensual y horario de la velocidad del viento entre 2013 a 2020 a partir de datos de COYI y COYII (Figura 2.16). En su trabajo señala que la velocidad de viento disminuye en los meses de otoño e invierno y aumentan en la primavera y verano en ambas estaciones (Figura 2.16 (a)). Por otro lado, resulta interesante el

comportamiento horario de la velocidad del viento, que disminuye por las mañanas, mientras que a medio día aumentan notablemente, para posteriormente disminuir en el atardecer (Figura 2.16 (b)).

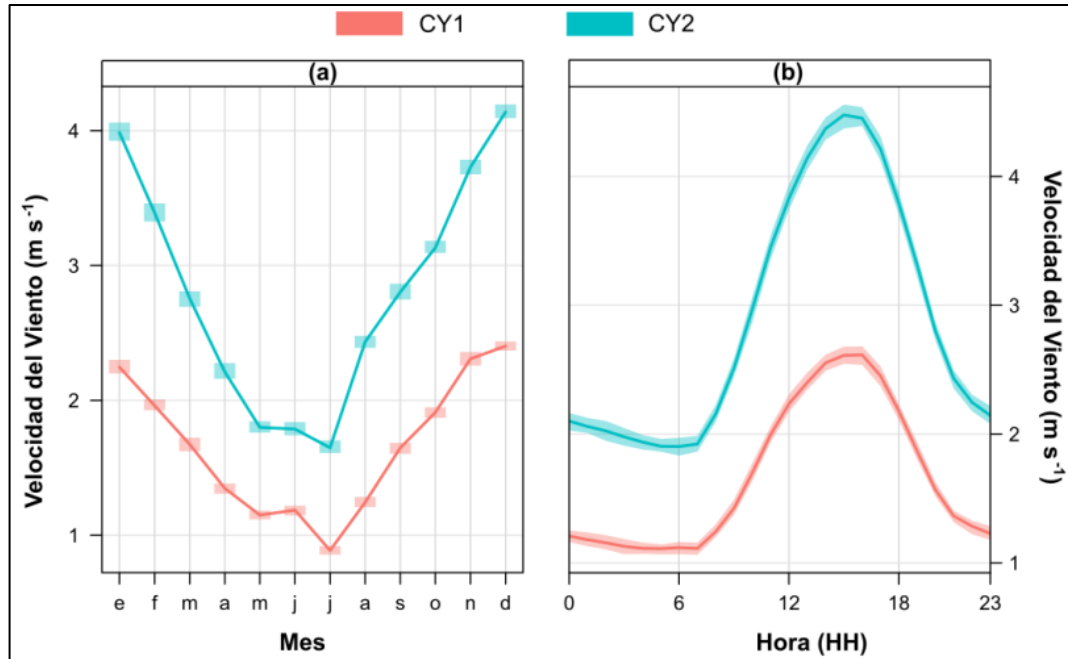


Figura 2.16. Variación mensual (a) y horaria (b) de las velocidades del viento en m/s (2013-2020). (CY1: 'Coyhaique I' y CY2: 'Coyhaique II'). Extraído de Solís (2021).

2.1.5. Inversión térmica

En condiciones normales de la atmósfera la temperatura disminuye con la altitud, lo que produce que las masas de aire cálido cercanas a la superficie se enfríen y dispersen al ascender (Seinfeld y Pandis, 2016). La inversión térmica, corresponde al proceso contrario a lo descrito, específicamente es un fenómeno donde la temperatura del aire aumenta con la altitud, lo que provoca la formación de una capa de aire caliente que impide que las masas de aire cargadas de contaminantes asciendan y se dispersen (Figura 2.17) (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

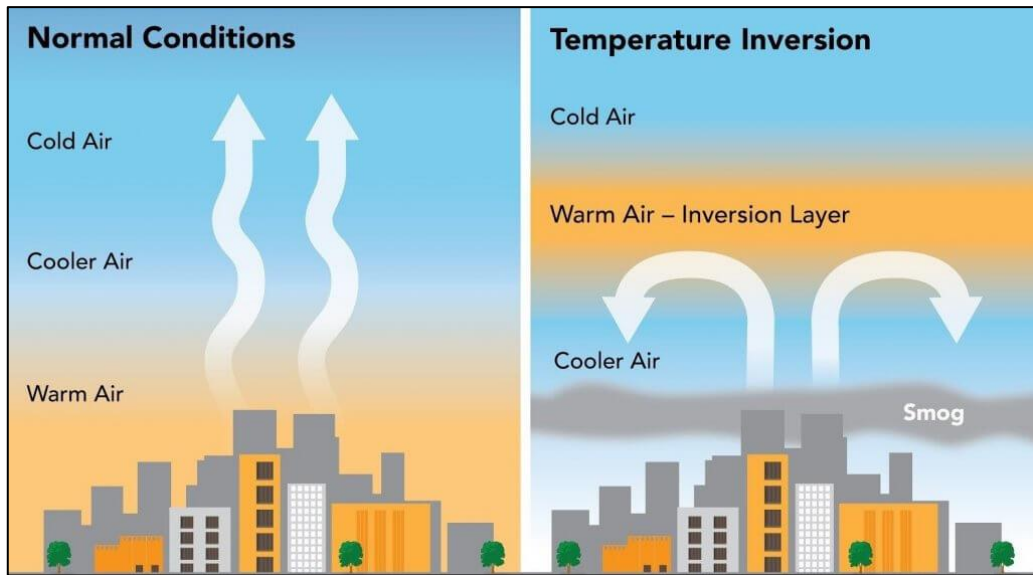


Figura 2.17. Representación gráfica de inversión térmica. Extraído de lotusarise.com (2024).

Todo el volumen de aire que queda bajo el fenómeno de inversión térmica se denomina capa de mezcla o capa límite, esta zona suele tener una altura 100 m a 2000 m, y aquí se concentran e interactúan los contaminantes entre sí (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Este fenómeno fue identificado en Coyhaique por Gómez (2022) quien investiga los patrones meteorológicos de escala sinóptica vinculados a los eventos de emergencia de calidad del aire por $MP_{2,5}$ en Coyhaique. Aquí el autor expone que los fenómenos climáticos de gran escala producen calentamiento anómalo de la tropósfera y un fortalecimiento de la inversión térmica, lo que a escala local conlleva a la inhibición de los procesos de ventilación y dispersión de contaminantes en la ciudad (Figura 2.18).

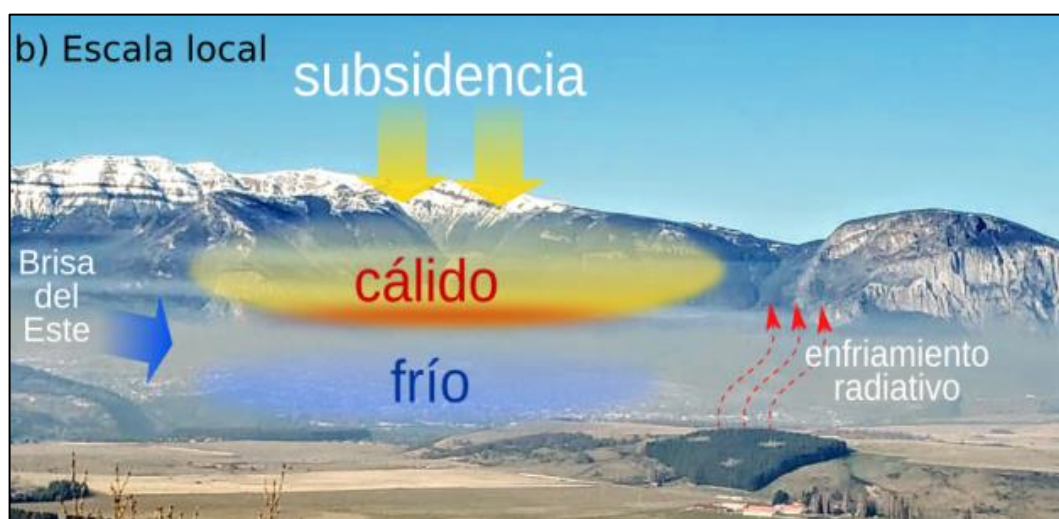


Figura 2.18. Esquema a escala local de la representación de inversión térmica en Coyhaique. Extraído de Gómez (2022).

2.2. GEOMORFOLOGÍA

Las unidades geomorfológicas de la región de Aysén difieren de la típica configuración en el resto del país con la Cordillera de la Costa al oeste, Depresión Central y Cordillera de los Andes al este, aquí las dos primeras cuentan con una importante porción sumergida en el mar debido a los procesos de hundimiento tectónico producidos por el emplazamiento y posterior derretimiento de grandes masas de hielo en el pasado geológico (Börgel, 1983).

Según la clasificación geomorfológica de Börgel (1983) en la región de Aysén se reconocen las siguientes unidades de oeste a este: Cordillera de la Costa, Llano Central, Cordillera Patagónica insular, Cordillera Patagónica de fiordos y ríos, Cordillera Patagónica de ventisqueros y Cordillera Patagónica de lagos y ríos, que abarca la mayor parte del área regional (Figura 2.19).

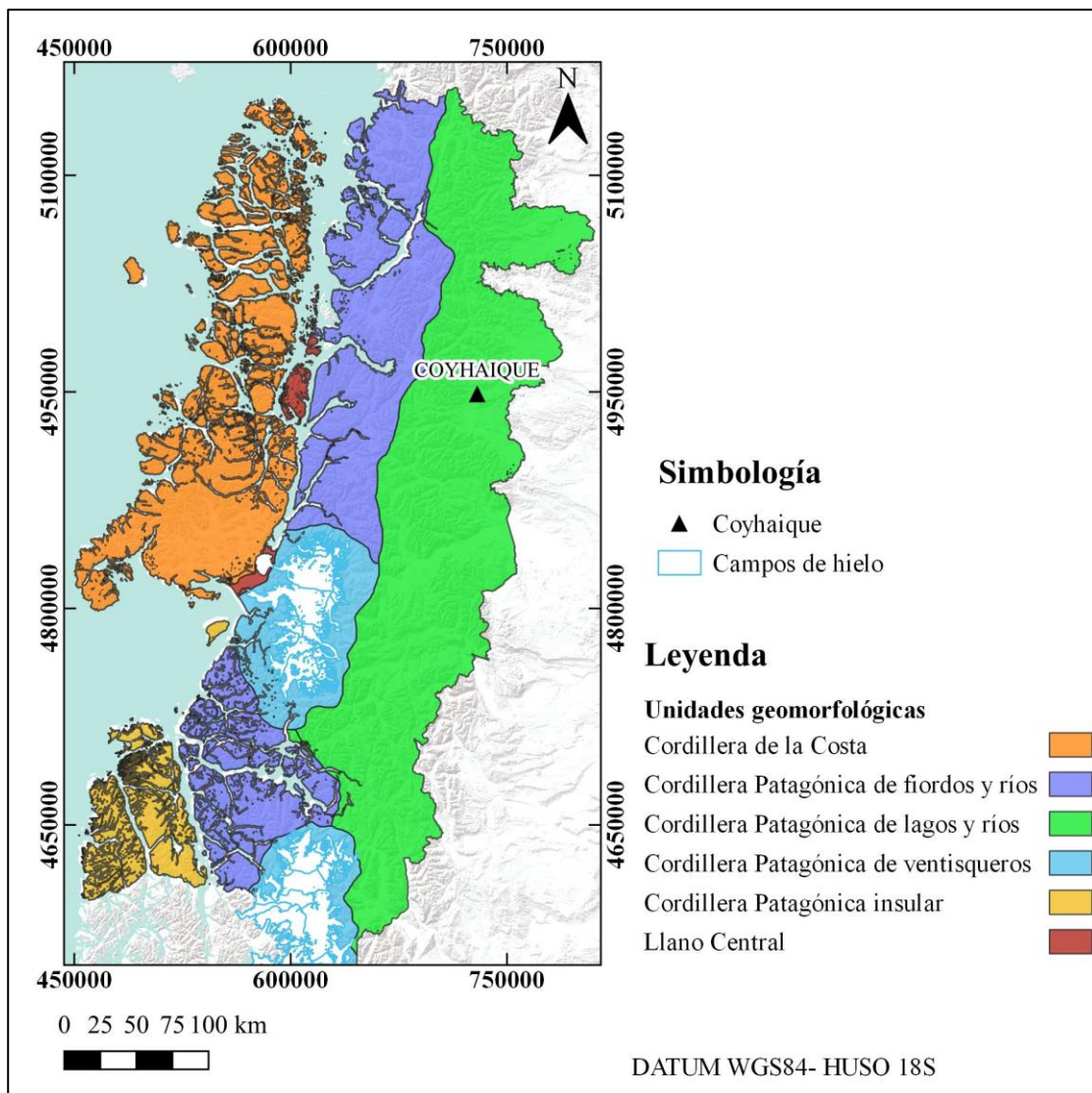


Figura 2.19. Unidades geomorfológicas de la región de Aysén según Börgel (1983). Elaboración propia.

Coyhaique se ubica en la unidad geomorfológica de la Cordillera Patagónica de lagos y ríos con control tectónico (Börgel, 1983), en una depresión que forma un valle donde confluyen los ríos Simpson y Coyhaique. Las elevaciones en el centro urbano varían entre los 198 a 396 m s.n.m y las principales cumbres de la zona se encuentran en los cordones subandinos orientales destacando los cerros: (1) Cordillerano con 1663 m s.n.m., (2) cordón Divisadero con 1520 m s.n.m. y (3) Panguilemu 1444 m s.n.m., que a su vez se encuentran seccionados y modelados por los cursos de aguas superficiales provenientes de altos topográficos (Figura 2.20).

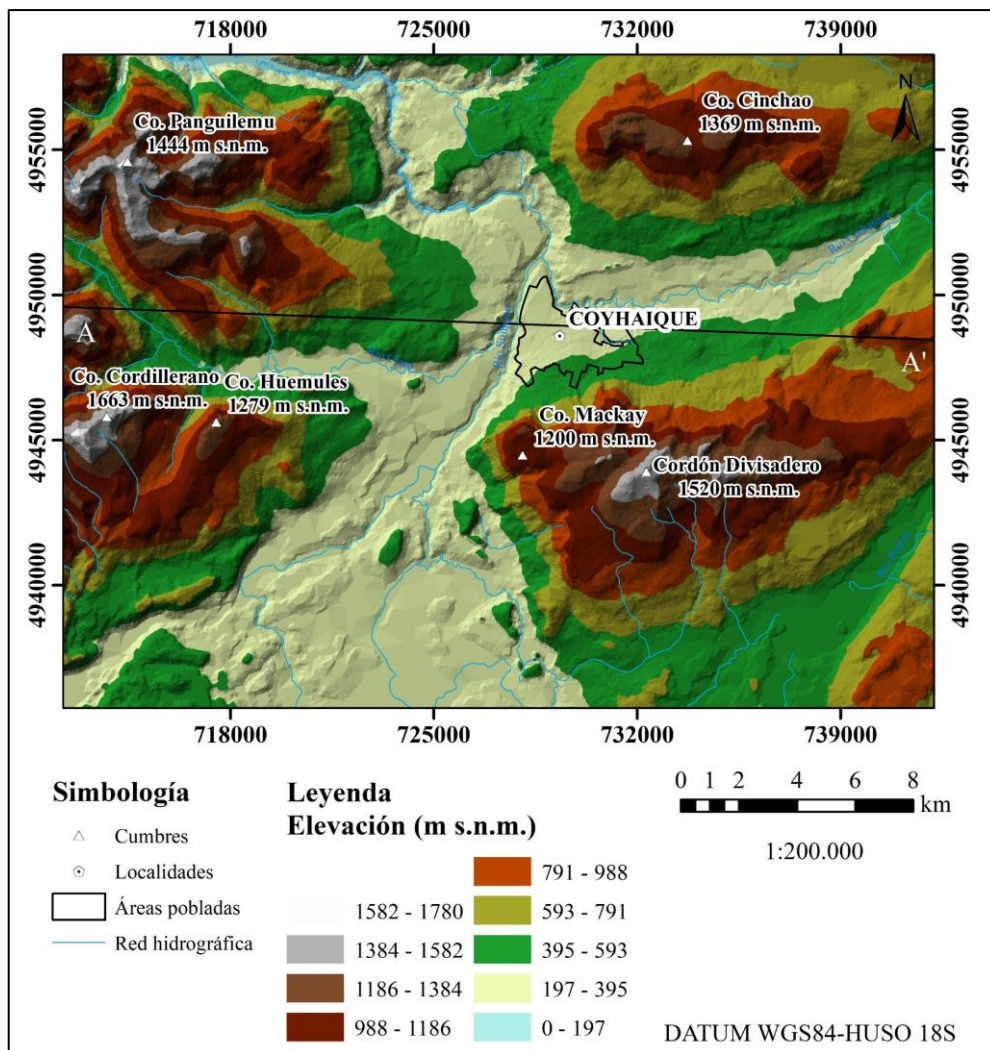


Figura 2.20. Mapa de elevación de Coyhaique y alrededores. Fuente de datos: DEM Alos Palsar. Elaboración propia.

Las menores elevaciones de la zona corresponden a los valles, destacando el valle abierto del río Simpson, otros valles de menor magnitud corresponden al formado en el río Coyhaique de orientación E-W y algunos esteros mayores. Aledaños al curso del río Simpson y Coyhaique

están dispuestos los llanos de sedimentación fluvial o aluvial formados por los cambios de nivel del río, lo que ha desarrollado diferentes terrazas o llanos fluviales, donde las terrazas más antiguas alcanzan una altitud de 388 m s.n.m y 300 m s.n.m., respectivamente (Figura 2.21).

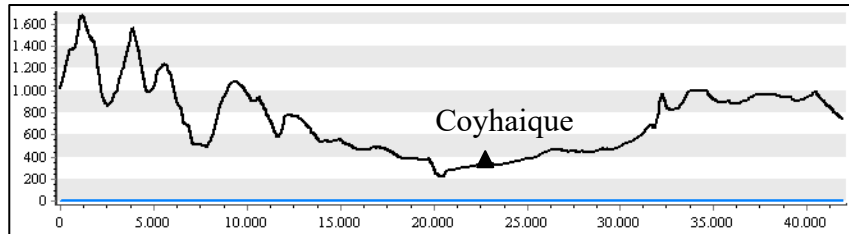


Figura 2.21. Perfil topográfico de elevación A-A'. Fuente de datos: DEM Alos Palsar. Elaboración propia.

La Figura 2.22 exhibe el mapa de pendientes en grados correspondiente al área de estudio. A simple vista, se aprecia que Coyhaique se sitúa en áreas con pendientes que oscilan entre 0 y 17°. Estas áreas, según la clasificación de Demek (1972) (consultar Anexo 2), se consideran desde terrenos planos hasta fuertemente inclinados, y están representadas por tonalidades verdes a amarillentas en el mapa. Dichas pendientes van aumentando gradualmente conforme nos aproximamos al cerro Mackay y al cordón Divisadero. Las mayores inclinaciones se concentran en las zonas montañosas del lado occidental, identificadas en color rojo, donde en algunos casos alcanzan hasta los 89°.

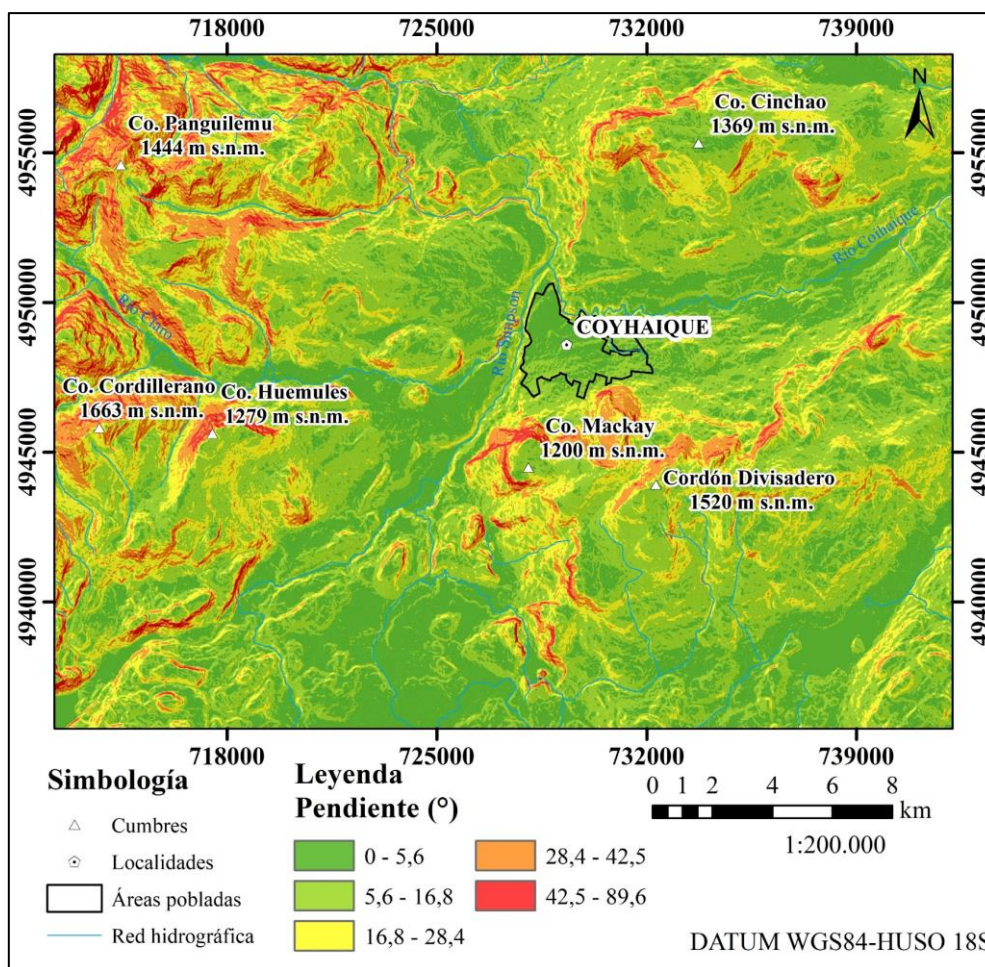


Figura 2.22. Mapa de pendientes de Coyhaique. Fuente de datos: DEM Alos Palsar. Elaboración propia.

El conjunto de ríos, afluentes y quebradas forman una red de drenaje de tipo dendrítica de baja densidad, donde el río Simpson, orientado en sentido NNE-SSW, constituye el principal cuerpo de agua que se conecta con los tributarios menores con alta angularidad, estas características están dadas por la dureza y resistencia de las litologías de la zona.

El relieve actual de Coyhaique es el resultado de la interacción de procesos endógenos y exógenos ocurridos en el sector (Skarmeta, 1976). Al mismo tiempo, es uno de los principales factores que influye en la dispersión de contaminantes, ya que las diferentes formas del terreno tienen una influencia en los movimientos de las masas de aire en la superficie (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

2.3. EVOLUCIÓN DEL MP_{2,5} EN COYHAIQUE

Para poder comprender el contexto en que se realiza el presente trabajo de memoria, es necesario entender que en los últimos años Coyhaique ha alcanzado los niveles más altos en

concentración de $MP_{2,5}$ registrados en la historia (Solís, 2021; Solís y otros 2022). El comportamiento y evolución del MP en Coyhaique fue estudiado por Solís (2021), quien a partir de datos de las estaciones COYI y COYII de la red SINCA, destaca que las concentraciones más altas de $MP_{2,5}$ se registran durante los meses de otoño e invierno, donde los máximos de concentración ocurren entre las 06:00 - 10:00 h y 18:00 - 23:00 h, momentos en que la población enciende las estufas a leña. Además, el autor observa una tendencia general a la disminución de las concentraciones de $MP_{2,5}$ a lo largo 2014 a 2020 (Figura 2.23).

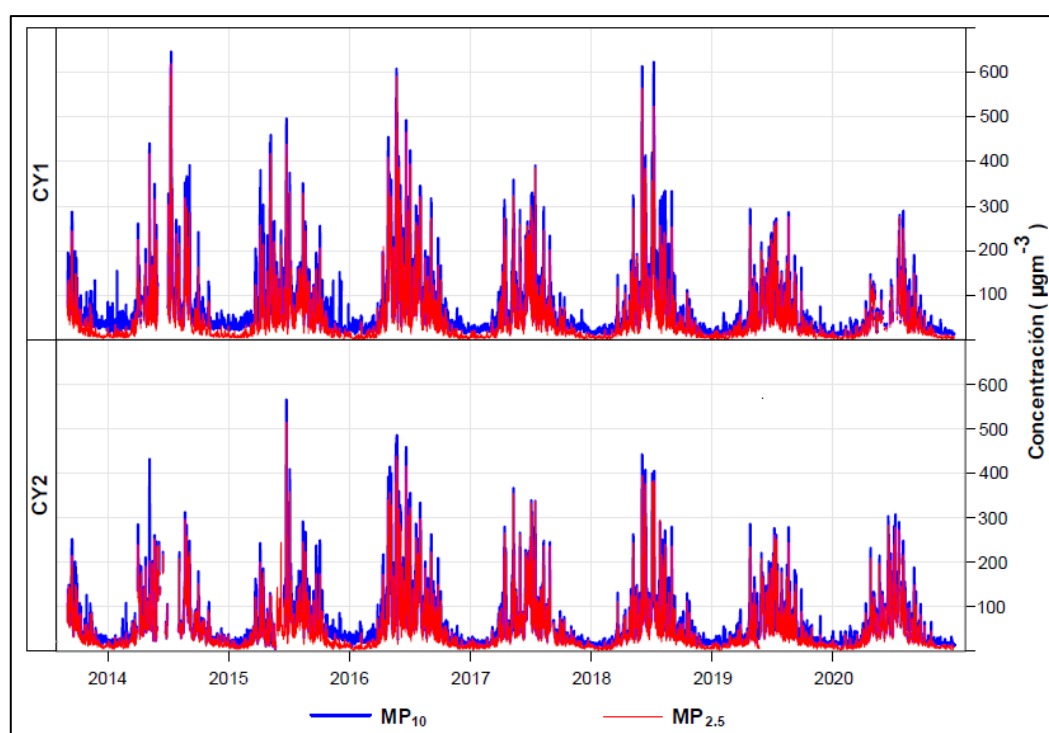


Figura 2.23. Serie de tiempo de las concentraciones de MP_{10} (líneas azules) y $MP_{2,5}$ (líneas rojas) para las estaciones en estudio. CY1: Coyhaique I; CY2: Coyhaique II. Extraído de Solís (2021).

En la misma línea, Solís y otros (2022) examinaron a largo plazo la contaminación por partículas en el aire de Coyhaique, evidenciando que entre 2014 y 2020 las concentraciones de MP superaron los límites establecidos por la OMS, con excedentes anuales del 57% para MP_{10} y del 77% para $MP_{2,5}$. Estos resultados subrayan la preocupante situación de contaminación que persiste en esta ciudad. Desde 2021 hasta la actualidad, no se han realizado análisis comparables a los de Solís (2021) en cuanto a promedios anuales y su relación con la normativa vigente.

Dado que en 2021 la OMS actualizó sus normativas sobre el MP, más adelante en este trabajo se analizarán los promedios anuales de $MP_{2,5}$ registrados en la ciudad en los últimos

años y su relación con dichas normativas, con el objetivo de comprender mejor el contexto ambiental actual.

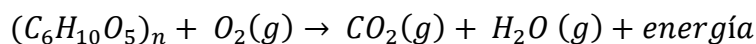
2.4 FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE MP_{2,5}

2.4.1. FUENTES ANTROPOGÉNICAS

2.4.1.1. Combustión de leña residencial

El MP_{2,5} proveniente de combustión residencial se forma a partir de la combustión incompleta de materiales orgánicos en este caso la leña, lo que depende directamente del grado de humedad de esta, mientras mayor sea la humedad menor será el grado de combustión y, por ende, habrá mayor producción de MP_{2,5} (Sippula, 2010).

Químicamente, la leña no tiene una composición exacta, esta dependerá de la sección del árbol a la pertenezca, ubicación geográfica, clima y condiciones del suelo (Pettersen, 1984). Sin embargo, en términos generales esta suele contener un 50% de C, 6% de H, 44% de O y contenidos variables de trazas de diversos iones metálicos (Pettersen, 1984). En mayor detalle, se estima que este material puede contener entre 65-75% de hidrocarburos, mayoritariamente celulosa ((C₆H₁₀O₅)_n) y hemicelulosa, y un 18-35% de lignina (Pettersen, 1984). Considerando, que la leña se compone mayoritariamente se celulosa la reacción química de combustión se representa de la siguiente manera:



Además de la liberación de CO₂ y H₂O, también se liberan cenizas, estas suelen contener altas cantidades de material volátil, especialmente K, del cual una gran fracción se volatiliza durante la combustión y forma partículas finas (Valmari, 2000 en Sippula, 2010).

La quema de leña constituye la principal fuente de calefacción residencial en Coyhaique, esto debido a la alta demanda energética de las viviendas especialmente en los meses de otoño e invierno. El inventario de emisiones de 2009 estimó que el sector residencial aporta con un total de 6.982 ton/año de MP_{2,5} y en 2015 este aporte alcanzó los 6.259,7 ton/año (Silva y otros, 2017). Estas estimaciones se obtienen del producto entre factores de emisión según tipo de artefacto, niveles de actividad, humedad de la leña y otros factores como la operación del artefacto (tiraje abierto, semiabierto o cerrado). Los cálculos de emisiones en el inventario de 2015, se realizaron mediante la siguiente ecuación (Silva y otros, 2017):

$$E_{total_{i,k}} = \sum (NA_k \times P \times FE_i) / 1.000.000$$

Donde,

$E_{total_{i,k}}$: Emisiones del contaminante “i”, para la comuna “k” (ton/año).

NA_k : Nivel de actividad (consumo de leña) para la comuna “k” (kg/año).

P : Variable que caracteriza las condiciones en que se realiza la combustión (leña seca, leña humedad o condiciones de operación).

FE_i : Factor de emisión (gr/kg) según artefacto “i”.

A partir de la ecuación anterior, el inventario del año 2015 estimó que un 99,67% del $MP_{2,5}$ proviene de la combustión residencial de leña, lo que la reafirma como principal fuente de contaminación en la zona. Esto se debe a que en ese entonces el 96% de las viviendas de la ciudad utilizaba leña para calefacción o cocción de alimentos (Silva y otros, 2017).

Para subsanar esta situación, el MMA ha implementado el programa de “Recambio de Calefactores” en la ciudad, el cual tiene como objetivo reducir las emisiones de contaminantes generadas por la combustión residencial de leña (MMA, 2016). Por medio de este programa, los beneficiarios pueden acceder a un nuevo calefactor siempre y cuando hagan entrega de su antiguo calefactor y/o cocina, el cual debe estar instalado y en uso en la vivienda (MMA, 2016). En concreto, las personas pueden cambiar su estufa a leña por una estufa a parafina, pellet o aire acondicionado.

2.4.1.2. Calderas

Según el inventario de emisiones de 2015, hasta ese año existían dentro de la zona saturada por $MP_{2,5}$ un total de 171 calderas en funcionamiento, donde un 50% corresponde a calderas cuyo combustible es el petróleo, 25% usa leña, 23% gas licuado y un 2% pellets (Silva y otros, 2017).

Las estimaciones de emisiones indican que los principales combustibles que producen $MP_{2,5}$ corresponden al petróleo y leña, lo que viene de la mano de la combustión incompleta de estos. Así, para el año 2015 se estimó un aporte de 7,23 ton/ año de $MP_{2,5}$ por parte de las calderas, donde un 0,03 ton/año provienen de petróleo $N^{\circ}2$ (Tipo de combustible derivado del petróleo crudo) y 7,2 ton/año de leña. Los cálculos fueron realizados a partir de la siguiente ecuación:

$$E = FE * NA * \left(1 - \frac{EA}{100}\right)$$

Donde,

E : Emisión (ton/año).

FE : Factor de emisión

NA: Nivel de actividad (consumo de combustible en litros o metros cúbicos estéreos)
EA: Eficiencia de abatimiento de la tecnología de control de emisiones, de existir alguna.

Así las calderas como fuentes fijas de emisión de $MP_{2,5}$ representan en Coyhaique al 2015 el 0,12% de las emisiones de material particulado fino (Silva y otros, 2017).

2.4.1.3. Transporte

A lo largo de los años el parque vehicular en Coyhaique ha ido en aumento, especialmente desde 2009, año en que se inició la extensión de la zona franca a la región. Según el boletín de parque de vehículos en circulación de 2023 en la región de Aysén, en Coyhaique de los 29.420 vehículos existentes, 29.049 eran motorizados y 371 no motorizados, lo que representa el 52,4% del total del parque vehicular de la región (INE, 2023).

El inventario de emisiones de 2015 considera en sus cálculos un parque vehicular total para Coyhaique de 20.139 vehículos, según cifras del INE para ese entonces, habría correspondido a un 31,55% menos que la actualización de 2023. Aun así, este inventario indica que los principales aportes de $MP_{2,5}$ provienen de vehículos comerciales con 6,85 ton/año, seguido de vehículos particulares con 5,07 ton/año, taxis colectivos con 0,11 ton/año y vehículos pesados con 0,63 ton/año. Los cálculos de emisiones se realizaron a partir de la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_k (N_{j,k} \times M_{j,k} \times FE_{i,j,k})$$

Donde,

$N_{j,k}$: Número de vehículos de la flota nacional de la categoría “j” y tecnología “k”.

$FE_{i,j,k}$: Factor de emisión específico por tecnología para el contaminante “i”, por categoría vehicular “j” y tecnología “k” (g/veh-km).

$M_{j,k}$: Distancia promedio anual recorrida por la categoría vehicular “j” y la tecnología “k” (km-veh).

Así las fuentes móviles representaron un total de 7,23 ton/año para 2015, que correspondió a un 0,2% del total de emisiones.

2.4.1.4. Quemadas agrícolas y forestales

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) es la entidad encargada de autorizar las quemadas agrícolas y forestales en Chile. Estas quemadas se realizan con el objetivo de reducir el peligro de incendios forestales, preparar terrenos para la siembra, controlar plagas, construir caminos, canales y cercos, entre otros (Silva y otros, 2017).

Para el año 2015 se autorizó por parte de CONAF un total 16 quemadas (15 agrícolas y 1 mixta) dentro de la zona saturada por $MP_{2,5}$, lo que corresponde a un área de total 9,66 ha (Silva y otros, 2017). Para estimar las emisiones Silva y otros (2017) utilizan la siguiente ecuación:

$$E_k = \sum S_i \times FE_{i,k} \times FC_i$$

Donde:

E_i : Emisiones del contaminante “k” (ton/año).

S_i : Nivel de actividad, expresado en superficie total quemada del tipo de suelo “i” (ha/año)

$FE_{i,k}$: Factor de emisión del tipo de suelo “i” para el contaminante “k” (ton/ton materia quemada)

FC_i : Factor de carga el tipo de suelo “i” (ton/ha).

Bajo estos cálculos, se estimó que los principales contaminantes que emiten las quemas agrícolas en la zona saturada de Coyhaique corresponden a MP_{10} y $MP_{2,5}$ con 0,40 ton/año y 0,37 ton/año, respectivamente (Silva y otros, 2017). Para el caso del $MP_{2,5}$, este representa un aporte de 0,01% respecto a las fuentes anteriormente descritas (Silva y otros, 2017).

2.4.2. FUENTES NATURALES

2.4.2.1. Incendios forestales

Según estadísticas de CONAF disponibles en su página web, las principales causas de los incendios forestales ocurridos entre 2003 a 2022 corresponden a: un 47,4% accidentales, 33,3% intencionales, 0,8% naturales y 18,5% desconocidas. Independientemente de la causa, está comprobado que los incendios forestales aumentan los niveles de $MP_{2,5}$ en el ambiente (De la Barrera y otros, 2018).

La composición del $MP_{2,5}$ proveniente de los incendios forestales tiene los siguientes tipos de componentes: a) derivados de la combustión de la biomasa (ej: levoglucanos, oxalatos, succinatos, malonatos, metoxifenoles, monosacáridos e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)); b) derivados de la corteza terrestre (ej: Fe, Al, Ca y Si) y c) aerosoles secundarios como nitratos, sulfatos y sales de amonio (Oyarzún, 2020).

Para el caso de la comuna de Coyhaique, CONAF registra entre 2013 a 2022 un total de 162 incendios forestales y total de superficie afectada de 402, 75 ha. Si bien en el inventario de emisiones de 2015 del MMA no se realizan estimaciones respecto a incendios forestales, existen metodologías para calcular emisiones de $MP_{2,5}$ por incendios, como la utilizada por Contreras (2019) quien trabaja en base a la propuesta de Ambiosis (2011), que toma como referencia el estudio realizado por la Junta de Recursos del Aire de California (CARB, 2004 en Contreras, 2019), proponiendo la siguiente ecuación:

$$E_C = FE_C \times A \times FC$$

Donde:

E_C : Emisión del contaminante “c” (ton/año)

A : Área consumida por incendios forestales (ha/año)

FE_C : Factor de emisión del contaminante c (ton/ton de combustible)

FC : Factor de carga (ton/ha)

Así, teniendo en cuenta la cantidad de incendios forestales y el total de superficie afectada dentro de la zona saturada por $MP_{2,5}$ es posible estimar la contribución de estos fenómenos a la contaminación atmosférica, lo que se podría considerar en futuros inventarios.

2.4.2.2. Erosión de suelo o material geológico

En la naturaleza el viento actúa como un agente de meteorización, erosión y transporte que produce desgaste en rocas o suelo, lo que tiene como consecuencia la remoción y transporte de partículas sólidas en el medio ambiente. Este efecto se ve favorecido en zonas de baja cobertura vegetal, donde las rocas o suelo se encuentran expuestos a la acción del viento y consecuente erosión. El MP derivado de la meteorización física y química de rocas y suelos se denomina en geoquímica atmosférica “material particulado crustal”, y su composición química en última instancia refleja la de los minerales que formaban la roca madre (Moreno y otros, 2011).

En Chile tanto Morata y otros (2008) y como Valdés y otros (2012) han identificado la presencia de partículas de origen geológico en $MP_{2,5}$, lo que está directamente relacionado con la composición de los suelos y la geología circundante.

En Coyhaique, la geología de la zona está caracterizada principalmente por rocas ígneas intrusivas y volcánicas de composición andesítica a riolítica, además de rocas sedimentarias fosilíferas (Figura 2.24).

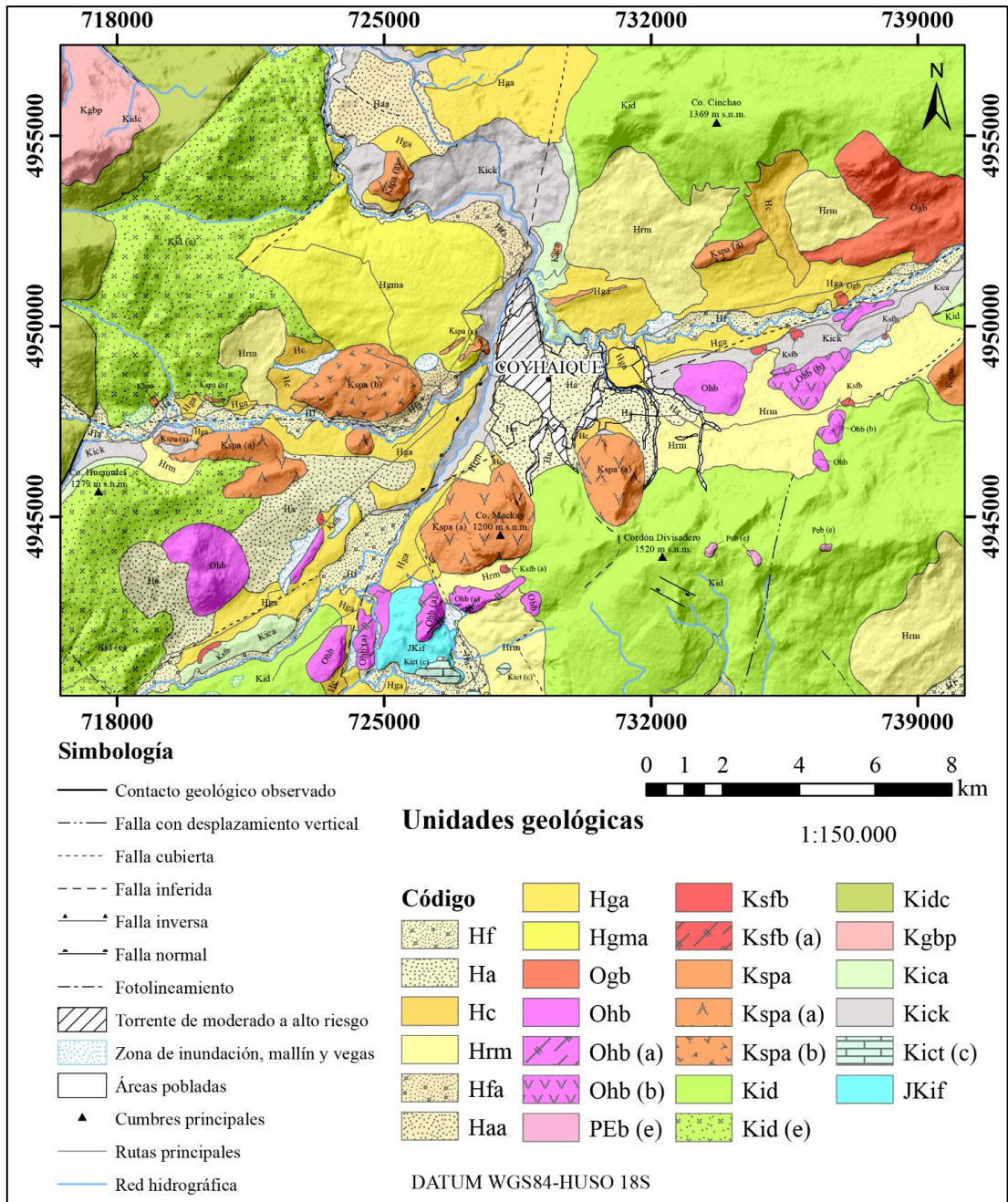


Figura 2.24. Mapa geológico de la ciudad de Coyhaique. Escala 1:150.000. Modificado de De la Cruz y otros (2003).

La ciudad se emplaza sobre depósitos de abanicos aluviales recientes (Ha) compuestos por gravas con bancos de arenas y limos subordinados, estas unidades se encuentran cercanos a cursos y flujos de detritos actuales (De la Cruz y otros, 2003). Alrededor, de los cerros Mackay y Divisadero principalmente en las quebradas y laderas, se exponen de manera reducida depósitos coluviales (Hc), constituidos por gravas con matriz de arena y limo (De la Cruz y otros, 2023).

En los altos topográficos de la ciudad se encuentran expuestos a erosión del viento diversos afloramientos de roca. Al suroeste de la ciudad, el Co. Mackay constituye una unidad subvolcánica de composición dacítica (Kspa (a)), las rocas de esta unidad presentan hornblenda, piroxeno y pseudomorfos de biotita/anfibola y una alteración argílica leve (De la Cruz y otros, 2003).

En el cordón montañoso del Co. Divisadero se distinguen dos zonas de exposición de rocas; la primera presenta menor elevación y se corresponde a un pórfido riolítico (Kspa (b)) que presenta biotita cloritizada e incipiente alteración a sericita y feldespato (De la Cruz y otros, 2003); la segunda zona, expuesta en la cima de este cordón, concierne a rocas de la Formación divisadero (Kid), que se compone de una secuencia a una secuencia de volcanoclastitas, con lavas intercaladas, que varían en composición desde andesitas a riolitas (De la Cruz y otros, 2003), esta unidad también se expone en el sector norte en la cima del cerro Cinchao. Localmente, en esta segunda zona del cordón Divisadero, existen afloramientos de la unidad Basaltos de Balmaceda (Peb (e)) compuesta por basaltos de olivino y clinopiroxeno (De la Cruz y otros, 2003).

En los valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique, aflora de manera reducida la Formación Katterfeld (Kick), que corresponde a una secuencia de lutitas negras marinas, localmente fosilíferas (De la Cruz y otros, 2003). La Formación Apeleg (Kica), también aflora en la confluencia de estos valles, donde es posible distinguir una secuencia de areniscas de color gris verdoso, compuestas por cristales de cuarzo, feldespato y líticos principalmente de rocas volcánicas básicas alteradas, en menor cantidad esquistos metasedimentarios y ocasionalmente clastos plutónicos y sedimentarios (De la Cruz y otros, 2003). En los lechos de ambos ríos, se exponen de manera subordinada depósitos fluviales actuales (Hf) no cohesivos constituidos por gravas clasto-soportadas, con cantidades menores de matriz arenosa, en estos sedimentos Roth (2016) identifica la presencia de metales Mo, Cu, Pb, Zn, Ag, Au, Hg, Tl, Co, Cr, Ni, Hf, Nb, Sc, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, Rb, Cs, Sr, Ba, Be, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Cd, Bi, Sn y metaloides como As, Sb, Te, Se y B (el detalle de las concentraciones de estos y otros metales se encuentra en el Anexo 3).

3. METODOLOGÍA

3.1. METODOLOGÍA DE TOMA DE MUESTRAS

Para efectos de este trabajo de memoria el origen los datos se puede dividir en: (1) datos de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ y variables climáticas obtenidos de la red SINCA y (2) muestras de composición elemental y concentración de $MP_{2,5}$ obtenidas mediante un monitoreo activo en terreno en la ciudad.

3.1.1. Concentraciones totales de $MP_{2,5}$ y variables climáticas de la red SINCA

Las estaciones de la red SINCA de Coyhaique utilizan el sensor BAM 1020 de Met One Instruments (Figura 3.1) para medir y registrar automáticamente los niveles de concentración de masa de partículas en el aire cada una hora (Met One Instruments, 2016). Este sensor opera bajo el principio de atenuación beta por absorción, utilizando filtros en forma de cinta compuestos de fibra de vidrio para la toma de muestras de MP (Met One Instruments, 2016).



Figura 3.1. Monitor BAM 1020. Extraído de Met One Instruments, (2023).

Las cintas utilizadas en el BAM 1020 no requieren un acondicionamiento previo, pero si deben ser renovadas cada 60 días aproximadamente. Además, estas no deben ser reutilizadas o se provocará errores en las mediciones (Met One Instruments, 2016).

El proceso de registro de datos inicia con la emisión constante de rayos beta a partir de C^{14} , estos pasan a través de un filtro en forma de cinta. Al comienzo del ciclo de medición, se registra la cuenta de rayos beta (I_0) que pasan a través de la cinta limpia. Luego, una bomba externa extrae un volumen de aire conocido, cargado de partículas, que pasa a través de la cinta atrapando así las partículas ambientales. Al final del ciclo de medición, se vuelve a medir la cantidad de rayos beta (I) que pasan a través de la cinta sucia, cargada de partículas (Met One Instruments, 2016). La relación de I_0 a I se utiliza para determinar la masa de las partículas recogidas en la cinta de filtro (M), mediante la siguiente relación (Met One Instruments, 2016):

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\mu M}{S}\right)$$

Donde,

I_0 : conteo de rayos beta que pasan a través del filtro limpio

I : conteo de rayos beta a través del filtro sucio

μ : sección transversal de absorción de rayos beta (cm^2/mg)

M : masa del aerosol depositado en el filtro (mg)

S : área del punto muestreado (cm^2)

Para las variables climáticas como la temperatura ambiente, humedad relativa, dirección y velocidad de viento, la red SINCA en COYI utiliza el sensor MET ONE 83D. En el caso de COYII, esta estación utiliza el sensor LSI LASTEM para registrar las mismas variables.

Una vez obtenidos los datos de masa de MP y variables climáticas por sus respectivos sensores, esta información pasa por un proceso de validación en línea antes de ser aceptada en la base de datos final, este proceso considera criterios cuantitativos y cualitativos (MMA, 2024).

Los criterios cuantitativos hacen referencia a la información histórica del sitio de medición, estado operacional de los equipos, calibraciones, rangos de medición, etc. (MMA, 2024). Los criterios cualitativos incorporan información relevante respecto de condiciones de la medición, observaciones adicionales, tales como meteorología u otros contaminantes, mediciones independientes de otras estaciones u otros sistemas de medición (MMA, 2024).

Bajo estos criterios, se definen tres tipos de registros en el sitio web de la red SINCA (MMA, 2024):

- Registros no validados: Estos datos de monitoreo no han sido verificados por los operadores de la red y pueden contener errores debido a cortes de energía o calibraciones incorrectas.
- Registros preliminares: Son datos enviados por los operadores de la red que pueden tener errores. Sin embargo, se conoce la razón de estas inexactitudes y, por lo tanto, se puede mejorar la calidad de la información.
- Registros oficiales: Estos registros preliminares han pasado por un segundo proceso de validación y son aptos para evaluar las normas de calidad del aire primarias.

Para acceder a los datos de la red SINCA se debe ingresar al sitio web, seleccionar la estación deseada y elegir entre los diversos parámetros contaminantes o meteorológicos disponibles, seleccionando el rango de fecha que se requiera, los datos pueden ser descargados en formato texto, CVS o Excel. De esta forma, se accedió a datos de registros diarios y horarios de $MP_{2,5}$, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento de la red SINCA.

3.1.2. Concentraciones totales y elementales del $MP_{2,5}$ y variables climáticas en terreno

La campaña en terreno en la ciudad de Coyhaique se desarrolló entre el 28 de febrero al 28 de marzo del año 2022, consistió en un monitoreo activo de la calidad del aire de la ciudad, específicamente de partículas y gases, tanto dentro y fuera de 18 viviendas seleccionadas en distintas zonas de la ciudad, por un período de 48 h (Figura 3.2). En este trabajo de memoria en particular, se trabajarán únicamente con los datos $MP_{2,5}$, temperatura y humedad relativa de esta campaña.

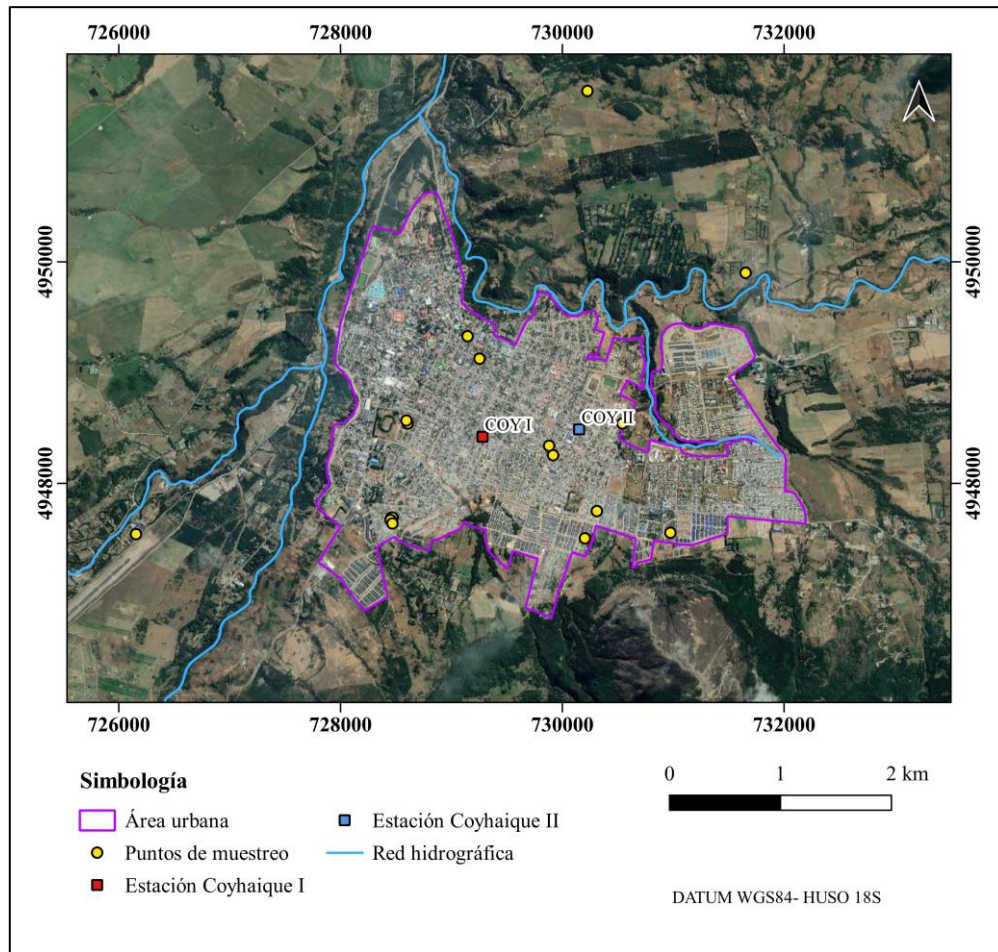


Figura 3.2. Ubicación de estaciones de monitoreo y puntos de muestreo de $MP_{2,5}$ en Coyhaique.
Elaboración propia.

3.1.2.1 Preparación de la campaña en terreno

3.1.2.1.1. Criterios de selección de puntos de muestreo

Esta campaña de terreno fue diseñada por un equipo de trabajo correspondiente al área de la salud dentro del proyecto. Para seleccionar las casas o puntos de muestreo, se emplearon estándares espaciales (zonificación de la ciudad) y atributos específicos de las residencias en términos de su sistema de calefacción y el nivel de aislamiento térmico que presentaban (Sección 3.1.2.1.1.2).

3.1.2.1.1.1. Zonificación de la ciudad

Durante la fase de desarrollo del proyecto, el equipo de investigación mantuvo múltiples reuniones con profesionales interdisciplinarios de la comuna que están involucrados en el PDA y que forman parte de la Seremi de Salud y Seremi del Medio Ambiente en la ciudad. Estos expertos señalaron que habrían observado una tendencia de acumulación de contaminación por MP en ciertas áreas de la ciudad, específicamente en las zonas montañosas que rodean el perímetro urbano.

Gallardo (2020), confirma lo comunicado por los profesionales intersectoriales, ya que mediante su investigación identifica que en los sectores sur y sureste de la ciudad se concentra la mayor contaminación de MP₁₀, sectores que coinciden con los pie de monte de los cerros aledaños a la ciudad, Co. Divisadero y Co. Mackay, donde ocurren cambios tanto en la pendiente como elevación del terreno.

Tomando en cuenta estas dos experiencias, el equipo a cargo de diseñar esta campaña decidió realizar una zonificación de la ciudad en función de las diferencias de elevación y pendiente, dividiéndola en los siguientes rasgos geomorfológicos locales: centro de la ciudad, valle fluvial río Simpson, valle fluvial río Coyhaique, pie de monte Co. Mackay y pie de monte Co. Divisadero. Los rangos de pendiente y elevación de cada zona geomorfológica se describen a continuación en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Zonas geomorfológicas con sus respectivos rangos de pendiente y elevación

Zona	Rangos de pendiente	Rangos de elevación
Centro de la ciudad	0° a 7°	296 a 400 m s.n.m.
Valle fluvial río Simpson	0° a 36°	220 a 300 m s.n.m.
Valle fluvial río Coyhaique	0° a 36°	220 a 320 m s.n.m.
Pie de monte Co. Mackay	7° a 36°	297 a 515 m s.n.m.
Pie de monte Co. Divisadero	7° a 89°	330 a 500 m s.n.m.

Así estas áreas fueron consideradas zonas prioritarias para la selección de puntos de muestreo, y se planteó tener al menos una casa en cada zona (Figura 3.3).

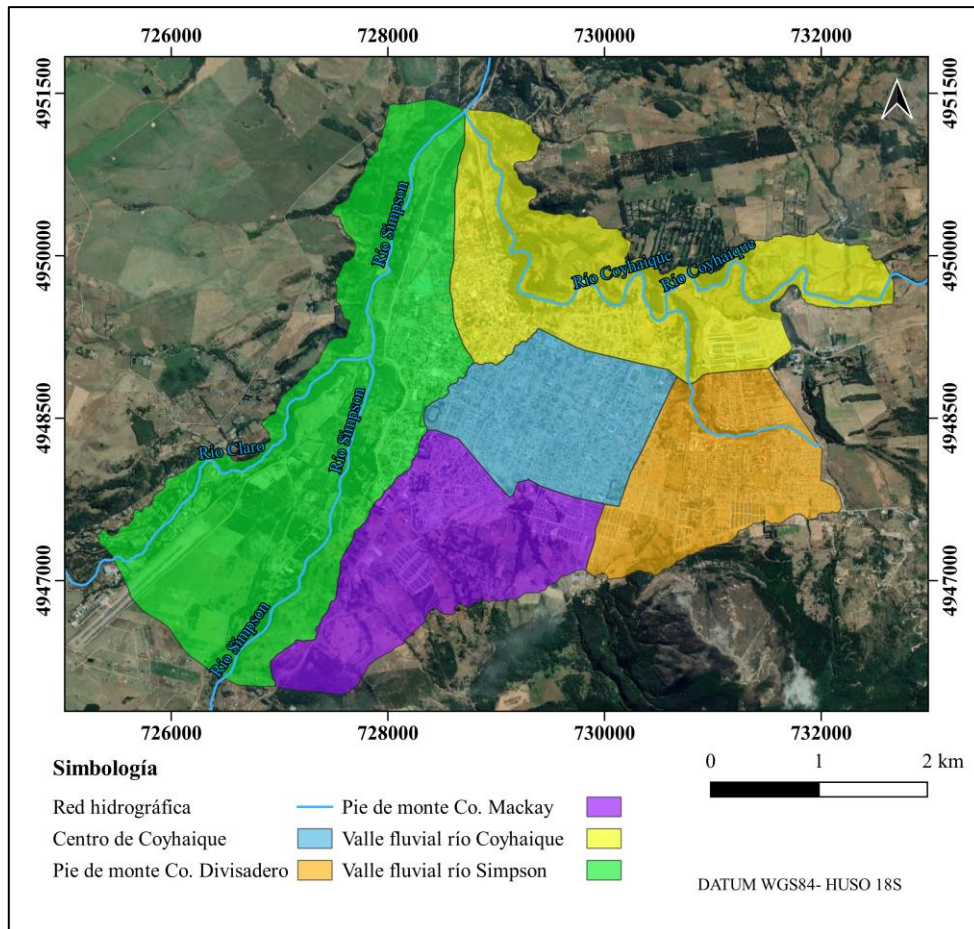


Figura 3.3. Mapa de zonas geomorfológicas locales o zonas prioritarias. Elaboración propia.

3.1.2.1.1.2. Selección de viviendas

Los criterios utilizados para la selección de viviendas dentro de la ciudad fueron: (1) casas dentro de la zona urbana de la ciudad y por ende dentro de la saturada por $MP_{2,5}$, (2) viviendas representativas de la ciudad, típicas casas del entorno natural y climático de la región, construidas principalmente con madera y planchas metálicas, con techos inclinados y ventanas simples o dobles, (3) casas acogidas o no al programa de recambio de calefactores del MMA, (4) casas acogidas o no al programa aislamiento térmico por parte del Ministerio de Vivienda (MINVU) y (5) casas dentro de las zonas prioritarias de monitoreo (Figura 3.3). Así se logró identificar un total de 18 viviendas voluntarias que cumplieran con los criterios mencionados.

3.1.2.1.1.3. Pareamiento de las viviendas

Las viviendas seleccionadas fueron pareadas entre sí, en base a los siguientes criterios: (1) ambas casas debían estar dentro de la misma zona prioritaria, (2) una de las viviendas debía estar acogida al programa de recambio de calefactores, (3) una de las viviendas no debía estar

acogida a dicho programa y (4) la distancia entre las viviendas pareadas no debía ser mayor a 300 metros.

En la práctica fue necesario flexibilizar los criterios (1) y (4) para completar una cantidad óptima de viviendas monitoreadas. En algunos casos se parearon viviendas en distintas zonas prioritarias y con distancia entre ellas mayor a 300 metros.

3.1.2.1.1.4. Asignación de códigos

Una vez seleccionadas las viviendas a monitorear, se les asignó un código alfanumérico para distinguirlas, las letras hacen referencia a si la vivienda se encuentra o no acogida al programa de recambio de calefactores del MMA y los números al orden de la toma de muestras. Así, aquellas casas acogidas al programa, que pueden presentar calefacción a parafina, pellet o aire acondicionado, se identificaron con el código CR (Con Recambio), por el contrario, las viviendas no acogidas tienen en su mayoría estufas a leña, a excepción de algunas que adquirieron estufas a parafina, pellet o aire acondicionado por su propia cuenta, estas se identificaron con el código SR (Sin Recambio).

En algunos casos, a los códigos se les ha agregado el sufijo “INT” o “EXT”, que indican si la muestra corresponde al interior o exterior de la vivienda, respectivamente

La Figura 3.4 muestra la distribución de las viviendas pareadas y codificadas.

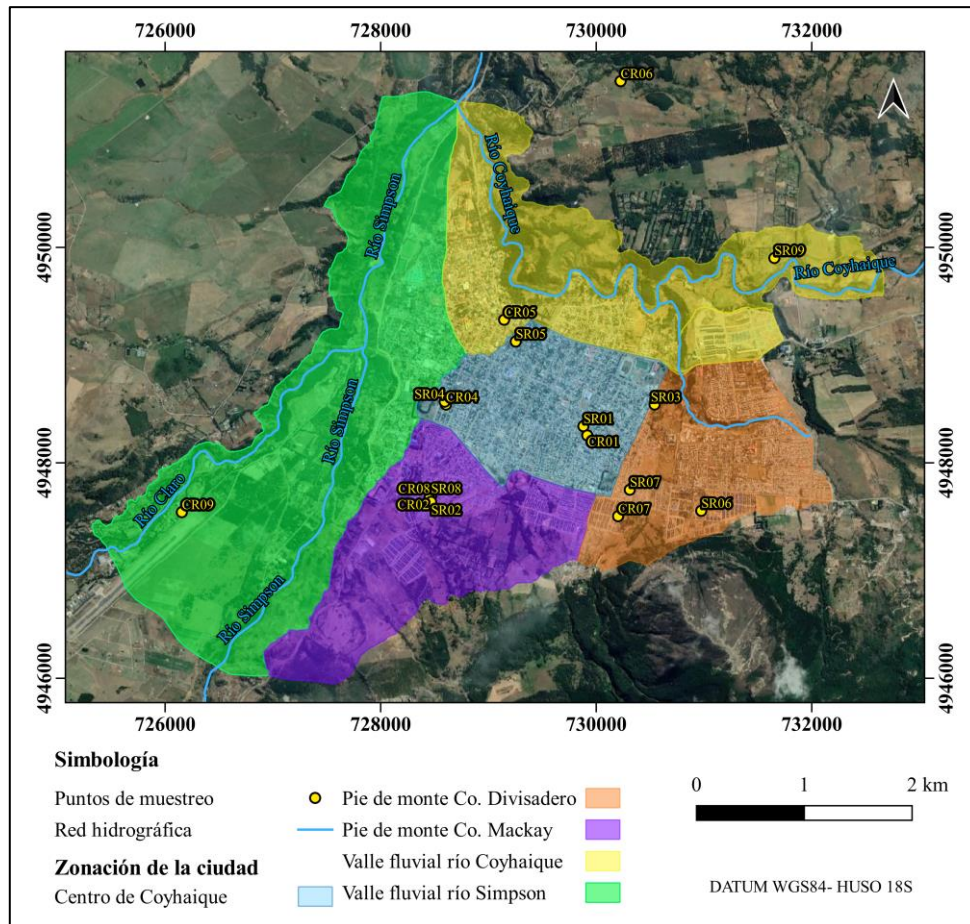


Figura 3.4. Distribución de las viviendas seleccionadas y sus respectivos códigos.
Elaboración propia

3.1.2.1.2. Equipos de muestreo

Para este estudio se colectó $MP_{2,5}$ sobre filtros de teflón utilizando un impactador *Personal Environmental Monitor (PEM)* para partículas menores a $2,5 \mu m$ de diámetro, acoplado a una bomba de muestreo *Aircheck Sampler* y el equipo *Environmental Particulate Air Monitor (EPAM5000)*, respectivamente. Se midió en forma continua los niveles de $MP_{2,5}$ utilizando monitores de tiempo real *EPAM5000* y *Dust Trak*. La temperatura y humedad relativa se midieron usando equipos de monitoreo continuo marca *HOBO Data Loggers*.

Los equipos recopilaban datos de $MP_{2,5}$, temperatura y humedad con una frecuencia de 1 minuto durante un periodo de 48 h, monitoreando el interior y exterior de las viviendas seleccionadas.

Inicialmente, se planeó distribuir los equipos de la siguiente manera: el *PEM* y el *Dust Trak* dentro de las viviendas, y el *EPAM5000* en el exterior. Posteriormente, esta distribución se modificó, instalando el *EPAM5000* en el interior de la mayoría de las viviendas, y el *PEM* junto con el *Dust Trak* en el exterior.

3.1.2.1.2.1.PEM

El *PEM* es un dispositivo de muestreo personal que porta un filtro interior que colecta partículas del aire según el tamaño deseado (Ej: 10 μm ó 2,5 μm), este se utiliza conectado a una bomba personal mediante una manguera. Para efectos de este monitoreo se utilizó un *PEM* para capturar partículas de tamaño $< 2,5 \mu\text{m}$ (Figura 3.5) . Este dispositivo consta de las siguientes partes principales: (1) tapa que contiene boquillas redondas por donde ingresa el aire al muestreador, (2) conjunto de anillos de impactación que actúa como superficie de impactación y como anillo de sujeción para el filtro posterior y (3) rejilla que soporta el filtro posterior (SKC Inc., 2023). La exposición personal utilizando el *PEM* se determina mediante análisis gravimétricos para la masa de partículas y análisis químicos para compuestos específicos (SKC Inc., 2023).

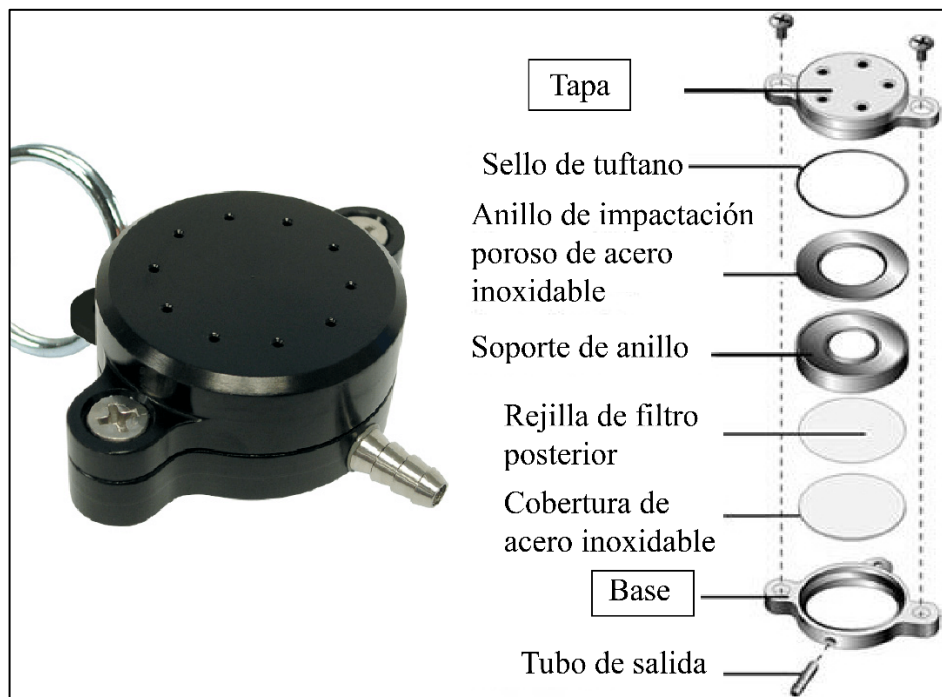


Figura 3.5. PEM y sus partes. Modificado de SKC Inc., (2023).

En este caso, el modelo de bomba de muestreo utilizado corresponde al *Airchek Sampler universal 44XR Sample Pump*, esta bomba tiene la capacidad de succionar el aire ambiental con un flujo de entre 0,5 a 5 L/min permitiendo que este pase a través del PEM (Figura 3.6)(SKC Inc., 2023).

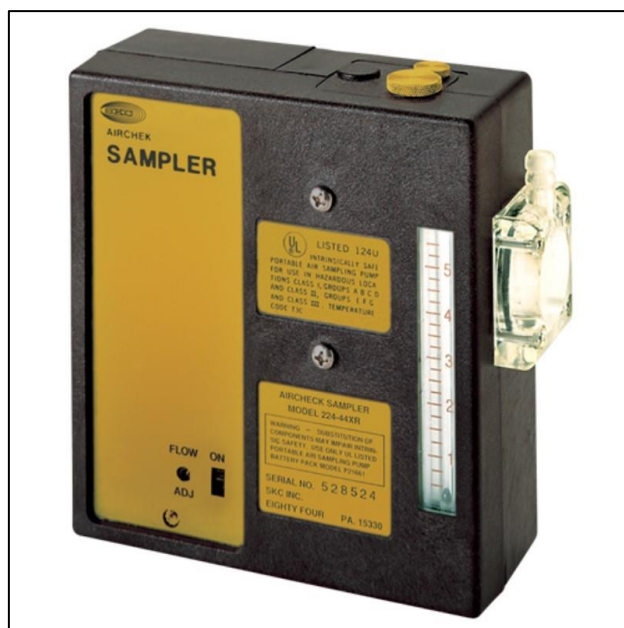


Figura 3.6. Bomba modelo Airchek Sampler universal 44XR Sample Pump. Extraído de SKC Inc., (2023).

Para lograr coleccionar partículas $MP_{2,5}$ se utilizó un flujo o caudal de muestreo de 4 L/min en el *Airechek Sampler*, las partículas capturadas fueron depositadas en un filtro de teflón de 37 mm que se encuentra entre el soporte de anillo y la rejilla de filtro posterior del *PEM*. Los filtros fueron pesados antes y después del monitoreo.

3.1.2.1.2.2. DUST TRAK

Este equipo es un monitor de aerosoles que mide tanto la masa como el tamaño del aerosol de manera simultánea, son fotómetros láser continuos de 90° que utilizan la dispersión de luz como principio de funcionamiento (TSI Incorporated, 2023). Permite realizar mediciones de partículas entre 0,1 a 15 μm en intervalos de entre 1 segundo a 60 minutos y flujos de entre 1,7 a 4 L/min (TSI Incorporated, 2023).

Se compone de: (1) entrada principal, por donde ingresa el aire el cual es filtrado por la tapa que puede ser de diferentes tamaños según el tamaño de partícula que se desea medir, (2) pantalla táctil, donde se puede observar las mediciones en tiempo real y (3) un puerto USB donde se pueden extraer los datos, luego de cada medición (Figura 3.7) (TSI Incorporated, 2023).

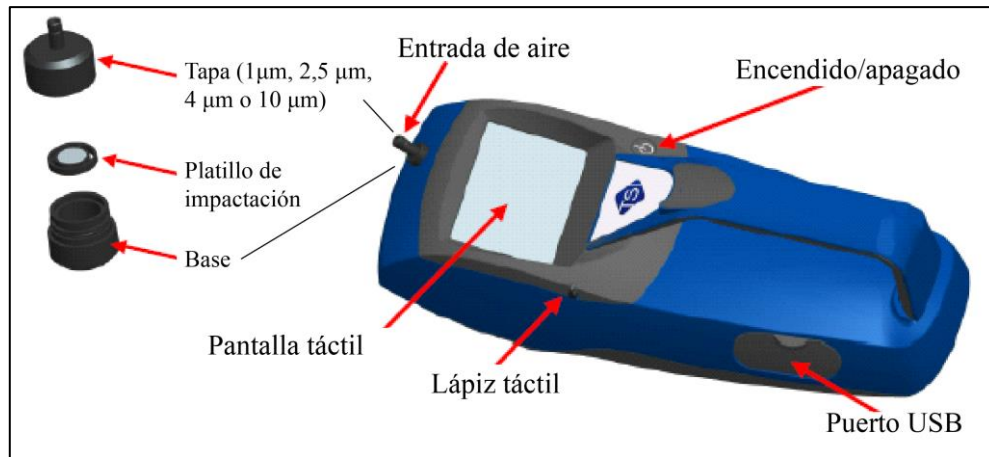


Figura 3.7. Dust Trak y sus partes. Extraído de TSI Incorporated, (2023).

Para efectos de este monitoreo se configuró el *Dust Trak* con un flujo de 4L/min y con un intervalo de muestreo de 1 minuto.

3.1.2.1.2.3. EPAM5000

El *EPAM5000* es un monitor y colector portátil de MP, utiliza la técnica de dispersión de luz para medir la concentración de partículas en mg/m^3 y porta impactadores intercambiables según el tamaño de partículas que se desea capturar (SKC Inc., 2023).

A diferencia del *PEM* este equipo permite capturar el MP ambiental en un filtro de teflón y además medirlo a lo largo del tiempo de muestreo en intervalos de 1 segundo, 1 minuto, 10 minutos o 30 minutos. Es por esto que los equipos *PEM* fueron complementados con el *Dust Trak* para equiparar las funciones del *EPAM5000*.

Las partes principales de este equipo consisten en : (1) capucha de precipitación por donde ingresa el aire, (2) tubo con impactador acoplado a la capucha, este tubo es intercambiable según el tamaño de partículas MP_{10} , $\text{MP}_{2,5}$, MP_1 o Partículas Totales Suspendidas (TSP), (3) compartimiento de sensor y filtro, aquí se inserta el filtro a utilizar para capturar las partículas y (4) pantalla que permite ver el tiempo real las concentraciones de MP (Figura 3.8).



Figura 3.8. EPAM5000 y sus principales elementos. Modificado de SKC Inc., (2023).

Para estimar la concentración de partículas el *EPAM5000* utiliza una fuente de luz infrarroja colocada en un ángulo de 90° desde un fotodetector (SKC Inc., 2023). A medida que las partículas transportadas por el aire entran por la capucha de precipitación y pasan por el sensor del rayo infrarrojo dispersando la luz, la cantidad de luz recibida por el fotodetector es directamente proporcional a la concentración de aerosol (SKC Inc., 2023). Una señal única se procesa internamente y compensa el ruido y la deriva, esto permite una alta resolución, límites de detección bajos, una excelente línea base y estabilidad (SKC Inc., 2023).

Para extraer los datos de concentraciones de $MP_{2,5}$, es posible conectar el *EPAM5000* a un computador y mediante el software *DustComm Pro* disponible para Windows, se obtiene una serie de tiempo de las mediciones como gráfico y tabla, estos datos pueden ser exportados en archivos de formato compatible con Microsoft Excel u otros softwares para su procesamiento.

Para recolectar las muestras de $MP_{2,5}$ se utilizó el impactador de $2,5 \mu m$, se seleccionó una frecuencia de muestreo de 1 min con un flujo de 4 L/min y filtros de teflón de 47 mm.

3.1.2.1.2.4. HOBO

Se trata de un registrador de datos portátil de pequeño tamaño, específicamente diseñado con sensores internos que registran la temperatura ambiente (°C) y la humedad relativa (%) (Figura 3.9) (HOBO Data Loggers, 2023). El modelo empleado en esta campaña es el U-12, y sus principales ventajas radican en su autonomía gracias a una batería propia, lo que prescinde de la necesidad de conexión eléctrica. Estos dispositivos fueron configurados para registrar las variables mencionadas cada 1 minuto durante un período de monitoreo de 48 h.



Figura 3.9. Modelo de HOBO utilizado. Extraído de HOBO Data Loggers, (2023).

Una vez finalizado este período, los dispositivos HOBO se conectan a un computador donde, a través del software *HOBOware*, se realiza la descarga de los datos. En total, se dispuso de 5 dispositivos *HOBO*, los cuales fueron distribuidos tanto al interior, como al exterior de las viviendas participantes en el monitoreo.

3.1.2.1.3. Preparación de filtros de monitoreo

Todos los filtros de teflón utilizados en este terreno se prepararon en un laboratorio y se acondicionaron en un ambiente con humedad relativa del 35% y temperatura de 23°C. Posteriormente, se pesaron gravimétricamente utilizando la balanza analítica *BOECO BAS31 PLUS* (Figura 3.10). Cada filtro se pesó tres veces, y se calculó el promedio de estas mediciones.



Figura 3.10. Balanza analítica modelo BOECO BAS 31 PLUS. Extraído de BOECO Germany, (2023).

Para la identificación de los filtros se utilizó el código COY.TE que hace referencia a Coyhaique y Teflón, seguido del número del filtro ej: COY.TE-0001. Posteriormente, fueron almacenados individualmente en compartimientos plásticos y sellados con papel parafilm.

3.1.2.3. Desarrollo de campaña en terreno

3.1.2.3.3. Muestras blanco

Para esta campaña de terreno se utilizaron tres muestras como blanco, dos para *PEM* una al exterior y otra al interior, y una para el *EPAM5000* al interior. Los filtros utilizados como blancos, en el caso del *PEM*, fueron instalados en los comportamientos de este durante 1 minuto, luego fueron retirados y guardados en su respectivo recipiente. Para el caso del blanco de *EPAM5000*, este filtro fue abierto y se dejó en su respectivo envase expuesto durante 5 minutos, luego se cerró y selló con parafilm.

En todos los casos, los blancos realizados representarían la carga sedimentable de $MP_{2,5}$ durante el tiempo de exposición. En esta campaña, no se consideró realizar blancos analíticos, que corresponderían a filtros sin manipular, estos representarían la cantidad de elementos que puedan provenir por defectos de fabricación de los filtros de teflón.

3.1.2.3.5. Protocolo de instalación equipos de monitoreo

Al llegar a cada punto de muestreo, el primer paso para la instalación de los equipos consistió en identificar la mejor zona de la casa para posicionarlos, de preferencia donde los habitantes de la vivienda pasen la mayor parte del tiempo. Así, durante toda la campaña de terreno, los equipos se instalaron principalmente en espacios de living-comedor y cocinas. Para

esta campaña, se diseñaron diversas fichas a rellenar en cada casa, donde se debía hacer un plano simplificado de la vivienda indicando la posición de los equipos al interior y exterior de la vivienda.

Como se mencionó anteriormente, la distribución inicial de los equipos involucraba la instalación del *PEM* junto con *Dust Trak* dentro de las viviendas y el *EPAM5000* en el exterior. Sin embargo, esta disposición solo resultó en los pares CR01-SR01, CR02-SR02 y SR03. Debido a los problemas ocasionados por el alto nivel de ruido emitido por el *Airechek Sampler* cuando estaba conectado al *PEM*, se implementó una modificación en la distribución de los equipos. A partir de la vivienda CR04, se cambió la configuración, posicionando el *EPAM5000* en el interior y el *PEM* en el exterior. La tabla 3.2. detalla la distribución final de los equipos en cada vivienda.

Tabla 3.2. Distribución de los equipos al interior y exterior de las viviendas.

Vivienda	Colector interior	Registro interior	Colector exterior	Registro exterior
CR01	<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>	<i>EPAM5000</i>	
SR01	<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>	-	-
CR02	<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>	-	-
SR02	<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>	<i>EPAM5000</i>	
SR03	<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>	-	-
CR04	<i>EPAM5000</i>		<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>
SR04	<i>EPAM5000</i>		-	-
CR05	<i>EPAM5000</i>		<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>
SR05	<i>EPAM5000</i>		-	-
CR06	<i>EPAM5000</i>		<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>
SR06	<i>EPAM5000</i>		<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>
CR07	<i>EPAM5000</i>		-	-
SR07	<i>EPAM5000</i>		<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>
CR08	<i>EPAM5000</i>		<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>
SR08	<i>EPAM5000</i>		-	-
CR09	<i>EPAM5000</i>		<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>
SR09	<i>EPAM5000</i>		<i>PEM</i>	<i>Dust Trak</i>

Al interior de las viviendas, los equipos fueron instalados en una mesa, esta podía ser propia de las casas y en caso de no tener, el equipo de monitoreo proporcionaba una cuya altura fue de 70 cm. La mesa debía ubicarse idealmente a 1 metro de la pared, puertas y ventanas. En algunas viviendas fue complejo respetar esta distancia por el poco espacio disponible, por lo que se flexibilizó la distancia exigida, la que varió entre los 10 a 60 cm. Antes de montar los equipos en la mesa, se realizó una desinfección de su superficie con toallas húmedas

desinfectantes, esto para evitar la contaminación de los equipos con polvo o líquidos sobre las superficies.

Una vez desinfectada la superficie de contacto, los equipos fueron montados en la mesa, aquí se realizó la instalación de los filtros de teflón en los compartimientos correspondientes, utilizando guantes y pinzas para evitar la contaminación de la muestra. Los envases contenedores de cada filtro fueron cerrados y sellados con parafilm hasta el término de las mediciones.

Al exterior de las casas, el *EPAM5000* se posicionó en su trípode y el *PEM* sobre una mesa también desinfectada, estos debían estar alejados de fuentes directas de contaminación como conductos de humo, por lo que la mayoría de lugares de monitoreo fueron los patios traseros de las viviendas y leñeras o bodegas abiertas.

Para encender y configurar cada equipo se utilizaron los protocolos diseñados previamente donde se debía registrar cada paso de instalación. En resumen, los pasos para configurar el *EPAM5000* correspondían a: (1) encender equipo, (2) corroborar ID equipo y ID de filtro, (3) corroborar la hora, (4) seleccionar el tamaño de muestra en este caso $MP_{2,5}$, (5) calibrar con función *auto-zero*, (6) seleccionar intervalo de muestreo en 1 min, (7) programar tiempo de muestreo de 48 h. Pasado este período el *EPAM5000* se apagaba y se guardaba el filtro en su envase correspondiente, utilizando pinzas y guantes, y sellando el envase con parafilm. Para el caso del *PEM*, una vez instalado el filtro se fijó el *PEM* mediante la manguera a la bomba *Airchek Sampler*, que a su vez se fijaron a un soporte recto de 1 metro, una vez realizado esto se encendió la bomba y se corroboró el flujo de medición de 4L/min. Posterior a las 48 h, la bomba fue apagada y el filtro almacenado en su envase correspondiente y sellado con parafilm.

Para la instalación de los *HOBO* estos fueron programados a través del software *HOBOWare* para registrar temperatura y humedad cada 1 min, seleccionando la hora de inicio de la toma de datos, estos eran adheridos con cinta adhesiva a los equipos como el *EPAM500* o *AirCheck Sampler* para evitar caídas.

3.1.2.3. Posterior a la campaña en terreno

Una vez finalizado el período de monitoreo, se obtuvo un total de 30 filtros de teflón muestreados (27 muestras y 3 blancos), estos fueron pesados nuevamente en el laboratorio, esta vez en condiciones de una humedad relativa del 40% y una temperatura de 18°C. Se realizaron tres mediciones gravimétricas y se calculó el promedio de estas mediciones, utilizando la misma balanza mencionada anteriormente.

Posteriormente fueron guardados y sellados con papel parafilm para ser enviados al laboratorio que realizó el análisis elemental de las muestras de MP_{2,5}.

3.1.2.3.1 Cálculo volumen por filtro

Previo a enviar las muestras para el análisis de laboratorio fue necesario calcular el volumen total de aire que pasó por cada filtro durante el monitoreo. Para calcular esto se utilizó la siguiente relación, considerando que cada filtro tuvo flujo constante de 4L/min, durante aproximadamente 48 h:

$$\frac{0,004 \text{ m}^3}{\text{Volumen m}^3 \text{ cada muestra}} = \frac{1 \text{ minuto}}{\text{Minutos totales de monitoreo en cada muestra}}$$

$$\text{Volumen m}^3 \text{ cada muestra} = \frac{0,004 \text{ m}^3 \times \text{Min. monitoreo cada muestra}}{1 \text{ minuto}}$$

Es importante señalar, que a pesar de que se monitoreó por 48 h dentro y fuera de las viviendas, los equipos no fueron apagados exactamente en las 48 h, por lo que existe una pequeña diferencia de minutos entre cada muestra, lo que entregará volúmenes totales de aire ligeramente diferentes. En general, el volumen entre las muestras varió entre 11 a 11,8 m³. En el caso de los blancos, no se indicó valor de volumen, ya que no fueron expuestos al flujo constante.

3.2. METODOLOGÍA DE LABORATORIO

El laboratorio escogido para analizar las muestras corresponde a *Chester LabNet*, ubicado Oregón en Estados Unidos. Este laboratorio está especializado en el análisis de especies inorgánicas en el aire.

Para el envío de las muestras fue necesario detallar en una cadena de custodia el total de filtros, códigos de cada filtro, fecha de muestreo, volumen de aire que pasó por cada filtro y tamaño de partícula en este caso MP_{2,5}, además de indicar el análisis requerido que en este caso fue Fluorescencia de rayos X.

Chester LabNet indicó en el reporte de resultados, que los protocolos analíticos utilizados para la determinación de metales en las muestras enviadas, corresponde a Fluorescencia de rayos X: EPA IO 3.3 (versión de junio 1999), para aniones EPA 300 (revisión 2.1) y cationes ASTM D6919-17.

La metodología EPA IO 3.3 establece criterios para los filtros de 37 mm y 47 mm, indicando que una muestra recolectada de manera adecuada debe presentar un depósito uniforme en toda el área de recolección con un diámetro mínimo de 25 mm. Aquellas muestras que no cumplan con esta uniformidad no podrán ser analizadas cuantitativamente. Antes del análisis, todas las muestras de filtros recibidas se manipulan con pinzas en un entorno controlado para verificar que no presenten condiciones que invaliden el análisis, como agujeros, desgarres o un depósito no uniforme.

El equipo utilizado para el análisis elemental corresponde al espectrómetro *Thermo model Quant'X EDXRF* (Figura 3.11), este equipo proporciona una cuantificación de elementos mayores, menores y trazas. Aquí se insertan las muestras en los portafiltros, el análisis que realiza es no destructivo, por lo que una vez finalizado el análisis de los filtros se guardan nuevamente en el envase original.



Figura 3.11. Espectrómetro *Thermo model Quant'X EDXRF*. Extraído de Chester LabNet, (2023).

Una vez que el espectrómetro analiza los analitos presentes en cada filtro, se entrega la concentración de cada elemento en $\mu\text{g}/\text{filtro}$, para realizar la conversión a $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el laboratorio realizó el siguiente cálculo, utilizando el volumen de aire que pasó por cada filtro indicado en la cadena de custodia:

$$\text{Concentración analito } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{\text{Concentración del analito } (\mu\text{g}/\text{filtro})}{\text{Volumen de aire que pasó por el filtro } (\text{m}^3)}$$

Así, a partir del $MP_{2,5}$ acumulado y el volumen que pasó por cada filtro, se pudo obtener las concentraciones de metales y metaloides en cada punto de muestreo en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.3. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE DATOS

3.3.1. Datos de la red SINCA

3.3.1.1. Exploración y validación de la base de datos

Para asegurar la calidad de los datos provenientes de la red SINCA, se utilizaron únicamente registros oficiales de concentraciones totales de $MP_{2,5}$, que como se mencionó anteriormente corresponden a datos validados previamente por los operadores de las estaciones.

En primer lugar, considerando que el trabajo de Solís (2021) tiene el promedio anual de $MP_{2,5}$ para los años 2013 a 2020, para completar la evolución del $MP_{2,5}$ en la última década, se accedió a los registros concentraciones totales diarias de la red SINCA para los años 2021, 2022 y 2023, de estos registros se eliminaron aquellos igual a cero o negativos o donde la razón $MP_{2,5}/MP_{10} > 1$, similar a los realizado por Solís (2021). Esta última condición se justifica porque el $MP_{2,5}$ es una fracción del material particulado total MP_{10} (como se explicó en la sección 1.4.1), de modo que su concentración nunca debería superar a la del MP_{10} . Valores mayores a uno podrían indicar errores de medición o inconsistencias en los datos.

En segundo lugar, para comprender el contexto ambiental en el que se desarrolló la campaña en terreno se accedió a registros horarios de $MP_{2,5}$ y parámetros climáticos horario entre el 26 de febrero al 30 de marzo de 2022. Para los datos de temperatura se eliminaron aquellos registros nulos, para las variables de humedad relativa se excluyeron registros negativos o superiores al 100%, para la velocidad del viento se eliminaron los registros negativos, que representan fallas en la medición, y en el caso de la dirección del viento se descartaron aquellos datos negativos o superiores a 360° .

3.3.1.2. Procesamiento datos red SINCA

3.3.1.2.1. Evolución de $MP_{2,5}$ en la última década

Una vez validados los registros diarios concentraciones totales de $MP_{2,5}$ de los años 2021, 2022 y 2023 obtenidos de la página web red SINCA, estos fueron ingresados al software *RStudio*, donde se calculó el promedio anual de $MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Al mismo tiempo, se ingresaron los promedios anuales de $MP_{2,5}$ de los años 2013 a 2020 del trabajo de Solís (2021). Utilizando la librería complementaria *ggplot2* (Wickham, 2016), se realizó un gráfico de líneas y puntos para representar los promedios anuales de $MP_{2,5}$ en la última década. En el eje x se encuentran

los años y en el eje y los promedios anuales de MP_{2,5}. Los datos de las estaciones COYI y COYII se diferenciaron por color con rojo y celeste, respectivamente. Se representó con líneas segmentadas la normativa chilena y de la OMS. Para cada año se etiquetó el valor de promedio anual.

3.3.1.2.2. Concentraciones totales de MP_{2,5} y variables climáticas red SINCA

Una vez validados los registros horarios de concentraciones totales de MP_{2,5} y de las variables climáticas temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento, del periodo correspondiente a la campaña en terreno, estos fueron ingresados al programa *RStudio* y mediante la librería complementaria de *ggplot2* (Wickham, 2016), se desarrollaron gráficos tanto para la estación COYI como COYII, que consisten en: (1) serie de tiempo de registros horarios de MP_{2,5}, (2) gráficos de dispersión que relacionan registros horarios de MP_{2,5} con la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento de cada hora y (3) gráfico de rosa de vientos que relaciona los registros horarios de MP_{2,5} con la dirección del viento de cada hora.

Para las serie de tiempo de registros horarios de MP_{2,5} se aplicó adicionalmente el comando *geo_smooth* con el método *LOESS* (*Locally Estimated Scatteplot Smoothing*), este método es una técnica de regresión local no paramétrica que se utiliza para mostrar tendencias subyacentes en los datos de manera más clara y suavizada (Jacoby, 2000). Se aplica calculando ponderaciones basadas en la distancia y ajustando regresiones locales dentro de una vecindad de datos alrededor de cada punto, lo que permite capturar patrones complejos sin asumir una forma específica para la relación entre las variables (Jacoby, 2000).

El método *LOESS* implica seleccionar una vecindad alrededor de cada punto (X_i) en el conjunto de datos, que incluye una fracción total de puntos, especialmente aquellos cercanos a X_i . Cada punto dentro de esta vecindad recibe una ponderación basada en su distancia al punto X_i , los puntos más cercanos reciben ponderaciones más altas (Jacoby, 2000). Esta ponderación se calcula utilizando la función tricúbica:

$$W_j = \left(1 - \left|\frac{X_j - X_i}{d}\right|\right)^3$$

Donde,

X_i : El valor de la variable independiente en el punto i para el cual se está calculando la estimación suavizada.

X_j : El valor de la variable independiente en el punto j dentro de la vecindad de X_i .

d : La distancia máxima desde X_i hasta el punto más lejano en la vecindad seleccionada.

Dentro de esta vecindad, se ajusta un polinomio de baja orden, típicamente de primer orden (una línea recta), utilizando las ponderaciones calculadas (Jacoby, 2000):

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x$$

Donde,

β_0 : El intercepto del polinomio ajustado.

β_1 : La pendiente del polinomio ajustado de primer orden

Para ajustar este polinomio, se minimiza la suma ponderada de los cuadrados de los residuos (Jacoby, 2000):

$$\min \sum_{j \in \text{vecindad}} W_j (Y_j - \beta_0 - \beta_1 x_j)^2$$

Donde,

W_j : La ponderación asignada al j-ésimo punto de datos basado en su distancia a X_i .

Y_j : El valor observado de la variable dependiente (respuesta) correspondiente al j-ésimo punto de datos.

X_j : El valor de la variable independiente (predictor) correspondiente al j-ésimo punto de datos dentro de la vecindad de X_i .

Finalmente, la estimación suavizada en X_i , denotada \hat{y}_i , se obtiene evaluando el polinomio ajustado en X_i :

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i$$

Para las series de tiempo los datos de las estaciones COYI y COYII se diferenciaron por color con rojo y celeste, respectivamente. En el eje x se disponen los días mientras que en el eje y los registros horarios de $MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se etiquetó las principales concentraciones del periodo con el día y hora en que ocurrieron. Además, se representó con líneas en la base del gráfico los días en que se realizaron mediciones durante el terreno.

En el caso de los gráficos de dispersión, los datos de las estaciones COYI y COYII se diferenciaron por color con rojo y azul, respectivamente. En el eje x se encuentra la temperatura, en el eje y los registros horarios de $MP_{2,5}$, la velocidad del viento se representa con círculos de diferente tamaño (a mayor velocidad mayor tamaño del círculo) y los colores de los círculos graficados representan la humedad relativa que va en una escala de color de amarillo (baja

humedad) a rojo (alta humedad) para COYI y de amarillo a azul para COYII. Se representó con líneas segmentadas la normativa nacional e internacional.

Para el caso de los gráficos rosa de los vientos se utilizó el paquete *Openair* (Carslaw, y Ropkins, 2012) utilizando el comando *windRose* que trabaja en base a datos de velocidad y dirección del viento. Este tipo de gráfico es radial, en el eje circular se presentan las direcciones de viento entre 0° a 360°, los radios que se extienden desde el centro muestran la velocidad del viento y su longitud es proporcional a la frecuencia de viento en una dirección y velocidad específica, los colores se asocian a los niveles de MP_{2,5} asociados a cada dirección y velocidad del viento. Para el caso de COYI se utilizó una paleta de colores de amarillo (bajo MP_{2,5}) a rojo (alto MP_{2,5}) y para COYII una paleta de colores que va de amarillo a azul.

3.3.2. Datos de campaña en terreno

3.3.2.1. Exploración y validación de datos de terreno

Para los datos de concentraciones totales de MP_{2,5}, temperatura y humedad relativa obtenidos en terreno se aplicaron los mismos criterios de validación de datos descritos para la red SINCA.

Por otro lado, para los datos de concentraciones elementales de MP_{2,5}, el laboratorio proporcionó un archivo Excel, donde se detallan los metales y metaloides identificados en los filtros de teflón de 37 mm y 47 mm, junto con sus concentraciones expresadas en unidades de µg/m³. Este archivo también especifica la incertidumbre de medición para cada elemento en todas las muestras, utilizando la misma unidad de medida. Destacaron las concentraciones que exceden tres veces la incertidumbre, ya que cualquier valor por debajo de este umbral se considera inferior al límite de detección.

Esta distinción se fundamenta en la explicación proporcionada por *Chester LabNet*, que establece que la medición de la incertidumbre en el análisis XRF refleja un rango estadístico donde, con cierta probabilidad, se podría encontrar el valor real de la concentración. En términos de una distribución Gaussiana, 1σ de incertidumbre describe el rango de valores posibles (sumando y restando la incertidumbre al valor reportado) con un 68 % de confianza; 2σ describe que el valor real se encuentra en dos veces la incertidumbre con un 95 % de confianza; mientras que 3σ describe que con alta probabilidad el valor está en un rango de tres veces la incertidumbre con un 99.7 % de confianza. Según este concepto, cuando el valor medido es menor a tres veces su incertidumbre, se interpreta que está por debajo del límite de detección o posiblemente su concentración sea tan baja para confirmarse con seguridad. Esta

incertidumbre puede originarse debido a cuatro efectos distintos: la calibración del equipo, las estadísticas de conteo (recuento de partículas o eventos), la corrección de superposición de picos (el caso en que diferentes elementos generen señales similares) y la absorción (perdida de señal por la absorción del material).

En base a lo anterior, antes de procesar esta información, se realizó una inspección visual de los datos, identificando aquellos elementos que tuvieran una considerable cantidad de datos bajo el límite de detección establecido por el laboratorio. Aquí, se encontró que la mayoría de los elementos tenían una gran cantidad de muestras bajo este límite, y al eliminarlos se perdería una cantidad considerable de información para la caracterización del $MP_{2,5}$.

En este contexto, y basándonos en la premisa de que la presencia de metales y metaloides por debajo del límite de detección no implica necesariamente su ausencia. Se decidió para este estudio utilizar como criterio de descarte de elementos, la cantidad de muestras en cero de cada elemento (muestras con valores $0,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Considerando un total de 27 filtros (descontando los blancos), los elementos Co y Cd, superan el 65% de muestras en cero, en el caso del Co alcanza el 100% y el Cd el 82%, es por esto que se decidió removerlos de la base de datos original (Figura 3.12).

A pesar, de que los elementos Cu, Pd, In, Sb y Ba superan el 50% de muestras con concentraciones en cero, se decide conservarlos en la base de datos, debido a la importancia de comprender su presencia en el contexto analizado (Figura 3.12).

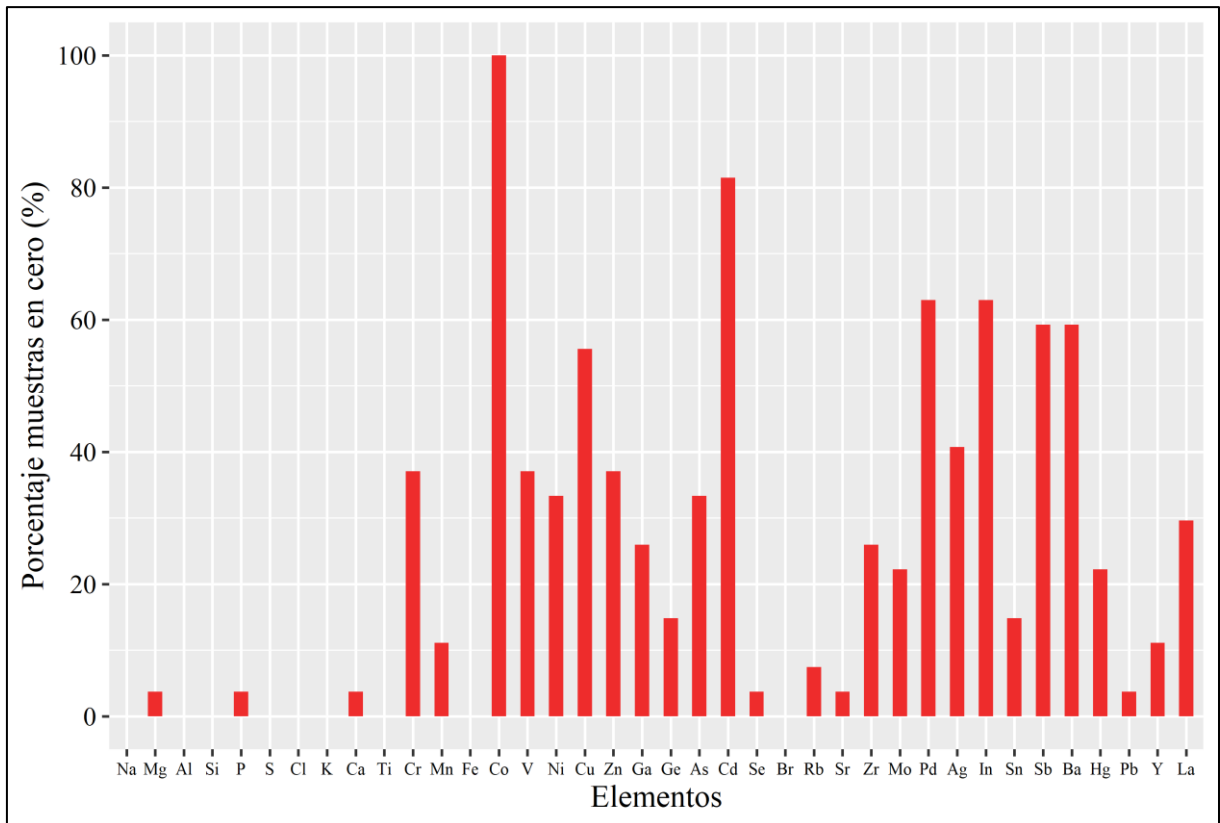


Figura 3.12. Gráfico de porcentaje de muestras con concentraciones cero. Elaboración propia.

3.3.2.1.1. Corrección con muestras blanco

Al inicio de esta campaña, se esperaba utilizar los filtros blancos para la corrección de los resultados del laboratorio. Sin embargo, debido a que estos no tuvieron un flujo de aire similar a las muestras y que como se mencionó anteriormente, más bien representan la carga sedimentable de $MP_{2,5}$, se descartó utilizarlos para la corrección de las concentraciones elementales de metales y metaloides. Lo pertinente, hubiese sido utilizar blancos analíticos para la corrección de los blancos de laboratorio. No obstante, en la campaña de invierno del proyecto realizada en 2023, se contempló reservar filtros de la misma partida que los filtros de la campaña de verano como blancos analíticos, que permitirían la corrección de estas muestras en el futuro.

3.3.2.2. Procesamiento datos de terreno

3.3.2.2.1. Masa acumulada en filtros de teflón

Como se mencionó anteriormente los filtros de teflón utilizados en esta campaña de terreno fueron pesados en el laboratorio antes y después del muestreo. A partir de estos datos, fue posible calcular la diferencia de masa al inicio y final de la campaña en terreno. Esta diferencia representa el total de masa total acumulada de $MP_{2,5}$ en cada filtro:

$$M_a = M_i - M_f$$

Donde:

M_a : Masa total acumulada (μg)

M_i : Masa inicial del filtro sin usar (μg)

M_f : Masa final posterior al muestreo (μg)

Utilizando los datos de masa total acumulada en cada filtro, se generaron gráficos de barras en RStudio mediante la librería *ggplot2* (Wickham, 2016). En el eje x se encuentran las viviendas asociadas a cada filtro y en el eje y se representa la masa total acumulada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Los colores de las barras indican si el filtro se colocó dentro (azul) o fuera (verde) de las viviendas.

A partir de la masa total acumulada en cada filtro y el volumen total de aire que pasó a través de estos durante el período de muestreo, se calculó la concentración de $\text{MP}_{2,5}$ por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Concentración } \text{MP}_{2,5} \text{ por } \text{m}^3 = \frac{\text{Masa total acumulada } (\mu\text{g})}{\text{Volumen total } (\text{m}^3)}$$

La importancia de observar la masa acumulada y la concentración de $\text{MP}_{2,5}$ por m^3 radica en que a partir de estos será posible calcular la proporción de metales y metaloides en el $\text{MP}_{2,5}$. Además de que la masa total acumulada resulta una aproximación a los niveles de exposición de $\text{MP}_{2,5}$ en cada vivienda.

3.3.2.2.2. Concentraciones totales $\text{MP}_{2,5}$, temperatura y humedad dentro y fuera de las viviendas

Los equipos *EPAM500* y *Dust Trak* recopilaron datos de $\text{MP}_{2,5}$, mientras que los HOBO registraron humedad y temperatura interior y exterior en las viviendas, todos estos datos fueron obtenidos a una frecuencia de 1 minuto en 14 viviendas: SR01, CR01, SR04, CR04, SR05, CR05, SR06, CR06, SR07, CR07, SR08, CR08, SR09 y CR09. Los registros de las viviendas SR02, CR02, SR03 y CR03, fueron descartados, ya que presentaron errores en los registros de $\text{MP}_{2,5}$ que no permite representar las 48 h de monitoreo.

Una vez obtenidos estos datos, se realizó una inspección visual, para identificar todos aquellos registros vacíos o nulos, estos fueron removidos de la base de datos. Posteriormente, se realizaron gráficos de líneas en el software RStudio utilizando la librería *ggplot2* (Wickham, 2016). En el eje x de cada gráfico se representa el día y hora de medición. El eje y primario señala las concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ y el eje y secundario representa la temperatura y humedad.

Todas las variables se graficaron con líneas: las concentraciones de $MP_{2,5}$ al interior se representan en azul y al exterior en verde; la temperatura interior se muestra con una línea segmentada en naranja y la exterior con una línea continua en negro; la humedad interior se representa con una línea segmentada en rojo y la exterior en morado. Se aplicó escala logarítmica a los ejes secundarios para mejorar la visualización de los datos.

3.3.2.2.1 Variabilidad y distribución de concentraciones de $MP_{2,5}$ en el interior y exterior de las viviendas

A partir de los datos de concentraciones de $MP_{2,5}$, se llevó a cabo un análisis de sobre la distribución estadística del conjunto de datos en base gráficos de *boxplot* elaborados en RStudio. Estos gráficos están contruidos en base al parámetro estadístico de la mediana que divide cualquier conjunto de datos en dos partes iguales (Figura 3.13) (Reimann y otros, 2008). Se constituye por una caja central que representa en rango intercuartil (IQR) donde se encuentra el 50% de los datos (mediana), esta va desde el primer cuartil (Q1, 25%) hasta el tercer cuartil (Q3, 75%), y los límites horizontales corresponden a los valores extremos del conjunto, los puntos exteriores corresponden a valores atípicos o anómalos (Reimann y otros, 2008) (Figura 3.13). Para mejorar la visualización de la distribución de los datos se aplicó escala logarítmica a estos gráficos.

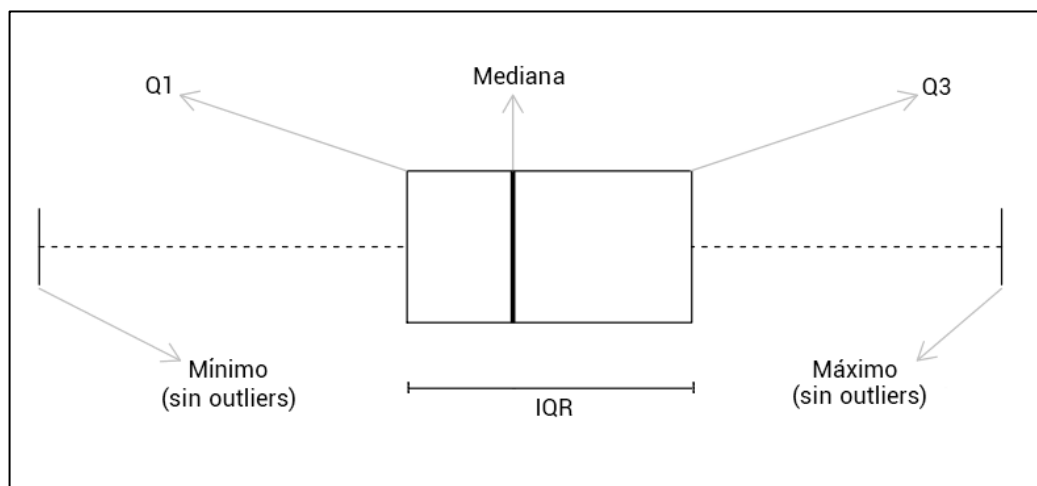


Figura 3.13. Gráfico de *boxplot* y sus partes. Extraído de Reimann y otros (2008).

Adicionalmente, en base a las medianas obtenidas de los boxplot, se realizó un análisis comparativo de estas entre el interior y exterior de cada vivienda, mediante el cálculo de la diferencia porcentual ($\Delta\%$) de las medianas, utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta\% \text{ Mediana} = \left(\frac{Mi - Me}{Me} \right) * 100$$

Donde,

$\Delta\%$ Mediana: Diferencia porcentual entre medianas del interior y exterior.

Mi: Mediana de MP_{2,5} al interior ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Me: Mediana de MP_{2,5} al exterior ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Al mismo tiempo, las medianas obtenidas se utilizaron para hacer una comparación entre los pares y tipos de viviendas según su codificación (CR o SR).

Por último, se contabilizaron los valores atípicos de cada lugar muestreado, ya que estos permiten identificar eventos de concentración extrema que podrían estar asociados a episodios específicos de contaminación ambiental.

3.3.2.2.3. Concentraciones elementales de metales y metaloides dentro y fuera de las viviendas

Luego del monitoreo, el análisis de laboratorio y la validación de la base de datos, se dispuso de un registro de información con concentraciones elementales de 36 metales y metaloides, por el periodo de monitoreo de 48 h en cada punto de muestreo.

Para cada filtro asociado a una vivienda, se determinó la concentración de metales y metaloides en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de estas concentraciones, se calculó la suma total de metales y metaloides en cada filtro, y con este valor se estimó su proporción respecto al MP_{2,5} total utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Metales y metaloides} = \left(\frac{\text{Suma de metales y metaloides } (\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\text{Concentración total } (\mu\text{g}/\text{m}^3)} \right) \times 100$$

Luego, los datos de concentraciones elementales de cada vivienda fueron procesados en el software RStudio y aplicando la librería *ggplot2* (Wickham, 2016) se diseñaron gráficos que representan la composición elemental del MP_{2,5}. En el eje x se representan los elementos y en el eje y las concentraciones, estas se representaron con líneas y puntos de diferentes figuras geométricas. En cada gráfico los puntos de muestreo fueron agrupados según la zona prioritaria en la que se encontraban, diferenciando las viviendas por color. En el caso de las viviendas en las zonas de los valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique . Los resultados fueron divididos en las siguientes secciones: a) Elementos mayores y b) Elementos traza y tierras raras. Se utilizó escala logarítmica en el eje y para mejorar la visualización de las concentraciones elementales.

Así de un total de 17 puntos de muestreo, se pudo realizar gráficos de metales y metaloides tanto al interior como exterior en un total de 10 viviendas, específicamente: CR01,

SR02, CR04, CR05, CR06, SR06, SR07, CR08, CR09, y CR09; Mientras que en 7 de ellas sólo se realizaron gráficos al interior, específicamente: SR01, CR02, SR03, SR04, SR05, CR07 y SR08. Esto debido a la disponibilidad de equipos y filtros, considerando que el monitoreo fue simultáneo en las viviendas pareadas.

3.3.2.2.3.1. Análisis de Elementos Mayores: Interior y exterior

Después de que se representaron los niveles de metales y metaloides al interior y exterior de las viviendas surgió la necesidad de dimensionar las diferencias de concentraciones de los elementos del interior versus al exterior de cada vivienda. Para esto se realizó un cálculo en torno a las diferencias porcentuales entre dichas concentraciones para elementos mayores, elementos trazas y tierras raras. Utilizando la siguiente fórmula:

$$\Delta\% \text{ Concentración} = \left(\frac{C_i - C_e}{C_e} \right) * 100$$

Donde,

$\Delta\%$ Concentración: Diferencia porcentual entre concentraciones interior y exterior.

C_i : Concentración del elemento al interior ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

C_e : Concentración del elemento al exterior ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

El resultado de aplicar la fórmula tiene las siguientes interpretaciones:

- Si $\Delta\% > 0$, indicaría que el elemento tiene mayor concentración al interior de la vivienda.
- Si $\Delta\% < 0$, señalaría que las concentraciones de este elemento fueron mayor al exterior de la vivienda.

Al analizar el comportamiento de los elementos utilizando dicha fórmula, se presentan dos casos especiales que deben ser considerados cuando C_i o C_e son iguales a cero. En ambos casos, esto se puede deber a que el límite de cuantificación del equipo utilizado no logró detectar el elemento o que su concentración sea tan baja que tiende a cero. Los resultados en la fórmula son los siguientes:

- (1) Si $C_i = 0$: matemáticamente da como resultado -100% para la diferencia porcentual. Este valor debe interpretarse como una ausencia o concentración extremadamente baja del elemento en el interior.
- (2) Si $C_e = 0$: se genera un problema matemático en la fórmula porque implica una división por cero, lo que resulta en una indeterminación (∞). Esto debe interpretarse como una ausencia o concentración extremadamente baja del elemento en el exterior.

(3) Si C_i y C_e son iguales: el valor de $\Delta\%$ será 0, lo que significa que no hay diferencia entre las concentraciones en el interior y el exterior.

Los cálculos de $\Delta\%$ Concentración se realizaron en RStudio, donde además se realizaron gráficos de barra para cada sección de los resultados, utilizando la librería *ggplot2* (Wickham, 2016). En el eje x de los gráficos se representan las viviendas, mientras que en el eje y se muestra el resultado de $\Delta\%$ Concentración. Si $\Delta\% > 0$, las barras se orientan hacia arriba y serán de color naranja, mientras que, si $\Delta\% < 0$, las barras se orientan hacia abajo y serán de color verde. Para los casos especiales donde C_i es igual a cero ($\Delta\% = -100\%$), las barras serán de color morado, mientras que en los casos donde C_e es igual a cero (indeterminación), se designó un punto negro sobre el eje x. En los casos de que C_i y C_e sean iguales, no se mostrará barra en dicha vivienda, ya que no habría diferencia en las concentraciones.

Por otro lado, para entender el comportamiento estadístico de los elementos mayores, traza y tierras raras identificadas en el $MP_{2,5}$, se realizaron gráficos de *boxplot* para el interior y exterior de las viviendas mediante RStudio, con el objetivo de estudiar la distribución de los datos, identificar la dispersión o simetría y detectar valores atípicos o extremos. En el eje x se indica el elemento, mientras que en el eje y se representa la concentración. Los valores atípicos se representan con círculos. Se realizaron gráficos para el interior con cajas de color naranja y gráficos para el exterior con cajas de color verde.

3.3.2.2.4. Cumplimiento de la normativa vigente de calidad del aire

Dado que las viviendas fueron monitoreadas durante aproximadamente 48 horas, es posible dividir este período de observación en dos segmentos de 24 horas cada uno. De esta manera, podemos analizar si el promedio de concentración de $MP_{2,5}$ durante cada período de 24 horas cumple con las normativas establecidas por la OMS, donde dicho promedio debe ser inferior a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, así como con la normativa nacional, que estipula un límite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para esto se realizó una reorganización de la base de datos de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ adquiridos en terreno, donde se identificó y separó los datos de cada vivienda según su primer y segundo período de 24 horas. Así, se codificaron dichos datos de la siguiente manera: CR01-1, corresponde a aquellos datos del primer periodo de 24 horas en dicha vivienda y CR01-2, a los datos del segundo periodo de 24 horas en la misma vivienda.

Una vez reorganizada la base de información, se realizaron gráficos de barra en el software RStudio mediante la librería *ggplot2* (Wickham H, 2016). Se realizaron dos gráficos uno para representar las muestras del interior y otro para las muestras del exterior. En el eje x se representa la vivienda y el periodo de muestreo y en el eje y se indica el promedio de

concentraciones totales de $MP_{2,5}$ en 24 h. El color de las barras representa la clasificación de la calidad del aire según la metodología de evaluación de calidad del aire del MMA detallada en la sección 1.4.3 de este trabajo. En líneas segmentadas se señaló las normativas nacionales e internacionales de calidad del aire.

4. RESULTADOS

4.1. DATOS RED SINCA

A través del procesamiento de estos datos fue posible obtener un marco o contexto general en el cual se realizó la campaña de monitoreo en terreno. El comportamiento tanto de las concentraciones totales de $MP_{2,5}$, como el de las variables climáticas, resulta fundamental para entender los patrones que determinan la calidad del aire en la ciudad.

4.1.2. Evolución de $MP_{2,5}$ en la última década

Si bien el promedio anual de $MP_{2,5}$ entre 2013 a 2020 en Coyhaique fue descrito y estudiado por Solís (2021), esta investigación amplía la revisión hasta 2023 para abarcar una década completa. Además, considera las actualizaciones de las normativas de la OMS sobre $MP_{2,5}$, con lo que se comparan los promedios anuales frente a estos nuevos estándares.

Así se obtuvo la evolución de los promedios anuales de $MP_{2,5}$ entre 2013 y 2023 (Figura 4.1), elaborado a partir de registros diarios de las estaciones COYI (rojo) y COYII (azul). Las líneas segmentadas representan la normativa chilena (rojo) y la de la OMS (negro).

En general, en la década analizada todos los años se ha superado las normativas nacionales e internacionales en ambas estaciones (Figura 4.1). Durante siete de los diez años analizados, COYII registra promedios más altos de $MP_{2,5}$ que COYI. En 2014 y 2015, se observa un comportamiento similar con promedios cercanos a los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para 2016, se alcanzaron los promedios más elevados de la década en ambas estaciones, registrando $65,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en COYI y $64,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en COYII.

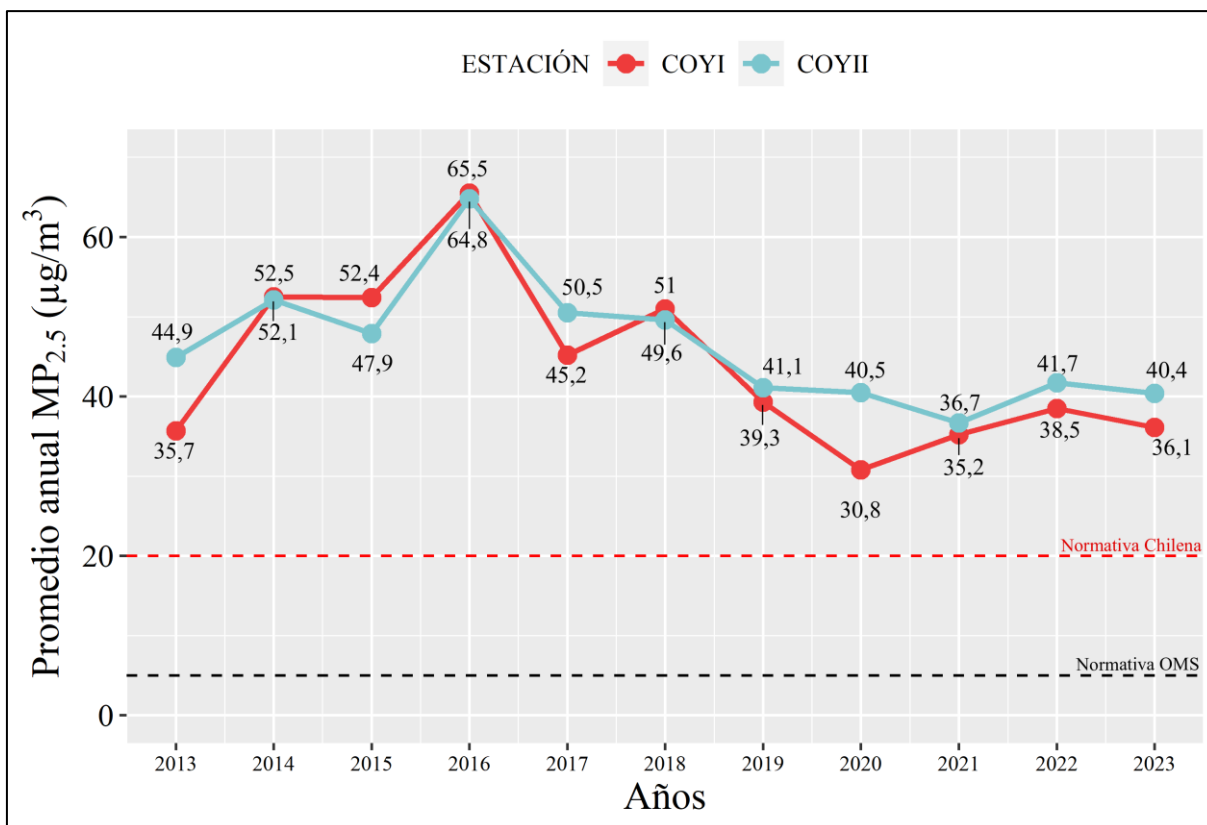


Figura 4.1. Promedios anuales de $MP_{2,5}$ entre 2013 a 2023. Fuente de los datos: red SINCA. Elaboración propia.

En 2018, la estación COYI registró un aumento en el promedio con respecto al año 2017, mientras que COYII mostró un promedio similar en ambos años. En 2019, la media general disminuyó en aproximadamente 10 unidades en ambas estaciones. Para 2020, COYI registró el promedio anual más bajo de la década con $30,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, bastante diferente al registrado en COYII, que fue de $40,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En 2021, el promedio en COYI es de $35,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en 2022 COYI registró $38,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y COYII $41,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el año 2023, COYI registró un promedio de $36,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y COYII una media de $40,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, muy similar a lo visto en 2022.

Este breve análisis sugiere una leve tendencia al alza en los niveles de $MP_{2,5}$ de 2021 a 2022, en contraste con los resultados de Solís (2021). La tendencia de COYII a registrar niveles más altos que COYI podría estar asociada a factores geográficos y de elevación dentro de Coyhaique.

4.1.3. Concentraciones totales de MP_{2,5} y variables climáticas red SINCA red SINCA

El contexto ambiental general en que se realiza la campaña en terreno de este trabajo se estableció a partir de datos de concentraciones totales de MP_{2,5}, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento disponibles en el sitio web de la red SINCA. Con esta información se elaboraron los siguientes gráficos: (1) serie de tiempo de registros horarios de MP_{2,5}, (2) gráficos de dispersión que relacionan registros horarios de MP_{2,5} con la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento de cada hora y (3) gráfico de rosa de vientos que relaciona los registros horarios de MP_{2,5} con la dirección del viento de cada hora.

La Figura 4.2 muestra los registros horarios de MP_{2,5} en la estación COYI, para el período del 26 de febrero al 31 de marzo de 2022. Las líneas rojas en el eje x, señalan los días monitoreados en la campaña en terreno. La línea roja con halo gris corresponde a la representación suavizada de la tendencia general de los datos de MP_{2,5}.

Durante el período de tiempo estudiado, que abarca al término del verano e inicio de otoño (20 de marzo), y que coincide con la campaña de terreno, la línea de tendencia general indica un aumento gradual de los niveles de MP_{2,5} a lo largo del período de monitoreo (Figura 4.2).

Al inicio del periodo, entre el 26 de febrero y el 05 de marzo, los registros de MP_{2,5} se mantienen por debajo de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 4.2). Entre el 06 y el 08 de marzo, se observan aumentos, alcanzando valores de 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 6 de marzo, 83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 7 de marzo y 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 8 de marzo. Posteriormente, entre el 09 y el 17 de marzo, los niveles vuelven a situarse por debajo de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nuevas alzas ocurren entre el 18 y el 21 de marzo, con máximos de 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 18 de marzo a las 23:00 h y 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 19 de marzo a las 20:00 h. Entre el 22 y el 25 de marzo, se registran dos episodios sobre 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y el 26 de marzo se alcanza un valor de 108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 0:00 h. Al cierre del mes, el 29 y 30 de marzo, los valores aumentan significativamente, con un máximo de 198 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 30 de marzo a las 21:00 h.

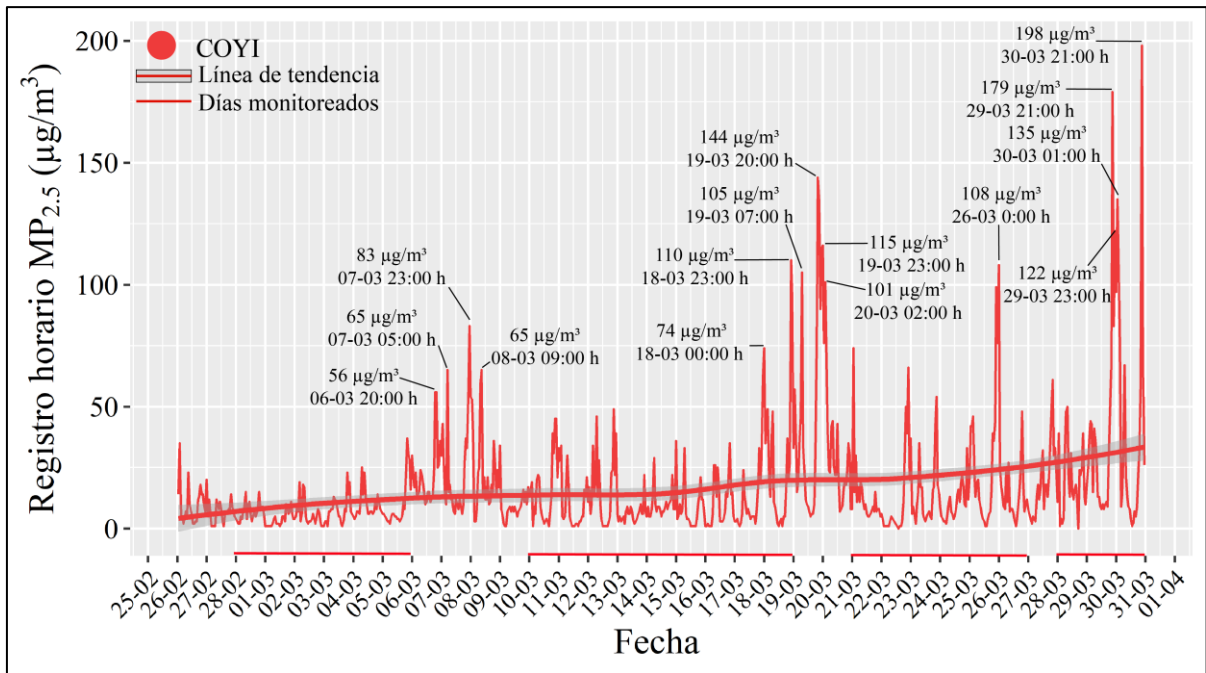


Figura 4.2. Serie de tiempo de MP_{2,5} del 26 de febrero al 30 de marzo en COYI. Elaboración propia.

La Figura 4.3 muestra los registros horarios de MP_{2,5} en la estación COYII para el período del 26 febrero al 31 de marzo de 2022. Las líneas celestes en el eje x señalan los días monitoreados en la campaña en terreno. La línea celeste con halo gris corresponde a una representación suavizada de la tendencia general de los datos de MP_{2,5} a lo largo del tiempo en COYII.

Al igual que en COYI, la línea de tendencia general de COYII señala un aumento gradual de los niveles de MP_{2,5} al final de periodo (Figura 4.3). Al inicio del período, del 26 de febrero al 04 de marzo, los registros de MP_{2,5} se mantienen por debajo de 50 µg/m³. Entre el 05 y el 08 de marzo se observan aumentos, alcanzando 59 µg/m³ el 5 de marzo, 76 µg/m³ el 7 de marzo y 62 µg/m³ el 8 de marzo. Los niveles vuelven a bajar entre el 9 y el 11 de marzo, pero se registran nuevas alzas el 12 de marzo (61 µg/m³) y el 14 de marzo (63 µg/m³). El 18 y 19 de marzo se destacan por incrementos mayores, llegando a 93 µg/m³ el 18 de marzo y alcanzando un máximo de 180 µg/m³ el 19 de marzo. Entre el 23 y el 25 de marzo se registran alzas de 68, 100 y 91 µg/m³. El período finaliza con aumentos el 29 de marzo (114 µg/m³) y el 30 de marzo (111 µg/m³).

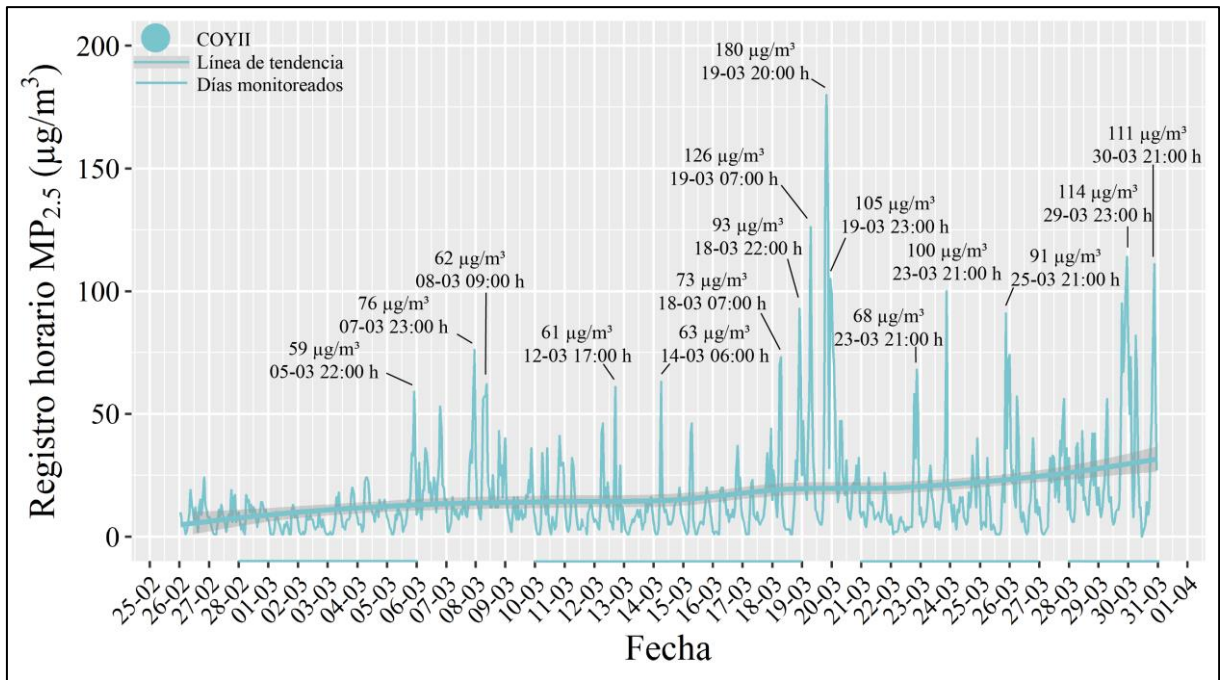


Figura 4.3. Serie de tiempo de MP_{2,5} del 26 de febrero al 30 de marzo en COYII. Elaboración propia.

Para ver cómo se relacionan estos niveles de MP_{2,5} con parámetros climáticos se elaboraron gráficos de dispersión para el período de estudio (Figura 4.4 y Figura 4.5). Estos gráficos representan la relación de los registros horarios de las concentraciones totales de MP_{2,5} con la temperatura, velocidad del viento y humedad. Los símbolos de puntos indican la velocidad del viento y los colores el grado de humedad, además se señala en líneas segmentada las normativas nacionales e internacionales.

Las concentraciones totales entre los 1 a 10 µg/m³ (Figura 4.4), se asocian a temperaturas que varían entre los 5°C a 20°C, en este grupo predominan velocidades de viento del orden de los 2 a 3 m/s, con humedad relativa predominante de 50% a 75%. Los registros entre 10 a 100 µg/m³, se relacionan a temperaturas entre los 0°C a 17°C, los tamaños de los puntos varían más en esta categoría, indicando una mayor variación en la velocidad del viento, aunque aun así predominan las velocidades entre 2 a 3 m/s, la humedad relativa varía entre 75% a 100%. Esto sugiere que, a medida que aumenta la humedad y las temperaturas permanecen relativamente bajas, los niveles de MP_{2,5} también tienden a aumentar. Los puntos que indican niveles más altos de MP_{2,5}, sobre los 100 µg/m³, son menos frecuentes en el gráfico, están asociados a temperaturas que están en el rango de 2,5°C a 12,5°C, el tamaño de estos puntos indica que predominan bajas velocidades de viento del orden de 1 m/s. La mayoría de los puntos presentan tonos rojos y naranjas, indicando alta humedad relativa.

En general, el gráfico muestra que los niveles de MP_{2,5} tienden a aumentar en condiciones de bajas temperaturas, alta humedad y baja velocidad del viento. Aunque los registros horarios

no representan la media diaria, una gran cantidad de muestras supera las normativas nacionales e internacionales para promedios diarios.

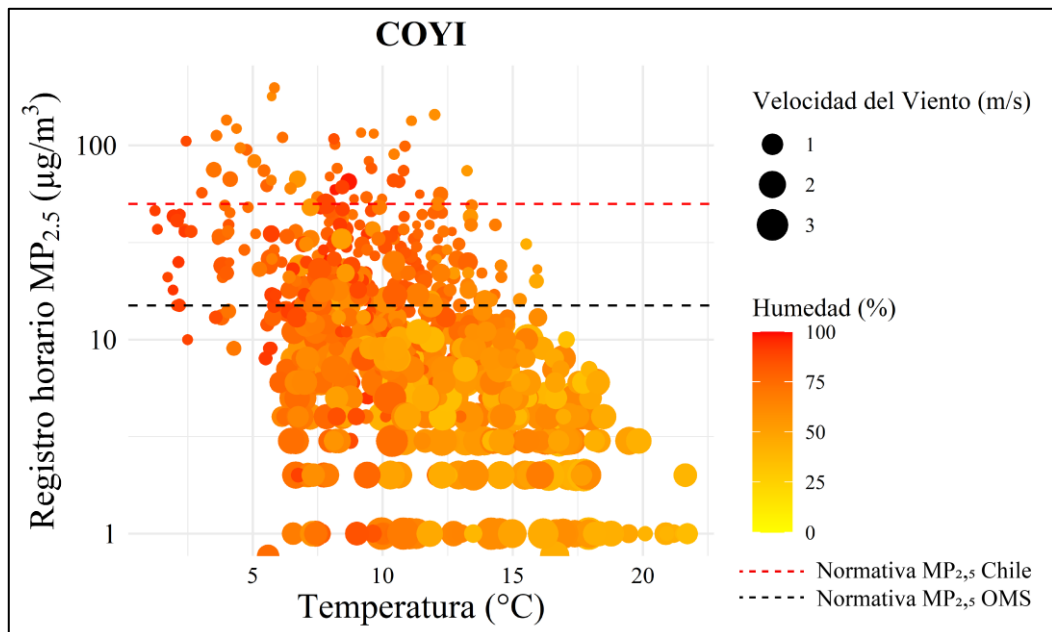


Figura 44. Gráfico de niveles MP_{2,5} y parámetros climáticos en COYI. Elaboración propia.

En el caso de COYII, el comportamiento es similar a COYI durante el período de estudio, la principal diferencia radica en que esta estación registra velocidades de viento mucho mayores para el período de estudio (Figura 4.5).

Entre los 0 a 10 µg/m³, se observa una alta densidad de puntos en un amplio rango de temperaturas, desde 0°C a 20°C, con una concentración mayoritaria entre 5°C a 17,5°C, asociadas a velocidades del viento altas entre 6 y 9 m/s, la humedad varía entre tonos amarillo a azul entre 30% a 60%. Los puntos entre que se encuentran entre los 10 a 100 µg/m³ se asocian a un rango de temperatura entre 0°C a 15°C, el tamaño de estos puntos tiende a disminuir, indicando velocidades de viento bajas a moderadas entre 3 a 6 m/s. Los colores de estos puntos varían entre amarillo azulado (50%) a azules (75% -100%) señalando un aumento en la humedad relativa para este grupo. Sobre los 100 µg/m³, hay una baja frecuencia de puntos, estos al igual que en COYI, ocurren entre los 2,5°C a 13°C, en condiciones de baja velocidad del viento del orden de 3 m/s y alta humedad relativa asociada a 75%.

En síntesis, la Figura 4.5 señala que a medida que aumentan los niveles de MP_{2,5}, disminuyen los rangos de temperatura, disminuye el tamaño de los puntos, y predominan tonos azules. Esto reafirma lo visto en COYI, donde los mayores niveles de MP_{2,5} se asocian a bajas temperaturas, baja velocidad del viento y alta humedad relativa.

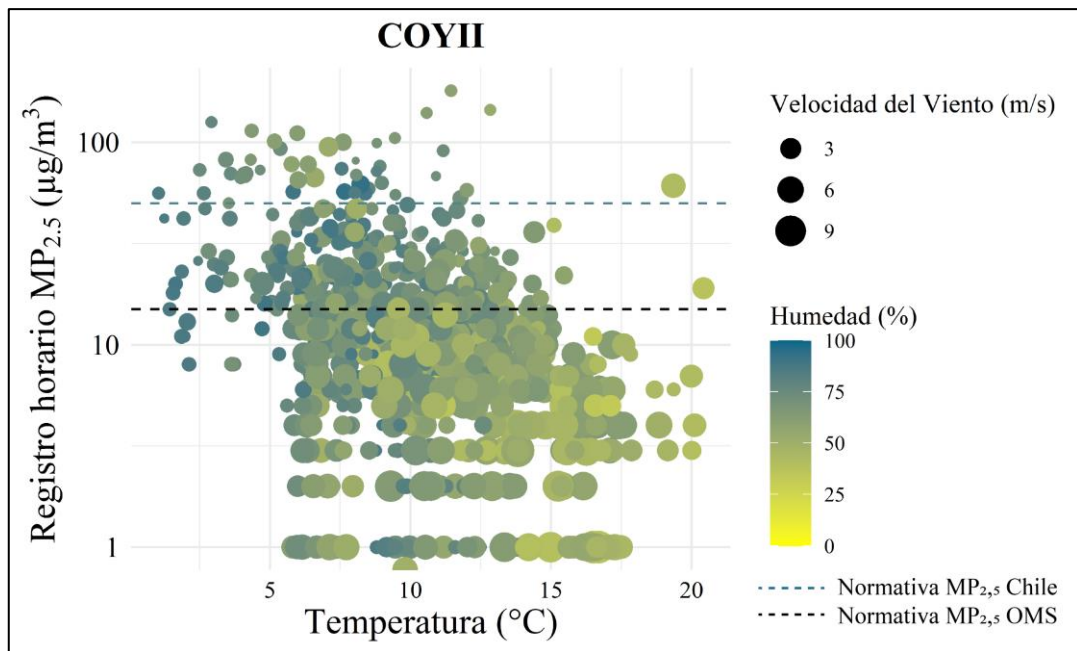


Figura 4.5. Gráfico de niveles MP_{2,5} y parámetros climáticos en COYII. Elaboración propia.

Las Figura 4.6 y 4.7 muestran cómo se comportan las concentraciones totales de MP_{2,5} respecto a la dirección del viento en COYI y COYII durante el período de estudio. En ambas figuras el eje radial representa la concentración de MP_{2,5}, el eje circular la dirección del viento y los colores se asocian a los niveles de MP_{2,5}, donde los más oscuros representan concentraciones más altas.

En COYI (Figura 4.6) la mayor frecuencia del viento proviene del noroeste (NW) con hasta un 40% de ocurrencia en esta dirección, aquí predominan las concentraciones de MP_{2,5} entre 0 a 20 µg/m³. También se observan concentraciones entre 20 a 50 µg/m³ asociadas a direcciones de menor frecuencia como el este (E) y sureste (SE). Las concentraciones más altas de MP_{2,5}, registradas entre los 50 a 198 µg/m³, están asociadas con vientos de menor frecuencia provenientes de una dirección oeste (W), este (E), sureste (SE) y suroeste (SW), relacionadas a bajas velocidades de viento.

En COYII se reconoce un comportamiento similar, en este caso la dirección predominante del viento es oeste (W) y noroeste (NW) asociadas a altas velocidades de viento, aquí se registran bajas concentraciones entre los 0 a 40 µg/m³. Las concentraciones más altas en COYII del orden de 50 a 180 µg/m³ se asocian a direcciones de viento en sentido noreste (NE), suroeste (SW) y sureste (SE) que presentan menores frecuencias y se asocian a bajas velocidades de viento.

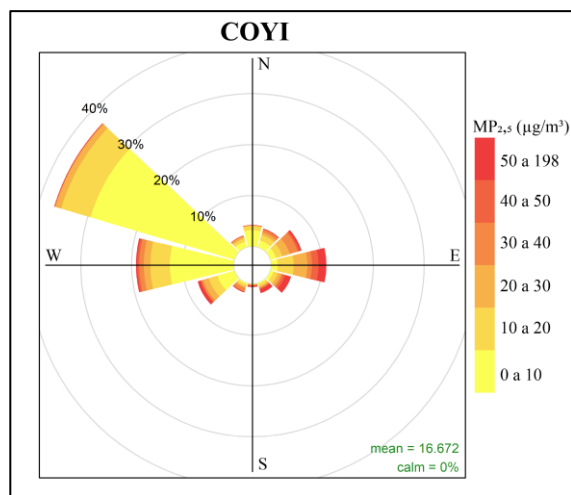


Figura 4.6. Rosa de vientos combinada con niveles $MP_{2,5}$ en COYI. Elaboración propia.

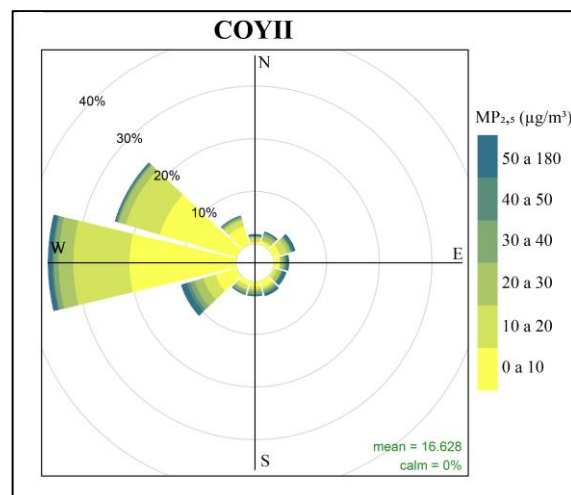


Figura 4.7. Rosa de vientos combinada con niveles $MP_{2,5}$ en COYII. Elaboración propia.

El análisis de las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ y su relación con variables climáticas de la red SINCA durante la campaña en terreno muestra que los niveles de $MP_{2,5}$ tienden a incrementar en condiciones de bajas temperaturas, alta humedad y bajas velocidades de viento en las estaciones COYI y COYII. Las series de tiempo indican un aumento progresivo de los niveles de $MP_{2,5}$ hacia el final del periodo de monitoreo, lo cual coincide con el cambio de estación de verano a otoño. Los gráficos de dispersión sugieren una relación directa entre los altos niveles de $MP_{2,5}$ y ambientes de alta humedad y baja temperatura, mientras que los gráficos de rosa de vientos indican que estas mayores concentraciones totales se vinculan a direcciones del viento de baja frecuencia y velocidad, como es oeste (W), sureste (SE) y suroeste (SW). Estos resultados otorgan un contexto general en el cual se desarrolló la campaña en terreno y destacan la influencia de los factores climáticos en el comportamiento del $MP_{2,5}$.

4.2. DATOS DE TERRENO

Los resultados de la campaña en terreno se dividieron las siguientes secciones: (1) Masa acumulada en los filtros antes y después de la campaña, (2) Concentraciones totales de $MP_{2,5}$ dentro y fuera de las viviendas, (3) Concentraciones elementales de metales y metaloides en $MP_{2,5}$ dentro y fuera de las viviendas y (4) Cumplimiento de la normativa vigente de calidad del aire.

La Figura 4.8 muestra la distribución final de los puntos de muestreo con sus respectivos códigos. Las viviendas CR05-SR05, CR06-SR06 y CR09-SR09 fueron pareadas a pesar de estar en zonas diferentes, debido a las dificultades de encontrar viviendas que cumplieran los criterios de selección en la misma zona. La vivienda SR03 esta estuvo pareada con la vivienda

CR03, pero el monitoreo se vio interrumpido, por lo que los datos de monitoreo de CR03 no se consideraron válidos para este estudio.

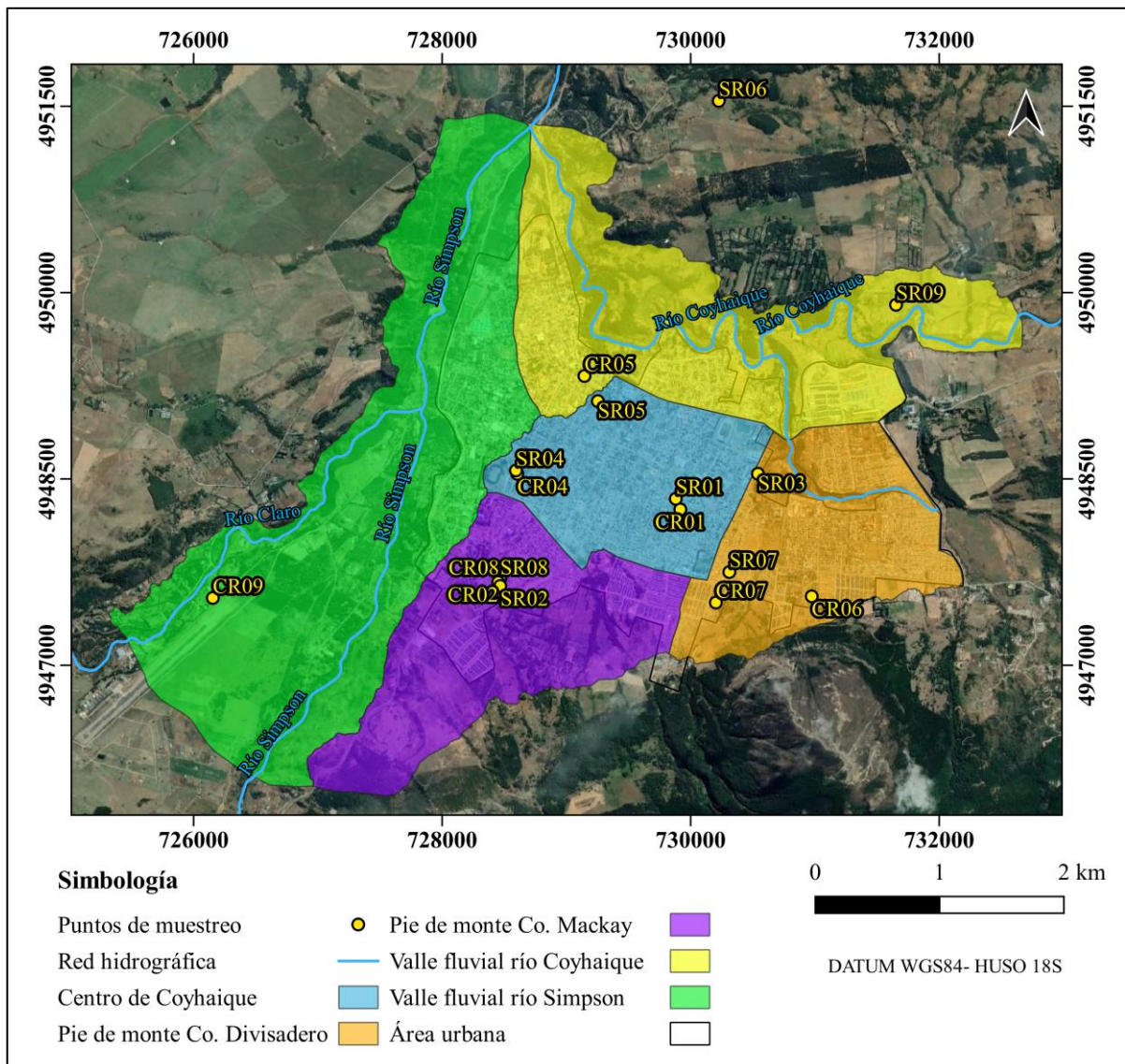


Figura 4.8. Ubicación de los puntos de muestreo y sus códigos. Elaboración propia.

4.2.1. Masa acumulada en filtros de teflón

Una vez terminada la campaña en terreno, se obtuvo un total de 27 filtros muestreados, de los cuales 10 corresponden a muestras provenientes del exterior de las viviendas, mientras que 17 fueron obtenidos al interior.

La masa acumulada por los filtros de teflón posterior al monitoreo de 48 h se registra en la Figura 4.9. La media de masa acumulada de los 27 filtros es de 482 μg representado por la línea segmentada del gráfico. Los valores mínimos se registraron en los filtros utilizados en las viviendas CR02-INT, SR05-INT y CR05-EXT con 233 μg , mientras que los valores máximos

se registran en las viviendas SR07-EXT y CR07-INT con 800 μg y CR09-INT que alcanza un máximo de 866 μg .

Los filtros que superan la media de masa acumulada representan el 44% del total de filtros monitoreados. Dentro de estos casos el 58% de los filtros corresponden a muestras obtenidas al interior de las viviendas y el 42% provienen del exterior.

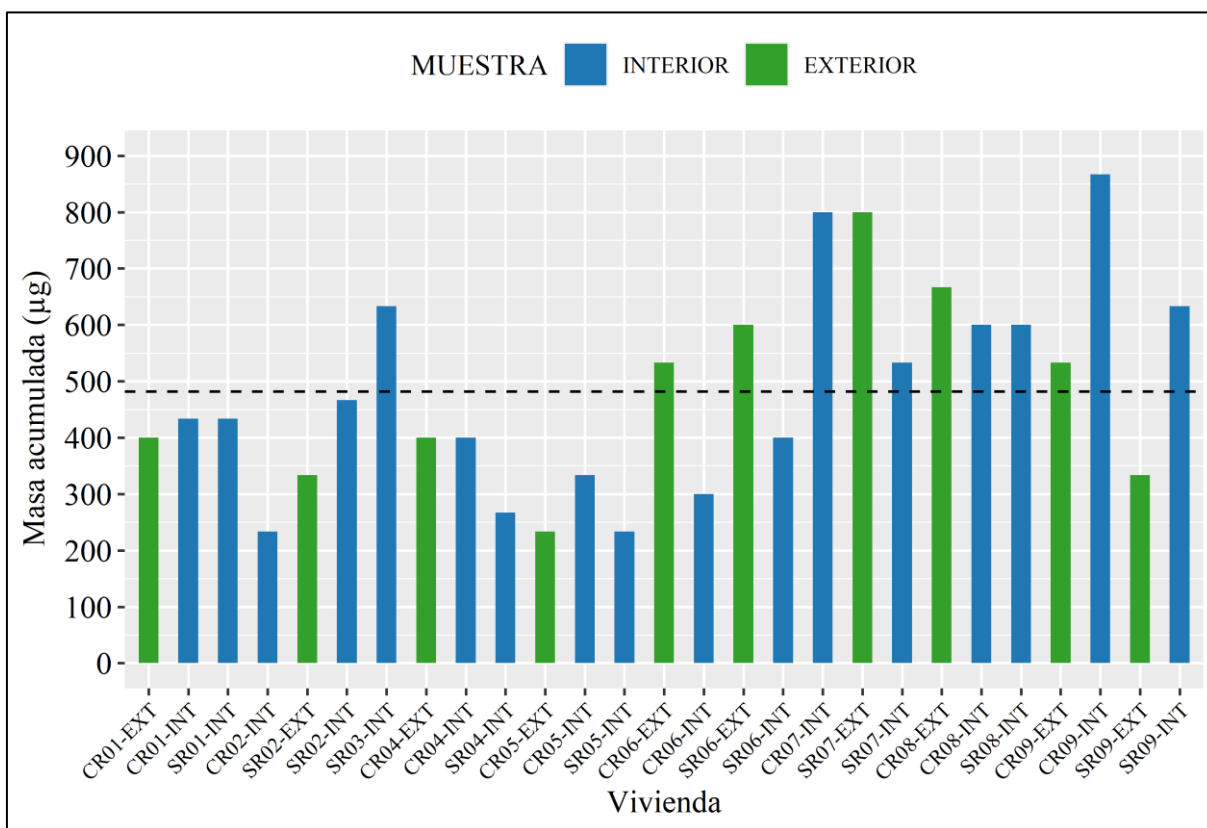


Figura 4.9. Gráfico de masa acumulada en filtros de teflón. Línea segmentada indica la media de los filtros representados. Elaboración propia.

En la Figura 4.9, las viviendas están ordenadas cronológicamente según fueron monitoreadas, evidenciándose que a partir de la vivienda CR07-INT (monitoreada desde el 21-03-2022), en la mayoría de los filtros se acumula una alta cantidad de masa que supera la media registrada, esto a excepción del filtro utilizado en la vivienda SR09-EXT. Este patrón concuerda con lo señalado en la sección 4.1.3 que muestra aumentos en los niveles de $\text{MP}_{2,5}$ desde el 19-03-2022 en las estaciones COYI y COYII.

En resumen, esta información representa una primera aproximación del comportamiento del $\text{MP}_{2,5}$ tanto en el interior como en el exterior de las viviendas. Los resultados sugieren que en las viviendas con más masa acumulada de $\text{MP}_{2,5}$ es probable que existan mayor exposición

a MP. En el siguiente apartado, se analizará con mayor detalle la variación temporal del MP_{2,5} en cada punto de muestreo, proporcionando una visión más completa de su dinámica.

4.2.2. Concentraciones totales de MP_{2,5}, temperatura y humedad dentro y fuera de las viviendas

Para analizar el comportamiento del MP_{2,5} en los puntos de muestreo, se elaboraron una serie de gráficos que muestran las variaciones minuto a minuto en las concentraciones totales de MP_{2,5} en interiores (línea azul) y exteriores (línea verde), así como en la temperatura interior (línea naranja segmentada), temperatura exterior (línea negra), humedad interior (línea roja segmentada) y humedad exterior (línea morada) a lo largo de las 48 horas de monitoreo. Los resultados fueron agrupados por pares de casas donde se monitoreó simultáneamente.

La Figura 4.10 exhibe los resultados del monitoreo de las viviendas CR01 y SR01 entre el 28 de febrero y el 2 de marzo de 2022, estas viviendas se ubican en la zona centro de Coyhaique. La vivienda CR01 cuenta con una estufa a parafina y cocina leña al interior de la vivienda, mientras que SR01 sólo cuenta con una estufa a leña. Los niveles de MP_{2,5}, temperatura y humedad al exterior de CR01 se han extrapolado a SR01, donde no se realizaron mediciones al exterior. Esta extrapolación se justifica porque los puntos de muestreo están separados por una distancia de 80 metros y fueron monitoreados simultáneamente.

Las concentraciones totales de MP_{2,5} al interior de CR01 promedian 32 µg/m³ durante el periodo de muestreo. El monitoreo inicia el 28 de febrero con niveles de MP_{2,5} entre 25 y 62 µg/m³, aumentando a 250 µg/m³ a las 19:30 h con 50% de humedad y 22°C, y luego disminuyendo hasta 26 µg/m³ a la medianoche con 56% de humedad y 19°C (Figura 4.10 a)). El 1 de marzo a las 0:36 h, el MP_{2,5} sube a 52 µg/m³, bajando de nuevo hasta las 08:00 h. Entre las 08:00 y las 10:00 h hay dos aumentos de 54 y 58 µg/m³. Desde las 10:00 h hasta las 16:00 h los niveles descienden, con aumentos abruptos de 161 µg/m³ a las 16:47 h con 49% de humedad y 21°C y 126 µg/m³ a las 19:17 h. El 2 de marzo, los niveles suben desde las 07:00 h, alcanzando los máximos del período con 336 µg/m³ en la mañana y 295 µg/m³ al mediodía.

Al interior de SR01, las concentraciones totales promedian 34 µg/m³. Se registran niveles entre 38 y 53 µg/m³ en la primera hora de monitoreo, en condiciones de 48% de humedad y 16°C de temperatura (Figura 4.10 b)). A partir de las 18:00 h comienza una disminución gradual de MP_{2,5} alcanzando los 6 µg/m³ a las 06:00 h del día 01 de marzo, en condiciones de 47% de humedad y 18°C. El 1 de marzo a las 09:30 h, los niveles suben a 78 µg/m³ con 52% humedad y 17°C, bajando de nuevo hasta las 13:00 h. A las 13:39 h del 01 de marzo hay un nuevo

aumento de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Entre las 18:00 y 19:00 h hay diversos registros que superan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, destacando el de 141 y $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en este periodo la humedad varió entre 36 a 38% y la temperatura entre 21 y 22°C . Desde las 20:00 h los niveles de $\text{MP}_{2,5}$ comienzan a descender hasta las 09:00 h del día 02 de marzo. Este último día hay un aumento sostenido de $\text{MP}_{2,5}$ entre las 09:00 a 12:00 h alcanzando el máximo de $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con humedad al 53% y 19°C . A las 13:46 h ocurre una nueva alza de $173 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguida de una nueva disminución de los niveles de $\text{MP}_{2,5}$.

Al exterior, las concentraciones totales promedian $23,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el muestreo y los datos muestran fluctuaciones similares a las del interior de las viviendas (Figura 4.10). La primera alza relevante ocurre el 28 de febrero a las 20:26 h con $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones de 71% de humedad y 10°C , alcanzando un máximo de $409 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 01 de marzo a las 0:15 h con 73% de humedad y 10°C . Entre la 01:00 y 07:00 h los niveles disminuyen, con un alza particular de $275 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 04:00 h. Entre las 08:00 h y las 10:00 h los niveles aumentan, disminuyendo luego hasta las 14:00 h. A las 14:30 h hay un alza de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y a las 23:38 h se alcanza un nuevo máximo de $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 61% de humedad y 12°C , disminuyendo luego hasta $197 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:22 h del 2 de marzo con 81% de humedad y 13°C .

En síntesis, en ambos puntos de muestreo se registraron una serie de fluctuaciones en las concentraciones totales de $\text{MP}_{2,5}$. Al interior, los aumentos de $\text{MP}_{2,5}$ tienden a ocurrir en las mañanas y tardes, y los descensos en las madrugadas. Al exterior, los aumentos ocurren en las mañanas, tardes y noche principalmente, con disminuciones al medio día. Los promedios de $\text{MP}_{2,5}$ al interior son similares y mayores al promedio exterior. En relación a las condiciones ambientales, CR01 muestra una mayor variabilidad de la humedad interior en comparación a SR01, mientras que sus temperaturas interiores son similares. Externamente, tanto los niveles de $\text{MP}_{2,5}$ como la humedad y temperatura, presentan una mayor variabilidad en general.

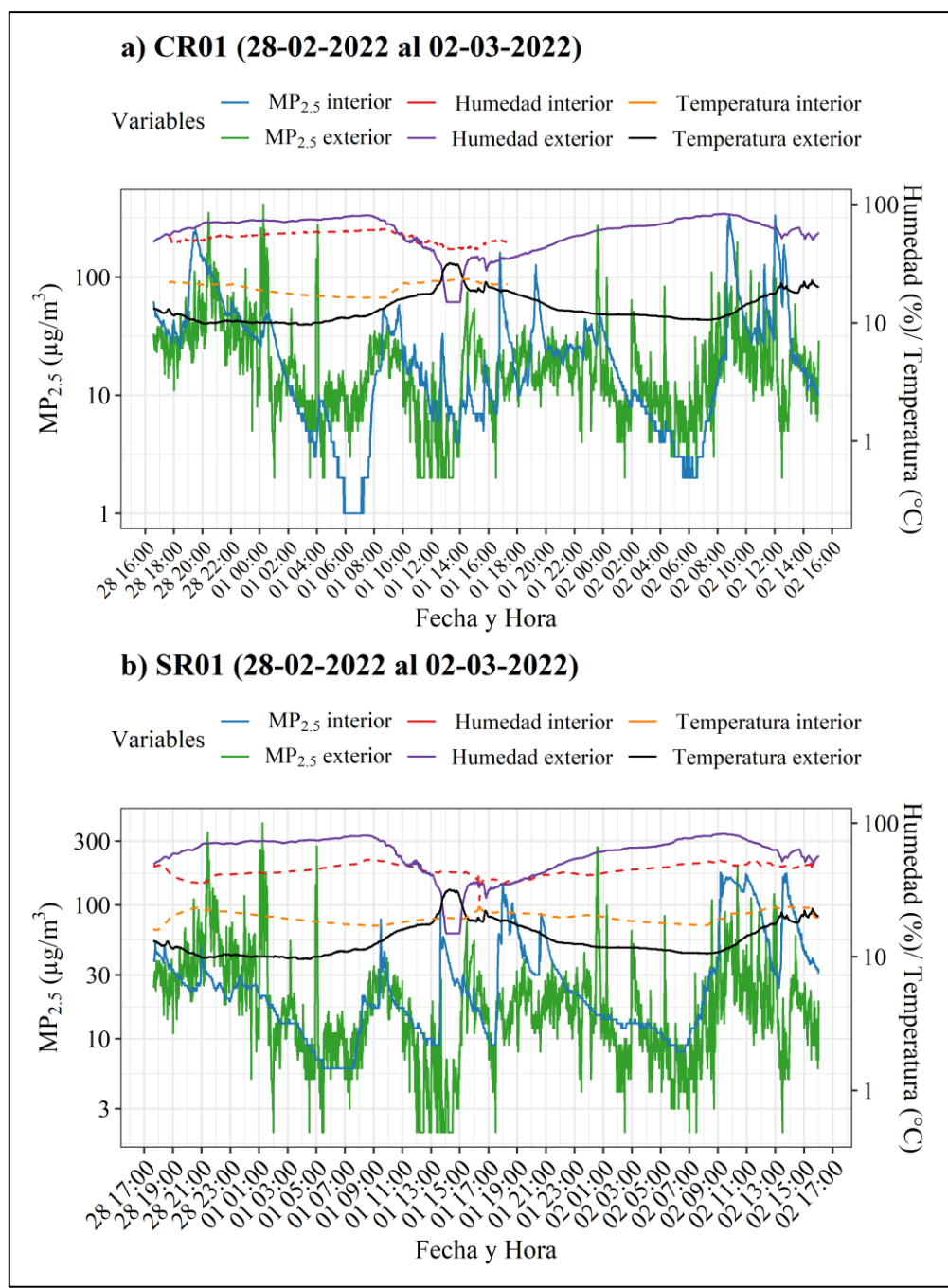


Figura 4.10. a) Serie de tiempo MP_{2,5}, temperatura y humedad en CR01. b) Serie de tiempo MP_{2,5}, temperatura y humedad en SR01. Elaboración propia.

La Figura 4.11 muestra los resultados del monitoreo de las viviendas CR04 y SR04 realizado entre el 10 y 12 de marzo de 2022, estas viviendas están ubicadas en la zona centro de Coyhaique. La vivienda CR04 cuenta con una estufa a parafina al interior de la vivienda, mientras que SR04 sólo cuenta con una estufa a leña. Los niveles de MP_{2,5}, temperatura y humedad al exterior de CR04 se han extrapolado a SR04, donde no se realizaron mediciones al exterior. Esta extrapolación se basa en que los puntos de muestreo están separados por una distancia de 22 metros y fueron monitoreados simultáneamente.

Dentro de CR04 (Figura 4.11 a)), se registró una media de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las concentraciones totales de $\text{MP}_{2,5}$. El monitoreo inicia el 10 de marzo a las 19:00 h con niveles entre los 9 a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que se mantienen hasta las 23:00 h. Entre las 00:00 a 07:00 h las concentraciones disminuyen oscilando entre 2 a $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de las 07:36 h del día 11, los niveles aumentan alcanzando el máximo del periodo con $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 07:55 h en condiciones de 62% de humedad y 16°C . Después de este máximo los niveles de $\text{MP}_{2,5}$ se mantienen entre los 2 a $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta las 09:00 h del día 12 de marzo, en este periodo la humedad varía entre 39 a 62% y la temperatura entre 16 a 28°C . El día 12 de marzo entre las 11:00 a 15:00 h hay un nuevo aumento de $\text{MP}_{2,5}$ con concentraciones que van desde los 29 a $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Luego de esto hay una disminución gradual del $\text{MP}_{2,5}$ hasta el término del monitoreo.

El comportamiento del $\text{MP}_{2,5}$ al interior de SR04 (Figura 4.11 b)) es similar al de CR04 en las primeras horas de monitoreo (19:00 a 00:00 h), con concentraciones que varían entre 6 a $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Entre las 01:00 a 09:00 h del día 11 de marzo los niveles de $\text{MP}_{2,5}$ disminuyen variando entre 2 a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La mañana del día 11 de marzo se registra como máxima $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 10:57 h. Posterior a esto, las concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ disminuyen nuevamente hasta las 16:41 h donde se registran $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La tarde y noche del día 11 las concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ vuelven a disminuir hasta el día 12 de marzo, cuando a las 10:06 h se alcanza la concentración máxima de $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones de 64% de humedad y 17°C .

Los datos de $\text{MP}_{2,5}$ exterior muestran fluctuaciones (Figura 4.11) a diferencia del interior de las viviendas las primeras horas de monitoreo al exterior se registran niveles que superan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ esto a partir de las 21:00 h en condiciones de 56% de humedad y 19°C . Luego hay una disminución del $\text{MP}_{2,5}$ entre las 01:00 a las 07:00 h del día 11 de marzo. A las 07:48 h del mismo día se produce la máxima del periodo con $215 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 88% de humedad y 11°C , niveles elevados que se mantienen hasta las 09:00 h. Entre las 09:00 a 17:00 h las concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ disminuyen gradualmente. A las 17:15 h se registra una pequeña alza de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 52% de humedad y 20°C . La siguiente máxima ocurre a las 23:15 h registrando $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ momento en que aumenta la humedad a 75% y disminuye la temperatura a 13°C . Posteriormente, hay una disminución de $\text{MP}_{2,5}$ seguida de un alza en la mañana del día 12 de marzo, registrando 101 y $108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 81% de humedad y 13°C .

En CR04 y SR04, los promedios de $\text{MP}_{2,5}$ en el interior son similares y significativamente menores a los registrados en el interior de CR01 y SR01. Además, el promedio exterior en CR04 y SR04 supera al del interior, lo contrario a lo observado en CR01 y SR01. Al interior, los aumentos de $\text{MP}_{2,5}$ ocurren principalmente en la mañana, mientras que al exterior ocurren en las mañanas y noches. Respecto a las variables ambientales, tanto dentro como fuera de las

viviendas, los incrementos de temperatura están directamente relacionados a los descensos de la humedad relativa esto evidenciado tanto en la Figura 4.10 como 4.11.

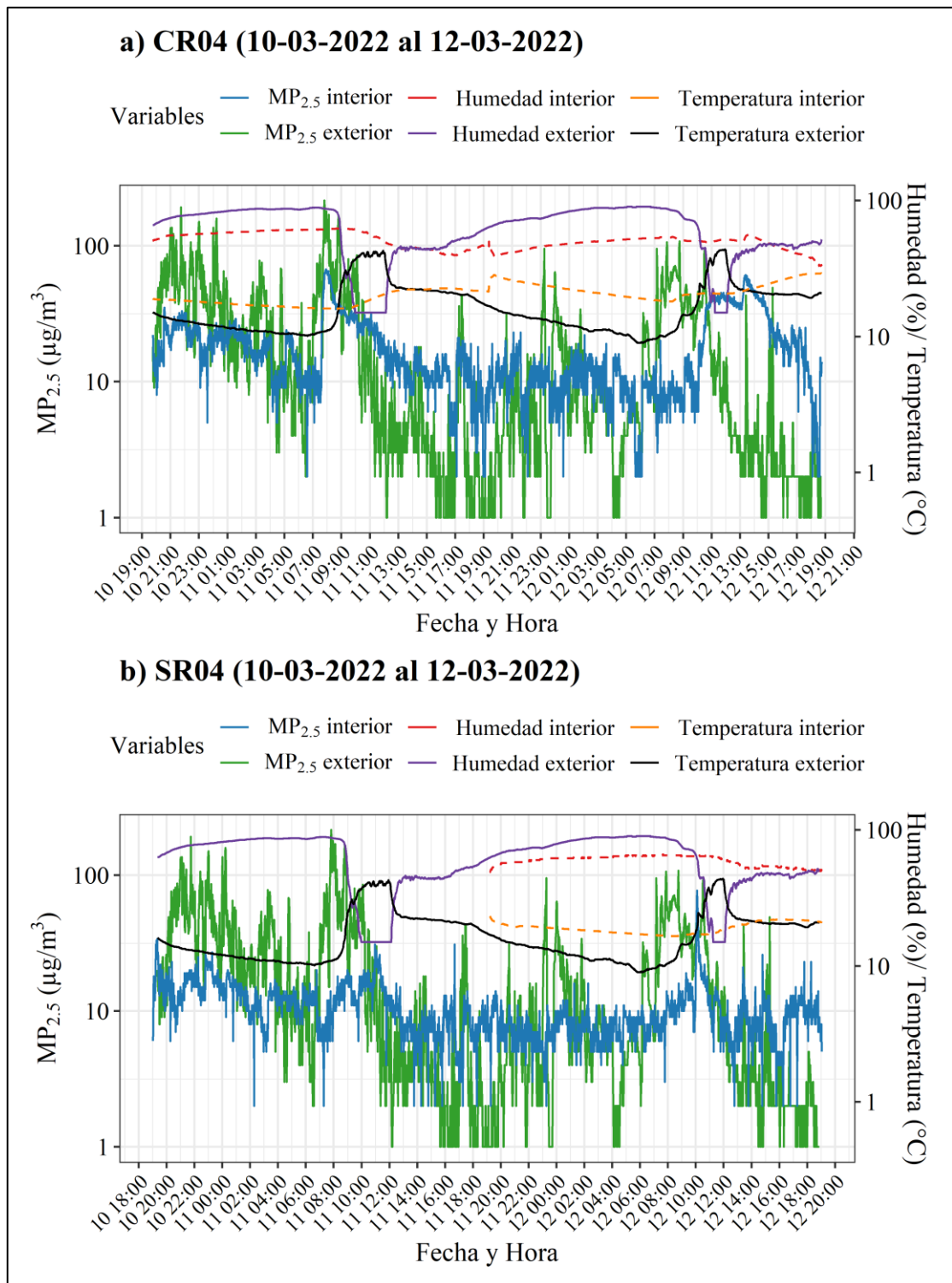


Figura 4.11. a) Serie de tiempo MP_{2,5}, temperatura y humedad en CR04. b) Serie de tiempo MP_{2,5}, temperatura y humedad en SR04. Elaboración propia.

La Figura 4.12 representa los registros de $MP_{2,5}$, temperatura y humedad de las viviendas CR05 y SR05, monitoreadas entre el 13 y 15 de marzo de 2022. CR05 se ubica en la zona del valle fluvial del río Coyhaique y SR05 se encuentra en la zona centro de la ciudad, sin embargo, las viviendas se encuentran a menos aproximadamente 200 metros de distancia. La vivienda CR05 cuenta con una estufa a parafina, estufa a pellet, estufa a leña y cocina a leña al interior de la vivienda, mientras que SR05 sólo cuenta con una estufa a leña. Los niveles de $MP_{2,5}$, temperatura y humedad al exterior de CR05 se han extrapolado a SR05 donde no se realizaron mediciones al exterior. Esta extrapolación se justifica porque los puntos de muestreo están separados por una distancia de exactamente 209 metros en línea recta y fueron monitoreadas simultáneamente.

Al interior de CR05 (Figura 4.12 a)) se registra una media de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ de $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El monitoreo inicia el 13 de marzo a las 21:00 h con niveles entre los 2 a $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que se mantienen hasta las 10:00 h del día 14. A partir de las 10:00 h del día 14, los niveles aumentan alcanzando un máximo de $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 10:11 h en condiciones de 39% de humedad y 22°C , seguido de una nueva alza a las 11:17 h con $134 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Entre las 12:00 a 14:17 h del día 14 ocurren una serie de alzas que superan los $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una máxima de $904 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 40% de humedad y 21°C a las 12:50 h, el nivel más alto alcanzado durante el periodo de monitoreo. Después de este máximo los niveles de $MP_{2,5}$ disminuyen gradualmente entre las 15:00 h a 10:00 h del día 15 de marzo. A las 11:55 h del día 15 ocurre un nuevo máximo de $142 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 49% de humedad y 21°C , seguida de otra alza a las 14:47 h de $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y a las 16:28 h se registran $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 48°C y 22°C .

Al interior de SR05 (Figura 4.12 b)) se registra un promedio de $MP_{2,5}$ de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante las primeras horas de monitoreo los niveles de $MP_{2,5}$ varían entre 5 a $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre las 21:00 y 02:00 h en condiciones de 18°C y humedad entre 47 a 51%. Entre las 02:00 a 07:00 h del día 14 de marzo los niveles de $MP_{2,5}$ disminuyen variando entre 2 a $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, momento en el cual aumenta la temperatura a 24°C y disminuye la humedad al 37%. Luego, entre las 07:00 a 16:00 h hay una serie de alzas de $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Posteriormente, los niveles vuelven a disminuir hasta las 19:26 h que ocurre un alza de $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y luego una de $422 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que corresponde a la máxima concentración registrada al interior de esta vivienda. A las 23:38 h del día 14 ocurre un alza de $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la última alza del período se registra a las 09:00 h del día 15 de marzo con $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Al exterior de ambas viviendas (Figura 4.12) el promedio de concentraciones de $MP_{2,5}$ es de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los niveles de $MP_{2,5}$ presentan diversas fluctuaciones similares que a las que ocurren al interior de las viviendas. Las primeras horas de monitoreo entre las 21:00 a 00:00 h

se registran niveles que superan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una máxima de $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 23:27 h con 66% de humedad y 14°C . Entre las 01:00 a 07:00 h del día 14 de marzo hay una disminución del $\text{MP}_{2,5}$, en condiciones de 64% a 75% de humedad y 12°C a 14°C de temperatura. A las 09:00 h del mismo día se produce la máxima del periodo con $836 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 67% de humedad y 13°C . Entre las 10:00 a 17:00 h del día 14 de marzo ocurren diversas alzas de $\text{MP}_{2,5}$ destacando la de $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $199 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Luego, las concentraciones disminuyen gradualmente durante la noche del día 14 y madrugada del día 15 de marzo. A las 08:00 h del día 15 de marzo se registran $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 78% de humedad y 13°C . Posteriormente, hay una nueva disminución en los niveles de $\text{MP}_{2,5}$, que aumentan hasta el fin del monitoreo donde se registran hasta $316 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 68% de humedad y 16°C .

En CR05 y SR05, los promedios de $\text{MP}_{2,5}$ en el interior son mayores que en el exterior de las viviendas. Los niveles máximos de $\text{MP}_{2,5}$ al interior de CR05, tienden a ocurrir durante la mañana y mediodía, mientras que en SR05 preferentemente en las mañanas y noche. Al exterior, las principales alzas ocurren en las mañanas y noches. La temperatura, tanto interior como exterior, muestra una marcada influencia sobre la humedad. La temperatura interior tiende a aumentar durante la noche, mientras que la exterior tiende a aumentar durante la mañana y medio día.

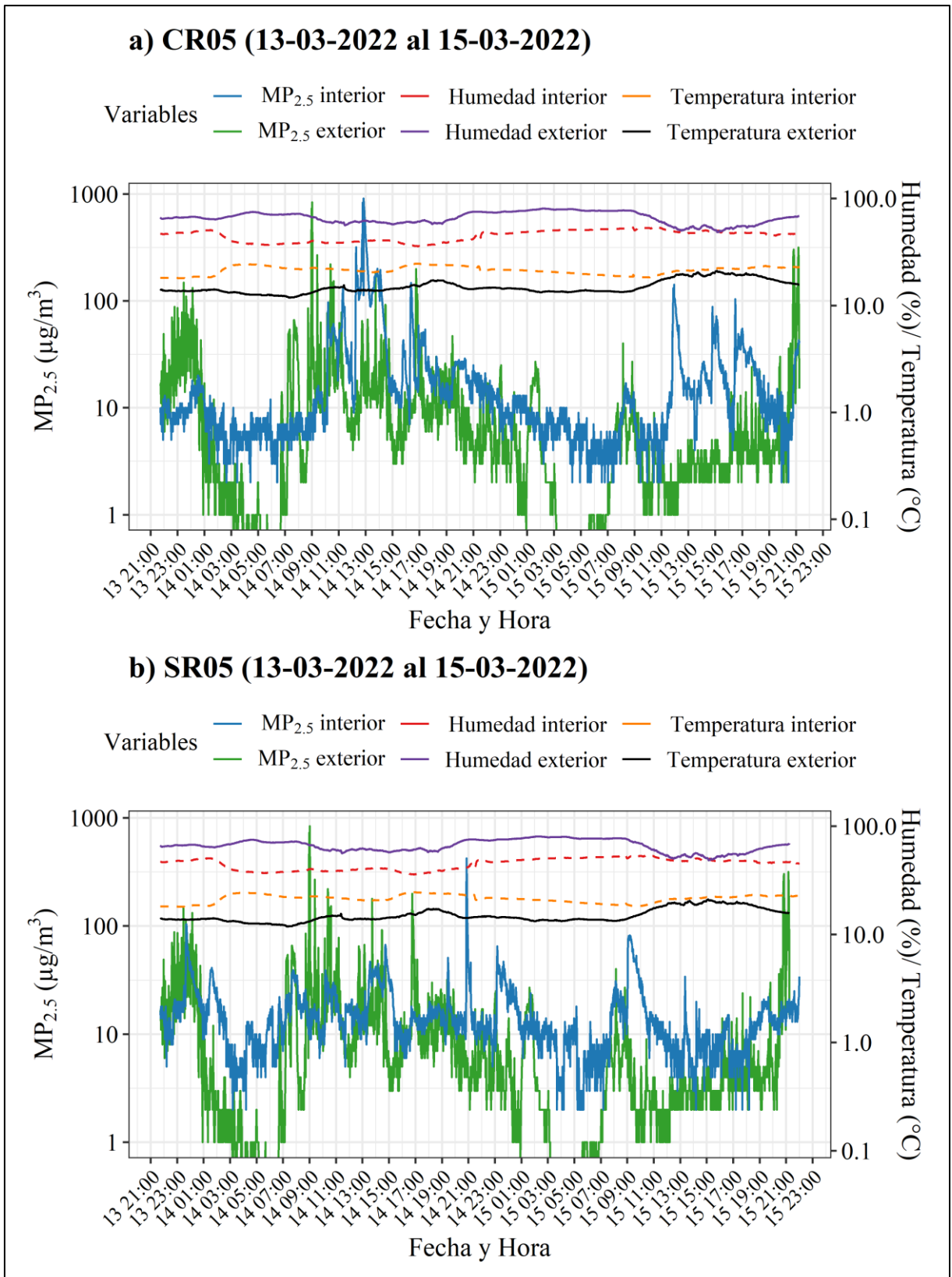


Figura 4.12. a) Serie de tiempo MP_{2,5}, temperatura y humedad en CR05. b) Serie de tiempo MP_{2,5}, temperatura y humedad en SR05. Elaboración propia.

Los niveles de $MP_{2,5}$ en las viviendas CR06 y SR06 fueron registrados durante el 16 al 18 de marzo de 2022 (Figura 4.13). La vivienda CR06 se encuentra en la zona de pie de monte del Co. Divisadero y SR06 se ubica a 2 km de la ciudad y fuera de las zonas de muestreo prioritario cercana al Co. Cinchao. CR06 cuenta con una estufa a parafina, mientras que SR06 tiene una estufa a pellet que no fue adquirida mediante el programa de recambio de calefactores. En la vivienda SR06, se utilizó el equipo *Dust Trak* para registrar el $MP_{2,5}$ al exterior, sin embargo, este presentó fallas durante el proceso de monitoreo y no se obtuvieron datos. Las viviendas están separadas por una distancia de 4 km en línea recta, por lo que se ha considerado no extrapolar los datos de $MP_{2,5}$ exterior como en los casos anteriores, donde las viviendas estaban a menos de 1 km de distancia.

Al interior de CR06 (Figura 4.13 a)), las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ promedian $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el periodo monitoreado, con una máxima de apenas $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la menor registrada de todas las viviendas estudiadas. El monitoreo comienza a las 20:00 h del día 16 de marzo con niveles entre 33 a $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones de 45% de humedad y 17°C . El mismo día, entre las 21:00 y 23:00 h las concentraciones disminuyen, para aumentar levemente a las 0:02 h del día 17 de marzo, con $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 49% de humedad y 17°C . Entre las 01:00 y 08:00 h del mismo día, las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ presentan una nueva disminución en condiciones de 51% de humedad y 16°C . A las 09:00 h del día 17 de marzo ocurre un alza de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 49% de humedad y 17°C . Durante la mañana y tarde del día 17 los niveles varían entre los 2 a $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hasta las 19:00 h que ocurre un alza de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 41% de humedad y 19°C . Luego a las 21:00 h comienza un aumento en los niveles de $MP_{2,5}$ que alcanza un máximo de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de una nueva disminución. A las 09:00 h del día 18 de marzo ocurre un aumento de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 45% de humedad y 15°C . Luego de esto los niveles descienden nuevamente, hasta las 15:20 h donde se alcanza el máximo de $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 39% de humedad y 19°C .

Al exterior de CR06 (Figura 4.13 a)), las concentraciones totales promedian $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El monitoreo comenzó con tres incrementos de concentración registrados entre las 21:00 h del 16 de marzo y la 01:00 h del 17 de marzo. El primero se observó a las 21:02 h del día 16, con una concentración de $310 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 57% de humedad y una temperatura de 10°C . El segundo aumento fue de $555 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una humedad del 72% y una temperatura de 8°C , mientras que el tercero alcanzó los $337 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 0:20 h, con una humedad del 78% y una temperatura de 8°C . Posterior a esto hay una abrupta disminución en los niveles de $MP_{2,5}$, que termina con el alza ocurrida a las 07:56 h del día 17 de marzo con $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 60% de humedad y 7°C . Entre las 09:00 a 19:00 h del día 17 hay un aumento en las concentraciones totales de $MP_{2,5}$

destacando las siguientes alzas: 131 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 10:12 h, 108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15:24 h y 114 a las 18:54 h esto en condiciones de entre 45% a 53% de humedad y 7°C a 14°C. Entre las 19:00 h del día 17 a 02:00 h del día 18, ocurren una serie de aumentos en el $\text{MP}_{2,5}$, momento en que disminuye la temperatura exterior y aumenta la humedad. Estas alzas corresponden a: 297 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 19:00 h del día 17 con 41% de humedad y 11°C; 342 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 59% de humedad y 8°C; 344 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 22:03 h del día 17 con 65% de humedad y 7°C y la máxima del período de 923 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 01:14 h del día 18 con 80% de humedad y 5°C. Luego de esto hay una abrupta disminución de las concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ hasta las 06:00 h del día 18 donde se alcanzan los 323 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 78% de humedad y 3°C. Seguido de esto se registran 528 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 07:21 h con 81% de humedad y 3°C, y a las 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 07:56 h. Posteriormente, las concentraciones disminuyen gradualmente hasta el término del monitoreo.

Las concentraciones totales al interior de SR06 (Figura 4.20 b)) promedian 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El monitoreo en esta vivienda inicia a las 18:00 h del día 16 de marzo. Durante las primeras horas las concentraciones están por debajo de los 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones de 53% de humedad y 21°C. A las 20:40 h se alcanzan 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 46% de humedad y 21 °C, seguido de esto hay una serie de fluctuaciones entre los 2 a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre las 23:00 h del día 16 de marzo hasta las 13:00 h del día 17 de marzo. Entre las 13:30 a 15:00 h del día 17 de marzo ocurre la principal alza de período con niveles entre los 31 a 113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, esta última alza ocurre en condiciones de 33% de humedad y 26°C y coincide con un aumento de la temperatura, tanto interior como exterior, y disminución de humedad. A partir de las 15:00 h se produce una disminución hasta las 17:58 h momento en que se alcanzan los 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 32% de humedad y 22°C. Posteriormente, las concentraciones totales de $\text{MP}_{2,5}$ descienden nuevamente oscilando entre los 2 a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre las 19:00 h del día 17 y 07:00 h del día 18 de marzo. A las 07:40 h del día 18, se registran 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 42% de humedad y 16°C. Luego a las 10:44 h ocurre una nueva alza de 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguida de una nueva disminución. A las 14:51 h ocurre una abrupta alza con 88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 15% de humedad y 35°C, que coincide con un aumento general de la temperatura y disminución de la humedad de la vivienda.

El comportamiento de las concentraciones totales de $\text{MP}_{2,5}$ de las viviendas muestreadas, presenta diversas fluctuaciones durante el tiempo de monitoreo. Al interior, ambas viviendas presentan bajos promedios de $\text{MP}_{2,5}$ en comparación a las viviendas ya descritas. Aun así, CR06 registra mayores niveles de $\text{MP}_{2,5}$ interior que SR06. Las alzas al interior de CR06 tienden a ocurrir en las mañanas y noches coincidiendo con temperaturas bajas y mayor humedad. En contraste, SR06, las alzas ocurren más bien en la tarde. En el exterior de CR06, las mayores

concentraciones exteriores coinciden con horas de menor temperatura y mayor humedad, específicamente durante las mañanas y noche.

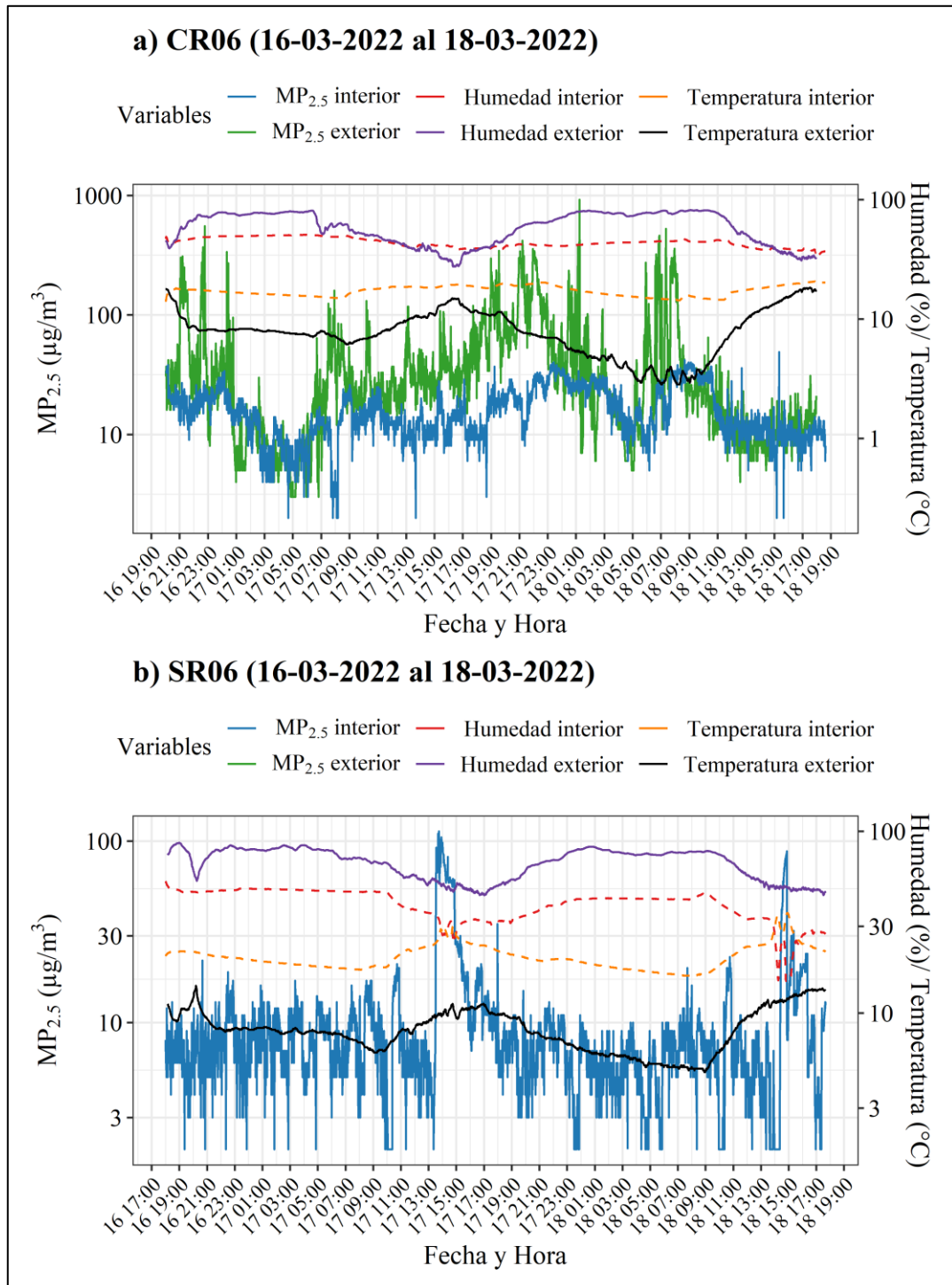


Figura 4.13. a) Serie de tiempo MP_{2.5}, temperatura y humedad en CR06. b) Serie de tiempo MP_{2.5}, temperatura y humedad en SR06. Elaboración propia.

La Figura 4.14 muestra el comportamiento de las concentraciones totales de MP_{2.5} para las viviendas CR07 y SR07, viviendas ubicadas en la zona prioritaria del pie de monte del Co.

Divisadero y monitoreadas entre el 21 y 23 de marzo de 2022. La vivienda CR07 cuenta con una estufa a pellet, mientras que SR07 tiene una estufa a leña. Los niveles de $MP_{2,5}$, temperatura y humedad al exterior de SR07 se han extrapolado a CR07, donde no se realizaron mediciones al exterior. Esta extrapolación se justifica porque los puntos de muestreo están separados por una distancia de 276 metros y fueron monitoreados durante el mismo periodo.

Durante el muestreo al interior en CR07, las concentraciones de $MP_{2,5}$ promedian $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 4.14). El monitoreo comienza el 21 de marzo a las 15:00 h con 51% de humedad y 18°C . Inicialmente, el $MP_{2,5}$ varía entre $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta las 17:00 h, momento en que la humedad baja a 41% y la temperatura sube a 22°C . Entre las 17:00 y 19:00 h, se registran tres alzas significativas: $241 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 17:22 h, $242 \mu\text{g}/\text{m}^3$ poco después, y $107 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 19:00 h. A las 21:00 h, los niveles alcanzan $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y a las 22:00 h, $107 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin cambios en humedad ni temperatura. Entre las 23:00 h del 21 de marzo y las 06:00 h del 22 de marzo, los niveles de $MP_{2,5}$ descienden mientras la humedad aumenta a 42% y la temperatura disminuye a 18°C . De 08:00 a 16:00 h del 22 de marzo, ocurren varias alzas: $149 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $162 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con incrementos progresivos de humedad y temperatura. Entre las 14:00 y 18:00 h, los niveles de $MP_{2,5}$ disminuyen antes de un aumento gradual a las 19:00 h, alcanzando un máximo de $820 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 19:24 h con 41% de humedad y 21°C . Finalmente, los niveles disminuyen hasta las 08:00 h del 23 de marzo, con últimas alzas de $246 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 08:58 h y $247 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 10:26 h.

Al interior de SR07, las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ promedian $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 4.14). Durante las primeras horas de monitoreo, entre las 16:00 h del día 21 a 0:00 h del día 22 de marzo, las concentraciones oscilan entre 6 a $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la humedad varía entre 33 a 50% y la temperatura entre 19 a 26°C . Entre la medianoche y las 06:00 h del 22 de marzo los niveles de $MP_{2,5}$ disminuyen junto con la temperatura. A las 08:40 h se registran $124 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 37% de humedad y 22°C , luego a las 11:34 h se registran $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las mismas condiciones ambientales. Entre las 12:00 h y 19:00 h del día 22 los niveles de $MP_{2,5}$ disminuyen, para aumentar nuevamente a las 20:45 h con $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 35% de humedad y 25°C . Entre las 21:00 h del día 22 y las 06:00 h del día 23 los niveles de $MP_{2,5}$ descienden. A las 08:58 h ocurre la máxima del periodo con $295 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 36% de humedad y 23°C , seguido de esto a las 09:45 h ocurre una nueva alza de $234 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Luego, los niveles disminuyen hasta el término del monitoreo.

Las concentraciones totales al exterior de las viviendas (Figura 4.14) promedian $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al inicio del periodo, se registra un alza de $137 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 21:24 h. Posterior a esto, hay una abrupta disminución de $MP_{2,5}$, que culmina a las 07:00 h donde las concentraciones

aumentan gradualmente. A las 10:07 h ocurre una nueva alza de $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 73% de humedad y 12°C , seguida de otra a las 11:07 h con $155 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 75% de humedad y 12°C . Luego, a las 14:58 h se registran $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 47% de humedad y 18°C , seguido de una baja en los niveles de $\text{MP}_{2,5}$. Entre las 18:30 h a 0:00 h del día 22 ocurren diversas alzas que van desde los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $439 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones aumento de humedad de 44 a 65% de humedad y temperatura entre los 14 a 18°C . Entre las 01:00 h del día 23 de marzo a las 07:00 h disminuyen nuevamente las concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$, que aumentan gradualmente hasta alcanzar la máxima del periodo de $864 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:40 h con 73% de humedad y 10°C .

En el interior de las viviendas, CR07 presenta mayores concentraciones totales de $\text{MP}_{2,5}$ que SR07, siguiendo un patrón de comportamiento similar al del exterior. En CR07, tanto al interior como al exterior, las mayores concentraciones se observan en las mañanas, tardes y noches, mientras que las menores ocurren durante la madrugada, coincidiendo con bajas temperaturas y aumento de la humedad. En cambio, en SR07 los aumentos de $\text{MP}_{2,5}$ ocurren en las mañanas y tardes.

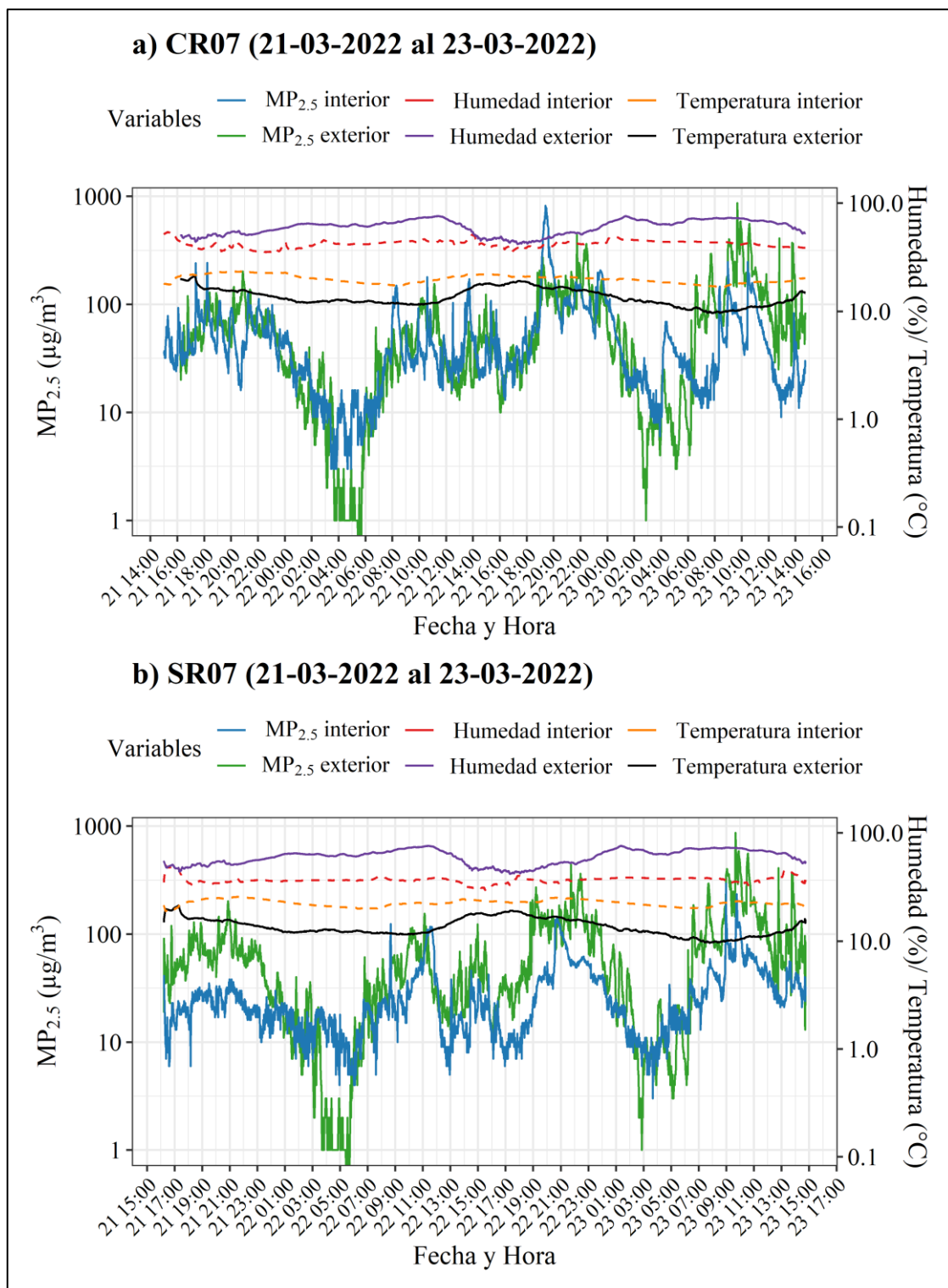


Figura 4.14. a) Serie de tiempo MP_{2,5}, temperatura y humedad en CR07. b) Serie de tiempo MP_{2,5}, temperatura y humedad en SR07. Elaboración propia.

Entre el 24 y el 26 de marzo de 2022, se llevó a cabo el monitoreo de las viviendas CR08 y SR08 (Figura 4.15), ubicadas en la zona de pie de monte del Co. Mackay. La vivienda CR08 dispone de una estufa a pellet, como parte del programa de recambio, y una cocina a leña, mientras que la vivienda SR08 solo cuenta con una estufa a leña. Dado que ambas viviendas se

encuentran en el mismo sitio domiciliario, los datos de $MP_{2,5}$, temperatura y humedad tomados al exterior de CR08 se han extrapolado a SR08.

Dentro de CR08 las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ (Figura 4.15 a)) promedian un total de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el periodo de monitoreo. Entre las 11:00 y 18:00 h del día 24 de marzo las concentraciones de $MP_{2,5}$ varían entre 2 a $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la humedad entre 31 a 39% y la temperatura entre 23 a 30°C . A las 18:51 h se registra la primera alza de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 37% humedad y 24°C , luego hay un breve descenso en los niveles de $MP_{2,5}$, seguido de un aumento a las 23:00 h con $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 40% de humedad y 21°C . Durante la madrugada del día 25 de marzo los niveles disminuyen gradualmente junto con la temperatura, para luego aumentar a las 06:35 h con $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 41% de humedad y 19°C . A partir de las 07:00 h comienza un aumento de temperatura y ocurre un alza de $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:03 h con 34% de humedad y 25°C . Luego, hay una nueva disminución entre las 10:00 a 19:00 h del día 25. Entre las 20:00 a 21:00 h ocurren dos alzas significativas asociadas a la disminución de la temperatura y aumento de la humedad, la primera de $129 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la segunda de $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones de 37% de humedad y 24°C . Seguido de esto, los niveles disminuyen paulatinamente hasta el término del monitoreo.

Al interior de SR08 las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ promedian $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 4.15 b)). Las primeras horas del monitoreo, entre las 10:00 y 22:00 h del día 24, las concentraciones varían entre 30 a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la humedad inicia en 78% y disminuye gradualmente a 26% y la temperatura inicia en 28°C y disminuye a 20°C . A las 22:50 h se alcanza una máxima de $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 41% de humedad y 21°C , una hora más tarde ocurre una nueva alza de $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante la madrugada del día 25 de marzo las concentraciones de $MP_{2,5}$ disminuyen nuevamente al igual que la temperatura. Entre las 08:00 a 11:00 h ocurren una serie de alzas asociadas a una disminución abrupta de la humedad y aumento de la temperatura, específicamente de: $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 08:18 h con 46% de humedad y 16°C ; $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:28 h con 31% de humedad y 25°C y luego $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 10:30 h con 23% de humedad y 30°C . Seguido de esto, hay una disminución de $MP_{2,5}$ hasta las 20:40 h, momento en que se identifican diversos registros que superan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 35% de humedad y 23°C . Luego, la siguiente alza ocurre a las 23:39 h con $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el día 26 de marzo en la madrugada se registran $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Al exterior de ambas viviendas, las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ presentan un patrón de fluctuaciones similar al observado en el interior, pero con un promedio mayor de $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las primeras alzas ocurren a las 11:47 h del 24 de marzo con $265 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones de 52% de humedad y 14°C , y la siguiente a las 17:00 h con $359 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 53% de humedad y 16°C .

Entre las 18:00 y 19:00 h, se registran varios aumentos sobre los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, destacando: 233 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 177 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 56% de humedad y 14°C. Desde las 21:00 h hasta la medianoche del día 24, se observan varias alzas que alcanzan un máximo de 394 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 67% de humedad y 12°C. En la madrugada del 25 de marzo, hay una gran disminución de $\text{MP}_{2,5}$, que aumenta gradualmente a partir de las 06:00 h, alcanzando un máximo de 378 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 75% de humedad y 9°C. Entre las 10:00 y 18:00 h, los niveles de $\text{MP}_{2,5}$ disminuyen nuevamente, para aumentar abruptamente a las 19:37 h con el máximo del periodo de 788 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, coincidiendo con una disminución de la temperatura y un aumento de la humedad. Durante la madrugada del 26, las concentraciones descienden y vuelven a aumentar al término del monitoreo, registrándose específicamente a las 10:00 h, 535 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con 72% de humedad y 12°C.

En el periodo de monitoreo de CR08 y SR08 ambas viviendas muestran un patrón de fluctuaciones con aumentos notables en el interior y exterior. En CR08, las mayores alzas ocurren durante la tarde y noche del 24 de marzo. SR08 presenta aumentos importantes en la noche del 24 y la mañana del 25 de marzo. Al exterior de ambas viviendas, las principales alzas ocurren en tardes y mañanas influenciadas por la disminución de la temperatura y aumento de la humedad, mientras que las disminuciones de $\text{MP}_{2,5}$ se ven asociadas a alzas de la temperatura y baja en la humedad.

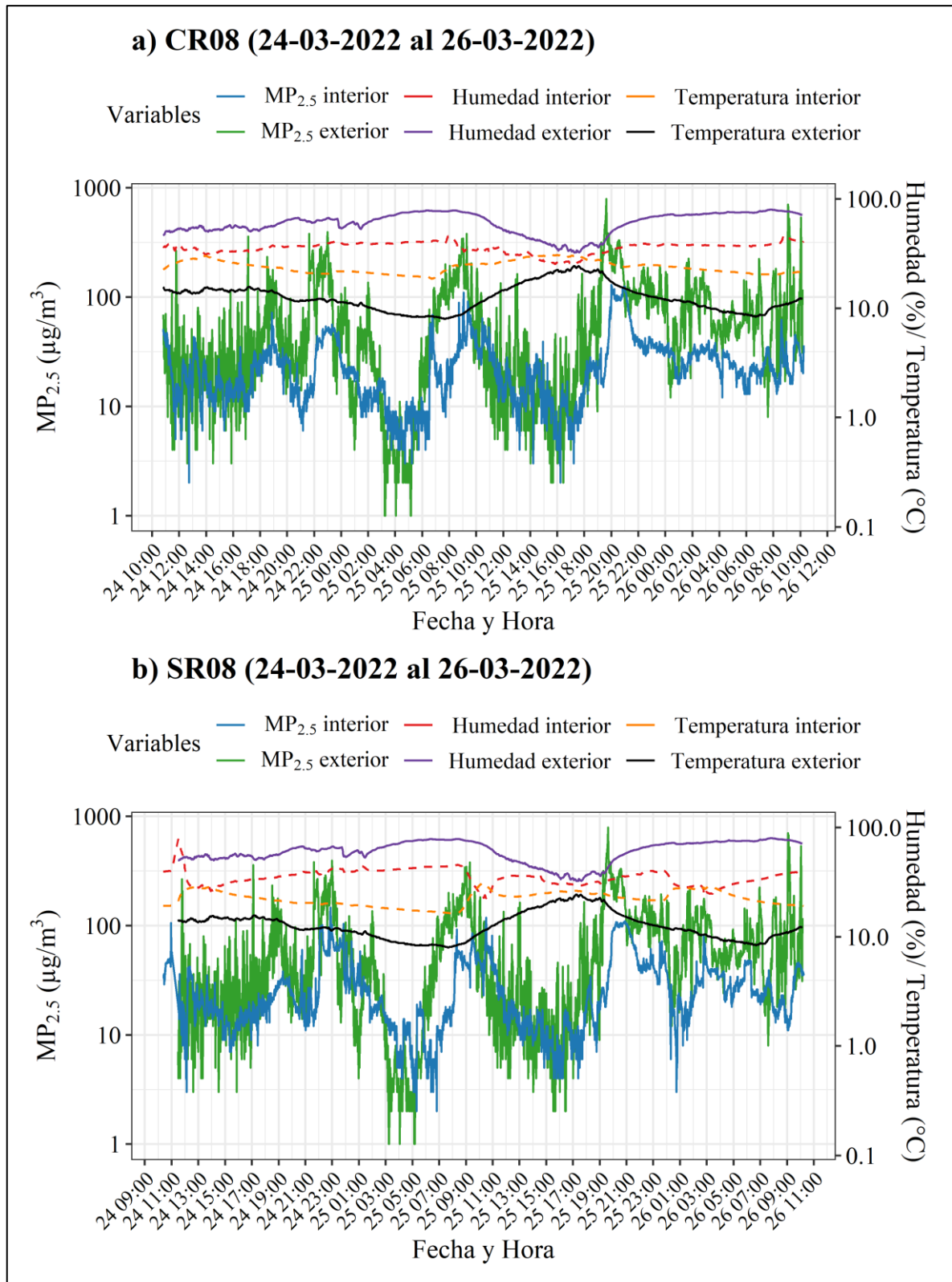


Figura 4.15. a) Serie de tiempo MP_{2.5}, temperatura y humedad en CR08. b) Serie de tiempo MP_{2.5}, temperatura y humedad en SR08. Elaboración propia.

Las últimas viviendas monitoreadas fueron CR09 y SR09 durante el 28 al 30 de marzo (Figura 4.16), en este caso no fue posible parear las casas en la misma zona prioritaria. CR09

se ubica en la zona del valle fluvial del río Simpson y cuenta con una estufa a pellet. SR09 pertenece a la zona del valle fluvial del río Coyhaique y cuenta con una estufa a parafina. En este caso ambas viviendas obtuvieron sus estufas por el programa de recambio de calefactores, sin embargo, se mantuvo la codificación originalmente planteada. Las viviendas se encuentran a una distancia de 6 km en línea recta, por lo que se tomaron datos al exterior de manera independiente en cada vivienda.

Al interior de CR09 (Figura 4.16 a)), las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ promedian un total de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, durante el periodo de monitoreo. Al inicio del monitoreo, entre las 19:00 a 21:00 h del día 28 de marzo, los niveles de $MP_{2,5}$ oscilan entre 27 a $199 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una humedad relativa que varía entre 46 a 49% y temperatura entre 15 a 17°C . Desde las 21:00 h del día 28 a las 06:00 h del día 29, hay una disminución paulatina de los niveles de $MP_{2,5}$, acompañada de diversas oscilaciones de la humedad y temperatura. Entre las 19:00 a 23:00 h del día 29 ocurren múltiples alzas en las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ con una máxima de $293 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 21:28 h con 36% de humedad y 18°C . Posteriormente, los niveles de $MP_{2,5}$ disminuyen hasta las 02:00 h del día 30 de marzo, cuando ocurre un alza de $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Entre las 07:00 y 13:00 h del día 30 hay nuevamente múltiples alzas de $MP_{2,5}$, destacando: $259 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 07:28 h con 41% de humedad y 14°C ; $931 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:11 h con 40% de humedad y 16°C , máxima del periodo de monitoreo; y $399 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 9:52 h y $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 13:00 h con 42% de humedad y 16°C .

Fuera de CR09, las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ siguen un patrón similar al del interior, con un promedio de $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el periodo de monitoreo (Figura 4.16 a)). A diferencia del interior, la humedad y temperatura exterior muestran una amplia variación, con una humedad relativa que va del 15 al 95% y una temperatura que oscila entre 0 a 36°C . La primera alza significativa ocurre a las 08:28 h del día 29 con 93% de humedad y apenas 1°C . La siguiente alza ocurre entre las 20:55 h del mismo día con $470 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 59% de humedad y 7°C . La máxima del periodo de monitoreo se alcanza a las 07:00 h del día 30 con $908 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 88% de humedad y 1°C . Todos estos episodios de altas concentraciones están dados por un aumento de la humedad relativa y muy bajas temperaturas.

Para SR09 las concentraciones totales al interior promedian $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El monitoreo al interior inicia con un alza de $466 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 21:25 h con 49% de humedad y 16°C , esta corresponde a la máxima del período de monitoreo (Figura 4.16 b)). Luego durante las primeras horas del día 29, los niveles de $MP_{2,5}$ descienden gradualmente desde los $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, esto junto con un aumento de la humedad y disminución de la temperatura. A las 15:50 h del día 29 ocurre una leve alza donde se registran $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 60% de humedad y 15°C .

Posteriormente, los niveles de $MP_{2,5}$ vuelven a descender asociado a un aumento de la temperatura y disminución de la humedad. Durante la tarde del día 29 se mantienen entre 2 a $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a la media noche se alcanza una humedad del 63% y 14°C . En la madrugada del día 30, las concentraciones de $MP_{2,5}$ se mantienen similar a la tarde del día 29. A las 08:00 h del día 30 se registra una leve alza de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 64% de humedad y 11°C . Luego, las concentraciones descienden manteniéndose entre 2 a $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hacia el término del monitoreo a las 19:00 h la humedad disminuye a 46% y la temperatura a 20°C .

Al exterior de SR09, las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ promedian $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante la tarde del día 28 de marzo la máxima de $MP_{2,5}$ alcanza los $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 22:18 h con 59% de humedad y 8°C (Figura 4.16 b)). Durante la madrugada del día 29 de marzo, los niveles de $MP_{2,5}$ descienden, acompañado de aumento de humedad que alcanza el 93% y temperaturas del orden de 2°C . Los niveles más bajos del monitoreo se registran entre las 08:00 a 18:00 h del día 29, donde las concentraciones son de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, periodo en que la humedad alcanza el 42% y la humedad 12°C . Entre las 19:00 h del día 29 y media noche, los niveles de $MP_{2,5}$ aumentan, registrando $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 23:50 h con 66% de humedad y 6°C . Durante las primeras horas del día 30, se alcanza la máxima del periodo con $131 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 1:17 h con 68% de humedad y 5°C , alza que viene acompañada con diversos registros sobre los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A las 02:38 h ocurre una nueva alza de $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 67% de humedad y 5°C . A las 06:30 h del día 30, ocurre la última alza de $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 68% de humedad y 6°C , luego de esto los niveles descienden abruptamente hasta el término del monitoreo.

CR09 presenta concentraciones totales superiores a SR09, tanto en el interior como en el exterior. En ambos puntos, se observan variaciones abruptas de temperatura exterior que influyen en la humedad. Las máximas interiores de CR09 y SR09 superan a las exteriores. Estas altas concentraciones ocurren en episodios alternos durante el monitoreo: mañana y tarde. Mientras que las mínimas de $MP_{2,5}$ tienden a ocurrir en las madrugadas. Las variaciones de $MP_{2,5}$ exteriores pueden estar relacionadas con la ubicación de las viviendas. Aunque ambas están en valles fluviales, CR09 está en una zona más baja y menos ventilada que SR09.

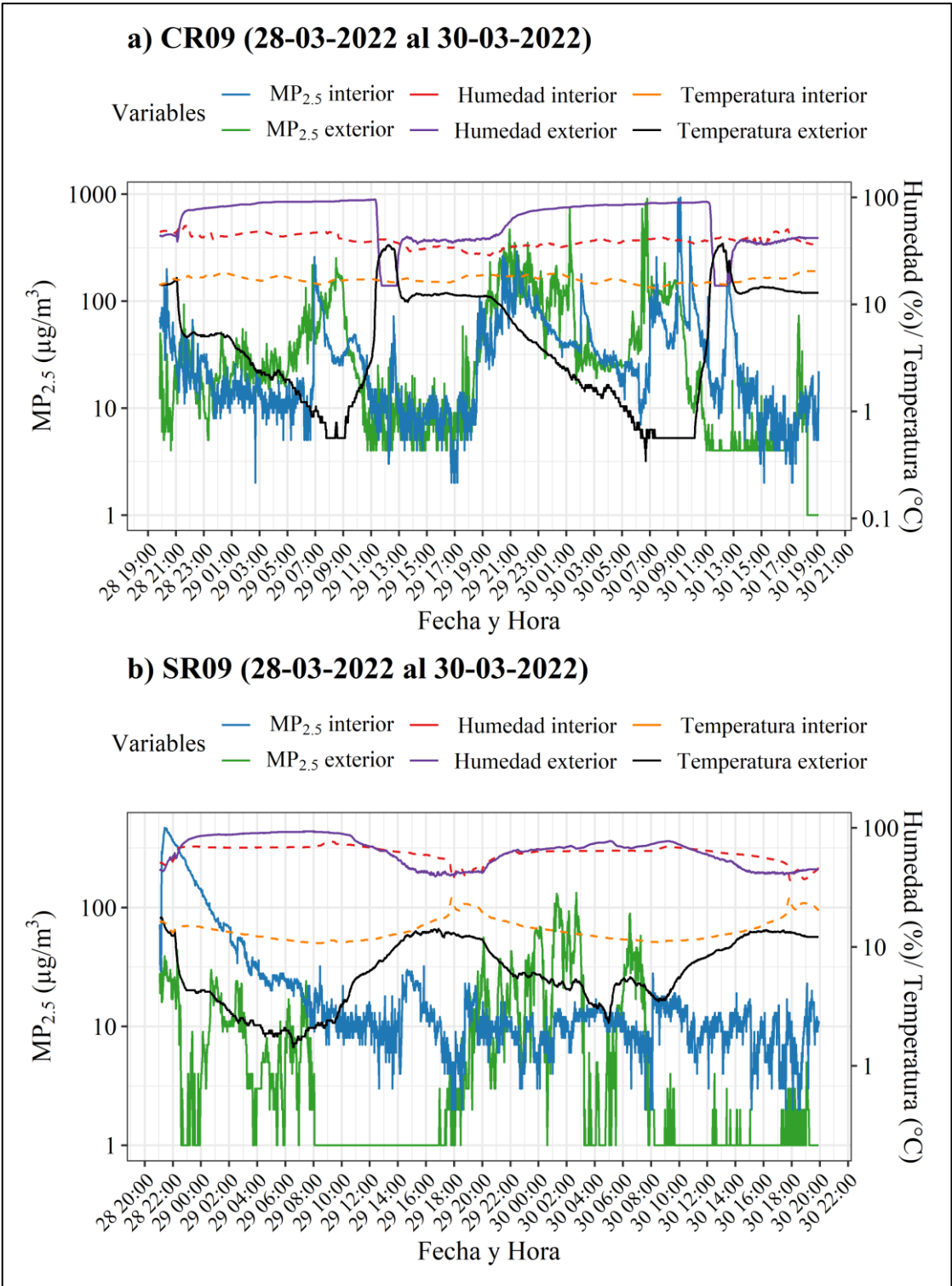


Figura 4.16. a) Serie de tiempo MP_{2.5}, temperatura y humedad en CR09. b) Serie de tiempo MP_{2.5}, temperatura y humedad en SR09. Elaboración propia.

4.2.2.1 Variabilidad y distribución de concentraciones de MP_{2,5} en el interior y exterior de las viviendas

La distribución y dispersión de los datos recopilados en cada vivienda se muestra en la Figura 4.17. En este gráfico, las viviendas están ordenadas de acuerdo con el momento en que fueron monitoreadas, lo que permite una fácil comparación y análisis de los datos en orden cronológico. En general, existe una mayor dispersión de datos al exterior que al interior de las viviendas, lo que sugiere mayor variabilidad en los valores exteriores. Se observa una cantidad significativa de valores atípicos en todos los puntos de muestreo, lo que correspondería a niveles elevados de MP_{2,5} (Figura 4.17).

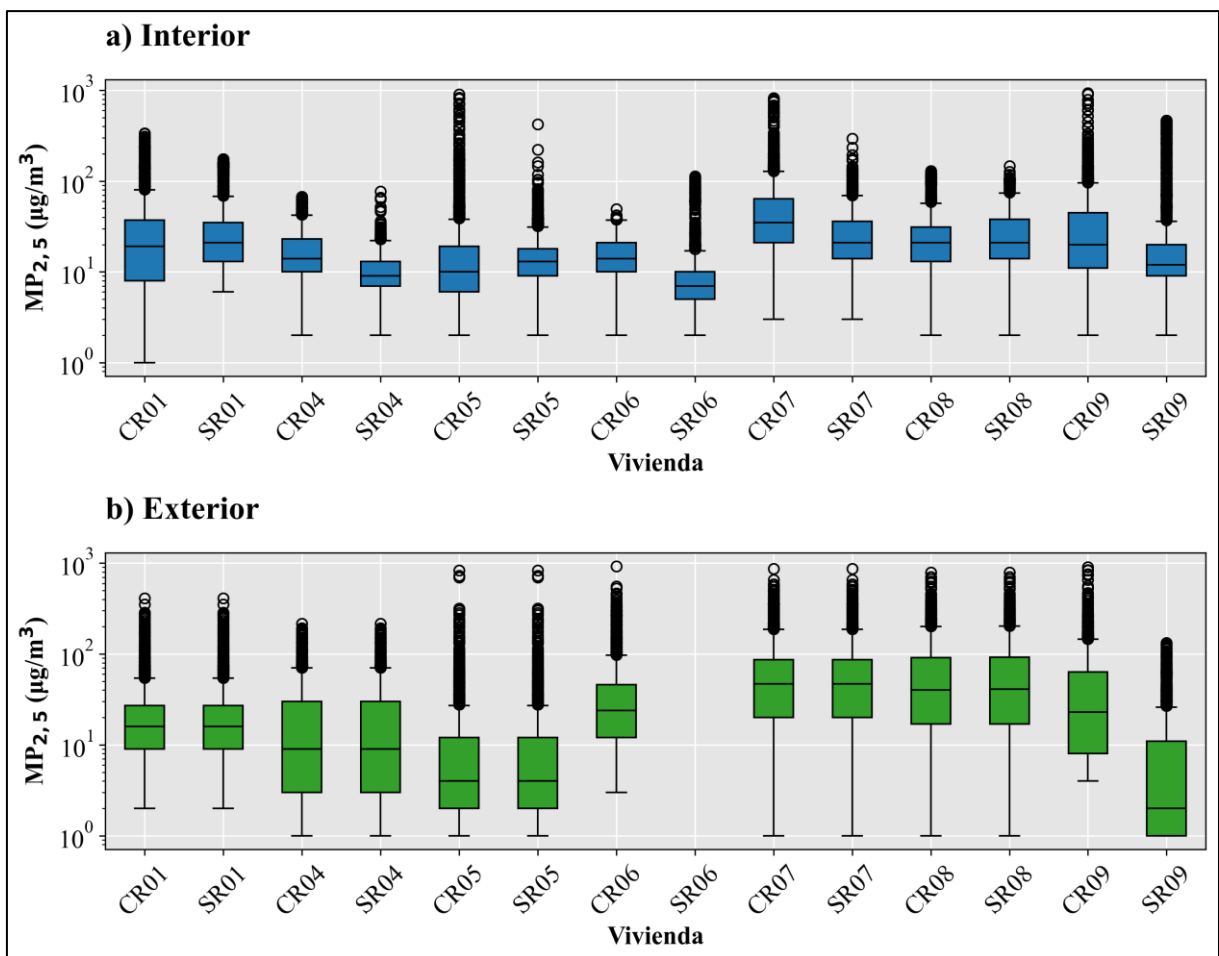


Figura 4.17. a) Boxplot de concentraciones totales de MP_{2,5} por minuto al interior de las viviendas. b) Boxplot de concentraciones totales de MP_{2,5} por minuto al exterior de las viviendas. Elaboración propia.

Dentro de las viviendas (Figura 17 a)), las medianas más bajas de concentraciones totales de MP_{2,5} se registraron en las viviendas SR06 y SR04 con 9 µg/m³ y 7 µg/m³, respectivamente, lo que indica que, en al menos la mitad de las mediciones, las concentraciones fueron menores en comparación con otras viviendas. Las mayores medianas de concentraciones totales de MP_{2,5}, se alcanzaron en: CR07 con 35 µg/m³, SR01, SR07, CR08 y SR08 todas con 21 µg/m³,

lo que quiere decir que al menos la mitad de las mediciones en estas viviendas fueron mayores en comparación con otras viviendas monitoreadas. En el exterior de las residencias (Figura 17 b)), las menores medianas se registraron en SR09 con $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CR05 y SR05 con $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En contraste, las mayores medianas se registraron en las viviendas CR07 y SR07 con $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SR08 con $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y CR08 con $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que corresponden a las últimas viviendas monitoreadas durante el mes de marzo. En general, a medida que avanzó el monitoreo, se observó un aumento gradual en las medianas de las concentraciones totales de $\text{MP}_{2,5}$, con la excepción de SR09, donde la mediana fue significativamente más baja, tanto dentro como fuera.

Considerando un total de 14 viviendas donde se tienen datos de $\text{MP}_{2,5}$ tanto al interior como el exterior, en el 42% de los casos, las medianas al exterior superan a las medianas del interior de $\text{MP}_{2,5}$ en las viviendas. Esto se refleja en la diferencia porcentual de las viviendas: CR06 (-42%), CR07 (-26%), SR07 (-55%), CR08 (-48%), SR08 (-49%) y CR09 (-13%), los valores negativos indican que la mediana es mayor al exterior. Por otro lado, en las viviendas CR01, SR01, CR04, CR05 y SR05, las medianas al interior son superiores, con diferencias del 19%, 31%, 56%, 150% y 225%, respectivamente. La vivienda SR09 presenta una diferencia notable de 500%, indicando una concentración significativamente mayor en el interior. La vivienda SR04 no muestra diferencia en las medianas entre el interior y el exterior. En SR06 no se obtuvieron muestras al exterior, por lo que no fue posible establecer esta comparación.

Al comparar entre pares de casas, se observa que en los pares CR01-SR01 y CR05-SR05, las medianas interiores son superiores a las exteriores. Esto sugiere que, en estos casos, las concentraciones tienden a ser más altas en el interior. En contraste, en los pares CR07-SR07 y CR08-SR08, las medianas exteriores son mayores, sugiriendo mayores concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ en el exterior. En el par CR04-SR04, las medianas exteriores son iguales a las interiores en SR04, mientras que en CR04 la mediana interior es 56% mayor, lo que sugiere una tendencia hacia concentraciones más altas en el interior de CR04. En el par CR06-SR06, la mediana exterior de CR06 es 42% superior a la interior. En el par CR09-SR09, CR09 presenta una mediana interior ligeramente inferior a la exterior con una diferencia del -13%, mientras que SR09 muestra una notable diferencia del 500%, lo que indica una tendencia notable hacia concentraciones más altas en el interior de SR09.

De las 14 viviendas monitoreadas, 7 de ellas poseen código CR, de estas últimas en el 57% de los casos las medianas de las concentraciones totales de $\text{MP}_{2,5}$ son mayores al exterior, mientras que en el restante 42% las medianas son mayores al interior. Las viviendas con código SR también son 7, excluyendo a las viviendas SR04 y SR06 (que no cuentan con diferencias

entre medianas), el 60% de las viviendas las medianas de concentraciones totales son mayores al interior y un 40% de las medianas son mayores al exterior.

En relación con los valores atípicos, estos representan mediciones de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ que son significativamente más altas o bajas en comparación con el rango intercuartil del resto de las mediciones en cada vivienda, en este caso todos los datos atípicos superan son superiores a las concentraciones totales registradas. Al interior de las viviendas, la cantidad de los valores atípicos se pueden ordenar de la siguiente manera: SR09 (368), SR01 (332), CR05 (332), SR06 (259), SR05 (256), CR09 (223), CR07 (196), SR07 (156), SR08 (139), CR08 (125), CR04 (114), SR04 (66) y CR06 (23). Mientras que al exterior de mayor a menor la cantidad de valores atípicos se puede ordenar así: SR09 (313), CR06 (310), CR09 (252), CR05 (250), CR01 (194), SR07 (172), CR04 (161), CR08 (158) y SR08 (155). Estos valores podrían indicar o representar episodios puntuales de contaminación elevada o variaciones inusuales en las concentraciones de $MP_{2,5}$. Aunque estos no reflejan la tendencia central de los datos, su presencia sugiere la posibilidad de eventos extremos que pueden ser relevantes para entender la variabilidad en las concentraciones totales de $MP_{2,5}$.

4.2.3. Concentraciones elementales de metales y metaloides en $MP_{2,5}$ dentro y fuera de las viviendas

El análisis del laboratorio permitió identificar 36 metales y metaloides: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Pd, Ag, In, Sn, Sb, Ba, La, Hg y Pb.

Es importante destacar, que los valores de concentraciones elementales (Anexo 4) que se presentan a continuación corresponden a registros puntuales de elementos obtenidos a partir del $MP_{2,5}$ acumulado durante las 48 h de monitoreo en cada punto.

4.2.3.1. Elementos mayores

A partir del análisis de laboratorio, se detectó la presencia de 14 elementos mayores, específicamente: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn y Fe, tanto en el interior como en el exterior de los puntos de muestreo. Se obtuvieron muestras de metales y metaloides en el interior de 17 viviendas, mientras que al exterior solo se lograron muestras en 10 viviendas. Los resultados fueron clasificados según las zonas prioritarias de muestreo: 1) Zona centro, 2) Zona Pie de Monte Cerro Divisadero, 3) Zona Pie de Monte Cerro Mackay, y 4) Zona de valle fluvial de los ríos Simpson y Coyhaique. En este último caso, se decidió agrupar ambas zonas fluviales debido a la baja cantidad de viviendas en cada una.

4.2.3.1.1. Elementos mayores al interior

La concentración total de elementos mayores, entendida como la suma de las concentraciones de todos los elementos identificados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, al interior de cada vivienda se puede clasificar en orden decreciente de la siguiente manera: CR09, SR03, SR08, CR07, SR07, CR08, SR02, SR05, CR05, CR01, CR06, SR06, CR02, SR09, SR01, CR04 y SR04 (Anexo 5). La proporción que estos elementos mayores representan en el total de $\text{MP}_{2,5}$ por m^3 varía entre un 1,5 % y un 15 % del material particulado fino monitoreado en cada vivienda (Anexo 6).

En la Figura 4.18 se aprecian las concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas CR01, CR04, SR01, SR04 y CR05, el sufijo INT hace referencia a que corresponden a muestras del interior, estas pertenecen a la Zona Centro de Coyhaique. En el eje x se encuentran los elementos mayores, y en el eje y se presentan las concentraciones de estos elementos en una escala logarítmica. Cada línea tiene un color y símbolo distintivo, lo que facilita la comparación entre las viviendas.

Las concentraciones de elementos mayores son variables y el análisis de centrará en describir cómo se comporta cada uno de los elementos (Figura 4.18). En el caso del Na, las concentraciones se pueden ordenar de manera decreciente: CR01-INT con $0,2833 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SR05-INT con $0,1922 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SR04-INT con $0,1623 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SR01 con $0,1265 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y CR04 con $0,0811 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Mg, presenta concentraciones menores en comparación al Na, la mayor concentración corresponde a SR04-INT con $0,0310 \mu\text{g}/\text{m}^3$, luego las viviendas CR04-INT, CR01-INT y SR01-INT presentan concentraciones de $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la menor concentración corresponde a SR05-INT con $0,166 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Al son mayores en comparación al Mg, y se pueden ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: SR05-INT con $0,161 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CR04-INT con $0,0647 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CR01-INT con $0,408 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SR04-INT con $0,0401 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y SR01-INT con $0,0295 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Si, es el elemento que presenta mayores concentraciones en general entre los elementos mayores para este grupo de viviendas, con concentraciones que van desde $0,3854 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR05-INT, $0,2226 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-INT, $0,1586 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-INT, $0,175 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR04-INT y $0,0618 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT. El P, es de los elementos con menores concentraciones, la máxima para este grupo de viviendas se registra en SR05-INT con $0,0177 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el resto de las viviendas están bajo los $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, registrando una mínima de $0,0041 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT. El S, muestra concentraciones levemente mayores que P, variando entre $0,0726 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT a $0,0389 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR04-INT, rango de valores similar al de Al. Para el Cl, se distingue un aumento respecto al S en las viviendas CR01-INT, SR01-INT y

SR05-INT con $0,1957 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,1572 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,1564 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, en SR04-INT se registran $0,0661 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en CR04-INT se alcanza los $0,0262 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

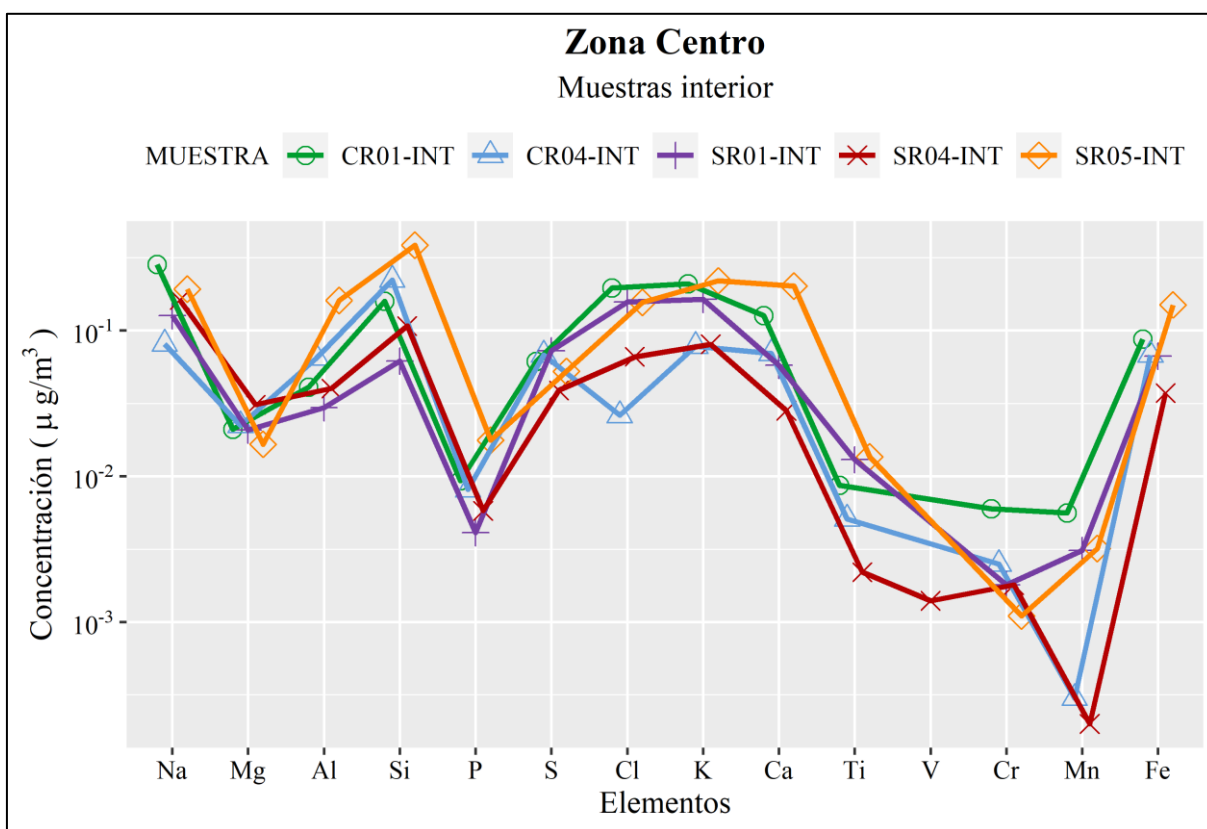


Figura 4.18. Concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas de la zona centro. Elaboración propia.

El K (Figura 4.18) presenta rangos de valores similares al Cl, con un ligero aumento para SR04 y CR04, las concentraciones en orden decreciente son: $0,2191 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR05-INT, $0,2089 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-INT, $0,1637 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT, $0,0806 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR04-INT y $0,0782 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-INT. Las concentraciones de Ca se mantienen similares al K en SR05-INT con $0,2017 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el resto de las viviendas los valores son menores con $0,1267 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-INT, $0,0695 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-INT, $0,0577 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT y $0,0282 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR04-INT. Para el Ti, los niveles son menores en comparación al Ca, la máxima se registra en SR05-INT con $0,0136 \mu\text{g}/\text{m}^3$, luego SR01-INT muestra una concentración similar con $0,0130 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en las viviendas CR01-INT, CR04-INT y SR04-INT las concentraciones son menores del orden de $0,087 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,051 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0022 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El V sólo se registró en la vivienda SR04-INT con $0,0014 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el Cr la mayor concentración se registra en CR01-INT con $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la menor ocurre en SR05-INT con $0,0011 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este grupo de viviendas, el Mn alcanza como máxima concentración $0,0056 \mu\text{g}/\text{m}^3$

en CR01-INT, luego $0,0032 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR05-INT y SR01-INT, en CR04-INT y SR04-INT se registra el menor valor de todos los elementos mayores para este grupo de viviendas con $0,0003 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0002 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respetivamente. Las concentraciones de Fe se pueden ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: $0,1502 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR05-INT, $0,0875 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-INT, $0,068 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-INT, $0,0667 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT y $0,0372 \mu\text{g}/\text{m}^3$ SR04-INT.

En la Figura 4.18 se evidencia claramente un patrón de altas concentraciones de elementos mayores como Na, Al, Si, K, Ca y Fe y bajas concentraciones de Mg, P, Ti, V, Cr y Mn. Según la mediana de los elementos mayores en la Zona Centro, estos pueden ordenarse de la siguiente manera: K ($0,1637 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Na ($0,1623 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Si ($0,1586 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cl ($0,1564 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca ($0,0695 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe ($0,068 \mu\text{g}/\text{m}^3$), S ($0,0614 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Al ($0,0408 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mg ($0,021 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ti ($0,0087 \mu\text{g}/\text{m}^3$), P ($0,0081 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn ($0,0031 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cr ($0,0018 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y V (Anexo 7).

En la Figura 4.19 se señalan las concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas CR06, CR07, SR03 y SR07, pertenecientes a la Zona del Pie de Monte del Co. Divisadero. Cada línea tiene un color y símbolo que diferencia a las viviendas entre sí.

Las concentraciones de elementos mayores presentan variaciones similares a las de la Zona Centro (Figura 4.19). Para el Na, las concentraciones se pueden ordenar de manera decreciente: $0,4583 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT, $0,2838 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT, $0,1828 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT y $0,1711 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT. El Mg, presenta concentraciones menores en comparación al Na, variando entre $0,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT a $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT. Para el Al, las concentraciones son mayores en comparación al Mg, y se pueden ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: $0,2745 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,2634 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,2504 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0948 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Si, nuevamente presenta mayores concentraciones entre los elementos mayores de este grupo de viviendas, específicamente $0,7962 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT, $0,772 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT, $0,4598 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT y $0,2646 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT. En el caso del P las concentraciones son similares a las de Mg, con una máxima de $0,0173 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT y una mínima de $0,0041 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT. El S, muestra concentraciones similares al Al, variando entre $0,2713 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT a $0,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT. Las concentraciones de Cl se pueden ordenar de mayor a menor, de la siguiente manera: $0,7652 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,2041 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,1648 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,1064 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

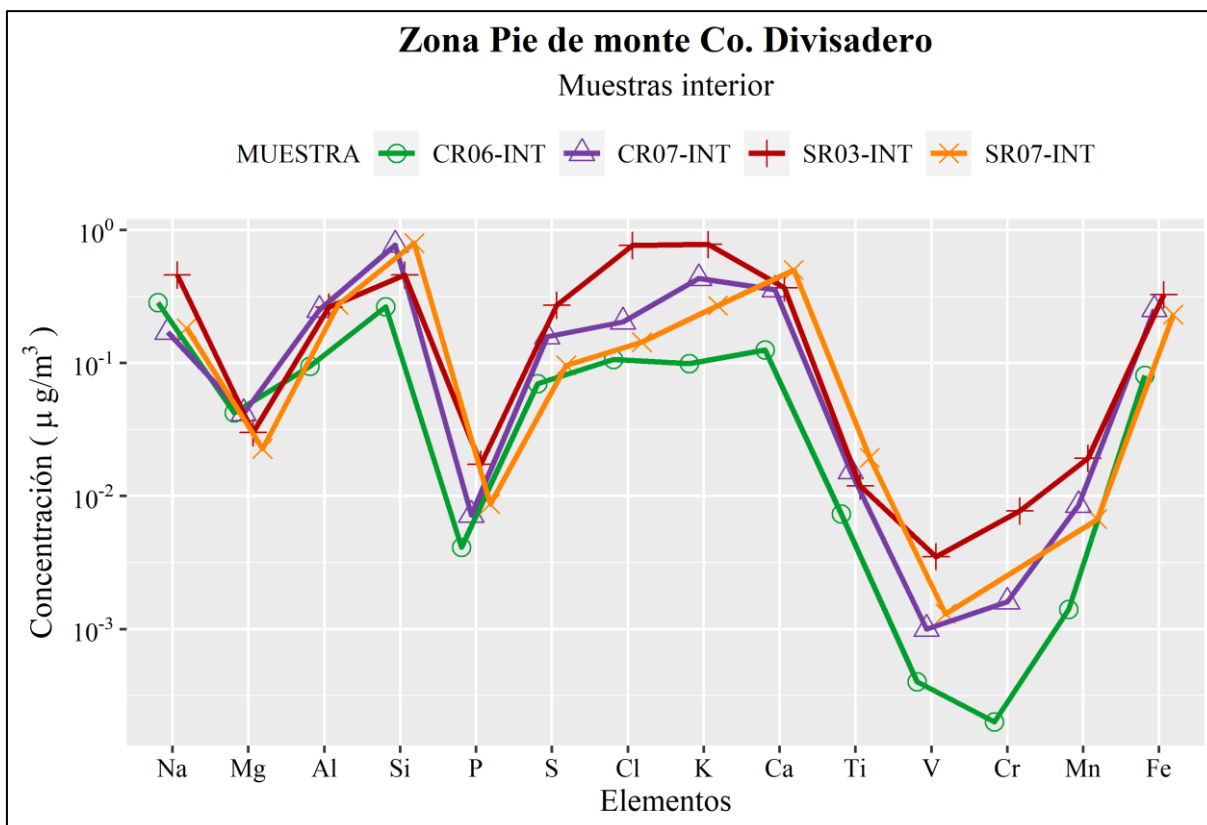


Figura 4.19. Concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Divisadero. Elaboración propia.

Al igual que en la Zona Centro, en esta zona el K (Figura 4.19) presenta rangos de valores similares al Cl, estas van desde 0,7786 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ al 0,0992 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de Ca son ligeramente menores al K, en orden decreciente son: 0,5016 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT, 0,3675 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT, 0,3549 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT y 0,1252 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT. Los niveles de Ti son bajos en comparación al Ca y similares al P y Mg, la máxima se registra en SR07-INT con 0,0194 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una mínima 0,0073 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT. Los mayores niveles de V se registraron en SR03-INT y SR07-INT con 0,0035 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0013 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Para el Cr la mayor concentración se registra en SR03-INT con 0,0077 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la menor ocurre en CR06-INT con 0,0002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Mn alcanza cómo máxima concentración 0,0192 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT, luego 0,0085 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT, 0,0067 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT y 0,0014 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT. Las concentraciones de Fe se pueden ordenar de la siguiente manera 0,3259 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT, 0,2526 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT, 0,2311 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT y 0,0806 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT.

Los niveles de elementos mayores presentes en el $\text{MP}_{2,5}$ al interior de las viviendas de la Zona del Pie de Monte del Co. Divisadero, siguen un patrón similar al visto en las viviendas de la Zona Centro con altas concentraciones de Na, Al, Si, K, Ca y Fe y bajas concentraciones de

Mg, P, Ti, V, Cr y Mn, elementos como S y Cl presentan niveles variables (Figura 4.19). Según la mediana los elementos mayores en esta zona pueden ordenarse de la siguiente manera: Si ($0,6159 \mu\text{g}/\text{m}^3$), K ($0,3741 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca ($0,3612 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Al ($0,2569 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe ($0,2418 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cl ($0,1844 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Na ($0,1769 \mu\text{g}/\text{m}^3$), S ($0,1267 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mg ($0,0263 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ti ($0,0136 \mu\text{g}/\text{m}^3$), P ($0,0102 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn ($0,0076 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cr ($0,0013 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y V ($0,0011 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Anexo 7).

Las concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas CR02, CR08, SR02 y SR08, de la Zona Pie de monte del Co. Mackay se aprecian en la Figura 4.20. Cada línea tiene un color y símbolo que diferencia a las viviendas.

El Na (Figura 4.20) se identificó en las cuatro viviendas, registrando su máxima concentración en CR02-INT con $0,2652 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la menor se obtuvo en CR08-INT con $0,1145 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Mg presenta concentraciones que oscilan entre $0,0806 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,0119 \mu\text{g}/\text{m}^3$, niveles menores en comparación al Na. El Al, alcanza su mayor concentración en SR08-INT con $0,1516 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de CR08-INT con $0,1267 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CR02-INT $0,069 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y SR02-INT con $0,0484 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Si, presenta altas concentraciones en CR08-INT y SR08-INT con $0,5611 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,4894 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, mientras que en CR02-INT alcanza $0,0953 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y SR02-INT registra $0,0894 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El P presenta concentraciones menores en comparación al Si, que varían entre $0,0516 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,00053 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el S las concentraciones aumentan ligeramente en comparación al P, alcanzando una máxima de $0,2119 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT y una mínima de $0,0401 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT. Las concentraciones de Cl pueden ordenarse de mayor a menor, de la siguiente manera: $0,3627 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-INT, $0,3017 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT, $0,1286 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-INT y $0,1167 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT.

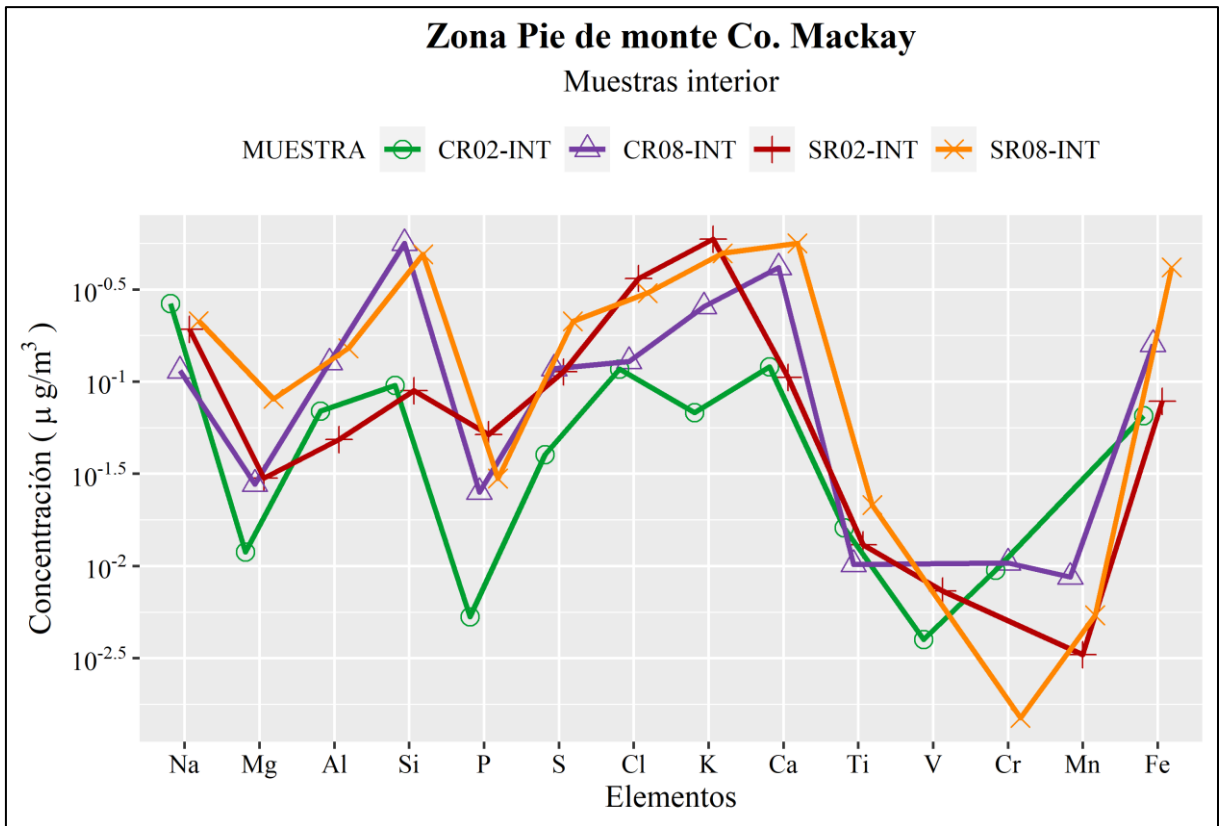


Figura 4.20. Concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Mackay. Elaboración propia.

El K (Figura 4.20) muestra concentraciones del orden de $0,5916 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,4959 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-INT y SR08-INT, respectivamente, en CR08-INT muestra $0,2551 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la menor concentración ocurre en CR02-INT con $0,0679 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el Ca se distinguen rangos de valores similares al K que van desde los $0,562 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,152 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Ti muestra bajos niveles, similar a lo visto en las zonas anteriores, sus concentraciones se pueden ordenar de manera decreciente como: $0,0214 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT, $0,0161 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT, $0,013 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-INT y $0,0102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-INT. El V sólo se registró en SR02-INT con $0,0073 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y CR02-INT con $0,004 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Cr se identificó en CR08-INT, CR02-INT y SR08-INT con $0,0104 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,0095 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0015 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Para el Mn las concentraciones identificadas van desde $0,0087 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,0033 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este elemento no se registró en CR02-INT. El Fe muestra un aumento respecto al Mn, con concentraciones que van desde $0,4158 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,0652 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A diferencia de las zonas anteriormente descritas, en esta las concentraciones de elementos mayores en el $\text{MP}_{2,5}$ muestran mayor variación entre las viviendas, sin embargo, se distingue un patrón de mayores concentraciones de elementos como Na, Si, K y Ca y menores de Mg, P, Ti, V, Cr y Mn (Figura 4.20). A partir de las medianas de los elementos mayores en esta zona, estos elementos pueden ordenarse de la siguiente manera: K ($0,3755 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Si

(0,2923 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca (0,26755 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cl (0,2151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Na (0,2024 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe (0,1187 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), S (0,1150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Al (0,09785 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mg (0,0289 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), P (0,0274 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ti (0,0145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cr (0,0055 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn (0,0043 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y V (0,002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Anexo 7).

En la Figura 4.21 se presentan las concentraciones de elementos mayores registradas al interior de las viviendas CR05 y SR09 pertenecientes a la Zona del Valle fluvial del río Coyhaique, CR09 perteneciente a la Zona de Valle fluvial del río Simpson y SR06 localizada en las proximidades del Co. Cinchao, se incluyó en estas zonas debido a su cercanía a ellas. Cada línea tiene un color y símbolo que diferencia a las viviendas.

A simple vista se aprecia que la vivienda CR09-INT presenta las mayores concentraciones en la mayoría de los elementos en estudio (Figura 4.21). Para el Na, las concentraciones oscilan entre 0,2611 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-INT a 0,0739 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-INT. El Mg presenta menores concentraciones con una máxima de 0,1448 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una mínima de 0,016 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Al registra 1,674 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-INT, 0,0739 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-INT, 0,0617 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-INT, 0,0613 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-INT. Para el Si, se registran valores ligeramente más altos que el Al, presentando el valor máximo entre el grupo de elementos de 3,908 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-INT, el valor mínimo ocurre en SR09-INT con 0,1557 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de P son mucho menores en comparación a los elementos ya descritos y varían entre 0,0909 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El S muestra valores del orden de 0,2311 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-INT, 0,0874 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0746 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-INT y 0,0613 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-INT. El Cl presenta valores ligeramente más altos que el S que oscilan entre 0,422 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

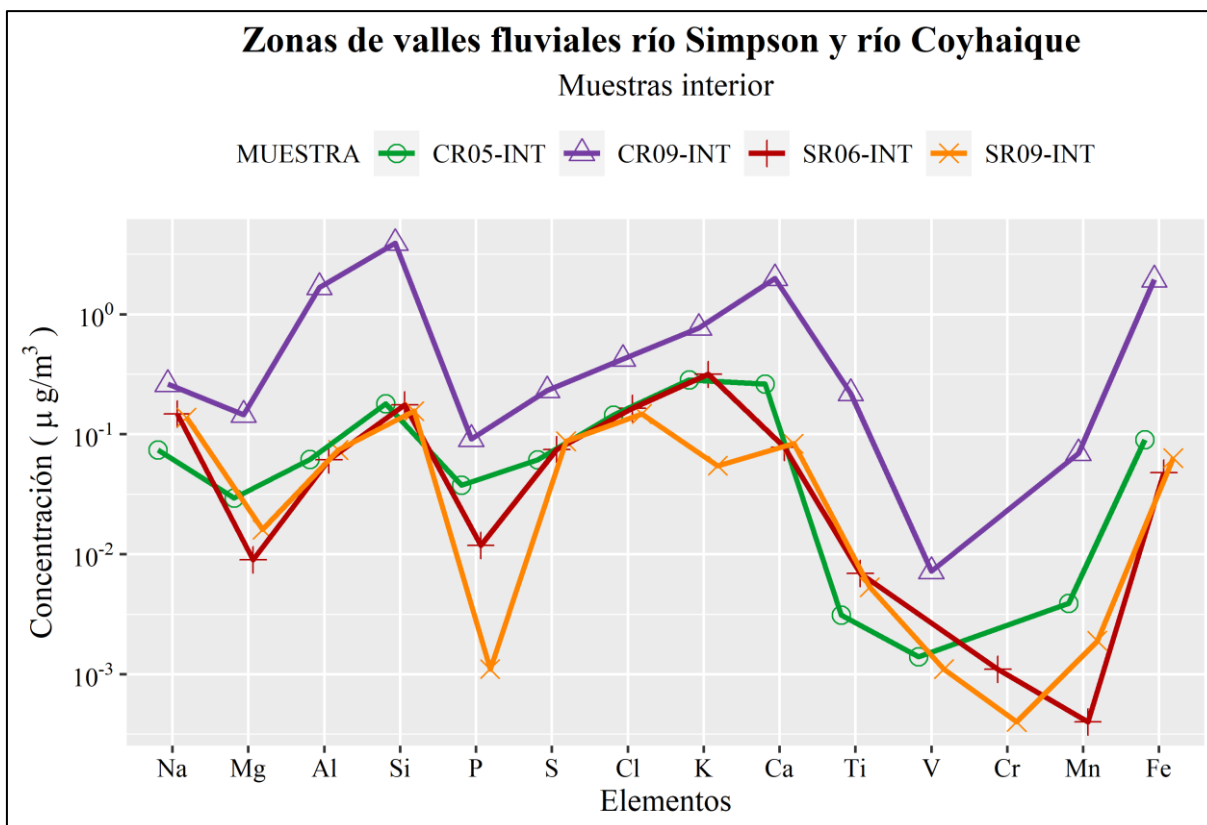


Figura 4.21. Concentraciones de elementos mayores al interior de las viviendas de las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique. Elaboración propia.

Las concentraciones de K se pueden ordenar de manera decreciente: 0,7668 µg/m³, 0,3151 µg/m³, 0,2835 µg/m³ y 0,0546 µg/m³. El Ca alcanza una máxima de 1,985 µg/m³ en CR09-INT, mientras que en resto de las viviendas muestra concentraciones similares al K con 0,2618 µg/m³, 0,0834 µg/m³ y 0,0775 µg/m³. Los niveles de Ti, se pueden ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: 0,2185 µg/m³, 0,0069 µg/m³, 0,0053 µg/m³ y 0,0031 µg/m³. El V muestra concentraciones menores en comparación al Ti, con una máxima de 0,0072 µg/m³ y una mínima 0,0011 µg/m³. El Cr es el elemento que presenta menores concentraciones en el grupo, y sólo se registró en SR06-INT con 0,0011 µg/m³ y SR09-INT con 0,0004 µg/m³. El Mn varía entre 0,0691 µg/m³ a 0,0004 µg/m³. Las concentraciones de Fe registran una máxima de 1,939 µg/m³ en CR09-INT, seguido de 0,0901 µg/m³ en CR05-INT, 0,0632 µg/m³ en SR09-INT y 0,0476 µg/m³ en SR06-INT.

Las concentraciones de elementos mayores en las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique pueden ordenarse de la siguiente manera según su mediana: K (0,2993 µg/m³), Si (0,177 µg/m³), Ca (0,173 µg/m³), Cl (0,156 µg/m³), Na (0,142 µg/m³), S (0,081 µg/m³), Fe (0,077 µg/m³), Al (0,068 µg/m³), P (0,025 µg/m³), Mg (0,023 µg/m³), Ti (0,006 µg/m³), Mn (0,003 µg/m³), V (0,001 µg/m³) y Cr (0,0002 µg/m³) (Anexo 7).

Las concentraciones elementales al interior de las viviendas permiten identificar que, en las zonas de pie de monte, como Co. Divisadero y Co. Mackay, se observan mayores concentraciones de elementos como el Si, K y Ca en comparación con el centro de Coyhaique y las zonas de valles fluviales. En el centro de Coyhaique, los elementos predominantes según sus concentraciones son el K, Na, Si y Cl. Por otro lado, en las zonas de valles fluviales, como los ríos Simpson y Coyhaique, predominan el K, Si, Ca y Cl. La vivienda SR06 en estricto rigor no se encuentra dentro de ninguna zona prioritaria de muestreo, a pesar de esto mostró altos niveles de K, Si, Cl y Na, muy similar a las zonas de pie de monte.

4.2.3.1.2. Elementos mayores al exterior

La concentración total de elementos mayores al exterior de cada vivienda se puede clasificar de mayor a menor de la siguiente manera: SR07, CR01, CR08, CR09, CR06, SR09, SR02, CR05, CR04 y SR06 (Anexo 5). La proporción que estos elementos mayores representan en el total de $MP_{2,5}$ por m^3 varía entre un 1,4 % y un 8,3 % del material particulado fino monitoreado en cada vivienda (Anexo 6).

En la Figura 4.22 se detallan las concentraciones de elementos mayores al exterior de CR01 y CR04, ambas viviendas se encuentran en la zona centro de la ciudad. En la mayoría de los elementos CR01 muestra mayores concentraciones que CR04. El Na alcanza $0,2 \mu g/m^3$ en CR01-EXT y $0,1371 \mu g/m^3$ en CR04-EXT. El Mg es bajo en ambos puntos con $0,0059 \mu g/m^3$ en CR01-EXT y $0,0035 \mu g/m^3$ en CR04-EXT. El Al se presenta en niveles similares al Na, con $0,1838 \mu g/m^3$ en CR01-EXT y $0,1055 \mu g/m^3$ en CR04-EXT. El Si muestra la concentración más alta de elementos mayores en CR01-EXT, con un valor de $0,543 \mu g/m^3$, mientras que en CR04-EXT alcanza los $0,2365 \mu g/m^3$. Sólo en CR01-EXT se registra P con $0,0032 \mu g/m^3$. El S se comporta similar al Al, con concentraciones del orden de $0,1175 \mu g/m^3$ en CR01-EXT y $0,0568 \mu g/m^3$ en CR04-EXT. El Cl presenta una gran variación entre las viviendas de esta zona con $0,5307 \mu g/m^3$ en CR01-EXT y apenas $0,035 \mu g/m^3$ en CR04-EXT.

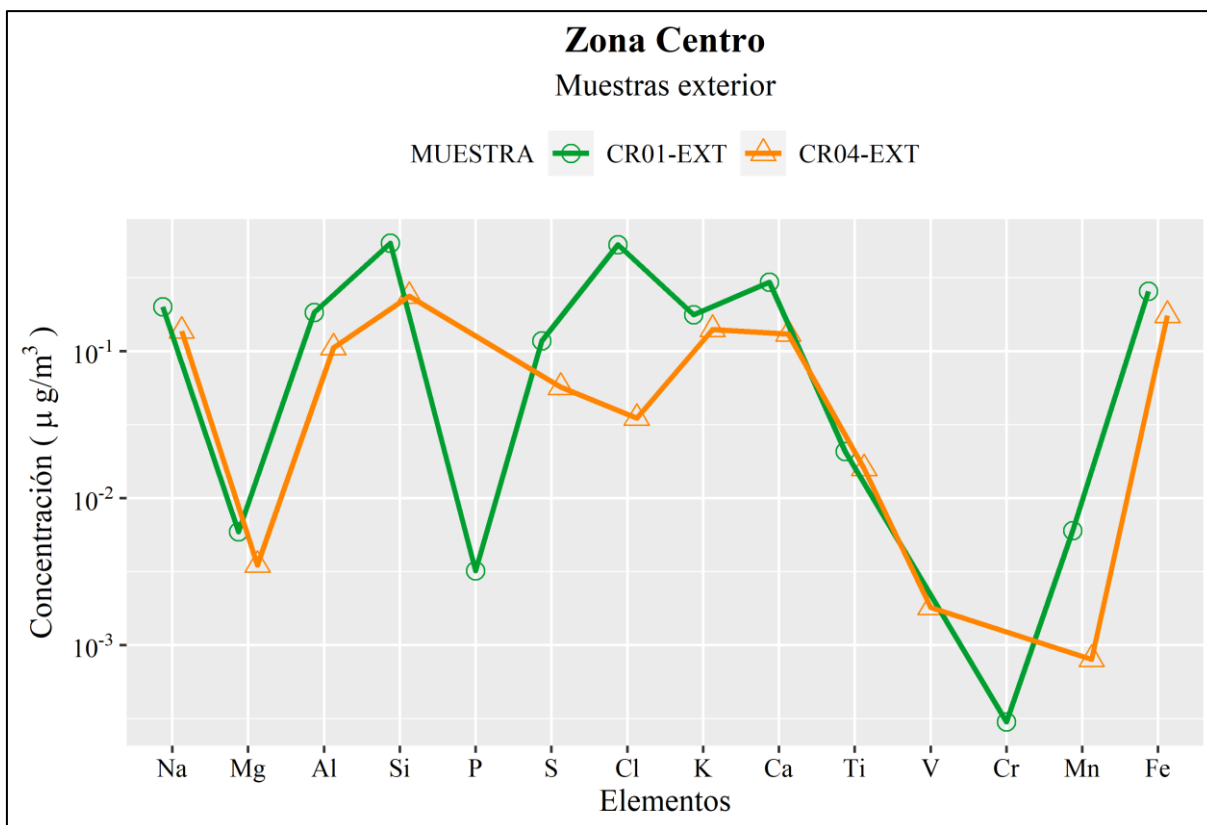


Figura 4.22. Concentraciones de elementos mayores al exterior de las viviendas de la zona centro. Elaboración propia.

El K presenta concentraciones similares a las de Na y Al con $0,177 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT y $0,1405 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT. Para el Ca se registra $0,2952 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT, constituyendo el tercer elemento con mayor concentración en dicha vivienda, y $0,1305 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT. El Ti presenta niveles muy similares en ambos puntos con $0,0208 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT y $0,0159 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT. Sólo en CR04-EXT se registró V con $0,0018 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y sólo en CR01-EXT se identificó Cr con $0,0003 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el Mn, se registraron concentraciones de $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT y $0,0008 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT. El Fe alcanza altos niveles en ambas viviendas, con $0,255 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT y $0,1751 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT, en este último constituye el segundo elemento con mayor concentración de la vivienda.

En este caso, como sólo se logró tomar muestras al exterior de dos viviendas en esta zona, la mediana de cada elemento corresponde en realidad el promedio de los datos obtenidos. Así, según los promedios de concentraciones, los elementos se pueden ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: Si ($0,38975 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cl ($0,28285 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe ($0,21285 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca ($0,21285 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Na ($0,16855 \mu\text{g}/\text{m}^3$), K ($0,15875 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Al ($0,14465 \mu\text{g}/\text{m}^3$), S ($0,08715 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ti ($0,01835 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mg ($0,0047 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn ($0,0034 \mu\text{g}/\text{m}^3$), P ($0,0016 \mu\text{g}/\text{m}^3$), V ($0,0009 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Cr ($0,00015 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Para la zona de Pie de monte del Co. Divisadero se pudo obtener datos al exterior de CR06 y SR07 (Figura 4.23). En todos los elementos mayores SR07 presenta mayores concentraciones que CR06. El Na se encuentra en concentraciones similares en ambas viviendas con $0,2474 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y $0,211 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. Las concentraciones de Mg en esta zona presentan mayor variación en comparación al Na, con $0,0619 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y $0,0047 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. El Al presenta aún más variación que el Mg con $0,5227 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y $0,1089 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. El Si para este par de viviendas se observó en SR07-EXT, con un valor de $1,689 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en CR06-EXT se registró una concentración de $0,03106 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El P presenta bajas concentraciones en ambas viviendas con $0,0138 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y $0,007 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. Para el S se identificaron niveles del orden de $0,1744 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0808 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Cl muestra niveles ligeramente más altos que el S, con $0,2635 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,2095 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

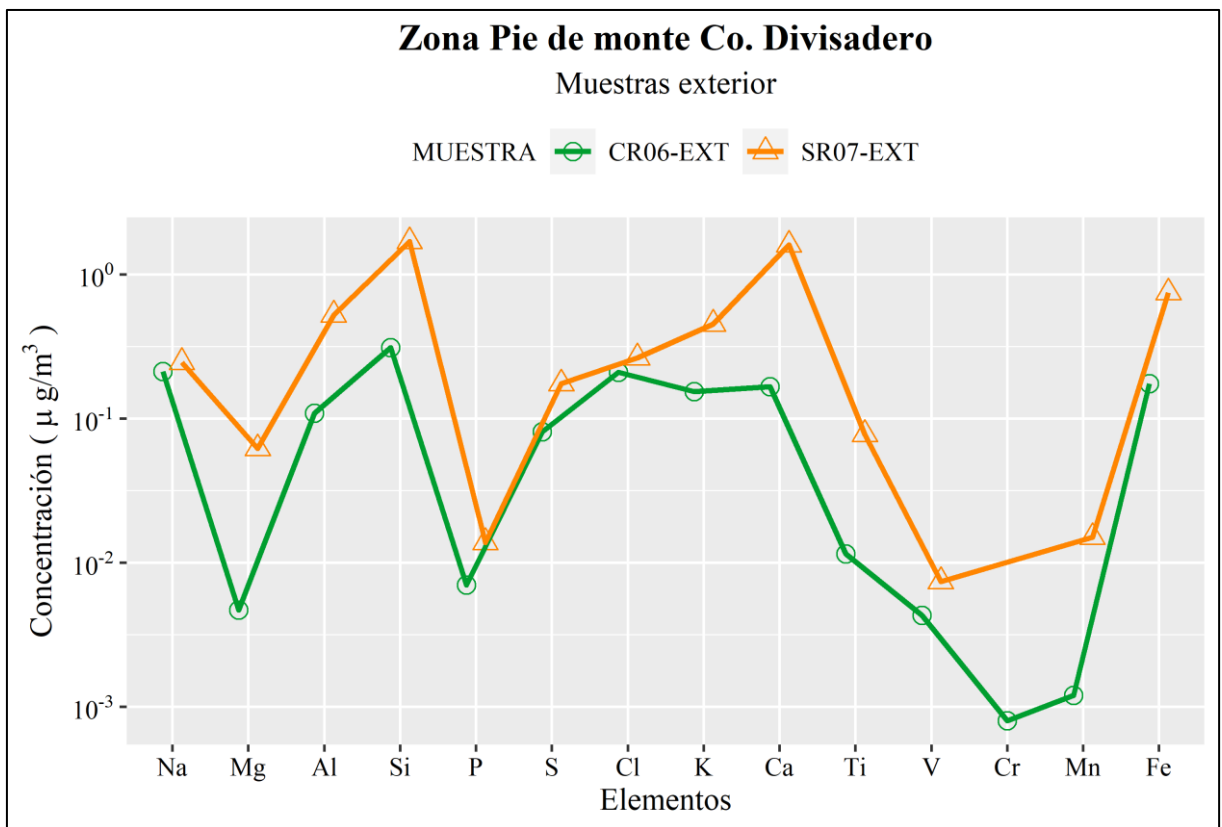


Figura 4.23. Concentraciones de elementos mayores al exterior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Divisadero. Elaboración propia.

El K presenta concentraciones de $0,4519 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y $0,1531 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. Las concentraciones de Ca son similares a las de Si, con $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y $0,1659 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. El Ti varía entre $0,0776 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0115 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de V son

bajos en ambas viviendas con 0,0074 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y 0,0043 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. El Cr solo se identificó en CR06-EXT con 0,0008 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el Mn se identificaron concentraciones de 0,015 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0012 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Fe varía entre 0,7462 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07 y 0,1746 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Los promedios de concentraciones de los elementos mayores en esta zona se pueden ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: Si (1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca (0,883 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe (0,460 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Al (0,316 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), K (0,303 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cl (0,237 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Na (0,228 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), S (0,128 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ti (0,045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mg (0,033 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), P (0,0010 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn (0,008 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), V (0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Cr (0,0004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En la zona pie de monte del Co. Mackay sólo se pudo obtener datos de elementos mayores en las viviendas CR08 y SR02 (Figura 4.24). El Na muestra concentraciones de 0,2416 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT y 0,0877 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT. El Mg varía entre 0,0663 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0243 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de Al son ligeramente mayores al Mg, con 0,1859 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0861 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El elemento con mayor concentración corresponde al Si registrado en CR08-EXT con 0,5943 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de P son bajos en ambas viviendas con 0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT y 0,003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT. El S se comporta de manera similar en ambas viviendas con concentraciones de 0,0762 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0635 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de Cl varían entre 0,2475 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT y 0,1415 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT.

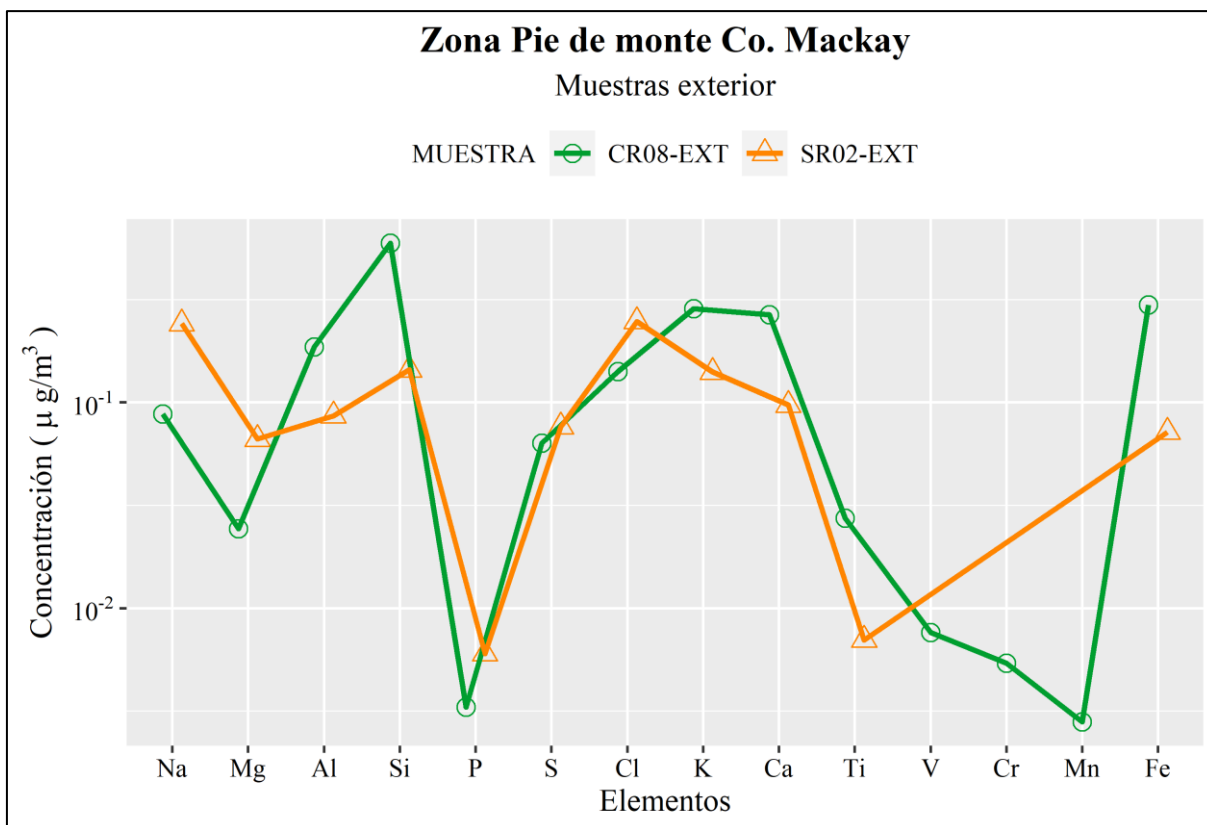


Figura 4.24. Concentraciones de elementos mayores al exterior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Mackay. Elaboración propia.

Las concentraciones de K son similares a las de Cl, variando entre $0,2854 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT y $0,1404 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT. El Ca muestra niveles ligeramente más bajos que el K, con $0,2666 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0971 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Ti son bajos en ambos puntos de muestreo, con $0,0274 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,007 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El V, Cr y Mn sólo se identificó en CR08-EXT con $0,0076 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,0054 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0028 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Fe presenta concentraciones de $0,2978 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT y $0,0718 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT.

Los elementos mayores identificados en la zona de pie de Monte de Co. Mackay, se pueden ordenar según su promedio de la siguiente manera: Si ($0,3692 \mu\text{g}/\text{m}^3$), K ($0,2129 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cl ($0,1945 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe ($0,1848 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca ($0,18185 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Na ($0,16465 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Al ($0,136 \mu\text{g}/\text{m}^3$), S ($0,0453 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mg ($0,0453 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ti ($0,0172 \mu\text{g}/\text{m}^3$), P ($0,00465 \mu\text{g}/\text{m}^3$), V ($0,0038 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cr ($0,0027 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Mn ($0,0014 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Anexo 7).

En la Figura 4.25 se exponen las concentraciones de elementos mayores al exterior de las viviendas CR05 y SR09, pertenecientes a la zona del valle fluvial del río Coyhaique, CR09, ubicada en el valle fluvial del río Simpson, y SR06 localiza al exterior de las zonas prioritarias de muestreo. El Na alcanza su máxima concentración en SR09-EXT con $0,3374 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mínima en CR09-EXT con $0,0877 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Mg presenta concentraciones similares en SR06-

EXT, CR05-EXT y CR09-EXT con $0,0131 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,0084 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0065 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, la máxima se registra en SR09-EXT con $0,0298 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de Al se pueden ordenar de manera decreciente de la siguiente manera: $0,2153 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-EXT, $0,0792 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-EXT, $0,057 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-EXT y $0,0215 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-EXT. La máxima concentración de Si se registra en CR09-EXT con $0,5127 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de SR09-EXT con $0,2011 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CR05-EXT con $0,1047 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y SR06-EXT con $0,0522 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones P varían entre $0,0089 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,0002 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de S en SR06-EXT y CR05-EXT son similares con $0,0989 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0659 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, en CR09-EXT se registró $0,0507 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en SR09-EXT se alcanzó $0,0273 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de Cl son similares en el grupo de viviendas con niveles que varían entre $0,1921 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,117 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

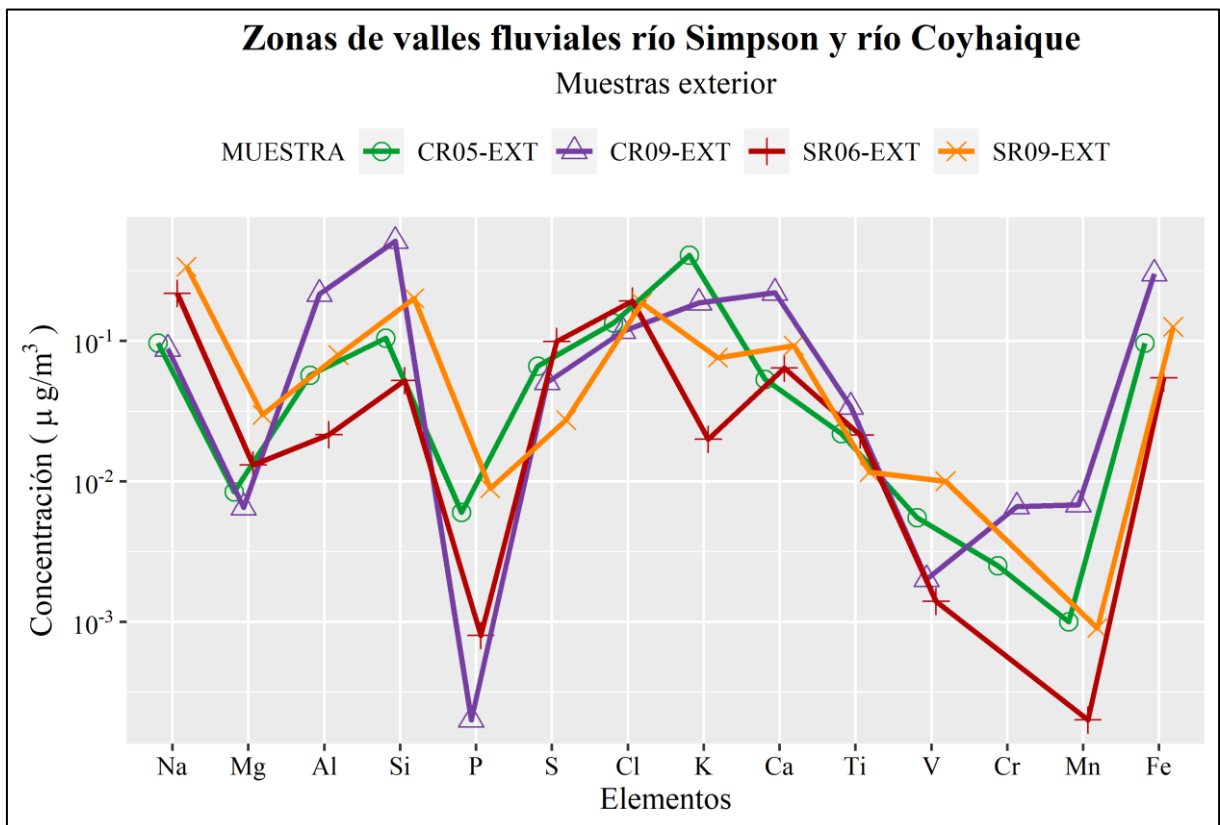


Figura 4.25. Concentraciones de elementos mayores al exterior de las viviendas de las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique. Elaboración propia.

Para el K destaca la concentración registrada en CR05-EXT con $0,4071 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en CR09-EXT y SR09-EXT los valores registrados son similares con $0,1865 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0759 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, SR06-EXT registra $0,0199 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Ca varían entre $0,2199 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-EXT a $0,0531 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-EXT. Las mayores concentraciones de Ti se identificaron en CR09-EXT con $0,0339 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de CR05-EXT con $0,0219 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SR06-EXT con $0,0214 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y SR09-EXT con $0,0116 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El V muestra niveles que varían

entre 0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Cr se registró en CR09-EXT y CR05-EXT con 0,0066 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0025 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. La máxima concentración de Mn registra 0,0068 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-EXT, seguido de CR05-EXT con 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que SR09-EXT registra 0,0009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Fe se pueden ordenar de la siguiente manera: 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-EXT, 0,1259 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-EXT y 0,0967 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-EXT y 0,0545 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-EXT.

La mediana de los elementos mayores presentes en las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique, se puede ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: Cl (0,160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Na (0,157 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Si (0,153 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), K (0,131 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe (0,111 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca (0,078 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Al (0,068 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), S (0,058 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ti (0,022 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mg (0,011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), V (0,004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), P (0,003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cr y Mn (0,0011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

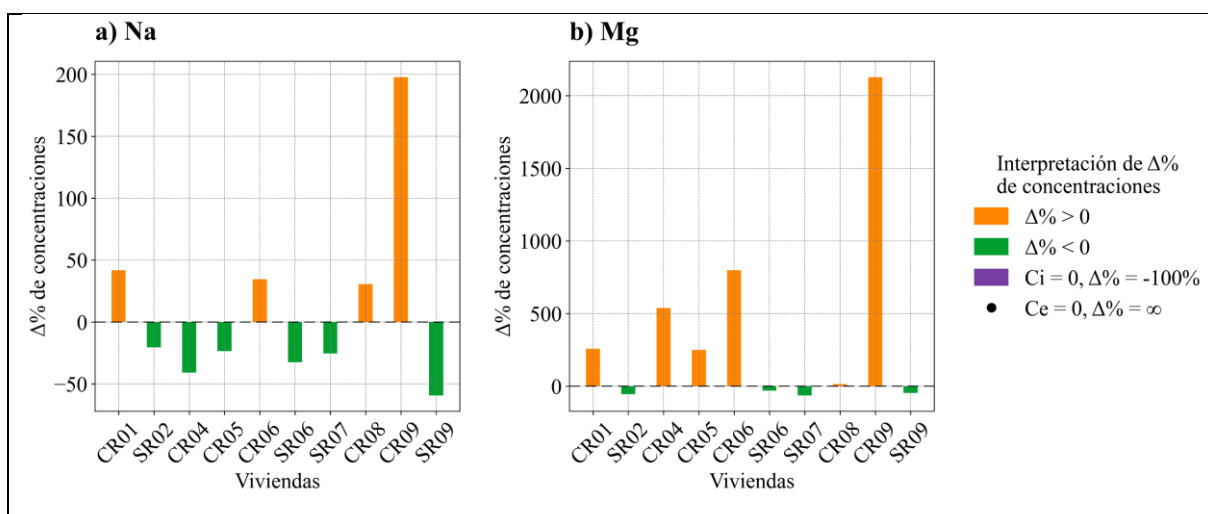
4.2.3.1.3. Análisis de Elementos Mayores: Interior y Exterior

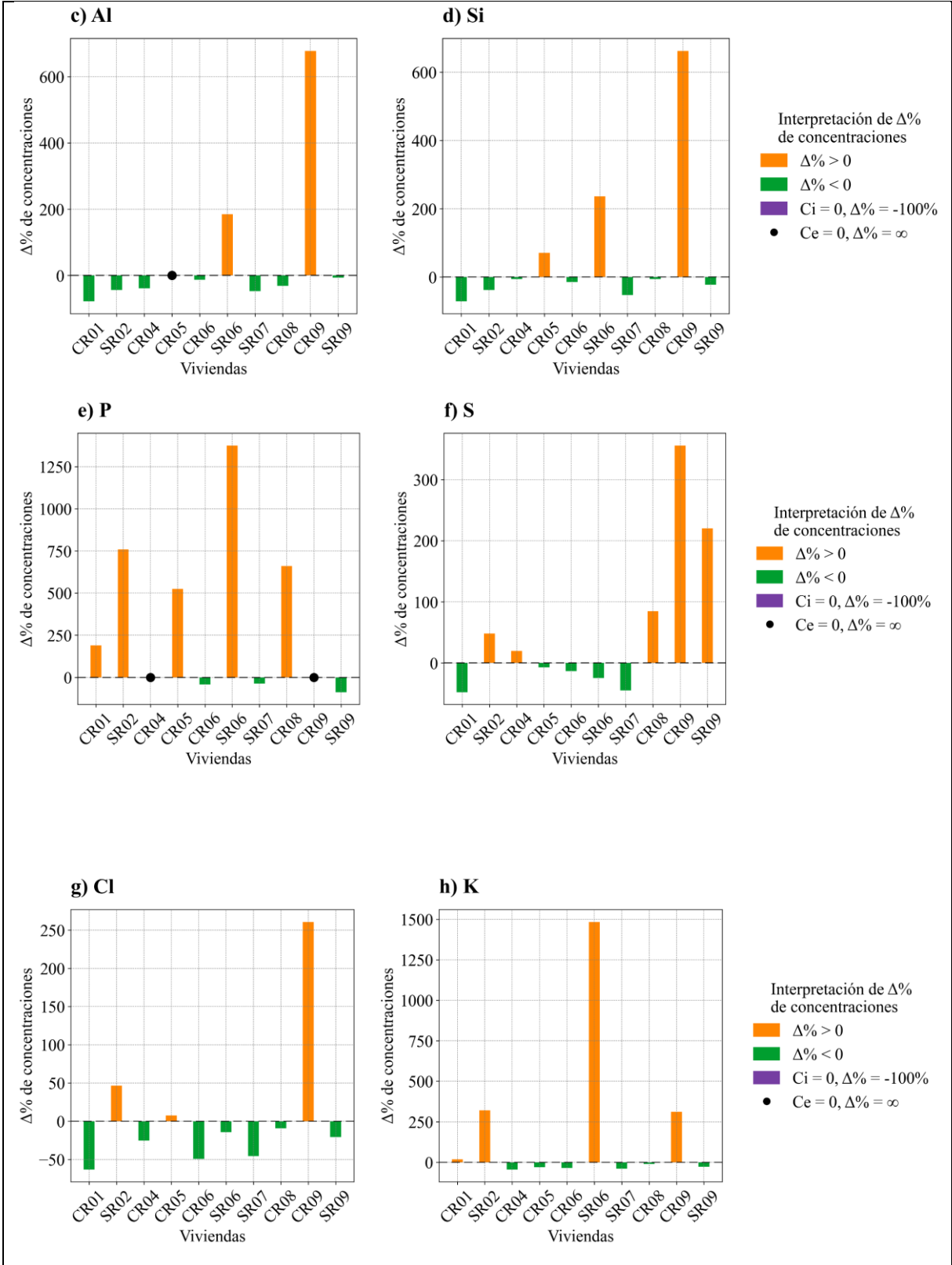
En esta sección se realiza un análisis del comportamiento de los elementos mayores, ya descritos, en relación con sus proporciones y distribución estadística tanto al interior como el exterior de los puntos muestreados. Para ello, se calcularon las diferencias porcentuales ($\Delta\%$) entre las concentraciones de cada elemento en ambos ambientes y se realizaron los gráficos de boxplot.

En la Figura 4.26 se agrupan los resultados de las diferencias porcentuales ($\Delta\%$) de las concentraciones de cada elemento al interior y exterior de las viviendas. Las barras de color naranja representan las viviendas donde $\Delta\% > 0$, indicando una mayor concentración del elemento en el interior, mientras que las barras de color verde corresponden a $\Delta\% < 0$, señalando una mayor concentración en el exterior. Los casos especiales se visualizan con barras de color morado para cuando C_i es igual a cero ($\Delta\% = -100\%$), y un símbolo de círculo negro para cuando C_e es igual a cero ($\Delta\% = \infty$). En aquellos casos donde $C_i = C_e = 0$, no se muestra barra, ya que técnicamente no existe diferencia en las concentraciones. Las viviendas representadas en el gráfico son aquellas en las que se lograron obtener mediciones de metales y metaloides tanto en el interior como en el exterior. Estas se presentan ordenadas cronológicamente, según el orden de muestreo.

Considerando un total de 10 viviendas monitoreadas al interior y exterior, en el 60% de los casos el Na (Figura 4.26 a)) muestra mayores concentraciones al exterior, mientras que en un 40% presentó mayores niveles al interior, destaca la vivienda CR09 donde se registró un 200% más de Na al interior que al exterior. En contraste, el Mg (Figura 4.26 b)) se presenta en un 60% de los casos con mayores concentraciones al interior, destacando CR09 con un 2,128% más de Mg al interior de la vivienda, las viviendas con mayores niveles de Mg al exterior

tienden a ser del tipo SR, como SR02, SR06, SR07 y SR09. El Al (Figura 4.26 c)), se presenta en un 70% de los casos con mayores concentraciones al exterior, y solo en un 20% de los casos existen mayores niveles al interior, específicamente en SR06 y CR09 con un 185% y 678% respectivamente, en CR05 se obtuvo una concentración exterior de cero, por lo que $\Delta\%$ fue indeterminada. Al igual que el Al, el Si (Figura 4.26 d)) presenta con mayores concentraciones al exterior del 70% de las viviendas con diferencias que van desde el -6% al -71%, en las viviendas CR05, SR06 y CR09, se presentan mayores concentraciones al interior con diferencias de 71%, 236% y 662%, respectivamente. En el 50% de las viviendas se identificó más P (Figura 4.26 e)) al interior con una diferencia en SR06 de 1,375%, en un 30% de los casos se presentó con mayores concentraciones al exterior y en dos viviendas la concentración exterior fue de cero. En el caso del S (Figura 4.26 f)), las concentraciones se distribuyen equitativamente, con un 50% de las viviendas presentando niveles más altos en el exterior y el otro 50% en el interior, destaca nuevamente CR09 donde se registró un 356% más de S al interior que al exterior y SR09 con un 220% de más S al interior. Para el Cl (Figura 4.26 g)), en un 70% de las viviendas se registraron mayores concentraciones al exterior, mientras que en el 30% restante se reconocieron mayores niveles al interior.





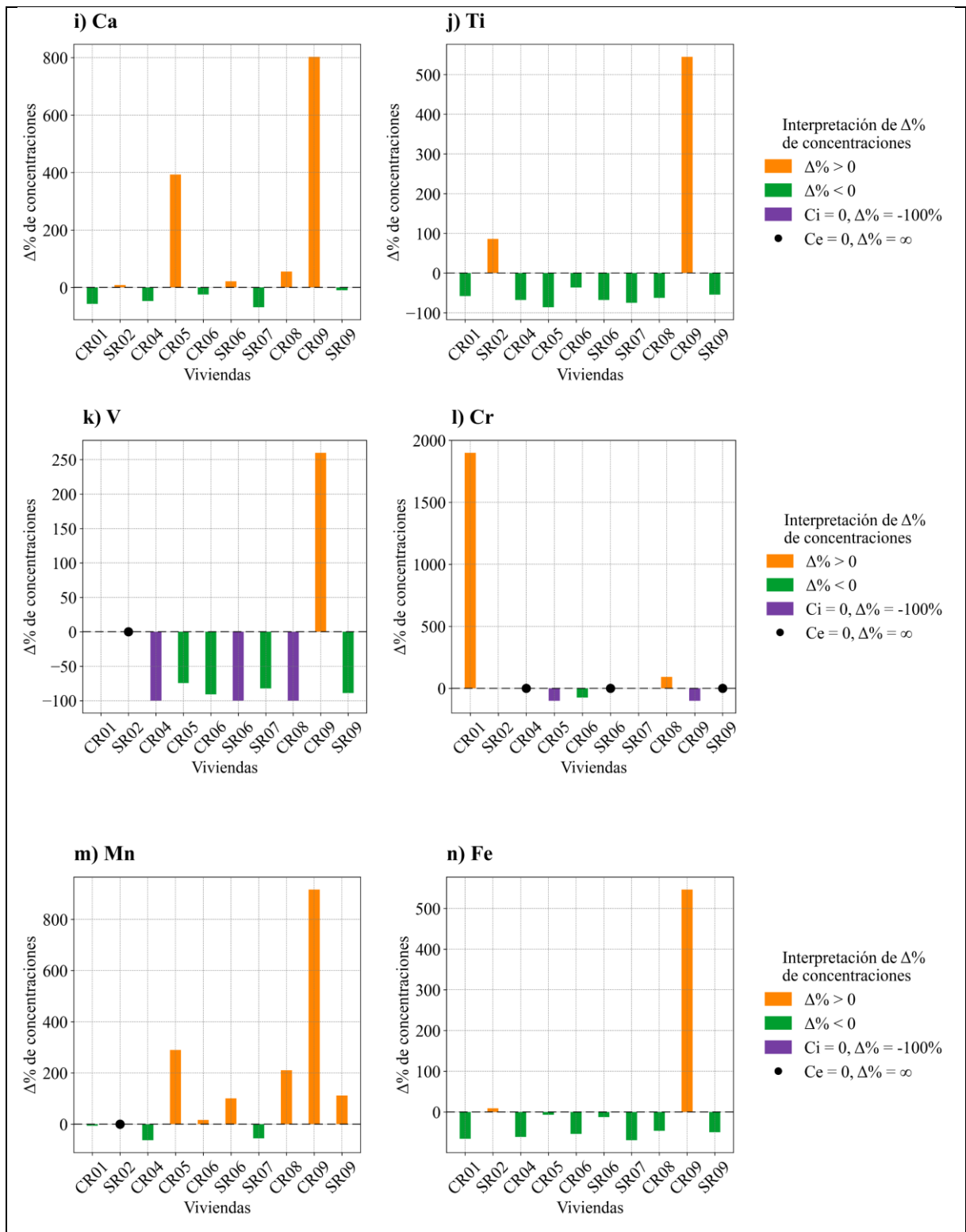


Figura 4.26. Gráfico de diferencias de concentraciones (%). Elaboración propia.

Para el K (Figura 4.26 h)), en el 60% de las viviendas se registró mayormente al exterior con diferencias porcentuales que varían entre el -11% y -44%, mientras que en cuatro de las viviendas se identificó principalmente al interior, específicamente en SR06 presenta un 1,483%

más de K al interior que al exterior. El Ca (Figura 4.26 i)), al igual que S presenta proporciones equitativas con cinco viviendas con mayores niveles de Ca al exterior y cinco con mayores niveles al interior, sobresale SR09 con un 803% más de Ca al interior que al exterior. En un 80% de las viviendas se idéntico mayores concentraciones de Ti (Figura 4.26 j)) al exterior, mientras que en SR02 y CR09 ocurrió lo contrario con diferencias de 86% y 545%, respectivamente. El V (Figura 4.26 k)), presenta un comportamiento diferente a lo descrito anteriormente, en el 40% de las viviendas se identificaron mayores concentraciones al exterior, en el 30% las concentraciones interiores fueron cero, por lo que se obtuvo -100% de concentraciones al exterior, en un caso la diferencia porcentual fue indeterminada y en sólo en CR09 se identificó mayor concentración al interior con un 260% más que en el exterior. El comportamiento del Cr (Figura 4.26 l)) es variable, en dos casos presentó mayor concentración al interior, destacando CR01 con un 1,900% más de concentración al interior que al exterior, en SR02 y SR07 no se detectó Cr en el interior y exterior por lo que no hay diferencia porcentual y en CR04, SR06 y SR09, la concentración exterior fue cero y la diferencia indeterminada, en dos viviendas la concentración interior fue cero con una diferencia porcentual de -100% a favor del exterior, y sólo en CR06 mayor concentración al exterior con -75%. El Mn (Figura 4.26 m)) se identificó en un 60% de las viviendas con mayores concentraciones al interior, en un 30% con mayores concentraciones al exterior y en SR02 no se detectó en el exterior por lo que la diferencia fue indeterminada. Finalmente, el Fe (Figura 4.26 n)) se encuentra en un 80% de los casos con mayores concentraciones al exterior y sólo un 20% de mayores concentraciones al interior específicamente en SR02 y CR09, con diferencias porcentuales de 9% y 546%, respectivamente.

Los elementos analizados presentan diferentes patrones de distribución entre el interior y exterior de las viviendas estudiadas (Figura 4.26). Algunos, como el Na, Al, Si, Cl, K, Ti, V y Fe presentan una tendencia de estar más concentrados al exterior, mientras que el Mg, P, Cr y Mn estarían más concentrados al interior de las viviendas. El Ca y S no presentan una tendencia preferente. Para el Cr, si se considera que en los casos en que $C_e=0$, resulta en concentraciones a favor del interior, se puede interpretar como que este elemento tiene una tendencia a concentrarse más en el interior. La vivienda CR09 destaca por registrar concentraciones significativamente más altas de varios elementos en el interior en comparación con el exterior. Este comportamiento podría sugerir condiciones particulares en esta vivienda que favorecen la acumulación de elementos en su interior.

La distribución estadística de los datos de elementos mayores presentes en las diez viviendas monitoreadas tanto del interior como exterior se resume en la Figura 4.27 mediante

gráficos de boxplot. En general al interior, las mayores medianas se observan en los elementos K ($0,2628 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Si ($0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Na ($0,16495 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Cl ($0,1457 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido de estos están los elementos Ca ($0,126 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe ($0,08405 \mu\text{g}/\text{m}^3$), S ($0,081 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Al ($0,0739 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Mg ($0,0252 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Las menores medianas se encuentran entre los elementos P ($0,01055 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ti ($0,008 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cr ($0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn ($0,0039 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y V ($0,0013 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Los elementos con mayor dispersión de datos, evidenciado por el tamaño de las cajas (que representa el rango intercuartílico, es decir, del cuartil 1 al cuartil 3), corresponden a Si, P, K, Ca, Cr y Mn, esto indica mayor variabilidad de las concentraciones medidas. En general, la mayoría de los conjuntos de datos de elementos presentan asimetrías, es decir la línea que representa la mediana no se encuentra centrada dentro de las cajas, sino que la mediana está cercana a la parte superior (asimetría positiva) o inferior (asimetría negativa) de la caja. El K, V, Cr y Mn presentan asimetría positiva, lo que indica una mayor concentración de valores altos. En contraste, el Al, Si, P, S, Cl, Ca y Fe presentan una asimetría negativa con medianas desplazadas hacia la parte baja de la caja, lo que indica una mayor concentración de valores bajos, con unos pocos valores altos.

La mayoría de los elementos presentan datos atípicos, que indican valores que exceden los límites inferiores y superiores, estos datos podrían representar eventos puntuales o fuentes locales específicas de emisión de estos elementos en el interior. Solo los elementos Na, P y Cr no muestran valores atípicos.

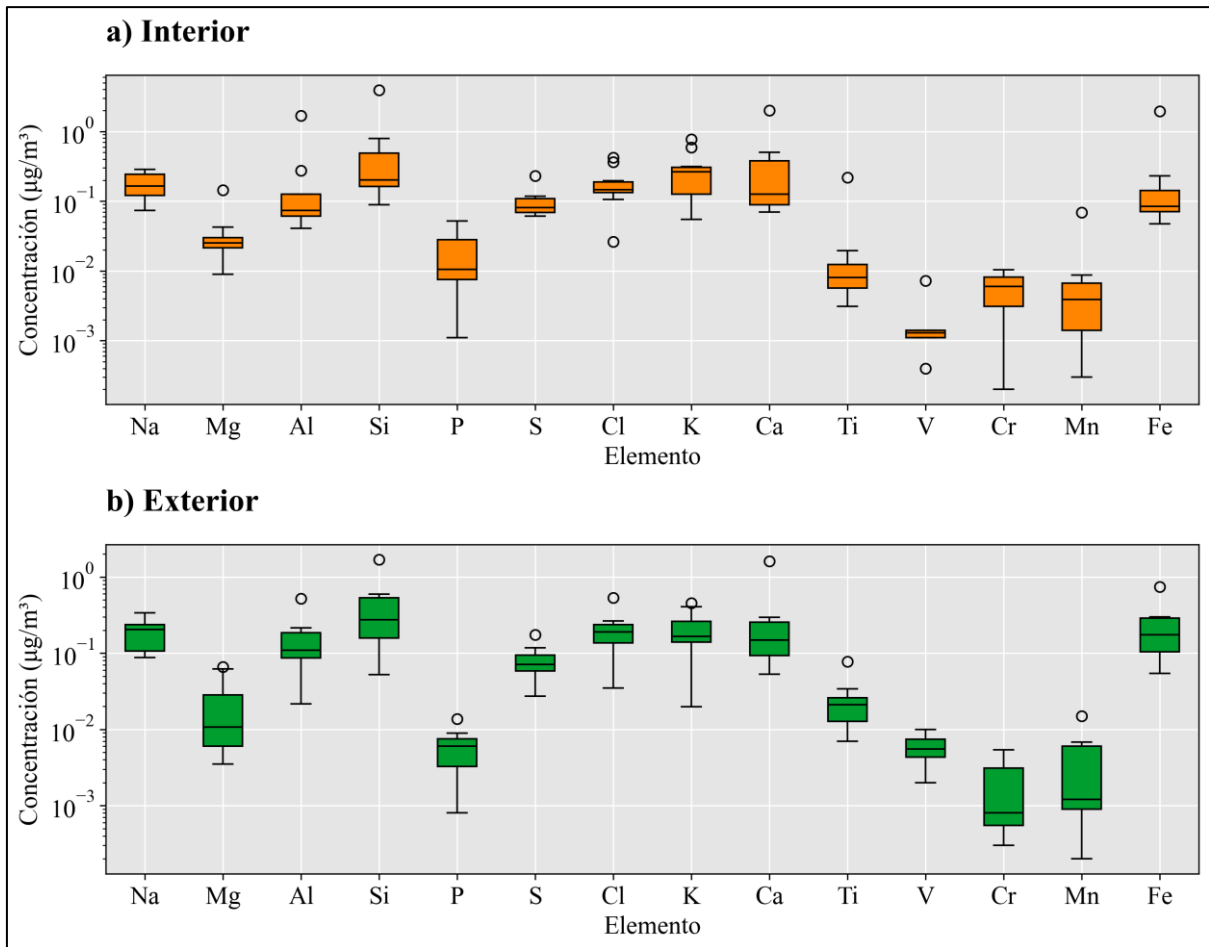


Figura 4.27. a) Gráfico de boxplot de elementos mayores al interior de las viviendas. b) Gráfico de boxplot de elementos mayores al exterior de las viviendas. Elaboración propia.

Al exterior, las mayores medianas se observan en los elementos Si ($0,27355 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Na ($0,2055 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cl ($0,18915 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Fe ($0,17485 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido de estos están los elementos K ($0,16505 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca ($0,1482 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Al ($0,1089 \mu\text{g}/\text{m}^3$), S ($0,07105 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Ti ($0,0211 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Las menores medianas se encuentran entre los elementos Mg ($0,01075 \mu\text{g}/\text{m}^3$), P ($0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$), V ($0,0055 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn ($0,0012 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Cr ($0,0008 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Los elementos con mayor dispersión de datos corresponden a Mg, Si, Ca, Cr, Mn y Fe esto indica mayor heterogeneidad en las concentraciones observadas. En general, la mayoría de los conjuntos de datos de elementos presentan asimetrías, los elementos Na, P, Cl y Ti, presentan asimetría positiva, lo que refleja una mayor proporción de valores altos. En contraste, el Mg, Al, K, Cr y Mn presentan una asimetría negativa con medianas desplazadas hacia la parte baja de la caja, lo que señala una mayor acumulación de valores bajos.

Al igual que al interior, en el exterior la mayoría de los elementos presentan datos atípicos, estos datos podrían representar situaciones puntuales o fuentes locales particulares de emisión de estos elementos en el exterior. Solo los elementos Na, V y Cr no muestran valores atípicos.

4.2.3.2. Elementos traza y Tierras raras

Se identificó la presencia de 21 elementos traza y 1 tierra rara, específicamente: Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Pd, Ag, In, Sn, Sb, Ba, Hg, Pb y La. Al igual que para los elementos mayores estos elementos traza se registraron al interior de 17 viviendas, mientras que al exterior fue en 10 viviendas. Los resultados se han organizado según las zonas prioritarias de muestreo: 1) Zona centro, 2) Zona Pie de Monte Cerro Divisadero, 3) Zona Pie de Monte Cerro Mackay, y 4) Zona de valle fluvial de los ríos Simpson y Coyhaique. En este último caso, se decidió agrupar ambas zonas fluviales debido a la baja cantidad de viviendas en cada una.

4.2.3.2.1. Elementos traza y Tierras raras al interior

La concentración total de elementos traza y La, entendida como la suma de las concentraciones de todos los elementos identificados al interior de cada vivienda se puede ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: SR03, CR02, SR01, SR02, CR01, SR08, CR07, CR09, CR06, CR08, SR07, CR04, SR05, SR09, SR04, CR05 y SR06 (Anexo 5). La proporción que estos elementos traza y tierras raras representan en el total de $MP_{2,5}$ por m^3 varía entre un 0,2 % y un 3 % del material particulado fino monitoreado en cada vivienda (Anexo 6).

En la Figura 4.28 se registran las concentraciones de elementos traza y La al interior de las viviendas CR01, CR04, SR01, SR04 y CR05, pertenecientes a la zona centro de Coyhaique. En el eje x se encuentran los elementos mayores detectados, y en el eje y se presentan las concentraciones de estos elementos en escala logarítmica. Cada línea tiene un color y símbolo distintivo, lo que facilita la comparación entre las viviendas.

Las concentraciones de los elementos traza varían considerablemente entre las diferentes viviendas y el análisis de centrará en describir cómo se comporta cada uno de los elementos (Figura 4.28). En algunos casos, un elemento se detecta solo en una o dos viviendas, mientras que otros están presentes en todas las viviendas, pero con fluctuaciones significativas en sus concentraciones. Las viviendas SR01-INT y CR01-INT destacan por registrar las concentraciones más altas en todos los elementos a excepción del Cu.

Para el Ni (Figura 4.28), las concentraciones se pueden ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: SR01-INT con $0,0052 \mu g/m^3$, CR01-INT con $0,004 \mu g/m^3$, SR04-INT con $0,0036 \mu g/m^3$, CR04-INT con $0,0028 \mu g/m^3$ y SR05-INT con $0,0001 \mu g/m^3$ (Figura 4.28). El Cu, solo se identificó en dos viviendas CR04-INT y SR04-INT con $0,0181 \mu g/m^3$ y $0,0022 \mu g/m^3$, respectivamente. El Zn, estaba presente en todas las viviendas de esta zona con mayor concentración en CR01-INT con $0,0141 \mu g/m^3$ y con menor concentración en SR04-INT con

0,0016 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Solo en las viviendas SR01-INT y CR01-INT se registró Ga con concentraciones muy similares de 0,0259 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Ge, muestra concentraciones variables, específicamente 0,0269 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-INT, 0,0167 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT, 0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR04-INT y 0,0018 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR05-INT. El As, se registró al interior de todas las viviendas con concentraciones que varían entre 0,0385 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 0,0033 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el Se el rango de concentraciones es similar al As, con una máxima de concentración de 0,0291 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ registrada en SR01-INT y una mínima de 0,0029 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-INT. El nivel más alto de Br se registra en CR01-INT con 0,0513 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de SR01-INT con 0,0239 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SR05-INT con 0,0068 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SR04-INT con 0,0061 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CR04-INT con 0,009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Rb, registra su nivel más alto en SR01-INT con 0,0431 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el resto de sus concentraciones son menores y varían entre 0,0076 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 0,0011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Sr son similares en SR01-INT y CR01-INT con 0,0295 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0263 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, para el resto de las viviendas varía entre 0,0041 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 0,0001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Y alcanza su máxima concentración en CR01-INT con 0,0483 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y SR01-INT con 0,0121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

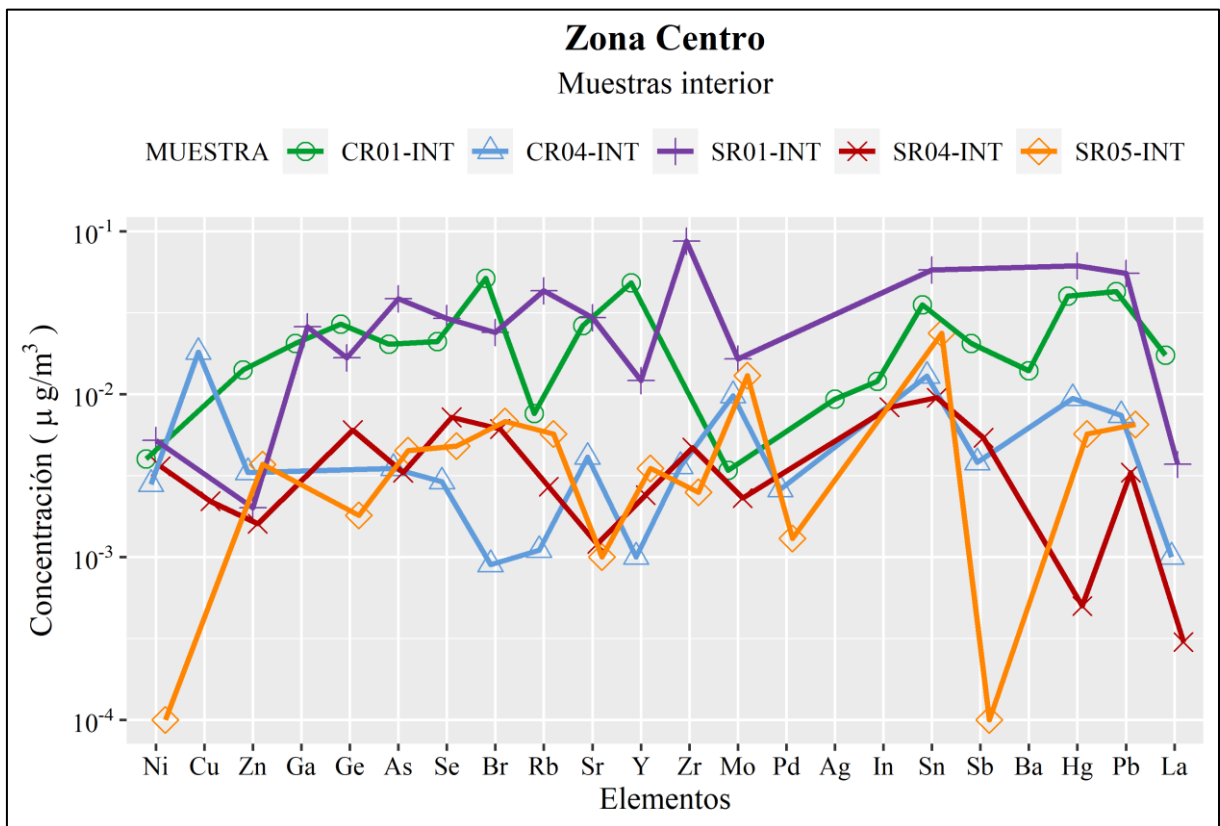


Figura 4.28. Concentraciones de elementos traza y tierras raras al interior de las viviendas de la zona centro. Elaboración propia.

El Zr es el elemento con mayor concentración en este grupo de viviendas, alcanzando 0,0868 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT, en contraste este elemento no se registra en CR01-INT, en las viviendas SR04-INT, CR04-INT y SR05-INT registra menores concentraciones del orden de: 0,0047 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0036 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0025 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Las concentraciones de Mo varían entre 0,0164 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT a 0,0023 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR04-INT. El Pd sólo se registró en CR04-INT y SR05-INT con 0,0026 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0013 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. La Ag, solo se identificó al interior de CR01 con una concentración de 0,0093 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el In, se obtuvieron dos registros de 0,0259 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT y 0,0205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-INT. El Sn se detectó en todas las viviendas y sus concentraciones se pueden ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: 0,0577 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0353 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0236 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0129 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0095 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Sb, se detectó en CR01-INT, SR04-INT, CR04-INT y SR05-INT con concentraciones de 0,0205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0054 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0038 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Únicamente en CR01-INT se identificó Ba con 0,0139 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Hg se registró en todas las viviendas y en niveles muy variables que van desde 0,0613 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT a 0,0005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR04-INT. El Pb se comporta similar al Hg, sus concentraciones se pueden ordenar de manera decreciente de la siguiente manera: 0,0552 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR01-INT, 0,0426 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-INT, 0,0074 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-INT, 0,0065 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR05-INT, 0,0033 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR04-INT. La tierra rara La, se identificó en CR01-INT, SR01-INT, CR04-INT y SR04-INT con concentraciones de 0,0173 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0037 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Las concentraciones de elementos traza y La en la zona centro de Coyhaique pueden ordenarse de la siguiente manera según su mediana: Sn (0,0236 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mo (0,0098 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Hg (0,0094 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Pb (0,0074 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Se (0,0072 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Br (0,0068 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ge (0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Rb (0,0057 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), As (0,0045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sr (0,0041 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sb (0,0038 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ni (0,0036 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zr (0,0036 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Y (0,0035 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zn (0,0033 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y La (0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En la Figura 4.29 se registran las concentraciones de elementos traza y La al interior de las viviendas CR07, SR03, CR06 y SR07 pertenecientes a la zona de Pie de monte del Co. Divisadero. Cada línea tiene un color y símbolo que diferencia a las viviendas. A simple vista, se distingue que la línea que representa a la vivienda SR03-INT se encuentra desplazada a la zona alta del gráfico, indicando que esta vivienda posee las mayores concentraciones en la mayoría de los elementos a excepción de Ni, Cu y Zn.

El Ni, sólo se detectó en las viviendas CR07-INT y SR07-INT con 0,0016 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El nivel más alto de Cu se registra en CR07-INT con 0,0029 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT. El Zn es el elemento traza con mayor concentración en CR06-INT alcanzando 0,0842 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, también se identificó en CR07-INT con 0,0437 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y

en SR07-INT con $0,0131 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Ga se reconoció en las cuatro viviendas, y sus concentraciones se pueden ordenar de mayor a menor como: $0,1191 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT, $0,0062 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT y $0,0031 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT. Las concentraciones de Ge van desde $0,0633 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,001 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En SR03-INT y CR07-INT se detectó As con concentraciones de $0,0541 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,005 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Se presenta concentraciones que varían entre $0,0827 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT a $0,003 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT. Se identificó Br en todas las viviendas y sus niveles se pueden ordenar en: $0,0735 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,0058 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,0048 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0019 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Rb alcanza su máximo en SR03-INT con $0,066 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de $0,0061 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT, $0,0055 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT y $0,0039 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT. Las concentraciones de Sr varían entre $0,0204 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,0041 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se detectó Y en SR03-INT y CR07-INT con concentraciones de $0,0346 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0024 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

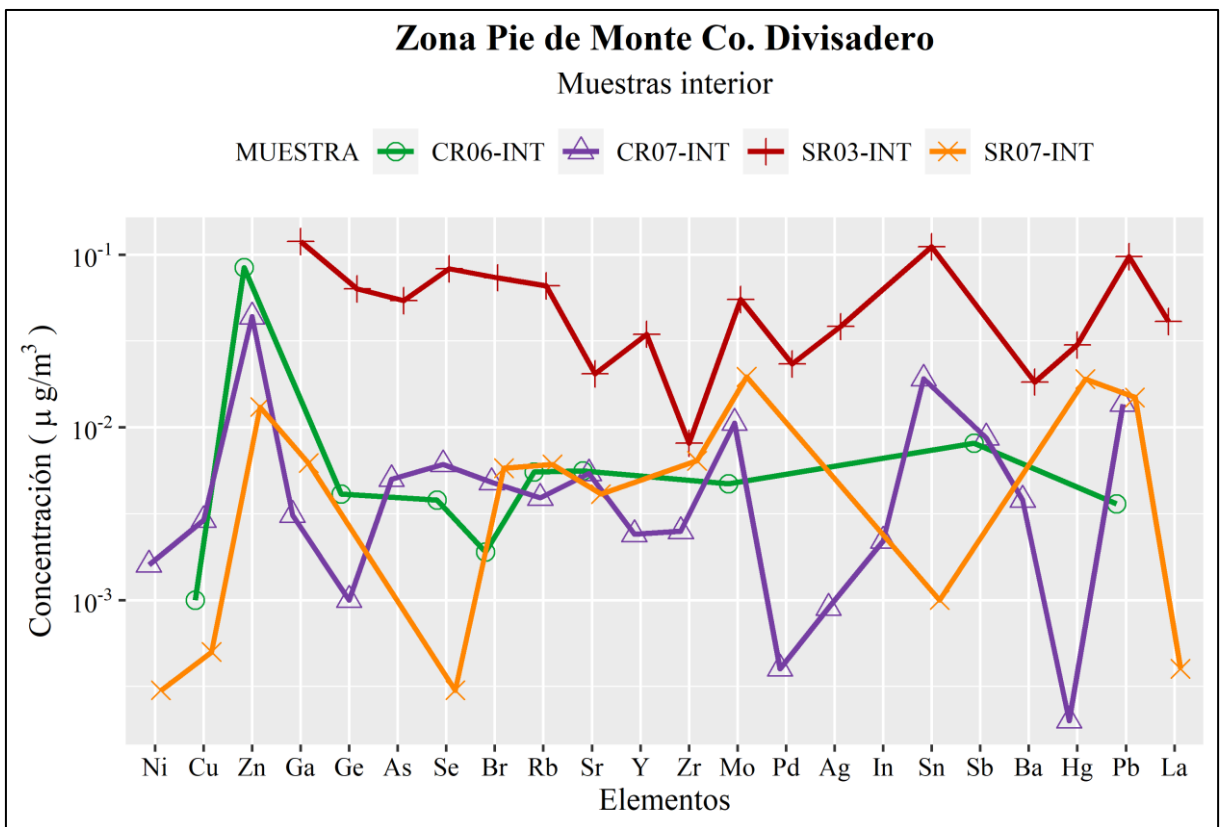


Figura 4.29. Concentraciones de elementos traza y tierras raras al interior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Divisadero. Elaboración propia.

El Zr es el elemento con menor concentración de los registrados en SR03-INT con $0,0081 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en el resto de las viviendas registra $0,0064 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT y $0,0025 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT. Las concentraciones de Mo se pueden ordenar de mayor a menor, de la siguiente

manera: 0,055 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT, 0,0196 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT, 0,0106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT y 0,0047 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT. Sólo se identificó Pd en SR03-INT y CR07-INT con 0,0233 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. La mayor concentración de Ag se registró en SR03-INT con 0,0383 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de CR07-INT con 0,0009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sólo se identificó In en CR07-INT con 0,0022 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de Sn presentan grandes diferencias entre las viviendas con 0,1108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR03-INT, 0,0191 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR07-INT y 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-INT. Se registró Sb en CR07-INT con 0,0087 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en niveles muy similares en CR06-INT con 0,0081 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Ba fue detectado en SR03-INT y CR07-INT con 0,0183 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0038 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Hg se registró en todas las viviendas de la zona, los mayores niveles se registran en SR03-INT y SR07-INT con 0,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Las concentraciones de Pb se pueden ordenar de mayor a menor como: 0,0972 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0149 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0036 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por último, el La se registró solo en SR03-INT y SR07-INT con 0,041 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Las concentraciones de elementos traza y La en la zona de Pie de monte del Co. Divisadero pueden ordenarse de la siguiente manera según su mediana: Zn (0,028 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mo (0,015 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Pb (0,014 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sn y Hg (0,010 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Rb y Sr (0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Br, Se y Ga (0,005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zr y Sb (0,004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ge y As (0,003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ba (0,002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Y y Cu (0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Anexo 8).

En la Figura 4.30 se registran las concentraciones de elementos traza y La al interior de las viviendas CR02, CR08, SR02 y SR08 pertenecientes a la zona de Pie de monte del Co. Mackay. Cada línea tiene un color y símbolo que diferencia a las viviendas. Las viviendas CR02-INT y SR02-INT tienden a presentar las mayores concentraciones en la mayoría de los elementos.

El Ni se detectó en CR02-INT, CR08-INT y SR08-INT en igual concentración de 0,002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sólo se detectó Cu en dos viviendas con concentraciones similares de 0,0125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondientes a CR08-INT y SR08-INT, respectivamente. En las mismas viviendas se detectó Zn con 0,0723 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT y 0,0136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-INT. Las concentraciones de Ga se pueden ordenar en orden decreciente así: 0,0158 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0013 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0008 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Ge, solo se detectó en CR08-INT con 0,0054 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y SR08-INT con 0,0014 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de As identificados son similares entre sí con concentraciones de 0,0188 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0116 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los contenidos de Se varían entre 0,0388 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT a 0,0018 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT. Se identificó Br en todas las viviendas en concentraciones muy variables que van desde 0,0483 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT, 0,0141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-INT, 0,0048 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT y 0,009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-INT. Las concentraciones de

Rb pueden ordenarse de la siguiente manera: 0,0288 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0193 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Sr varían entre 0,0176 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 0,0053 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Y es el elemento con concentraciones más variables en esta zona con 0,0863 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-INT, 0,0268 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT, 0,0006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-INT y 0,0004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT.

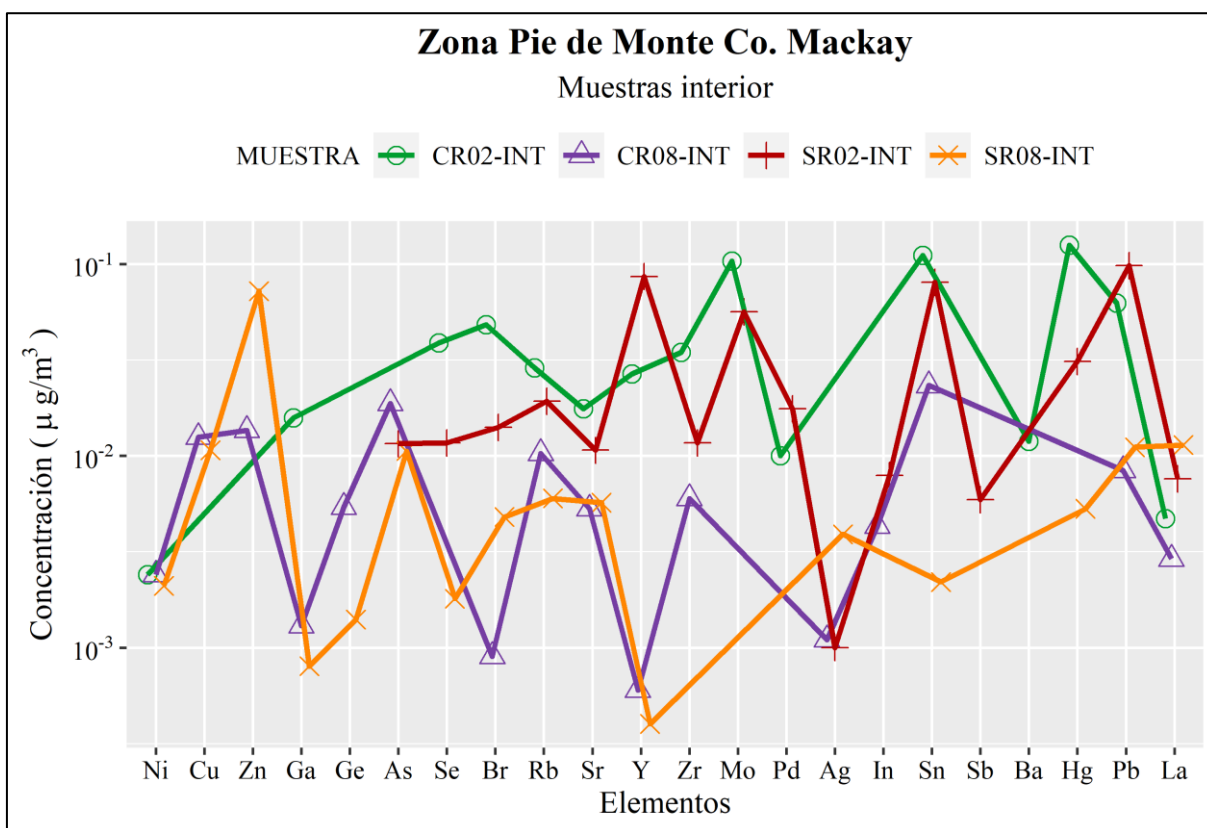


Figura 4.30. Concentraciones de elementos traza y tierras raras al interior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Mackay. Elaboración propia.

El Zr se identificó en CR02-INT, SR02-INT, y CR08-INT con 0,0346 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0,0117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Solo se detectó Mo en CR02-INT y SR02-INT con 0,1036 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0565 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondientemente. En las mismas viviendas se reconoció Pd en concentraciones bastante similares de 0,0176 en SR02-INT y 0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT. Se registró Ag en SR08-INT con 0,0039 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CR08-INT y SR02-INT con igual concentración de 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El In fue identificado en SR02-INT con 0,0079 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y CR08-INT 0,0043 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Sn se encontró en todas las viviendas con concentraciones de: 0,1112 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT, 0,0805 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-INT, 0,0233 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-INT y 0,0022 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT. Sólo se detectó Sb en SR02-INT con 0,0059 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, sólo se registró Ba en CR02-INT con 0,0119 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Hg presenta concentraciones de 0,1256 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT, 0,0311 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-INT y 0,0053 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT. El Pb presenta niveles similares al Hg, con

concentraciones de 0,0983 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-INT, 0,0627 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR02-INT, 0,0111 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR08-INT y 0,0084 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-INT. Todas las viviendas de esta zona presentan contenidos de La, para SR08-INT de 0,0114 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SR02-INT de 0,0076 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CR02-INT de 0,0047 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y CR08-INT de 0,0029 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las concentraciones de elementos traza y La al interior de las viviendas en la zona de Pie de monte del Co. Mackay pueden ordenarse de la siguiente manera según su mediana: Sn (0,0519 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Pb (0,0369 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mo (0,02825 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Hg (0,0182 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Rb (0,0148 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Y (0,0137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), As (0,011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Br y Zr (0,009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sr (0,008 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zn y Se (0,007 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), La (0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cu y Pd (0,005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ni y In (0,002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ag, Ga y Ge (0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En la Figura 4.31 se señalan las concentraciones de elementos traza y La registradas al interior de las viviendas CR05 y SR09 pertenecientes a la zona del valle fluvial del río Coyhaique, CR09 perteneciente a la zona de valle fluvial del río Simpson y SR06 ubicada en las cercanías del Co. Cinchao. Cada línea tiene un color y símbolo que diferencia a las viviendas.

El Ni sólo se detectó en SR09-INT y CR09-INT con 0,0045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0042 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Cu presenta su mayor concentración en CR09-INT con 0,0165 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de 0,0053 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-INT y 0,0039 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-INT. Se identificó Zn en tres viviendas con concentraciones de: 0,0295 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-INT, 0,0104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-INT, 0,0013 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-INT. En SR06-INT y CR09-INT se detectó Ga con apenas 0,0042 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Las concentraciones de Ge son similares entre las viviendas y de mayor a menor son: 0,0062 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-INT, 0,0061 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-INT, 0,0045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-INT y 0,0037 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-INT. Los contenidos de As son similares a los de Ge con 0,0066 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-INT, 0,0063 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-INT, 0,0058 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-INT y 0,0049 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-INT. Las concentraciones de Se varían entre 0,0075 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 0,0042 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, rangos similares al Ge y As. El Br se identificó en todas las viviendas con valores que van desde 0,0046 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-INT, seguido de 0,0039 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-INT, 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-INT y apenas 0,0009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-INT. Las concentraciones de Rb son similares en SR06-INT y SR09-INT con 0,0072 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0065 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, mientras que en CR05-INT registra el nivel más bajo con 0,0019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los valores de Sr son variables, alcanzando su máxima concentración en CR09-INT con 0,0167 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de 0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-INT, 0,0029 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-INT y 0,0028 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-INT. El Y se identificó en CR09-INT con 0,0081 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SR06-INT con 0,0039 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y SR09-INT con 0,0022 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

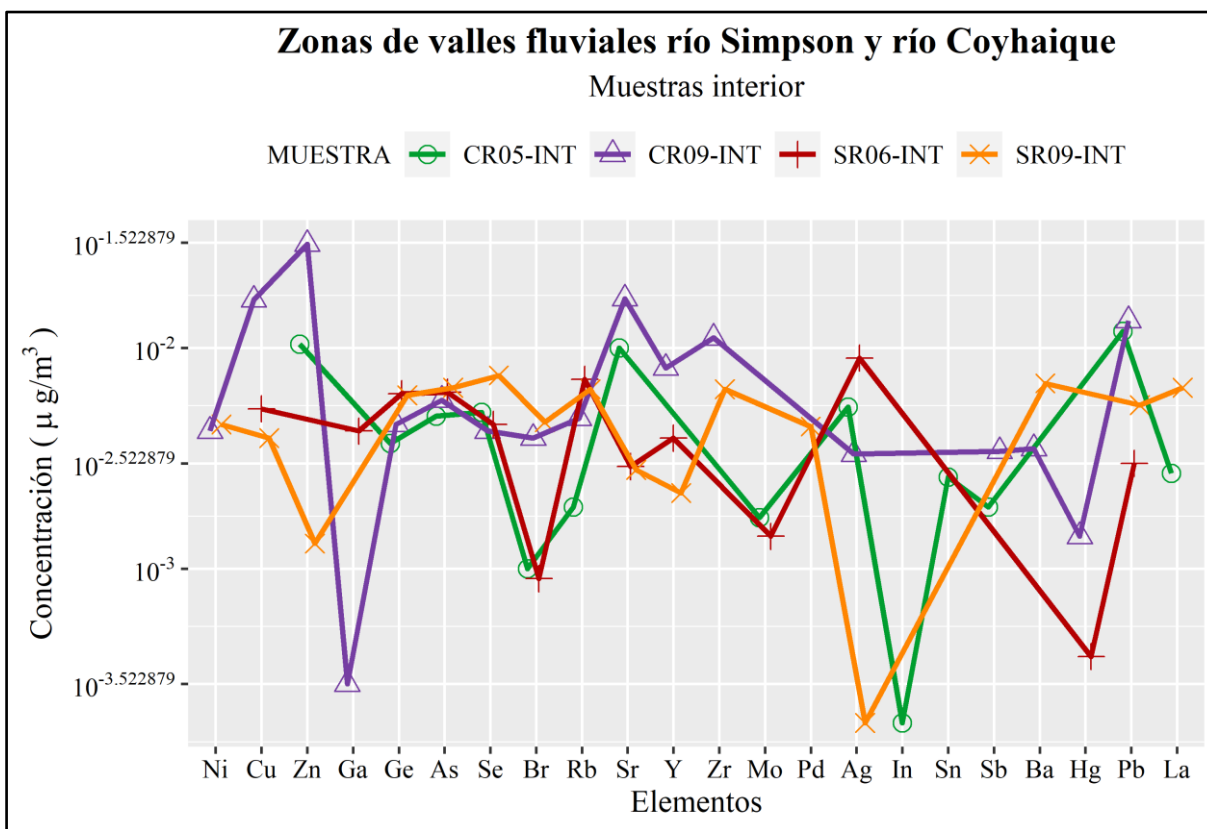


Figura 4.31. Concentraciones de elementos traza y tierras raras al interior de las viviendas de las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique. Elaboración propia.

Al igual que el Y, el Zr sólo se detectó en CR09-INT y SR09-INT con $0,0111 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0065 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Mo, solo se presentó en SR06-INT con $0,0014 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y CR05-INT con $0,0017 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Solamente se reconoció Pd en SR09-INT con $0,0044 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La máxima concentración de Ag se encontró en SR06-INT con $0,009 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la mínima ocurrió en SR09-INT con $0,0002 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El In y Sn solo se registraron en CR05-INT con $0,0002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0026 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Las concentraciones de Sb varían entre $0,0002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,0019 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Ba se reconoció en las viviendas SR09-INT y CR09-INT con concentraciones de $0,0069 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0035 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Hg se registró en CR09-INT con $0,0014 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en SR06-INT con $0,0004 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Pb se pueden ordenar de manera decreciente de la siguiente manera: $0,0133 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-INT, $0,0119 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-INT, $0,0055 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-INT y $0,003 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-INT. El La sólo se registró en SR09-INT y CR05-INT con $0,0066 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0027 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Las concentraciones de elementos traza y La en la zona de valles fluviales de los ríos Simpson, Coyhaique y cercanías del Co. Cinchao, pueden ordenarse de la siguiente manera

según su mediana: Pb (0,009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sr, As, Zn y Rb (0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ge, Se y Cu (0,005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ag (0,004), Zr e Y (0,003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Br, Ni y Ba (0,002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), La, Sb y Mo (0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Las concentraciones de elementos traza y La presentes en el $\text{MP}_{2,5}$ al interior de las viviendas permiten identificar que, tanto en la zona centro de la ciudad como en las zona de pie de monte del cerro Mackay los elementos traza con mayores concentraciones son el Sn, Mo, Hg y Pb. En contraste, algunos elementos como el Ni y el Cu se detectan en pocas viviendas y con niveles mucho más bajos. En la zona de pie de monte del Co. Divisadero predomina la presencia de elementos como Zn, Mo, Pb y Sn. En las zonas de los valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique son elementos traza con mayor contenido corresponden al Pb, Sr, As y Zn, en esta zona las viviendas mostraron niveles mucho menores de elementos traza en comparación con el resto. Estos resultados sugieren que factores geográficos y fuentes de emisión locales podrían influir en la distribución y variabilidad de los elementos traza al interior de las viviendas.

4.2.3.2.1. Elementos traza y Tierras raras al exterior

La concentración total de elementos traza y La al exterior se puede ordenar de manera decreciente, de la siguiente forma: CR09, SR07, CR08, SR09, CR06, CR05, CR04, SR06, SR02 y CR01 (Anexo 5). La proporción que estos elementos traza y tierras raras representan en el total de $\text{MP}_{2,5}$ por m^3 varía aproximadamente entre un 0,3 % y un 2,4% del material particulado fino monitoreado en cada vivienda (Anexo 6).

En la Figura 4.32 se registran las concentraciones de elementos traza y La al exterior de las viviendas CR01 y CR04 pertenecientes a la zona centro de Coyhaique. En el eje x se encuentran los elementos mayores detectados, y en el eje y se presentan las concentraciones de estos elementos en una escala logarítmica. Cada línea tiene un color y símbolo distinto, lo que facilita la comparación entre las viviendas. La línea que representa a CR04-EXT (naranja) se encuentra levemente desplazada a la zona alta del gráfico, presentando las mayores concentraciones en todos los elementos a excepción del Ni, Cu y Zn. En ambas viviendas el patrón de las líneas muestra similitud entre las fluctuaciones desde el Ge al Pb. No se detectó la presencia de As, Ba y Sb en ninguna vivienda.

Los niveles de Ni son iguales en ambas viviendas con 0,002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el caso del Cu, existe mayor diferencia, en CR01-EXT se registra 0,0047 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para CR04-EXT se detectó apenas un 0,0008 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Zn sólo se encontró en CR01-EXT con 0,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La mayor concentración de Ga se registró en CR04-EXT con 0,0165 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en CR01-

EXT se registró $0,0024 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Ge es uno de los elementos traza con mayor concentración en CR04-EXT con $0,0549 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en cambio en CR01-EXT registra $0,0044 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de Se son de $0,0333 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0031 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Br presenta niveles similares al Ga, con $0,0181 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT y $0,0037 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT. El Rb presenta un alza en ambas viviendas respecto al Br, alcanzando los $0,0254 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT y $0,0061 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT. El Sr muestra concentraciones similares al Br en ambas viviendas, en CR04-EXT alcanza $0,016 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en CR01-EXT registra $0,0035 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Y experimenta un alza en ambas viviendas respecto al Sr con concentraciones de $0,0401 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT y $0,0061 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT.

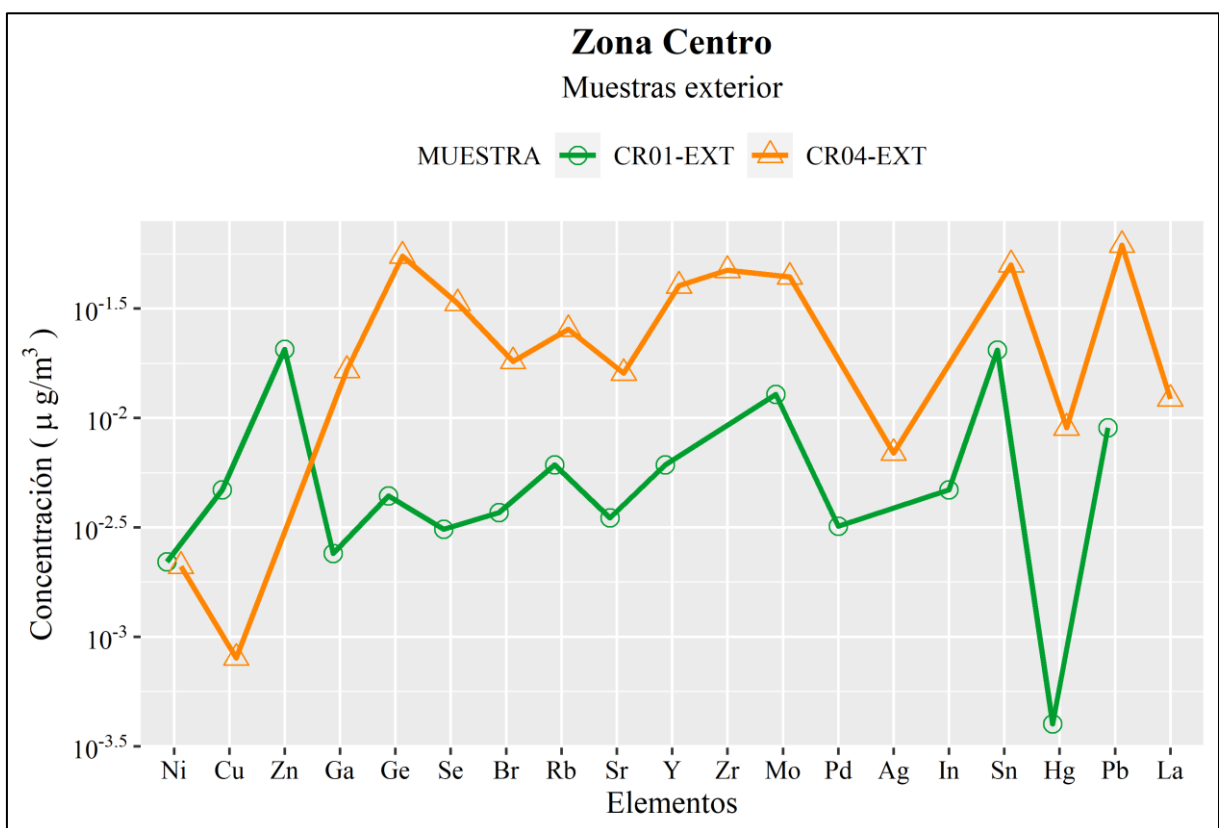


Figura 4.32. Concentraciones de elementos traza y tierras raras al exterior de las viviendas de la zona centro. Elaboración propia.

El Zr solo se registró en CR04-EXT con $0,0472 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 4.32). El Mo alcanza $0,044 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT y $0,0128 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT. Sólo en CR01-EXT se identificó Pd con $0,0032 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En contraste, solo se identificó Ag en CR04-EXT con $0,0069 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El In alcanzó $0,0047 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT. El Sn alcanza altas concentraciones en ambas viviendas con $0,0501 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT y $0,0204 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT. El Hg disminuye en ambas viviendas con $0,009 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT y apenas $0,0004 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT. Las

concentraciones de Pb registran 0,0615 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR04-EXT y 0,009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR01-EXT. Sólo se identificó La en CR04-EXT con 0,0122 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las concentraciones de elementos traza y La al exterior de las viviendas de la zona centro de Coyhaique pueden ordenarse de la siguiente manera según su mediana: Sn y Pb (0,035 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ge (0,030 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mo (0,028 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zr (0,024 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Y (0,023 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Se (0,018 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Rb (0,016 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Br (0,011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zn y Sr (0,010 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ga (0,009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), La (0,006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Hg (0,005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ag y Cu (0,003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), In, Ni y Pd (0,002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En la Figura 4.33 se muestran las concentraciones de elementos traza y La al exterior de las viviendas para las muestras CR06 y SR07 pertenecientes a la zona de pie de monte del Co. Divisadero.

El Ni solo se identificó en CR06-EXT con 0,003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Zn se detectó en SR07-EXT con 0,0088 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Ga registra 0,0313 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y 0,0254 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. Los niveles de Ge identificados son de 0,0138 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y 0,013 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. El As registra una concentración en SR07-EXT de 0,0419 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Se es mayor en CR06-EXT con 0,0084 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en SR07-EXT registra 0,019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Br corresponden a 0,0376 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y 0,032 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. El Rb solo se detectó en SR07-EXT con 0,0306 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Sr alcanzan 0,047 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y 0,0256 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT. El Y presenta una gran variación entre las viviendas con 0,0299 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR07-EXT y 0,0193 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR06-EXT.

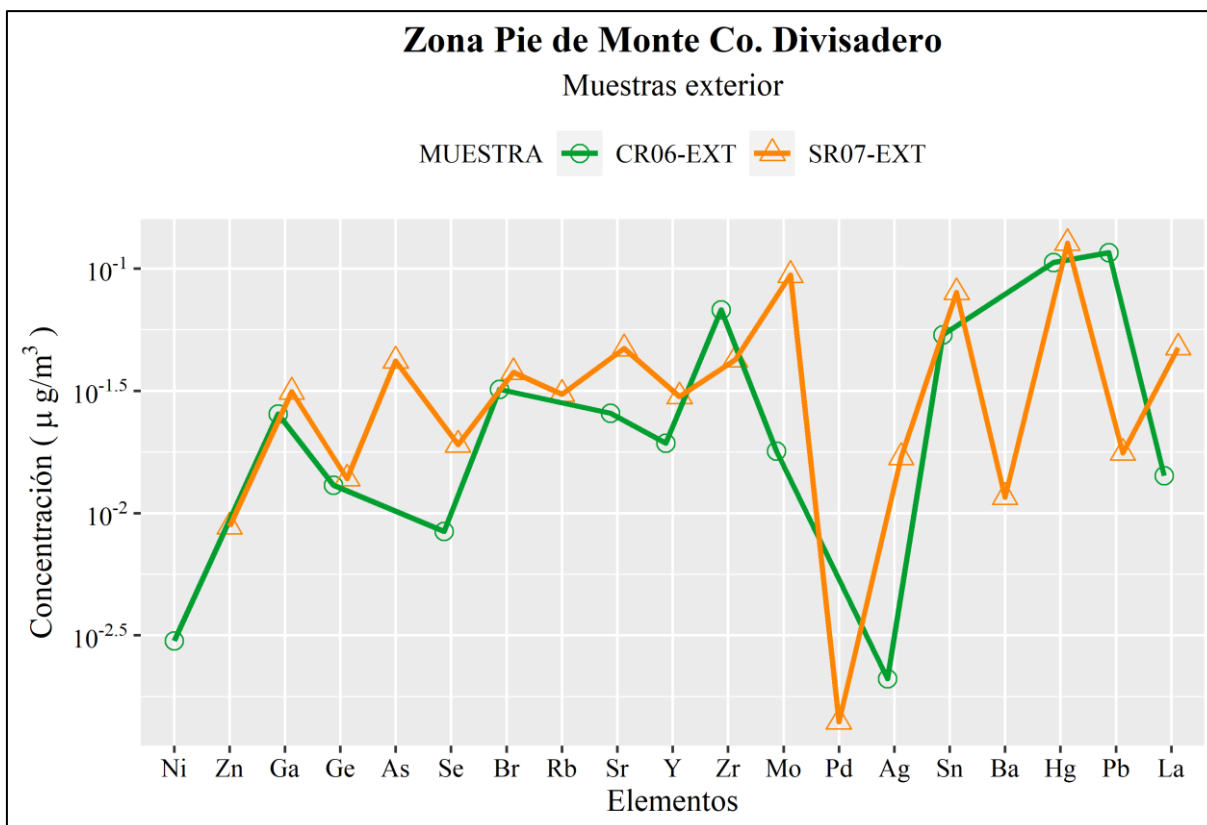


Figura 4.33. Concentraciones de elementos traza y tierras raras al exterior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Divisadero. Elaboración propia.

Las concentraciones de Zr se reconoció en ambas viviendas con 0,0678 µg/m³ en CR06-EXT y 0,0423 µg/m³ en SR07-EXT. El Mo, es el elemento con mayor diferencia entre las viviendas con 0,0939 µg/m³ en SR07-EXT y 0,0179 µg/m³ en CR06-EXT. El Pd sólo se identificó en SR07-EXT con 0,0014 µg/m³. La Ag alcanzó 0,0169 µg/m³ en SR07-EXT y 0,0021 µg/m³ en CR06-EXT. El Sn alcanza su valor máximo en 0,0798 µg/m³ en SR07-EXT y CR06-EXT registra 0,0535 µg/m³. El Ba sólo se identificó en SR07-EXT con 0,0116 µg/m³. El Hg muestra altos niveles en ambas viviendas, registrando 0,1268 µg/m³ en SR07-EXT y 0,1059 µg/m³ en CR06-EXT. El Pb es el elemento con mayor concentración en CR06-EXT con 0,1162 µg/m³, mientras que en SR07-EXT registra 0,0176 µg/m³. Se detectó La en ambas viviendas con 0,0474 µg/m³ en SR07-EXT y 0,0142 µg/m³ en CR06-EXT.

Las concentraciones de elementos traza y La al exterior de las viviendas de la zona de pie de monte del Co. Divisadero pueden ordenarse de la siguiente manera según su mediana: Hg (0,116 µg/m³), Pb y Sn (0,067 µg/m³), Mo (0,056 µg/m³), Zr (0,055 µg/m³), Sr (0,036 µg/m³), Br (0,035 µg/m³), La (0,031 µg/m³), Ga (0,028 µg/m³), Y (0,025 µg/m³), Ga (0,027 µg/m³), Se (0,025 µg/m³), Rb (0,024 µg/m³), Y y Ge (0,017 µg/m³), Ag (0,013 µg/m³), In (0,010 µg/m³), Ba (0,006 µg/m³), Zn (0,004 µg/m³), Ni (0,002 µg/m³) y Pd (0,001 µg/m³).

En la Figura 4.34 se muestran las concentraciones de elementos traza y La al exterior de las viviendas para las muestras CR08 y pertenecientes a la zona de pie de monte del Co. Mackay. Las viviendas presentan patrones muy diferentes, la línea que representa a CR08-EXT (verde) se encuentra ubicada en la sección alta del gráfico indicando mayores concentraciones en la mayoría de los elementos traza y La. En ninguna de las viviendas de esta zona se detectó Mo ni Sb.

El Ni y el Cu solo se identificó en SR02-EXT con concentraciones de $0,0038 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0155 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Zn se registró en ambas viviendas con $0,0074 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT y $0,0018 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT. El Ga presenta una gran variación entre las viviendas con $0,0262 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT y $0,0024 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT. En ambas viviendas hay un aumento de Ge respecto al Ga, en CR08-EXT alcanza $0,0331 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y SR02-EXT registra $0,0023 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Solo en CR08-EXT se detectó As con una concentración de $0,0489 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Se registra $0,051 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT y $0,0042 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT. En CR08-EXT hay aproximadamente 18 veces más Br que en SR02-EXT con concentraciones de $0,0422 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0023 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Rb alcanza $0,0329 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT y $0,0031 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT. El Sr muestra una diferencia similar al Rb en ambas vivienda, con $0,0398 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT y $0,0038 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT. El Y muestra un aumento respecto al Sr en ambos puntos, registrando concentraciones de $0,0492 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT y $0,0063 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT.

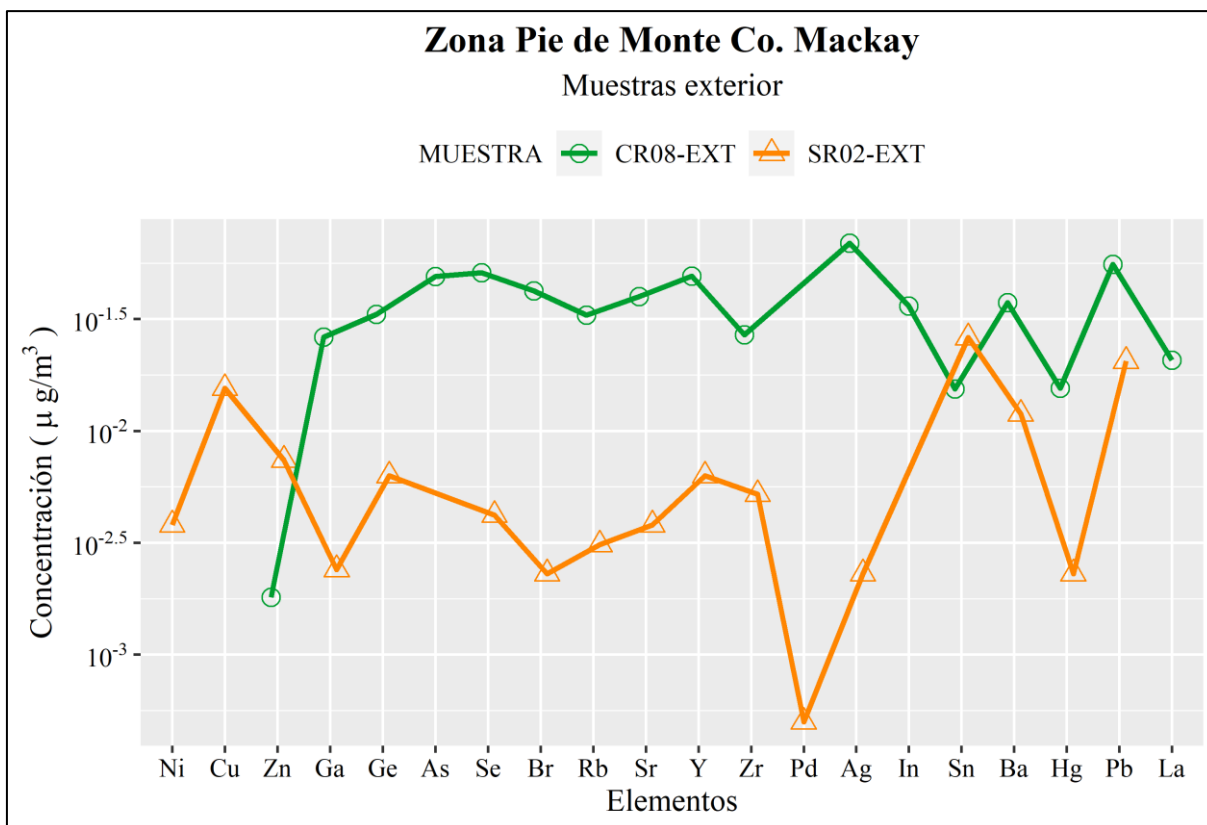


Figura 4.34. Concentraciones de elementos traza y tierras raras al exterior de las viviendas de la zona pie de monte del Co. Mackay. Elaboración propia.

El Zr muestra una concentración cinco veces mayor en CR08-EXT que en SR02-EXT con $0,0269 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0052 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Solo en SR02-EXT se detectó Pd con una concentración baja de $0,0005 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La Ag en CR08-EXT fue 30 veces mayor que en SR02-EXT con concentraciones de $0,069 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0023 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El In solo se identificó en CR08-EXT con $0,0362 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Sn muestra niveles similares entre las viviendas con $0,0261 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT y $0,0154 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT. El Ba alcanza $0,0374 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08EXT y $0,0119 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT. En ambas viviendas el Hg presenta una baja respecto al Ba, registrando $0,0155 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT y $0,0023 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT. Las concentraciones de Pb alcanzan $0,0554 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR08-EXT y $0,0205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR02-EXT. El La solo se identificó en CR08-EXT con $0,0207 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las concentraciones de elementos traza y La al exterior de las viviendas de la zona de pie de monte del Co. Mackay pueden ordenarse de la siguiente manera según su mediana: Pb ($0,038 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ag ($0,036 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Y y Se ($0,028 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ba ($0,025 \mu\text{g}/\text{m}^3$), As ($0,024 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Br y Sr ($0,022 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Sn ($0,021 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ge ($0,020 \mu\text{g}/\text{m}^3$), In y Rb ($0,018 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Zr ($0,016 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ga ($0,014 \mu\text{g}/\text{m}^3$), La ($0,010 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Hg ($0,009 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cu ($0,008 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Zn ($0,005 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Ni ($0,002 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

En la Figura 4.34 se muestran las concentraciones de elementos traza y La al exterior de las viviendas CR05 y SR09, pertenecientes a la zona del valle fluvial del río Coyhaique, CR09, ubicada en el valle fluvial del río Simpson, y SR06 localizada al exterior de las zonas prioritarias de muestreo.

El Ni solo se identificó en SR09-EXT con $0,0053 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Solo en CR05-EXT se identificó Zn con $0,0014 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de Ga se pueden ordenar de la siguiente manera: $0,028 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,0226 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,0213 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0138 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La máxima concentración de Ge se registra en SR09-EXT con $0,0368 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguida de $0,0195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-EXT y SR06-EXT, y $0,013 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-EXT. El As se identificó en las viviendas pertenecientes al Valle fluvial del río Coyhaique con $0,0447 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-EXT y $0,0255 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-EXT y también en SR06-EXT con $0,0323 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de Se varían entre $0,0417 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0,0318 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En CR09-EXT se registra el mayor nivel de Br con $0,0581 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de $0,0387 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-EXT, $0,0243 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-EXT y $0,0163 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-EXT. El Rb fue detectado en CR09-EXT, SR06-EXT y CR05-EXT con $0,0203 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,0183 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0,0029 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. La concentración más alta de Sr ocurre en la vivienda SR06-EXT ubicada cerca del Co. Cinchao con $0,0293 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en SR09-EXT se presenta una concentración similar de $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en CR09-EXT alcanza $0,0179 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El Y presenta niveles más altos en CR09-EXT y CR05-EXT con $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en ambas viviendas, en SR09-EXT registra $0,0291 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en CR06-EXT $0,0042 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

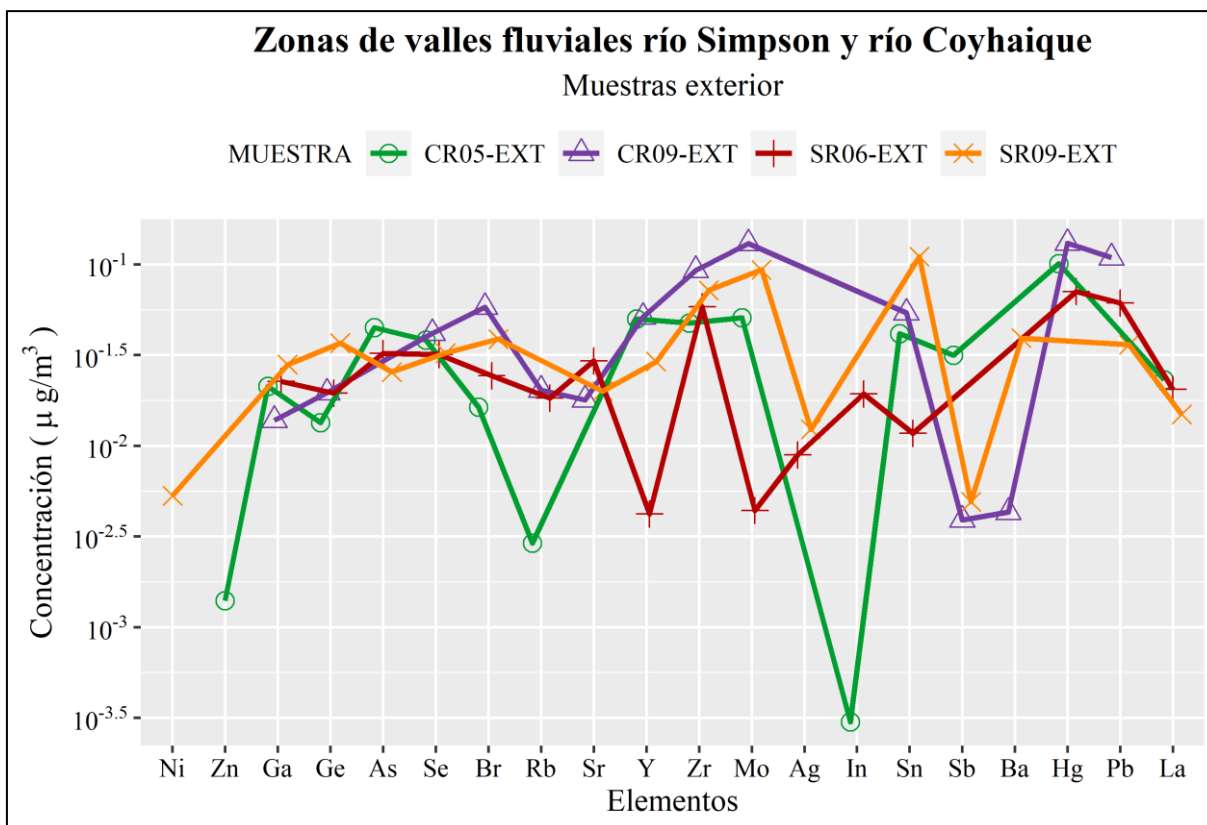


Figura 4.35. Concentraciones de elementos traza y tierras raras al exterior de las viviendas de las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique. Elaboración propia.

Las concentraciones de Zr en orden decreciente corresponden a: 0,0928 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-EXT, 0,072 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-EXT, 0,0584 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-EXT y 0,0475 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-EXT. El Mo se identificó en todas las viviendas y sus concentraciones van desde 0,1302 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR09-EXT a 0,0044 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-EXT. En las viviendas SR09-EXT y SR06-EXT se reconoció Ag con 0,0123 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0089 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Solo se identificó In en SR06-EXT con 0,0193 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y CR05-EXT con 0,0003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Sn corresponde al elemento con mayor concentración en SR09-EXT con 0,1103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en CR09-EXT la concentración de Sn alcanza 0,054 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en CR05-EXT se registra 0,0415 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en SR06-EXT presenta 0,0117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El Sb presenta menores niveles en comparación al Sn, en CR05-EXT alcanza 0,0316 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SR09-EXT registra 0,0049 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en CR09-EXT alcanzó 0,0039 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La mayor concentración de Ba se identificó en SR09-EXT con 0,0392 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en CR09-EXT también se registró dicho elemento con una concentración nueve veces menor. El Hg es el elemento traza con mayor concentración en CR09-EXT, CR05-EXT y SR06-EXT con 0,1309 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,0709 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El Pb se registró en CR09-EXT con 0,1089 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SR06-EXT con 0,0612 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en SR09-EXT registra 0,036 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El La alcanza 0,0231 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en CR05-EXT, 0,0149 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR09-EXT y 0,0205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en SR06-EXT.

Las concentraciones de elementos traza y La al exterior de la zona de valles fluviales de los ríos Simpson, Coyhaique y cercanías del Co. Cinchao, pueden ordenarse de la siguiente manera según su mediana: Hg (0,086 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mo (0,072 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zr (0,065 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Pb (0,049 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sn (0,048 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Y (0,040 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Se (0,035 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Br (0,032 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), As (0,029 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ga (0,022 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ge (0,020 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sr (0,019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), La (0,018 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Rb (0,011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ag y Sb (0,004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Ba (0,002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En resumen, los datos descritos muestran claras diferencias en las concentraciones elementales de elementos traza y La al exterior de las viviendas según su ubicación geográfica. En la zona centro los elementos con mayor concentración corresponden a Sn, Pb, Ge y Mo. Mientras que en la zona de pie de monte del Co. Divisadero y las zonas de valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique los elementos con mayores niveles corresponden a Hg, Mo, Zr, Pb y Sn. Por otro lado, la zona de pie monte del Co. Mackay presentó mayor presencia de elementos como Pb, Ag, Y, Se y Ba, muy diferente a las otras zonas. Estos resultados evidencian una variabilidad espacial en las concentraciones de elementos traza y tierras raras, posiblemente influenciada por factores locales como la proximidad a fuentes de emisión y las características geomorfológicas de cada zona.

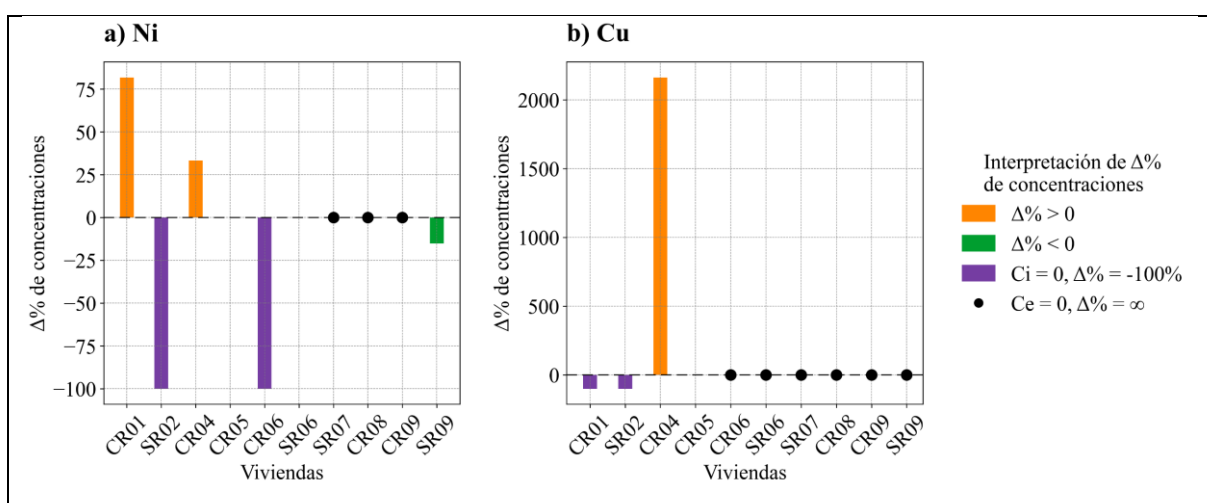
4.2.3.1.3. Análisis de Elementos traza y Tierras raras: Interior y Exterior

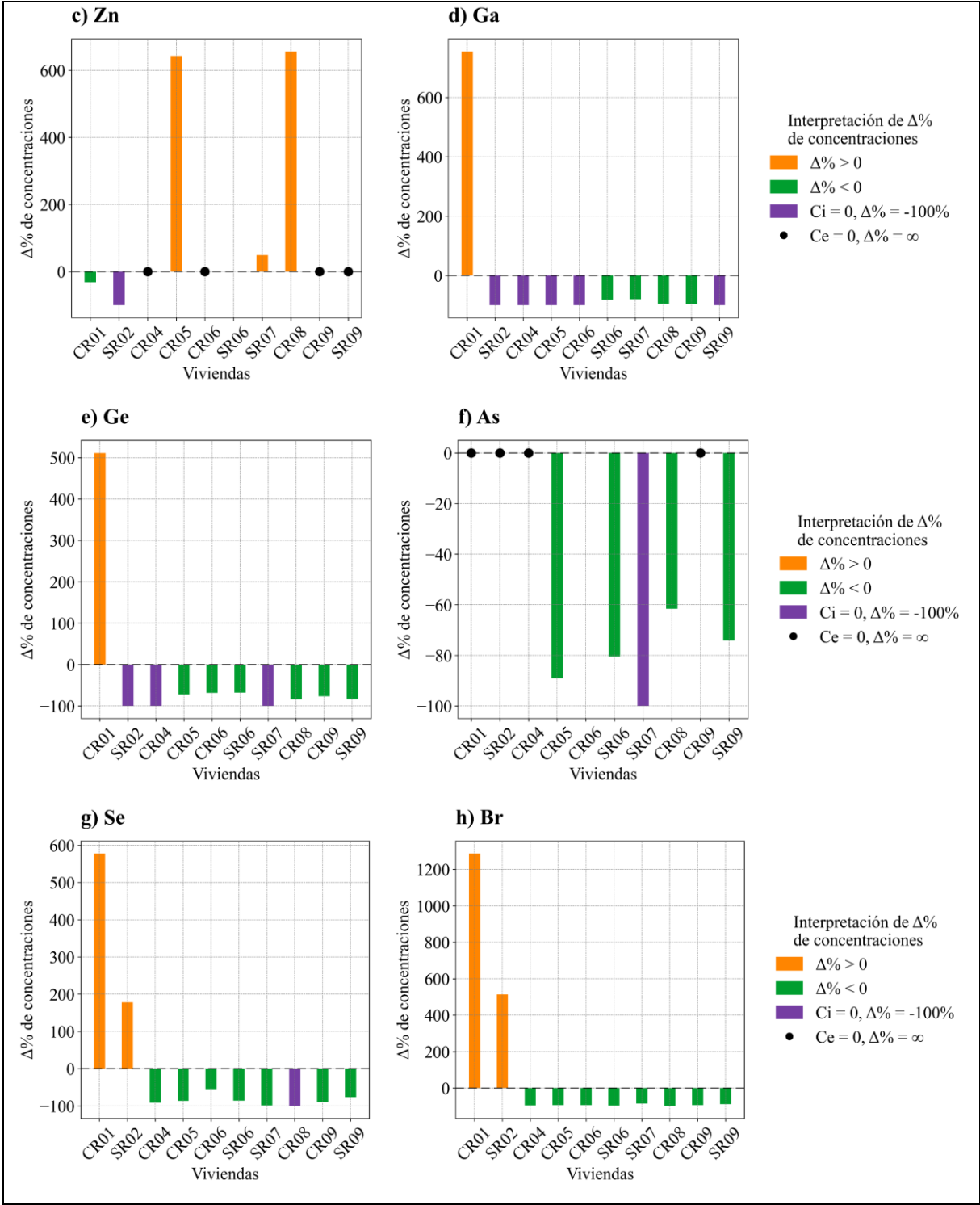
Al igual que para los elementos mayores en esta sección se realiza un análisis del comportamiento de los elementos traza y La ya descritos, en relación con sus proporciones y distribución tanto al interior como el exterior de los puntos muestreados. Para ello, se calcularon las diferencias porcentuales ($\Delta\%$) entre las concentraciones de cada elemento en ambos ambientes y se realizaron los gráficos de boxplot.

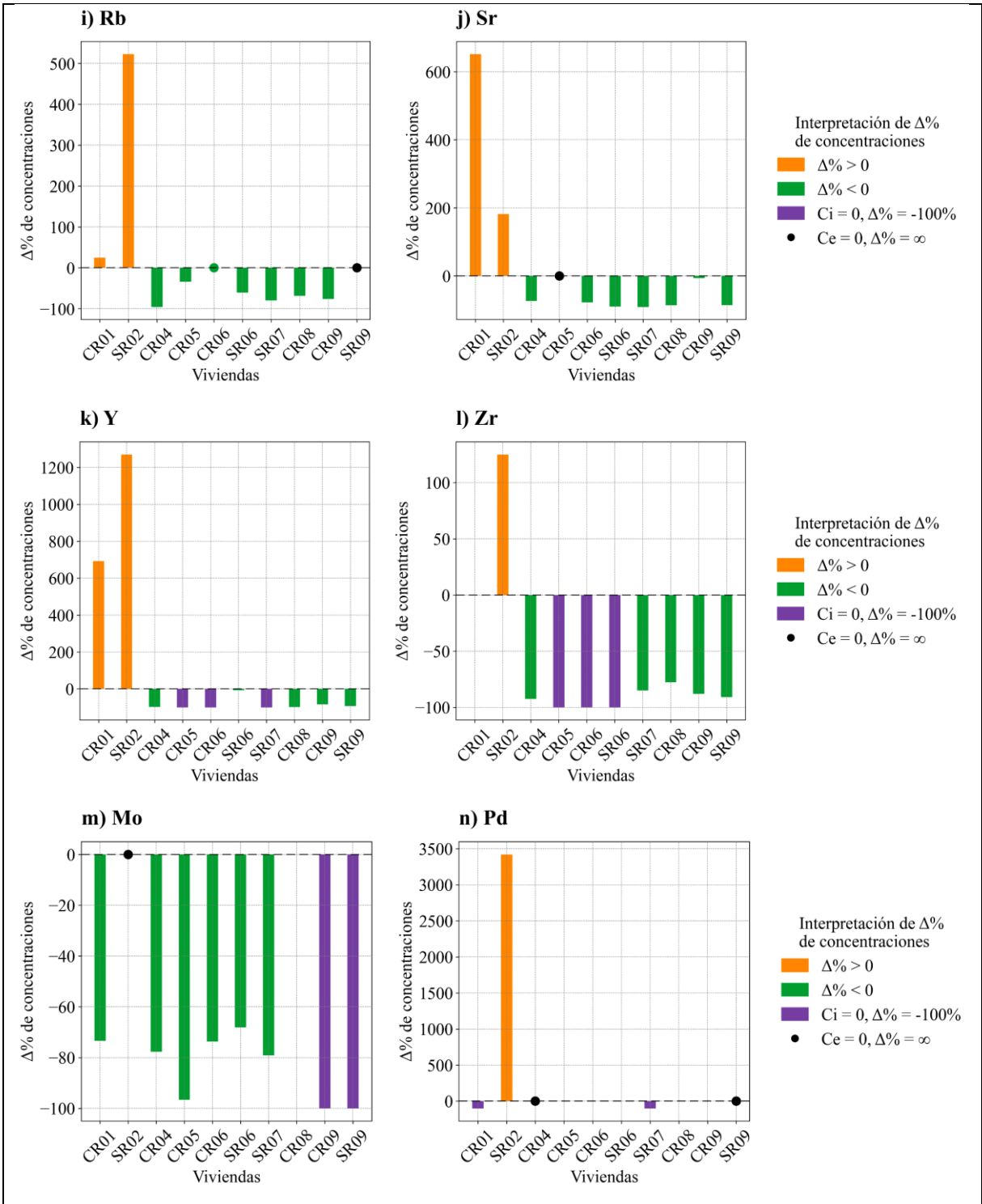
En la Figura 4.36 se agrupan los resultados de las diferencias porcentuales ($\Delta\%$) de las concentraciones de cada elemento traza y La, al interior y exterior de las viviendas. Los colores de las barras y la simbología de los gráficos son iguales a los presentados en los elementos mayores.

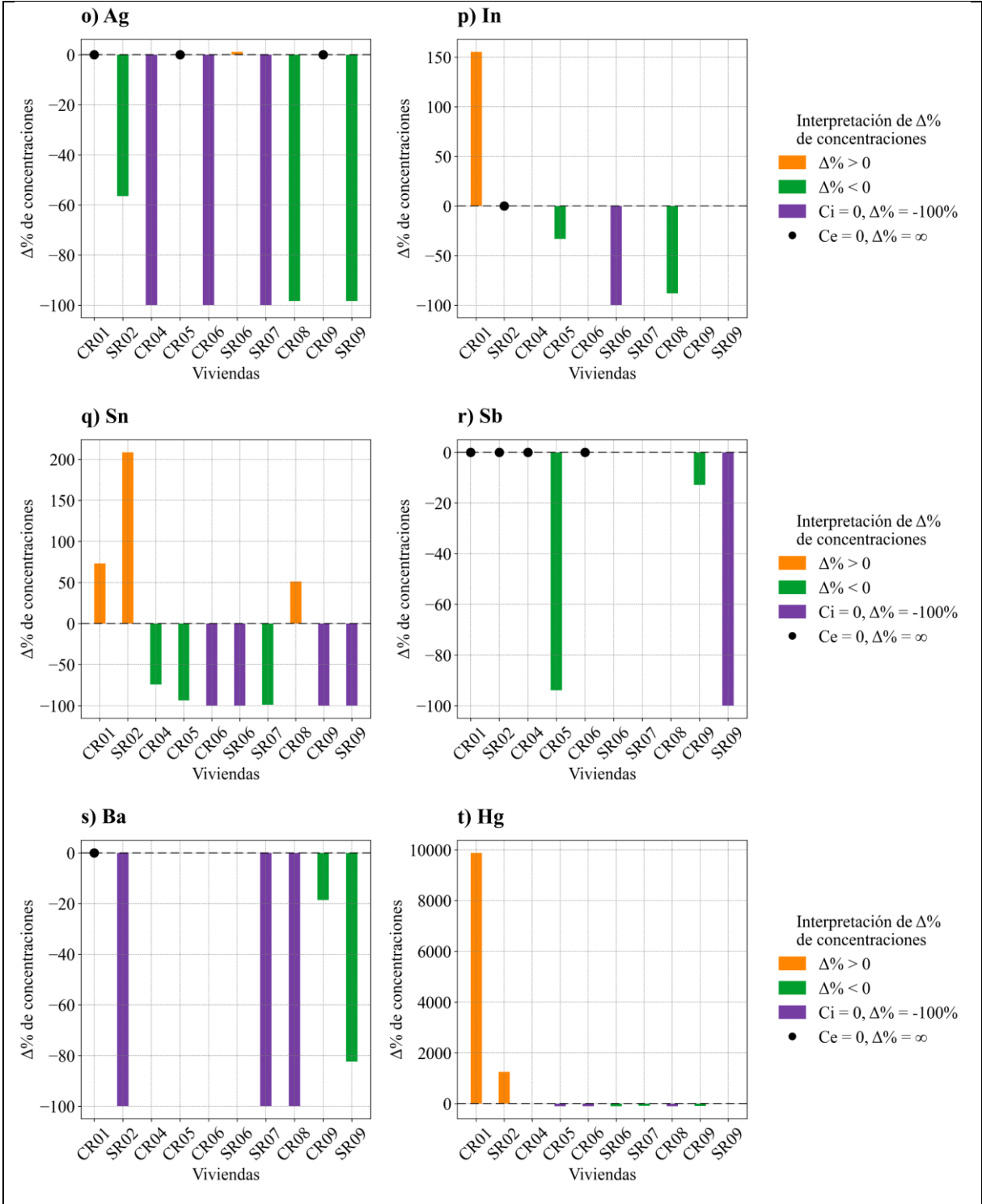
Para el Ni (Figura 4.36 a)), en tres de los casos se registró más en el exterior que en el interior, en dos casos las concentraciones fueron mayores al interior específicamente un 82% en CR01 y un 33% en CR04, en tres casos la Ce fue igual a cero, y en SR06 tanto al interior como el exterior la concentración de Ni fueron iguales a cero. En el 60% de los casos el Cu (Figura 4.36 b)) presenta Ce =0, en CR01 y SR02 la Ci =0, mientras que en CR04 se registró un 2,163% más de Cu al interior, en CR05 no hay barra ya que Ci=Ce=0. El Zn (Figura 4.36

c)) en el 30% de los casos muestra mayores concentraciones al interior, específicamente 643% en CR05, 49% en SR07 y 656% en CR08, en el 40% de los casos $C_e=0$ y por ende la diferencia indeterminada, en el 20% de los casos se registra mayores concentraciones al exterior como en CR01 y SR02. En el 90% de los casos el Ga (Figura 4.36 d)) muestra mayores concentraciones al exterior, solo en CR01 este registra mayor concentración al interior con un 754%. Similar al Ga, el Ge (Figura 4.36 e)) registra en nueve viviendas mayores concentraciones al exterior y nuevamente solo en CR01 se registró más en el interior con un 511%. El As (Figura 4.36 f)), en el 50% de los casos muestra mayores concentraciones al exterior, en el 40% la $C_e=0$, mientras que en solo un caso en CR06 tanto C_i como C_e son iguales a cero. Solo en CR01 y SR02 se registró mayores niveles de Se (Figura 4.36 g)) al interior con 577% y 179%, respectivamente, en el resto de las viviendas las mayores concentraciones ocurrieron en el exterior. El Br (Figura 4.36 h)), presenta un comportamiento similar al Se con un 20% de los casos mayores concentraciones al interior y un 80% con mayores concentraciones al exterior. En el 60% de las viviendas monitoreadas el Rb (Figura 4.36 i)) muestra mayores concentraciones al exterior, en dos casos $C_e=0$, mientras que en CR01 y SR02 se alcanzó un 25% y 523% más Rb al interior, respectivamente. Para el Sr (Figura 4.36 j)), el 70% de los casos presenta mayores concentraciones al exterior, mientras que nuevamente CR01 y SR02 muestran mayores niveles al interior, solo en CR05 la C_e fue igual a cero. En el caso del Y (Figura 4.36 k)), en el 80% de las viviendas hay mayores concentraciones al exterior, en tres de estos casos ocurre el caso en que $C_i=0$, mientras que en CR01 y SR02 se identificó mayores niveles de Y al interior con un 692% y 1270%, respectivamente.









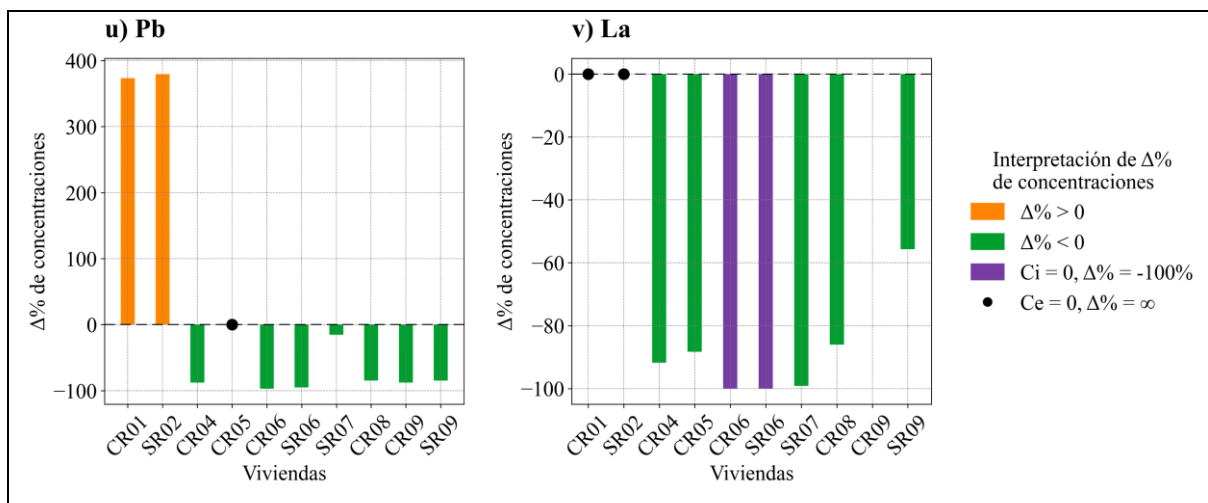


Figura 4.36. Gráfico de diferencias de concentraciones (%) de elementos traza y La. Elaboración propia.

En el 80% de las viviendas monitoreadas se detectó mayores niveles de Zr al exterior (Figura 4.36 l)), en tres de estos casos ocurre que $C_i=0$, solo en SR02 se registró más Zr al interior, mientras que CR01 la $C_i=C_e=0$. En ocho de las viviendas se detectaron mayores concentraciones de Mo (Figura 4.36 m)) al exterior y con porcentajes que varían entre -68% a -100%, en SR02 se obtuvo el caso especial de $C_e=0$ y en CR08 tanto C_i como C_e son iguales a cero. Para el Pd (Figura 4.36 n)), solo en SR02 se registró mayor concentración al interior con un 3,420%, en dos viviendas hay mayor concentración al exterior y en dos lugares ocurre que la $C_e=0$. En el 60% de los casos las concentraciones de Ag (Figura 4.36 o)) son mayores al exterior, mientras que en solo SR06 la concentración es mayor al interior con apenas un 1%, en tres viviendas ocurre el caso de $C_e=0$, por ende, la diferencia es indeterminada. En la mitad de las viviendas no se detectó In (Figura 4.36 p)) en el interior ni exterior, en tres casos se detectaron mayores concentraciones al exterior, en una vivienda ocurre que $C_e=0$ y en CR01 se registró un 155% más de In al interior. El Sn (Figura 4.36 q)) presentó mayores concentraciones al exterior en el 70% de las viviendas, mientras que en el 30% presentó mayores niveles dentro de estas, destacando SR02 con 208%. Para el Sb (Figura 4.36 r)) en el 30% de los casos se detectaron mayores niveles al exterior, en el 40% ocurre que $C_e=0$, mientras que en 30% restante ocurre que las concentraciones son iguales a cero tanto dentro como fuera de las viviendas. El Ba (Figura 4.36 s)) muestra mayores concentraciones al exterior de la mitad de las viviendas, en cuatro de estas ocurre que $C_i=C_e=0$, mientras que en una $C_e=0$. En el caso del Hg (Figura 4.36 t)), es importante destacar que en el 60% de las viviendas se registran mayores concentraciones al exterior, mientras que en el interior específicamente en CR01 y SR07 existe un 9,875% y 1,252% más Hg que en el interior, debido al largo de estas barras no es posible visibilizar de manera adecuada las barras inferiores. En el 70% de las viviendas se

registró mayores niveles de Pb (Figura 4.36 u)) en el exterior, mientras que en dos viviendas ocurrió lo contrario, en CR05 ocurre el caso de $C_e=0$. Para el La (Figura 4.36 v)), similar al Pb, en siete viviendas se detectaron mayores niveles del elemento en el exterior, con dos casos especiales de $C_e=0$ y un caso en que las concentraciones tanto dentro como fuera son iguales a cero.

El análisis de diferencias de concentraciones elementos traza y tierras raras tanto al interior como al exterior revela que la mayoría de los elementos tiende a presentar mayores concentraciones al exterior, específicamente Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Ag, In, Sn, Ba, Hg, Pb y La. Si se considera que los casos en que $C_e=0$ y por ende $\Delta\%$ de concentración es indeterminado, pero aún existe una $C_i > 0$ (casos representados por puntos en el gráfico), se puede establecer que los elementos Ni, Cu, Zn, Pd y Sb tienden a concentrarse más al interior de las viviendas. Destacan las viviendas CR01 y SR02 que en la mayoría de los elementos traza y tierras raras tienden a acumular elementos traza al interior con grandes diferencias de concentraciones respecto al exterior, este comportamiento podría sugerir que en estas viviendas existes condiciones o comportamientos particulares que favorecen la acumulación de elementos en su interior.

La distribución estadística de los datos de elementos traza y tierras raras se resume en la Figura 4.37 mediante gráficos de boxplot. Al interior (Figura 4.37 a)), los elementos con mayores medianas son: Sn ($0,0233 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Zn ($0,0131 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Pb ($0,0119 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mo ($0,0106 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ba y Hg ($0,0094 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Los elementos As, Zr, Rb e In presentan una mediana que ronda los $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el Se y Sr muestran una mediana de $0,0056 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el Ge y Sb una de $0,0054 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las menores medianas al interior corresponden a: Ga ($0,0052 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Br ($0,0048 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cu ($0,0046 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Pd ($0,0044 \mu\text{g}/\text{m}^3$), La ($0,0042 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Y ($0,0037 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ag ($0,0036 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Ni ($0,0026 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Al interior (Figura 4.37 a)), la mayoría de los elementos muestra dispersión en los datos, expresado por rango intercuartílico, aquellos elementos con mayor dispersión de datos corresponden a Cu, Zn, Ga, Br, Y, Mo, Pd, Ag, Sn, Hg, y Pb, lo que señala mayor variabilidad en las concentraciones de estos elementos al interior de las viviendas. Así mismo, la mayoría de los conjuntos de datos de elementos presentan asimetrías, es decir la línea que representa la mediana se encuentra desplaza respecto al centro de las cajas. Los elementos Zn, Ge, Mo, Ag, In y Ba presentan asimetría positiva, lo que indica una mayor concentración de valores altos. En contraste, la mayoría de los elementos, específicamente Ni, Cu, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr y Pb, presentan una asimetría negativa lo que indica una mayor concentración de valores bajos, con unos pocos valores altos. Los elementos Ga, Br, Pd, Sn, Sb y La, presentan simetría en sus

conjuntos de datos. En relación con los datos atípicos, la mayoría de los elementos presenta este tipo de datos, estos podrían representar eventos puntuales o fuentes locales específicas de emisión de estos elementos en el interior. Solo los elementos Ni, Cu, Pd, In, Sn y Ba no muestran valores atípicos.

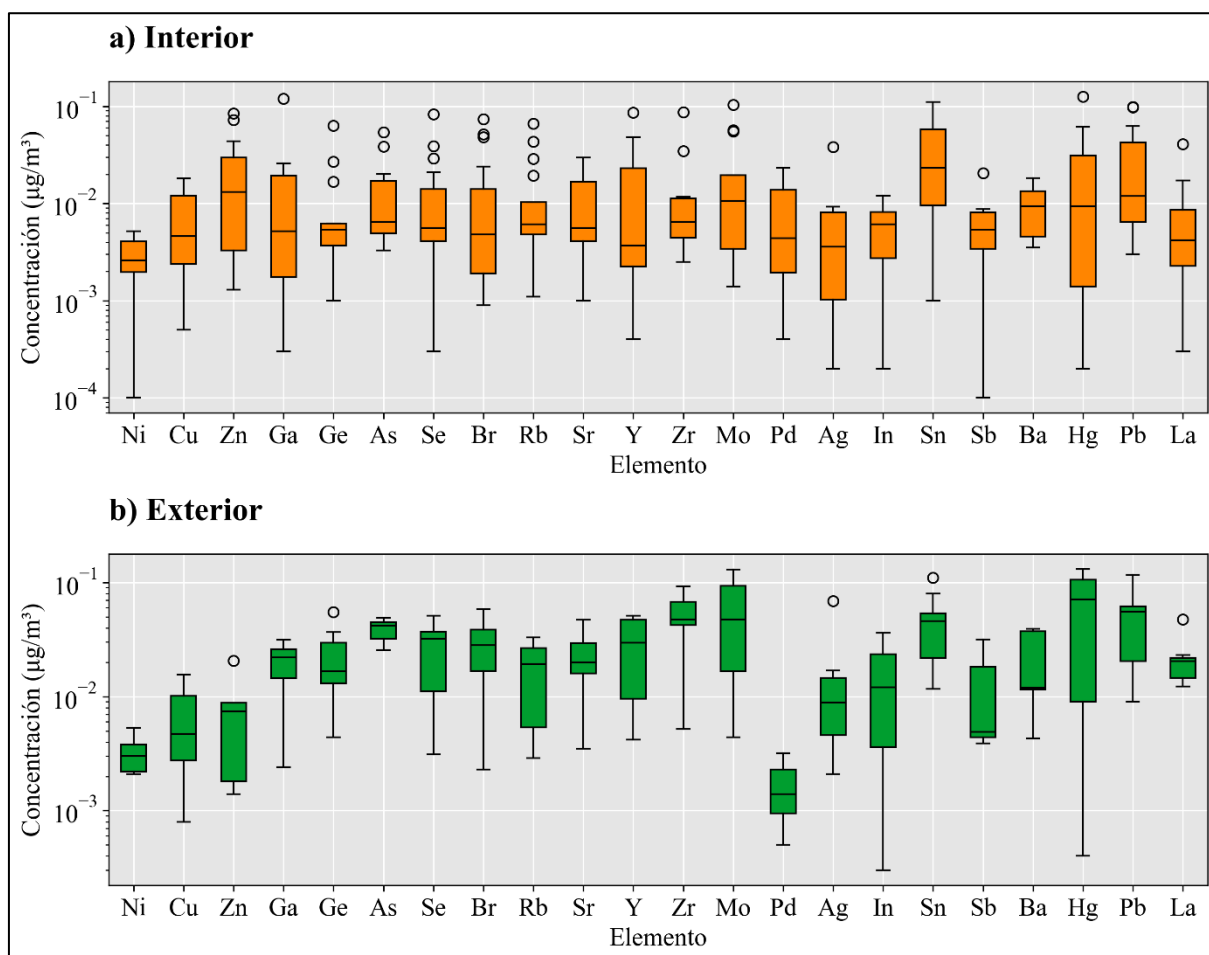


Figura 4.37. a) Gráfico de boxplot de traza y tierras raras al exterior de las viviendas. b) Gráfico de boxplot de elementos traza al exterior de las viviendas. Elaboración propia.

Al exterior (Figura 4.37 b)), los elementos con mayores medianas son: Hg (0,071 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Pb (0,055 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zr (0,048 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mo (0,047 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sn (0,0458 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y As (0,0419 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Los elementos Se e Y presentan una mediana que ronda los 0,003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el Br de 0,028 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ga de 0,022 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, La de 0,021 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Sr de 0,020 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Rb de 0,019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y Ge de 0,017 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las menores medianas al interior corresponden a: In y Ba (0,012 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ag (0,009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Zn (0,007 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sb y Cu (0,005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ni (0,003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Pd (0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Los elementos con mayor dispersión de datos al exterior corresponden a Ni, Cu, Sn, Se, Rb, Y, Mo, Ag, In, Sb, Ba, Hg y Pb, señalando una amplia variación entre las concentraciones fuera de las viviendas (Figura 4.37 b)). Aquellos elementos con asimetría

positiva corresponden a Zn, Ga, As, Se, Br, Rb, Y, Mo, In, Sn, Hg, Pb y La, mientras que los elementos con asimetría negativa corresponden a Cu, Ge, Sr, Zr, Pd, Sb y Ba. No existen elementos al exterior que presenten simetría en los datos. Solo algunos elementos presentan datos atípicos, específicamente Zn, Ge, Ag, Sn y La, estos en mucha menor cantidad en comparación al interior.

4.2.4. Cumplimiento de la normativa vigente de calidad del aire

Para analizar el grado de cumplimiento de la normativa vigente de calidad del aire de las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ obtenidas en terreno (presentadas en el capítulo 4.2.2), se realizó el cálculo de los promedios de $MP_{2,5}$ en periodos de 24 h de cada vivienda, comparándose estos resultados con la normativa chilena actual y la establecida por la OMS. La Figura 4.38 muestra los promedios de $MP_{2,5}$ tanto en el primer como en el segundo periodo de 24 h, al interior (Figura 4.38 a)) y exterior (Figura 4.38 b)) de las viviendas muestreadas. El color de las barras representa los niveles de calidad del aire según MMA, mientras que las líneas segmentadas representan la normativa vigente en relación al promedio de $MP_{2,5}$ en 24h. Las viviendas se han ordenado cronológicamente, según la fecha de monitoreo.

En total, se consideraron 28 períodos de monitoreo al interior de las viviendas, donde el 29% de los casos se encuentran bajo la normativa de la OMS, el 61% se encuentran sobre la normativa de la OMS y el 10% supera dicha normativa y la nacional (Figura 4.38). Al exterior, se registraron un total de 26 periodos, ya que en SR06 no se realizaron mediciones, así en el 23% de los casos se cumplen las normativas nacionales e internacionales, el 46% de los periodos están sobre los límites de la OMS y el 31% restante supera las normativas nacionales, en el término del periodo de muestreo.

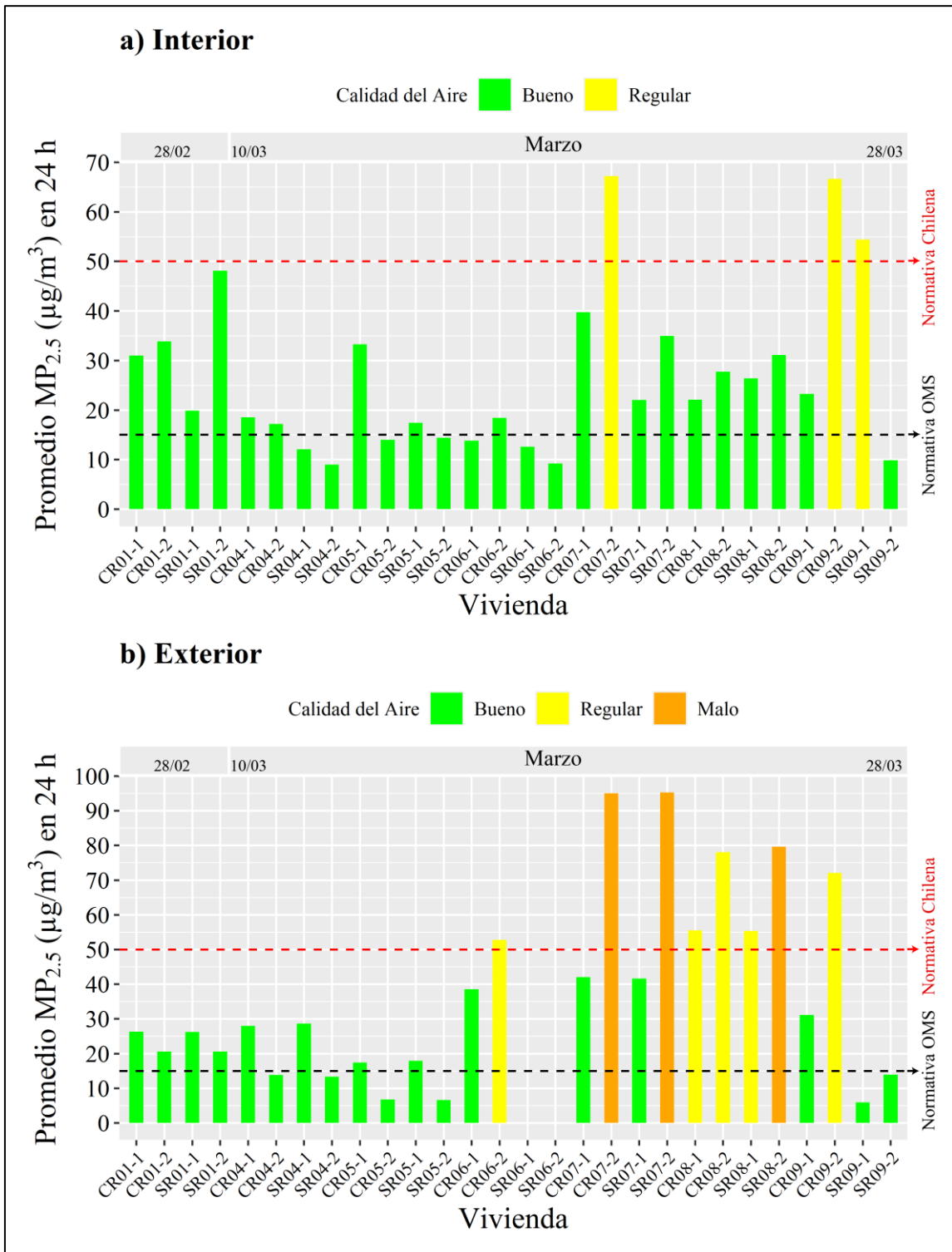


Figura 4.38. Promedios de $MP_{2,5}$ en 24 h a) interior y b) exterior. Elaboración propia.

En resumen, según la clasificación de los niveles de calidad del aire vigente, al interior de las viviendas el 89% de los casos presenta una buena calidad del aire, mientras que el 11% tuvo una calidad regular. Al exterior el 77% obtuvo buena calidad del aire, mientras que el 19% de los casos presenta una calidad regular y el 12% una mala calidad del aire.

Si bien la Gestión de Episodios Críticos (GEC) por parte del MMA va desde abril a septiembre de cada año, los resultados presentados en la Figura 4.38 señalan que los episodios críticos se registran a partir de la vivienda CR07 monitoreada el 17 de marzo, lo que implica una mala calidad del aire y por ende decretar emergencia ambiental.

5. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permitieron caracterizar el material particulado fino ($MP_{2,5}$) en la ciudad de Coyhaique, en términos de sus concentraciones totales, elementales y su dinámica de distribución espacial.

La información recopilada a través de la red SINCA permitió analizar la evolución del $MP_{2,5}$ durante la última década, estableciendo el contexto general en el que se enmarca este trabajo. Además, los datos de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ y variables climáticas obtenidos en las estaciones COYI y COYII, durante la campaña de terreno realizada en el verano de 2022, proporcionaron una visión general del panorama climático y ambiental en el que se desarrollaron las mediciones.

Los datos recopilados durante la campaña en terreno permitieron determinar las concentraciones totales y elementales de $MP_{2,5}$, así como identificar su distribución en las zonas prioritarias de monitoreo establecidas, tanto en el interior como en el exterior de las viviendas seleccionadas. Además, el análisis del cumplimiento de la normativa vigente en relación con las concentraciones totales de $MP_{2,5}$, proporcionó una evaluación del grado de conformidad con los estándares establecidos.

5.1. DATOS DE RED SINCA

5.1.1. Evolución de las concentraciones de $MP_{2,5}$ en la última década

Hasta este trabajo el último recuento de promedios anuales de $MP_{2,5}$ en la ciudad de Coyhaique fue publicado por Solís (2021), donde describe que entre 2013 a 2020 ocurre una disminución gradual de estos promedios. Para este trabajo se completó el periodo de la última década correspondiente a los años 2013 a 2023, periodo donde se ha experimentado los niveles más críticos de contaminación por MP en la ciudad, considerando además la actualización de normativa de $MP_{2,5}$ establecida por la OMS en 2021.

Los resultados (Figura 4.1) muestran que durante la última década los niveles de $MP_{2,5}$ han superado consistentemente las normativas nacionales e internacionales actuales. Además, se observa una leve tendencia al alza en los promedios de $MP_{2,5}$ entre 2021 a 2022, en contraste a la tendencia a la disminución descrita por Solís (2021) (Figura 2.23). Este incremento en los promedios de 2021 a 2022 podría estar influenciada por factores como las condiciones climáticas de cada año, la cantidad de registros oficiales obtenidos por las estaciones de monitoreo y el uso de sistemas de calefacción por parte de la población. No obstante, entre 2019 y 2023, los promedios anuales no presentan variaciones significativas en términos numéricos oscilando entre los 30 a 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que, en comparación a la década completa indica que los

promedios anuales se han homogeneizado con el tiempo, esto podría estar asociado a una estabilización en las emisiones de $MP_{2,5}$ o en las condiciones ambientales de la ciudad en los últimos años.

A través de estos resultados fue posible además evidenciar que en COYII se registraron promedios anuales levemente más altos que COYI en 8 de los 10 años estudiados, considerando que en ambas estaciones se utiliza el mismo sensor para medir $MP_{2,5}$, esta tendencia de COYII podría estar asociada a factores como la calibración de sensores, ubicación y elevación en el terreno y factores meteorológicos locales.

Aunque ambas estaciones cuentan con el mismo sensor para medir $MP_{2,5}$, posibles diferencias en su calibración o mantenimiento podrían influir en la cantidad de registros oficiales obtenidos anualmente, afectando así el cálculo del promedio anual. Es importante considerar que ambas estaciones están ubicadas en zonas residenciales con alto flujo vehicular, se encuentran separadas por 871 m en línea recta y presentan una diferencia de elevación de 16 m s.n.m. (COYI a 340 m s.n.m. y COYII a 356 m s.n.m.). Esta diferencia de elevación podría afectar la exposición de COYII a la dispersión y circulación de $MP_{2,5}$ debido al viento, ya que, como se indicó en el apartado de clima, los vientos predominantes soplan de oeste (W) a este (E), y COYII está ubicada precisamente al este de la ciudad.

En síntesis, en base a los datos provenientes de la red SINCA fue posible determinar la evolución de $MP_{2,5}$ en la última década en la ciudad, estableciendo que estos presentan una tendencia a la homogenización, sin embargo, continúan superando la normativa nacional e internacional actual, lo que refleja la necesidad de seguir implementando medidas para mitigar la contaminación por $MP_{2,5}$. Además, a pesar de que las estaciones presentan las leves diferencias en promedios de $MP_{2,5}$, su proximidad en ubicación y elevación resalta la necesidad de ampliar la red de monitoreo SINCA, para reflejar de manera más representativa la situación de otros sectores de la ciudad.

5.1.2. Concentraciones totales de $MP_{2,5}$ y variables climáticas red SINCA

A través de datos de concentraciones totales de $MP_{2,5}$, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento de la red SINCA, obtenidos durante el periodo de 26 de febrero de 2022 al 31 de marzo de 2022, se buscaba obtener el contexto ambiental general en el cual se realizó la campaña en terreno de este trabajo, esto se logró mediante la elaboración de: (1) serie de tiempo de registros horarios de $MP_{2,5}$ (Figuras 4.2 y 4.3), (2) gráficos de dispersión que relacionan registros horarios de $MP_{2,5}$ con la temperatura, humedad relativa y velocidad del

viento de cada hora (Figuras 4.4 y 4.5) y (3) gráfico de rosa de vientos que relaciona los registros horarios de $MP_{2,5}$ con la dirección del viento de cada hora (Figuras 4.6 y 4.7).

Así, para los registros horarios, tanto en COYI como en COYII se vio una tendencia al aumento gradual de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ a hacia fines del mes marzo, periodo que coincide con la transición de verano a otoño. Este fenómeno podría estar influenciado con el cambio de las condiciones meteorológicas del otoño, que como se vio en el apartado de clima, está caracterizado por la disminución de la temperatura, disminución de la velocidad del viento y mayores niveles de humedad.

A pesar de que, en este periodo del año, no se visualiza la nube de contaminación de MP en la ciudad presente en los meses de invierno, las series de tiempo realizadas indican que existen diversos registros horarios por sobre los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con máximos de $198 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en COYI y $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en COYII, estos suelen ocurrir en las mañanas y tardes, que coincide con lo expuesto por Solís (2021) descrito en la sección 2.3.

Los gráficos de dispersión confirman lo indicado anteriormente en las series de tiempo, señalando que las mayores concentraciones de $MP_{2,5}$, durante el periodo de estudio, están relacionadas a bajas temperatura ($2,5^\circ\text{C}$ a $12,5^\circ\text{C}$), baja velocidad del viento (1 a 3 m/s) y alta humedad (75% a 100%) en ambas estaciones.

Así mismo, los gráficos de rosa de vientos indican que las mayores concentraciones totales de $MP_{2,5}$ se vinculan a direcciones del viento de baja frecuencia y velocidad, como es oeste (W), sureste (SE) y suroeste (SW).

De esta manera, el análisis de las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ y su relación con variables climáticas de la red SINCA, permitieron identificar que el contexto climático y ambiental en que se desarrolló la campaña en terreno está caracterizado por temperaturas entre 0°C a 20°C , con velocidades de viento entre 1 m/s a 9 m/s y humedad entre 50% a 100% predominantemente. Donde las mayores concentraciones de $MP_{2,5}$ se registraron preferentemente en las mañanas y tardes, y su dispersión está relacionada a direcciones de viento oeste (W), sureste (SE) y suroeste (SW).

5.2. DATOS DE CAMPAÑA EN TERRENO

5.2.1. Masa acumulada en los filtros de teflón

Los resultados de masa acumulada en los filtros de teflón resultaron en una aproximación al comportamiento de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ en la campaña de terreno (Figura 4.9). De un total de 27 filtros muestreados, el 44% supero la media obtenida de 482 μg , dentro de esta proporción de filtros el 55% de los filtros provienen del interior de las viviendas, mientras que el 42% se obtuvo del exterior, esto señala que la cantidad de $MP_{2,5}$ al interior puede ser similar o incluso superior a la del exterior y sugiere que las personas que viven en los lugares que acumularon mayor masa se podrían encontrar más expuestas al $MP_{2,5}$ que las viviendas que acumularon menos $MP_{2,5}$.

Al interior, las casas que mostraron mayor acumulación de $MP_{2,5}$ durante las 48 h de monitoreo, corresponden a viviendas ubicadas en las zonas prioritarias de Pie de monte de Co. Divisadero, Pie de monte de Co. Mackay y Valle fluvial del río Simpson. Los máximos de masa acumulada ocurrieron en las viviendas: CR07-INT (800 μg), CR09-INT (866 μg), SR03-INT y SR09-INT (633 μg) y CR08-INT (600 μg). Esta mayor acumulación en las viviendas podría explicarse por factores como la eficiencia de los sistemas de calefacción, el tipo de combustible utilizado y las prácticas de ventilación en las viviendas.

Al exterior, las viviendas con mayor acumulación de masa corresponden a las ubicadas en el Pie de monte de Co, Divisadero, SR06-EXT ubicada en las cercanías del Co. Cinchao y CR09-EXT del Valle fluvial del río Simpson. Los máximos ocurrieron en SR07-EXT (800 μg), CR08-EXT (666 μg), SR06-EXT (600 μg), CR06-EXT y CR09-EXT (533 μg). En estos casos, la mayor acumulación podría explicarse en que las viviendas se ubican en zonas de mayor elevación en la ciudad y donde además se vio en la sección 4.1.3. que circulan vientos en dirección W (oeste) a E (este) con mayor concentración de $MP_{2,5}$.

5.2.2. Concentraciones totales de $MP_{2,5}$, temperatura y humedad dentro y fuera de las viviendas

En esta sección se compararon los niveles de contaminación al interior y exterior de las viviendas en siete pares de casas, utilizando datos de concentraciones totales de $MP_{2,5}$, temperatura y humedad registrados durante las 48 h de monitoreo (Figuras 4.10 a 4.16).

Para la medición de $MP_{2,5}$ se utilizaron los equipos *PEM*, *AirChek Sampler*, *Dust trak* y *EPAM5000*. En términos de funcionamiento el único en presentar fallas durante la medición fue el *Dust Trak* al exterior de SR06, donde no fue posible realizar mediciones. La emisión de ruidos molestos por parte del uso del *AirChek Sampler*, acoplado al *PEM*, representó una

dificultad a la hora de utilizarlo dentro de las viviendas, lo que representó un desafío y obligó a reorganizar la distribución de los equipos, trasladándolos al exterior. En contraste, el EPAM5000 demostró ser el equipo más completo, ya que permite obtener resultados equivalentes a los obtenidos mediante la combinación del PEM, AirChek Sampler y Dust Trak, simplificando así el proceso de medición. Para la temperatura y humedad se utilizó el *HOBO* que no presentó fallas durante las mediciones, gracias a la calidad de su batería se registraron estas variables de manera eficiente.

Los resultados de esta sección, expresados en gráficas de series de tiempo para cada vivienda, indican que el comportamiento de los niveles de $MP_{2,5}$ es variable entre las viviendas y está influenciado por factores como los tipos de calefacción, ubicación y características de las viviendas y las condiciones ambientales externas en las cuales se monitoreo el $MP_{2,5}$.

La importancia de estos resultados radica en que se aborda, por primera vez, los niveles $MP_{2,5}$ tanto dentro como fuera de las viviendas en la comuna, representando así una contribución fundamental para comprender la calidad del aire en la zona.

Es importante aclarar que dentro de las principales fuentes de emisión de $MP_{2,5}$ reconocidas en la ciudad (sección 2.4), durante la campaña en terreno, no se identificaron eventos como incendios forestales o quemas agrícolas, que pudieran influir en las mediciones de $MP_{2,5}$ en terreno. Según el inventario de emisiones, la quema de leña representa el 99,67% del total de las emisiones de este contaminante (Silva y otros, 2017). Este dato subraya el papel dominante de esta práctica en la calidad del aire de Coyhaique, tanto al interior como al exterior de las viviendas, y respalda la interpretación de los resultados observados en esta sección, donde las concentraciones más elevadas de $MP_{2,5}$ están asociadas al uso de sistemas de calefacción a leña. Cabe destacar, que estos inventarios no consideran el aporte cortical del material geológico circundante en la ciudad y que también podría estar aportando al aumento de $MP_{2,5}$.

En general, en la mayoría de las viviendas los promedios de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ fueron mayores al exterior, a excepción de CR01, SR01, SR09, CR05 y SR05. Esto último podría explicarse, para las viviendas de tipo SR, por el uso de calefacción a leña que emite mayores niveles de $MP_{2,5}$. Por otro lado, si bien las viviendas CR01 y CR05 cuentan con recambio de calefactores, en ambas reportaron el uso de artefactos complementarios de calefacción como cocinas a leñas durante el periodo de monitoreo, lo que explicaría estos mayores promedios.

En términos de patrones temporales, en general, tanto dentro como fuera de las viviendas, los niveles de $MP_{2,5}$ mostraron diversas fluctuaciones durante las 48 h de monitoreo. Los aumentos de concentraciones totales de $MP_{2,5}$ ocurrieron preferentemente durante las mañanas

(06:00 – 12:00 h), tardes (13:00 – 20:00 h) y parte de la noche (20:00 – 24:00 h) (Anexo 9). Estos aumentos se explicarían por las actividades típicas de los habitantes de cada vivienda y las condiciones climáticas vistas al interior y exterior de las viviendas. Durante las mañanas las temperaturas tanto exterior como al interior de las viviendas son bajas y la humedad alta, por ende, las personas encienden las estufas antes de ir al trabajo y/o estudios. Luego al medio día, se registra en general al exterior un aumento de la temperatura y disminución de la humedad, y con esto menores concentraciones totales de $MP_{2,5}$, probablemente porque se enciende con menor frecuencia las estufas. En las tardes, las personas retornan a sus viviendas, y al exterior en general, la temperatura desciende y aumenta la humedad, lo que produce que los habitantes enciendan sus sistemas de calefacción y su funcionamiento se prolongue a la noche. Finalmente, en las madrugadas entre las 01:00 – 06:00 h disminuyen las concentraciones de $MP_{2,5}$, en la mayoría de las viviendas, probablemente por el bajo uso de calefacción.

La disminución de $MP_{2,5}$ al medio día coincide con lo identificado por Solís (2021) que señala que durante este periodo aumenta la temperatura exterior, disminuye la humedad y aumenta la velocidad del viento, lo que ayudaría a la remoción de $MP_{2,5}$ en la atmósfera.

En cuanto a la temperatura y la humedad relativa, al interior de las viviendas la temperatura promedio varió entre los $14^{\circ}C$ a $24^{\circ}C$ y la humedad promedio entre 35% a 62%. Es importante señalar que, en algunas viviendas, no fue posible obtener un registro completo de temperatura y humedad interior, debido a la disponibilidad de los equipos. Por otro lado, que al exterior la temperatura promedio osciló entre $7^{\circ}C$ a $17^{\circ}C$ y la humedad promedio entre 60% a 67%. Esto refleja que, durante esta campaña en terreno, las temperaturas interiores son significativamente más altas, lo que sugiere que las viviendas mantienen un ambiente más cálido, probablemente por el uso de calefacción y el aislamiento térmico; la humedad interior, presenta una amplia variación lo que puede estar asociado al tipo de calefacción y las actividades realizadas en la vivienda durante el monitoreo. En contraste, al exterior las temperaturas son más bajas y la humedad relativa es alta y estable, reflejando la influencia directa de las condiciones ambientales externas.

Tanto al interior como en el exterior de las viviendas, se observó el efecto directo de la temperatura sobre la humedad relativa. A medida que la temperatura aumentaba, la humedad relativa disminuía de forma consistente. En general, se registraron incrementos de temperatura hacia el mediodía y durante la noche en la mayoría de las viviendas, lo que ocasionaba una disminución en los niveles de humedad relativa.

Los gráficos de series de tiempo fueron útiles para comparar los niveles de contaminación por $MP_{2,5}$ dentro y fuera de las viviendas, donde en diversos lugares se identificó un patrón

similar del interior y exterior. Debido a la cantidad de casas monitoreadas y la variabilidad en su comportamiento en relación al $MP_{2,5}$, la gráfica dificulta visualizar tendencias respecto al tipo de calefacción (CR o SR).

Es importante destacar que, de los estudios publicados previos a este trabajo, no se aborda la contaminación dentro de las viviendas de la ciudad, por ende, estos resultados tienen gran relevancia, ya que permitieron identificar que dentro de las viviendas existen cantidades considerables de $MP_{2,5}$ durante el periodo de transición de verano a otoño.

5.2.2.1 Variabilidad y distribución de concentraciones de $MP_{2,5}$ en el interior y exterior de las viviendas

Para comparar en mayor detalle los niveles de contaminación de $MP_{2,5}$ dentro y fuera de las casas, se realizaron gráficos de boxplot en 14 viviendas, que reflejan la distribución y dispersión de los datos (Figura 4.17). En este caso, la mediana el valor central de las concentraciones de $MP_{2,5}$, y resulta un parámetro más representativo que el promedio, ya que en todas las viviendas se registraron datos atípicos que podrían sesgar el cálculo del promedio. Las comparaciones entre viviendas se basan en la suposición de que la mediana representa las condiciones típicas de exposición.

A partir de la mediana del interior de las casas, es posible determinar que las viviendas con menores niveles de contaminación corresponden a SR04 ($7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) perteneciente a la zona centro de Coyhaique y SR06 ($9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) vivienda cercana al Co. Cinchao. En contraste, las mayores medianas se identificaron en CR07 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$), SR01, SR07, CR08 y SR08 (todas con $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y CR09 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), que representan las viviendas con mayor contaminación. Es importante destacar que CR07 y SR07 pertenecen a la zona de Pie de monte del Co. Divisadero, SR01 a la zona centro, CR08 y SR08 a la zona de pie de monte del Co. Mackay, por último, CR09 pertenece a la zona del valle fluvial de río Simpson.

Por otro lado, al exterior de las casas, las menores medianas se obtuvieron en SR09 ($2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ubicada en la zona del valle fluvial del río Coyhaique, SR05 y CR05 ($4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pertenecientes a la zona centro, lugares donde se podría establecer que hubo menor contaminación. Mientras que, las mayores medianas coinciden con algunas viviendas con mayores medianas al interior como CR07 y SR07 ($47 \mu\text{g}/\text{m}^3$), SR08 y CR08 ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), viviendas pertenecientes a las zonas de Pie de Monte en la ciudad.

En general, a medida que avanzó el monitoreo aumentaron los niveles de $MP_{2,5}$ reflejado en las medianas del interior y exterior de las viviendas CR07, SR07, CR08, SR08 y CR09, que fueron monitoreadas a fines de marzo. Esto coincide en lo visto en la sección 4.1.3. de la red

SINCA donde observó el aumento gradual de $MP_{2,5}$ a medida que terminaba el periodo de monitoreo y con lo presentado en la sección 4.2.1 de masa acumulada en los filtros, donde las viviendas mencionadas presentan una mayor acumulación de $MP_{2,5}$.

En términos de diferencia porcentual de medianas del interior versus exterior, los resultados revelan que en seis viviendas las medianas exteriores son mayores que las interiores, específicamente en CR06, CR07, SR07, CR08, SR08 y CR09, lo que quiere decir que hay más contaminación de $MP_{2,5}$ al exterior que al interior de estas casas. Resulta interesante que, de este grupo de viviendas, cuatro son de tipo CR, lo que podría estar asociado al tipo de calefacción que poseen las viviendas.

Por otro lado, en otros seis casos las medianas al interior son superiores a las del exterior, específicamente CR01, SR01, CR04, CR05, SR05 y SR09. Estas concuerdan con las viviendas de mayor promedio al interior vistas en la sección anterior, a excepción de CR04 que se suma a este grupo, a diferencia de CR01 y CR05, en esta vivienda no se reportó el uso de calefacción a leña complementaria durante las mediciones. La vivienda SR04 no muestra diferencias y en SR06 solo se midió $MP_{2,5}$ al interior.

En cuanto a las zonas prioritarias de monitoreo definidas para este estudio, se identificó que las viviendas ubicadas en las zonas de Pie de Monte presentan mayores niveles de contaminación tanto al interior como al exterior en comparación con las demás zonas. No obstante, es importante destacar que las zonas de valles fluviales de los ríos Coyhaique y Simpson contaban con menos viviendas que el resto, lo que dificulta obtener una representación precisa de las condiciones en estas áreas.

En relación con el tipo de calefacción utilizado en las viviendas, se esperaba que aquellas clasificadas como tipo CR, al haber implementado sistemas de recambio de calefactores, presentaran menores niveles de contaminación por $MP_{2,5}$. Sin embargo, los resultados no reflejaron esta tendencia. Este comportamiento podría explicarse por el uso complementario de artefactos de calefacción que aún emplean leña, como cocinas a leña, durante el período de monitoreo.

En síntesis, el análisis de variabilidad y distribución de datos de las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ dentro y fuera de las viviendas revela patrones asociados a la contaminación ambiental en la ciudad de Coyhaique. Las medianas destacan como un parámetro robusto para caracterizar los niveles de exposición a $MP_{2,5}$ en las viviendas. Las tendencias observadas de aumento de $MP_{2,5}$ hacia el final del periodo de monitoreo coincide con lo visto en otros apartados de este trabajo, destacando la influencia de factores estacionales en la concentración del $MP_{2,5}$. Las diferencias de niveles de $MP_{2,5}$ entre viviendas, tanto en términos de sus

medias interiores como exteriores, resalta la importancia de las características individuales de cada punto de muestreo, como puede ser el tipo de calefacción utilizada, en los niveles de contaminación registrados. En aquellas viviendas de tipo CR, pero con calefacción complementaria a leña, se puede encontrar niveles de $MP_{2,5}$ elevados similar a viviendas de tipo SR. Estos resultados aportan evidencia clave para comprender las dinámicas de contaminación intradomiciliaria y su relación con las condiciones ambientales y actividades humanas en la ciudad.

5.2.3. Concentraciones elementales de metales y metaloides en $MP_{2,5}$ dentro y fuera de las viviendas

Los resultados de esta sección permitieron identificar la composición y concentración de los metales y metaloides en el $MP_{2,5}$ de Coyhaique, además de comparar sus niveles al interior y exterior de las viviendas, con énfasis en las zonas prioritarias de monitoreo establecidas inicialmente (Figuras 4.18 a 4.37).

El uso de análisis XRF realizado por *Chester LabNet*, resultó particularmente adecuado para esta investigación, ya que permitió la caracterización de una amplia gama de metales y metaloides presentes en el $MP_{2,5}$: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Pd, Ag, In, Sn, Sb, Ba, La, Hg y Pb. La tecnología empleada, ofreció ventajas significativas al ser un método no destructivo y rápido, preservando la integridad de los filtros para futuros análisis complementarios.

En esta sección, los datos de metales y metaloides se agruparon en dos categorías principales: elementos mayores y elementos traza junto con tierras raras, basándose en su abundancia relativa en el medio ambiente y para facilitar la presentación de los resultados. Los datos obtenidos de cada vivienda se utilizaron para elaborar gráficos de líneas y puntos, agrupando las muestras según las zonas prioritarias de monitoreo. Esta estrategia permitió comparar la abundancia de estos elementos en distintos sectores de la ciudad de manera más efectiva.

Como se mencionó anteriormente, este trabajo es pionero en abordar la composición química específica del $MP_{2,5}$ en la ciudad, en términos de metales y metaloides, constituyendo una contribución fundamental para comprender el comportamiento del $MP_{2,5}$ en la zona, sus implicancias ambientales y de salud en las personas.

5.2.3.1. Comparación entre elementos mayores, traza y tierras raras

En esta sección se analizan las concentraciones de elementos mayores, traza y tierras raras detectadas en el MP_{2,5} tanto en el interior como en el exterior de las viviendas. Este análisis de alinea con los objetivos específicos: comparar niveles de metales y metaloides al interior y exterior y proponer potenciales fuentes de estos elementos. La comparación se centra en identificar patrones generales de distribución, diferencias significativas entre ambientes interiores y exteriores, y posibles relaciones con fuentes de emisión específicas en la zona de estudio. Este análisis busca proporcionar una visión integral de la composición elemental del MP_{2,5} y sus implicancias en la calidad del aire y la exposición humana.

Es importante mencionar que, en este estudio, se agruparon como elementos mayores a los siguientes metales y metaloides: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn y Fe. Esta clasificación se fundamentó en su abundancia relativa en el contexto ambiental y geológico de la ciudad. La geología local (abordada en la sección 2.4.2.2), está dominada por rocas ígneas intrusivas y volcánicas, junto con rocas sedimentarias fosilíferas, estas unidades presentan una composición mineralógica donde estos elementos son predominantes. Dado que su presencia caracteriza tanto la composición de las rocas como los procesos de meteorización y transporte en el área que forman los suelos de la ciudad, se justificó su agrupación como un conjunto representativo de los elementos mayores en este estudio.

Por otro lado, se consideraron elementos traza y tierras raras a los siguientes elementos: Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Pd, Ag, In, Sn, Sb, Ba, Hg, Pb y La, debido a su menor abundancia relativa en comparación con los elementos mayores. Cabe mencionar, que, dentro de las tierras raras, el análisis XRF sólo identificó al La. En el contexto de la ciudad y su entorno geológico, estos elementos suelen estar presentes en trazas, lo que los hace indicadores sensibles de procesos específicos relacionados con fuentes de emisión antropogénicas o naturales.

5.2.3.1.1. Patrones generales de concentración

En los resultados de cada grupo de elementos se menciona la suma total de las concentraciones de los elementos de cada vivienda, en base a esto fue posible calcular la proporción que representa cada grupo de elementos en el MP_{2,5} por m³, tanto al interior como al exterior, obteniendo que los elementos mayores al interior representan entre 1,5% al 15% del MP_{2,5} circundante, mientras que al exterior esta proporción oscila entre 1,4% a 8,3%. Por su

parte, los elementos traza y tierras raras, representan al interior 0,2% a 3% del MP_{2,5} y al exterior entre un 0,2 a 2,4%.

Estos resultados evidencian que los metales y metaloides constituyen una pequeña fracción del total de MP_{2,5} circundante. El resto de este MP_{2,5} podría estar compuesto por otras especies químicas, como compuestos orgánicos, sulfatos o nitratos.

En general, las proporciones de elementos mayores y traza son menores al exterior, lo que es esperable, ya que en espacios cerrados hay ventilación limitada, por lo que puede ocurrir mayor acumulación, mientras que, al exterior, la atmósfera está sujeta a una mayor dispersión de los contaminantes. Además, el bajo porcentaje de elementos traza y tierras raras, confirma que estos constituyen una pequeña fracción del total de MP_{2,5} circundante, menor que los elementos mayores.

Por otro lado, las proporciones entre elementos traza al interior y exterior son muy similares, esto sugiere un equilibrio en la dinámica de entrada y salida de estos elementos entre el interior y el exterior, posiblemente debido a fuentes externas homogéneas y baja interacción con condiciones interiores.

Generalmente, las concentraciones de elementos mayores en el MP_{2,5} al interior de las viviendas se caracterizaron por niveles elevados de Na, Al, Si, Cl, K, Ca y Fe, mientras que Mg, P, Ti, V, Cr y Mn presentaron concentraciones menores. Al exterior, se mantuvo un patrón similar con altas concentraciones de Si, Cl, Fe, Ca y K, aunque con niveles relativamente bajos de P, Ti, Mn, Cr y V. En el caso de los elementos traza y tierras raras, al interior se observaron mayores contenidos de Sn, Mo, Pb, Zn y Hg, mientras que el In, Ga, Ba y Pd presentaron valores reducidos. De manera similar, al exterior se identificaron altas concentraciones de Sn, Pb, Hg, Mo y Zr, mientras que Ni, Cu, Pd y Sb mostraron niveles significativamente menores.

En esta investigación, las concentraciones de elementos mayores, traza y tierras raras presentaron variaciones entre las distintas zonas prioritarias de monitoreo. En la zona centro, representada por las viviendas CR01, CR04, SR01, SR04 y CR05, al interior, se evidenció un predominio de elementos como K, Na, Si, Cl, Ca y Fe y de elementos traza como Sn, Mo, Hg, Pb y Se. Al exterior, en las viviendas CR01 y CR04, los elementos mayores más abundantes fueron Si, Cl, Fe, Ca y Na y al igual que los elementos traza Sn, Pb, Ge, Mo y Zr.

En la zona de pie de monte del Co. Divisadero, al interior se estudiaron las viviendas: CR06, CR07, SR03 y SR07, donde los elementos mayores más abundantes fueron Si, Ca, K, Al, Fe y Na, mientras que los elementos traza con mayor contenido fueron Zn, Mo, Pb, Sn y Hg. Al exterior, se monitoreó en las viviendas CR06 y SR07, los elementos mayores con

predominancia fueron Si, Ca, Fe, Al y K y los elementos traza más abundantes fueron Hg, Pb, Sn, Mo y Zr.

En la zona de pie de Monte del Co. Mackay se estudiaron viviendas: CR02, CR08, SR02 y SR08, al interior, donde los elementos mayores dominantes son K, Si, Ca, Cl, Na y Fe, similares a las otras zonas, mientras que los elementos traza más abundantes fueron Sn, Pb, Mo y Hg. En el exterior, se monitoreó en las viviendas CR08 y SR02, con mayores contenidos de Si, K, Cl, Fe y Ca, y los elementos traza y tierras raras más abundantes en esta zona difieren mucho de las otras zonas, con mayores niveles de Pb, Ag, Y, Se y Ba.

En los valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique, se estudiaron las viviendas CR05, CR09, SR06 y SR09, los elementos mayores más abundantes fueron K, Si, Ca, Cl, Na y S y los elementos traza con mayores concentraciones corresponden a de Pb, Sr, As y Zn. Estas zonas fueron las únicas en que se monitoreó en todas las viviendas al exterior, aquí los elementos mayores con altas concentraciones corresponden a Cl, Na, Si, K y Fe y los elementos traza y tierras raras más abundantes fueron Hg, Mo, Zr, Pb y Sn. Es importante señalar que en este grupo se incluyó la vivienda SR06 que como se mencionó anteriormente, está fuera de la ciudad, cercana a la cima del Co. Cinchao, esto podría estar relacionado a la similitud de concentraciones de metales y metaloides con las zonas montañosas.

A partir de esta información, se puede determinar que se observa una consistencia en los elementos mayores predominantes, como Si, K, Ca, Na, Cl y Fe, independientemente de la ubicación o el ambiente. En particular, las zonas de pie de monte del Co. Divisadero y Co. Mackay, se encuentran concentraciones elevadas de Hg, Sn y Pb tanto al interior como al exterior, reflejando posibles aportes comunes en estas áreas montañosas. Estas zonas fueron las que presentaron mayor acumulación de metales y metaloides en general, lo que podría estar relacionado a la geomorfología del terreno, que favorece la acumulación de $MP_{2,5}$ que podría estar ingresando a los hogares. La zona centro mostró concentraciones más bajas en general, lo que podría atribuirse a su topografía plana, menor exposición a fuentes de partículas minerales y características urbanas que limitan la entrada de $MP_{2,5}$ en interiores. Las zonas de los valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique presentan diferencias en los elementos traza con mayores concentraciones, los cuales podrían estar asociados a los sedimentos fluviales. Roth (2016) identificó la presencia de elementos como Mo, Cu, Pb, Zn, Ag, Au, Hg, Tl, Co, Cr, Ni, Hf, Nb, Sc, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, Rb, Cs, Sr, Ba, Be, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Cd, Bi, Sn, As, Sb, Te, Se y B en sedimentos fluviales activos, coincidiendo con diversos elementos traza identificados en este estudio.

5.2.3.1.2. Comparación interior versus exterior

Las secciones de análisis de elementos mayores, traza y tierras raras de los resultados (Figuras 4.26, 4.27, 4.36 y 4.37), permitieron realizar una comparación entre los niveles registrados al interior y exterior de las viviendas. Para ello, se utilizaron diferencias porcentuales como indicador ($\Delta\%$) y se elaboraron gráficos de tipo boxplot que resumen la distribución de las concentraciones. Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas en la distribución de estos elementos en los distintos ambientes monitoreados.

En general, la mayoría de los elementos mayores, traza y tierras raras presentan un comportamiento de distribución característicos. Por ejemplo, elementos como Na, Al, Si, Cl, K, Ti, V y Fe presentaron concentraciones más altas en el exterior, probablemente debido a su origen en la mineralogía predominante de la zona. Mientras que los elementos Mg, P, Cr y Mn mostraron concentraciones mayores en el interior. Los elementos traza Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Ag, In, Sn, Ba, Hg, Pb y La en la mayoría de los casos presentaron mayor concentración al exterior. Por otro lado, los elementos Ni, Cu, Zn, Pd y Sb presentaron mayor presencia al interior.

Para los elementos mayores, un caso relevante fue la vivienda CR09, que presentó un comportamiento atípico en comparación con el resto. Esta vivienda mostró altas concentraciones de elementos mayores en el interior, lo cual podría atribuirse a condiciones particulares. Según la ficha de monitoreo, los habitantes utilizan una estufa a pellet como sistema de calefacción, y la vivienda está construida con materiales como volcanita, lana mineral y termopaneles. Durante el periodo de monitoreo, ventilaron la casa en tres ocasiones y, una semana antes, realizaron trabajos de hormigonado en el exterior. Además, la vivienda se encuentra en un sector residencial con baja frecuencia vehicular. A pesar de la ventilación realizada, las altas concentraciones en el interior sugieren que estos elementos mayores podrían provenir del exterior y acumularse en el ambiente interno.

Similarmente, en el caso de los elementos traza y tierras raras, las viviendas CR01 y SR02 mostraron una tendencia a acumular estos elementos al interior con grandes diferencias de concentraciones respecto al exterior. En ambas viviendas, se documentó en su ficha de monitoreo, que utilizaron cocinas a leñas durante las mediciones, lo que podría explicar este comportamiento.

El análisis de estadística descriptiva obtenida de los gráficos de boxplot para las viviendas con datos tanto al interior como exterior, resalta comportamientos interesantes para los diferentes grupos de elementos. Según la mediana, los elementos con mayores concentraciones

en el interior fueron K, Si, Na y Cl, mientras que en el exterior destacaron Si, Na, Cl y Fe. Los elementos traza con mayores medianas al interior corresponden a Sn, Zn, Pb, Mo, Ba y Hg, mientras que al exterior corresponden a Hg, Pb, Zr, Mo, Sn y As. La repetición del Si, Na y Cl, Sn, Hg, Zr y Mo en ambos ambientes, sugiere la influencia de fuentes específicas de estos elementos en ambos entornos.

En términos de dispersión, para los elementos mayores, aquellos con mayor variabilidad en el interior fueron Si, P, K, Ca, Cr y Mn, mientras que en el exterior fueron Mg, Si, Ca, Cr, Mn y Fe. Para los elementos traza, la mayoría de estos muestran una alta dispersión, tanto al interior como al exterior. Esto evidencia una alta heterogeneidad en las concentraciones de estos elementos entre las diferentes viviendas, posiblemente debido a condiciones específicas de cada hogar que generan niveles significativamente más altos en algunos casos.

Se observó que los elementos mayores con asimetría positiva, como K, V, Cr y Mn en el interior, y Na, P, Cl y Ti en el exterior, presentan una mayor frecuencia de valores altos. De manera similar, los elementos traza con asimetría positiva incluyen Zn, Ge, Mo, Ag, In y Ba en el interior, y Zn, Ga, As, Se, Br, Rb, Y, Mo, In, Sn, Hg, Pb y La en el exterior. Esta distribución sugiere la posible influencia de eventos episódicos que aumentan sus concentraciones de forma puntual.

En contraste, los elementos mayores con asimetría negativa, como Al, Si, P, S, Cl, Ca y Fe en el interior, y Mg, Al, K, Cr y Mn en el exterior, presentaron una mayor acumulación de valores bajos. Un patrón similar se observó en los elementos traza con asimetría negativa, como Ni, Cu, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr y Pb en el interior, y Cu, Ge, Sr, Zr, Pd, Sb y Ba en el exterior. Este comportamiento sugiere que las fuentes asociadas a estos elementos tienden a generar concentraciones bajas de manera habitual, con incrementos ocasionales.

La metodología utilizada en esta sección permitió identificar diversos patrones en relación a los elementos mayores, traza y tierras raras en el MP_{2,5}, que aportan al conocimiento del problema de contaminación en la ciudad. No obstante, es importante reconocer ciertas limitaciones con los resultados. En primer lugar, no fue posible medir al interior y exterior de todas las viviendas, lo que afecta la comparabilidad. Además, la ausencia de estudios previos en la zona dificulta la discusión del origen de los elementos. A esto se suma, que existe una heterogeneidad entre las viviendas y las actividades que se realizan en estas, que podrían influir en estos resultados.

5.2.3.1.3. Relación con posibles fuentes de contaminación

En esta sección se discute la relación de los elementos mayores, traza y tierras raras más abundantes con posibles fuentes de contaminación. Este análisis se aborda desde un enfoque teórico, ya que el estudio no incluyó dentro de sus objetivos específicos la identificación o evaluación de fuentes contaminantes.

Como se mencionó en la sección 1.4.3, estado del arte, la composición química del MP_{2,5} se ha estudiado bastante en el centro-sur del país. Específicamente en Santiago, Valdés y otros (2013) identificaron que elementos como el: Mg, Y, Zr, U, Sr, Ca, Ti y V están relacionados a fuentes naturales y que los elementos como Rb, K, Cs, Fe, P, Ba, Mn, Ni, Cr, Co, Zn, Sn, Pb, Cu, Mo, Cd, As, Ag y Sb a fuentes antropogénicas. Si bien Coyhaique presenta condiciones muy diferentes a Santiago, tanto en términos de población, tráfico vehicular y actividades industriales, el estudio de Valdés y otros (2013) podría ofrecer una pista preliminar sobre el origen de ciertos elementos presentes en el MP_{2,5}. Esto sugiere que algunos patrones identificados en la capital podrían ser útiles como referencia inicial para interpretar posibles fuentes en Coyhaique, aunque con las particularidades propias de la región.

Los elementos mayores más abundantes resultaron ser Na, Al, Si, Cl, K, Ca y Fe, es importante destacar que estos son elementos formadores de la mineralogía predominante en la ciudad, por ende, sus altas concentraciones al interior y exterior podrían derivar de partículas de minerales provenientes de la meteorización y transporte de roca y suelo, y que podrían ingresar al hogar por ventanas o adheridas a ropa y calzado. En el caso del K, como se mencionó en la sección 2.4.1.1 es un elemento que particularmente se origina por la quema de leña, por lo que su origen al interior de las viviendas estaría directamente relacionado a la quema de leña. Aunque algunas fracciones también podrían provenir del material geológico circundante.

Por otro lado, los elementos traza más abundantes, tanto en el interior como en el exterior, incluyen Sn, Mo, Pb, Zn, Hg y Zr. Estos elementos no son representativos de la mineralogía predominante en la ciudad, lo que sugiere que su origen podría estar vinculado a fuentes antropogénicas, asociadas a procesos específicos como la combustión de calderas, tráfico vehicular o quemas agrícolas y forestales.

Para el caso de elementos como el V y el Ni, estos elementos se asocian ampliamente con la combustión de petróleo (Celis et al. 2004; Pey et al. 2009 en Valdés y otros, 2013). Menos frecuentemente, el Zn también se ha utilizado como trazador para la combustión de petróleo (Artaxo et al. 1999; Moreno et al. 2010 en Valdés y otros, 2013). Como se mencionó en la sección, de fuentes de contaminación, en Coyhaique un 50% de las calderas utiliza petróleo

como combustible, por lo que la presencia de estos elementos en el $MP_{2,5}$ podría estar asociado a esta fuente.

Valdes y otros (2013) señalan la importancia de cuantificar las concentraciones de tierras raras para detectar contaminación de procesos industriales o convertidores catalíticos. En el presente estudio solo le logró detectar La, en bajas concentraciones, lo que podría reflejar la baja o nula actividad industrial en la ciudad y que el tráfico vehicular emite bajos niveles de $MP_{2,5}$.

Es crucial resaltar la relevancia de identificar las fuentes específicas de los metales y metaloides detectados en este estudio, ya que ello resulta esencial para comprender la problemática de la contaminación por $MP_{2,5}$ en la ciudad.

5.2.4. Cumplimiento de la normativa vigente de calidad del aire

En base a las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ obtenidas en las viviendas se realizó un análisis del cumplimiento de la normativa vigente para el periodo de estudio, comprendido entre febrero a marzo de 2022, correspondiente a la transición entre verano a otoño en la ciudad. Dado que las viviendas fueron monitoreadas por 48 h, este tiempo se dividió en dos periodos de 24 h, permitiendo analizar el cumplimiento de la normativa de cada uno de ellos (Figura 4.38).

Al interior, los resultados de 28 periodos de monitoreo revelan que en un 61% de los casos se supera esta normativa establecida por la OMS y en el 10% de los casos se supera la normativa nacional e internacional con una calidad del aire clasificada según el MMA como regular. Esto indica que, incluso en una temporada donde no se esperaría alta contaminación interior, existen viviendas expuestas a niveles preocupantes de $MP_{2,5}$. Factores como el uso de fuentes de calefacción por leña, ventilación limitada o proximidad a fuentes externas de contaminación podrían contribuir a estas concentraciones elevadas.

Al exterior, se vieron mayores casos que superan las normativas nacionales e internacionales con un total de 31% de los periodos con calidad del aire regular o mala. Estos periodos coinciden con el término del monitoreo, momento en el cual se evidenció un aumento sostenido de los niveles de $MP_{2,5}$, posiblemente relacionado con la disminución de temperaturas hacia finales de marzo, que se vio en la sección de clima, que suele marcar el inicio del uso más intensivo de sistemas de calefacción en la ciudad.

Es interesante notar que, en general, la calidad del aire fue mejor al interior que al exterior de las viviendas. Esto podría explicarse por el efecto de las paredes y estructuras de las

viviendas, que actúan como una barrera parcial frente a las fuentes externas de contaminación, o bien por una menor actividad interna que genere partículas en suspensión. Sin embargo, esto no garantiza la ausencia de riesgos, ya que las concentraciones interiores que superan las normativas podrían tener efectos significativos en la salud de los habitantes, considerando que las personas pasan la mayor parte de su tiempo dentro de sus hogares.

Como se mencionó anteriormente, la Gestión de Episodios Críticos (GEC) comienza oficialmente en abril. No obstante, este análisis muestra niveles preocupantes de calidad del aire ya en marzo, particularmente en el caso de las mediciones exteriores. Esto sugiere que el periodo oficial de GEC podría no estar capturando adecuadamente las condiciones reales de exposición a la contaminación del aire en esta transición estacional en la ciudad. Resulta relevante considerar una extensión del periodo de GEC o la implementación de medidas preventivas anticipadas para abordar estos episodios críticos.

En síntesis, estos resultados reflejan la necesidad de reevaluar las estrategias de monitoreo y gestión de la calidad del aire en la ciudad, incorporando el análisis de periodos transicionales y los entornos interiores como exteriores, considerando su impacto en la salud de la población y las posibles diferencias en los factores que contribuyen a estas concentraciones.

6. Conclusiones

El presente trabajo de memoria logró caracterizar el $MP_{2,5}$ de la ciudad de Coyhaique, en términos de concentraciones elementales, totales y su dinámica de distribución, durante una campaña en terreno realizada entre febrero a marzo de 2022. Constituyendo el primer trabajo en el que se abordan tanto las concentraciones como la composición del $MP_{2,5}$ dentro y fuera de las viviendas de la ciudad. Los resultados señalan la presencia de diversos metales y metaloides en el $MP_{2,5}$ circundante, resaltando la importancia en continuar estudiando más a fondo la composición de este contaminante. Esta investigación contribuye al conocimiento sobre la dinámica de la contaminación atmosférica por MP en el sur de Chile, especialmente en regiones con climas fríos donde la principal fuente de emisión corresponde a la combustión de leña como calefacción residencial. Las principales conclusiones de este trabajo se enuncian a continuación:

1. La evolución de las concentraciones de $MP_{2,5}$ en la última década en Coyhaique muestra una tendencia hacia la homogenización en los últimos años. No obstante, los valores siguen superando los límites establecidos por la normativa chilena y la OMS, lo que resalta la necesidad de continuar implementando medidas para mitigar esta contaminación en la ciudad.
2. Las estaciones COYI y COYII de la red SINCA presentan ligeras diferencias en los registros de $MP_{2,5}$ y variables climáticas, probablemente atribuibles a su ubicación y diferencias de elevación del terreno. Sin embargo, estas estaciones no capturan adecuadamente la variabilidad espacial del problema de contaminación en la ciudad.
3. Se determinaron las concentraciones totales de $MP_{2,5}$ y su dinámica de distribución, al interior y exterior de 18 viviendas de la ciudad, en diversas zonas prioritarias de monitoreo. Registrando altos niveles de $MP_{2,5}$ durante las mañanas, tardes y noches, tanto dentro como fuera de las viviendas, donde también se observó un efecto directo de la temperatura sobre la humedad relativa en ambos ambientes.
4. Se compararon los niveles de $MP_{2,5}$ interior y exterior de las viviendas, donde se confirma el aumento de $MP_{2,5}$ hacia el final del periodo de monitoreo, lo que coincide con lo visto en la red SINCA. Las diferencias de niveles de $MP_{2,5}$ entre las viviendas, resaltan la importancia de las características individuales de cada punto de muestreo, como puede ser el tipo de calefacción utilizada, ubicación y ventilación. Las viviendas ubicadas en las zonas de pie de monte de la ciudad presentaron mayores niveles de $MP_{2,5}$ confirmando lo identificado en literatura previa, que señala que el sector sureste (SE) de la ciudad acumula mayor contaminación. En aquellas viviendas de tipo CR, pero con

calefacción complementaria a leña, se registraron niveles de $MP_{2,5}$ elevados similar a viviendas de tipo SR. Estos resultados aportan evidencia clave para comprender las dinámicas de contaminación intra y extra domiciliaria y su relación con las condiciones ambientales y actividades humanas en la ciudad.

5. Se identificaron 36 metales y metaloides en el $MP_{2,5}$ mediante el análisis XRF, dentro y fuera de las viviendas, los que constituyen una pequeña fracción del $MP_{2,5}$ circundante. Al comparar los niveles de metales y metaloides, se reconoció que al interior de los puntos de muestreo existe un patrón representando por mayores niveles de elementos mayores como Na, Al, Si, Cl, K, Ca y Fe y elementos traza como Sn, Mo, Pb, Zn y Hg. Al exterior, el patrón general mostró mayor presencia de Si, Cl, Fe, Ca y K y elementos traza como de Sn, Pb, Hg, Mo y Zr. Las mayores proporciones de elementos se registraron al interior, esto refleja la limitada ventilación de los espacios cerrados, que favorece la acumulación de partículas, mientras que al exterior predominan procesos de dispersión atmosférica.
6. En relación con el análisis de metales y metaloides según las zonas prioritarias de monitoreo, la zona centro, en general, mostró menores concentraciones, posiblemente por su topografía plana y características urbanas. En las zonas de pie de monte de los cerros Divisadero y Mackay, hubo mayores concentraciones en general, y especialmente de elementos como Hg, Sn y Pb tanto en interiores como exteriores, posiblemente por la geomorfología de estas zonas que favorece la acumulación de $MP_{2,5}$. En los valles fluviales de los ríos Simpson y Coyhaique, los elementos traza más abundantes fueron Pb, Sr, As y Zn.
7. De manera teórica, se propusieron potenciales fuentes para los metales y metaloides identificados, donde se sugiere que elementos como Na, Al, Si, Cl, K, Ca y Fe podrían provenir de un aporte cortical, ya que son elementos que forman la mineralogía predominante en la zona y podrían ser material resuspendido de rocas o suelo. Los altos niveles de K, al interior tienen una directa relación con el uso de leña como calefacción residencial. Los elementos traza más abundantes podrían estar asociados a fuentes antropogénicas, como sugiere la literatura para otras ciudades del país. Sin embargo, para identificar las fuentes específicas en Coyhaique, es necesario llevar a cabo estudios complementarios. Estos resultados recalcan la importancia de continuar el estudio de la composición del $MP_{2,5}$ en la ciudad, con el fin de comprender mejor sus fuentes, variabilidad y posibles implicancias para la salud y el medio ambiente.

8. Se analizó el grado de cumplimiento de la normativa vigente respecto a la calidad del aire en la ciudad durante el monitoreo, periodo que corresponde a la transición de verano a otoño, identificando que al interior de las viviendas se registra buena calidad del aire en general, a excepción de tres casos que muestran calidad de aire regular, mientras que al exterior si bien también se registra buena calidad del aire, hay casos en los que se superan la normativa nacional e internacional, lo que resulta interesante en un periodo donde no se realiza Gestión de Episodios Críticos (GEC) por parte del MMA. Esto subraya la relevancia de mantener estrategias de monitoreo y gestión de la calidad del aire durante todo el año, incluso en estaciones donde no se implementan medidas de Gestión de Episodios Críticos (GEC), para prevenir exposiciones a concentraciones que podrían ser perjudiciales.
9. Se recomienda ampliar la red de monitoreo SINCA para poder representar de mejor manera la variabilidad espacial de la contaminación en la ciudad. Asimismo, es fundamental profundizar en el estudio de las fuentes y procesos de emisión de metales y metaloides, así como en su relación con factores climáticos. El proyecto que financia la presente memoria de título contempló una campaña de medición de metales y metaloides en invierno de 2023, resultados que podrían ser comparados junto a los presentados en esta memoria. Investigaciones futuras también deberían evaluar el impacto en la salud de los elementos identificados.

Finalmente, esta investigación constituye un aporte significativo al conocimiento sobre la composición y dinámica del $MP_{2,5}$ en Coyhaique, proporcionando información clave sobre la contaminación intra y extra domiciliaria y su relación con factores ambientales y antropogénicos. Los hallazgos resaltan la importancia de mantener una vigilancia continua sobre la calidad del aire, ampliar la red de monitoreo y profundizar en el estudio de las fuentes de contaminación, especialmente en un contexto donde la leña es la principal fuente de calefacción. Asimismo, abre el camino para futuras investigaciones que evalúen el impacto de los elementos identificados en la salud pública y que permitan diseñar estrategias más efectivas para mitigar la contaminación atmosférica en la región.

REFERENCIAS

ACUÑA, M. 2014. Impacto de la contaminación del aire por MP10 en la morbimortalidad por enfermedad respiratoria, cardiovascular y algunos cánceres en la población de Coyhaique, 2009-2014. Tesis para optar al grado de Magíster en Salud Pública. Universidad de Chile. Escuela de Salud Pública. 89 pp. Santiago.

ALI, H., & KHAN, E. 2018. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'—proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*. Vol. 100, (1): 6-19.

ARTAXO, P. 1998. Aerosol characterization study in Santiago de Chile Wintertime. Reporte para CONAMA. Santiago.

ARTAXO, P.; OYOLA, P. & MARTINEZ, R. 1999. Aerosol composition and source apportionment in Santiago de Chile. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. Vol. 150 (1-4): 409-416. BÖRGEL, R. 1983. Geomorfología. Instituto Geográfico Militar. Santiago. Chile

CARRASCO, P. 2018. Efecto de la estratificación atmosférica en la distribución vertical de aerosoles segregados por tamaño en la atmósfera de Santiago. Seminario de Título para optar al grado de Química Ambiental. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias. 136 pp. Santiago.

CARSLAW, D. C., & ROPKINS, K. 2012. Openair—an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 27, 52-61.

CARVACHO, O.; TRZEPLA-NABAGLO, K.; ASHBAUGH, L.; FLOCCHINI, R.; MELÍN, P. & CELIS, J. 2004. Elemental composition of springtime aerosol in Chillán, Chile. *Atmospheric Environment*. Vol. 38 (31): 5349-5352.

CELIS, J.; MORALES, J.; ZAROR, C. & INZUNZA, J. 2004. A study of the particulate matter PM10 composition in the atmosphere of Chillán, Chile. *Chemosphere*. Vol. 54 (4): 541-550.

CHANG, R. & GOLDSBY, K. 2017. Chemistry. McGraw Hill Education. Edición 12. 1097 pp.

CHIANG J.; CORNEJO, J.; LOQUEZ, J.; ROMANO, S.; PASCUAL, J. & CEA, M. (1985). Determination of Cd, Cu, Mn, Pb, Fe, Zn and As in atmospheric fall out, in Quintero, fifth region of Chile. *Bol. Soc. Chil. Quim*. Vol. 30: 139-158.

COLVILE, R. N., HUTCHINSON, E. J., MINDELL, J. S., & WARREN, R. F. 2001. The transport sector as a source of air pollution. *Atmospheric environment*. Vol. 35(9), 1537-1565.

COLWYN, D. A., BRANDON, M. T., HREN, M. T., HOURIGAN, J., PACINI, A., COSGROVE, M. G., MIDZIK, M., GARREAUD, R. & METZGER, C. 2019. Growth and steady state of the Patagonian Andes. *American Journal of Science*. Vol. **319**(6), 431-472.

CONAMA, 2009. Análisis de Emisiones Atmosféricas en Coyhaique. Preparado por EnviroModeling Ltda. 253 pp. Santiago.

CONG Z, Kang S, Liu X, Wang G (2007) Elemental composition of aerosol in the Nam Co region, Tibetan Plateau, during summer monsoon season. *Atmos Environ*. Vol. **41**:1180–1187.

CONTRERAS, N. 2019. Diagnóstico de la calidad del aire en la comuna de Curanilahue. Caracterización de las principales fuentes de contaminación atmosférica y propuesta de medidas de gestión. Habilitación profesional presentada para optar al título de Ingeniero Ambiental. Facultad de ciencias ambientales. Universidad de Concepción. Concepción. Chile.

DÁVILA, J. 2011. Diccionario Geológico. Ingemmet. Arthaltuna Grouting S.A.C. 901pp. Perú.
DE LA BARRERA, F., BARRAZA, F., FAVIER, P., RUIZ, V., & QUENSE, J. 2018. Monitoring multiscale environmental impacts of burned ecosystems. *Science of the total environment*. Vol. **637**, 1526-1536.

DE LA CRUZ, R., SUÁREZ, M., BELMAR, M., QUIROZ, D., BELL, M. 2003. Area Coihaique- Balmaceda. Región de Aysén del General Carlos Ibañez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, No. 80. 40p.

DEMEK, J. 1972. Manual of detailed geomorphological mapping.

DIARIO REGIONAL AYSEN. 2022. Coyhaique ya no es la comuna con más contaminación atmosférica. Acceso:<https://www.diarioregionalaysen.cl/noticia/actualidad/2022/01/coyhaique-ya-no-es-la-comuna-con-mas-contaminacion-atmosferica>

DUFFUS, J. 2002. ""Heavy Metals"-a Meaningless Term? (IUPAC Technical Report)." *Pure and Applied Chemistry*. Vol. **74** (5): 793-807.

ENVIROMODELING LTDA. 2009. Análisis de emisiones atmosféricas en Coyhaique. Informe Final v2/R2. Preparado para CONAMA, región de Aysén del General Carlos Ibañez del Campo. Santiago. Chile. 253pp.

FIGUERUELO, J., & DÁVILA, M. 2004. Química física del ambiente y de los procesos medioambientales, editorial Reverté.

FUZZI, S.; BALTENSPERGER, U.; CARSLAW, K.; DECESARI, S.; DENIER VAN DER GON, H.; FACCHINI, M. C., ... & GILARDONI, S. 2015. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric chemistry and physics*. Vol. **15** (14):8217-8299.

GALLARDO, E. 2020. Contaminación atmosférica en Coyhaique: factores condicionantes,

características y comportamiento histórico espacial del MP10 y MP2. 5. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 111 pp. Santiago.

GARREAUD, R., LOPEZ, P., MINVIELLE, M., & ROJAS, M. 2013. Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate*, 26(1), 215-230.

GOMEZ, L. 2022. Caracterización meteorológica de los episodios extremos de contaminación por material particulado fino en Coyhaique. Tesis para optar la grado de magister en meteorología y climatología. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Departamento de Geofísica. Patagonia. Chile. 171 pp.

HANNINGAN, R. 2007. What goes around comes around: Today's environmental geochemistry. *Developments in Environmental Science*. Vol. 5: 1-6.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2018. Censo 2017: Resultados definitivos. Santiago. Chile.

HUANG, K., ZHUANG, G., XU, C., & WANG, Y. (2020). *The role of wind in pollutant transport and boundary layer dynamics in heavy haze events*. *Atmospheric Research*, 236, 104803.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). 2023. Parque de vehículos en circulación 2023. Región de Aysén del General Carlos Ibañez del Campo. 7pp.

JACOB, D. J., & WINNER, D. A. 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric environment*, 43(1), 51-63.

JORQUERA, H.; Villalobos, A. & Schauer, J. 2021. Wood burning pollution in Chile: A tale of two mid-size cities. *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 12 (4): 50-59.

LEIVA, M.; GONZÁLEZ, M.; MORALES, R.; BELMAR, M.; MORATA, D.; POLVÉ, M, & WAKAMATSU, S. 2005. Elemental and organic carbon ratios in aerosols at urban street canyon in Santiago downtown, Chile. IIII Jornadas Chilenas de Química y Física Ambiental. Universidad de La Frontera. Temuco. Chile.

LI, Y., MUÑOZ-LBAÑÉZ, F., MALDONADO-ALCAÍNO, A., JACK, D., YAN, B., XU, L., ... & CÁCERES, D. D. 2022. Cancer burden disease attributable to PM_{2.5} and health risk by PM_{2.5}-bound toxic species in two urban Chilean municipalities. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 22.

MASSIMI, L., RISTORINI, M., SIMONETTI, G., FREZZINI, M. A., ASTOLFI, M. L., & CANEPARI, S. 2020. Spatial mapping and size distribution of oxidative potential of particulate matter released by spatially disaggregated sources. *Environmental Pollution*, 266, 115271.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2011. Decreto 12: Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP_{2,5}. 8 pp. Santiago.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2012. Decreto Supremo N°33. Declara zona saturada por Material Particulado respirable MP10, como concentración diaria y anual, a la ciudad de Coyhaique y su zona circundante. Acceso: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1046122&f=2012-11-28&p=>

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2016. Decreto 46: Establece plan de descontaminación atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante. 38 pp. Santiago.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2016. Decreto Supremo N° 46. Establece plan de descontaminación atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante. Acceso: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1088770&f=2018-07-13&p=>

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2016. Decreto Supremo N°7. Establece plan de descontaminación atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante. Acceso: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1133992>

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2016. Guía de calidad del aire y educación ambiental. División de Educación Ambiental y Participación Ciudadana. 103 pp. Santiago.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2024. Sistema de Información de Calidad del Aire (SINCA). Acceso: <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/validacion>

MINISTERIO SECRETARIA GENERAL DE LA PRESIDENCIA .1994. Ley 19300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Santiago. Chile.

MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA. 1994. Ley 19.300. Ley sobre bases generales del medio ambiente. Acceso: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA. 1998. Decreto 50: Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP₁₀, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. 16 pp. Santiago.

MINISTERIO SECRETARIA GENERAL DE LA PRESIDENCIA. 1998. Decreto 59: Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable mp₁₀, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. 16 pp. Santiago.

MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA.2011. Decreto 12: Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP_{2,5}. 8 pp. Santiago.

MOLINA, C.; Toro, A.; Morales, R.; Manzano, C., Leiva-Guzman, M. 2017. Particulate Matter in Urban Areas of South-Central Chile Exceeds Air Quality Standards. *Air Quality, Atmosphere & Health*. Vol. **10** (5):653-667.

MORATA, D.; POLVÉ, M.; VALDÉS, A.; BELMAR, M.; DINATOR, M.; SILVA, M. & MORALES, J. 2008. Characterization of aerosol from Santiago, Chile: an integrated PIXE–SEM–EDX study. *Environmental Geology*. Vol. **56** (1): 81-95.

MUÑOZ, F. & CÁCERES, D. 2020. Impacto del recambio de tecnología de calefacción en la concentración atmosférica por MP2,5 y en las admisiones por urgencias respiratorias en Coyhaique, Chile. *Cadernos de Saúde Pública*. Vol. 36.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, 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. 2021. Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire. Resumen ejecutivo. 16 pp.

OYARZÚN, M. 2020. Boletín de la academia Chilena de medicina. N° LVII.

PÉREZ, P., MENARES, C. & RAMÍREZ, C. 2020. PM_{2,5} forecasting in Coyhaique, the most polluted city in the Americas. *Urban Climate*. Vol. 32. 10 pp.

PETTERSEN, R. 1984. The chemical composition of wood. *The chemistry of solid Wood*. Vol. 207. 57-126.

ROMO-KRÖGER C.; MORALES, J.; DINATOR, M.; LLONA, F. & EATON, L. 1994. Heavy metals in the atmosphere coming from a copper smelter in Chile. *Atmospheric Environment*. Vol. **28** (4):705-711.

SALINI, G. 2014. Estudio Acerca del Material Particulado Emitido en Ciudades de Tamaño Medio. *Revista INGE CUC*. Vol. 10 (1): 97-108.

SARMIENTO, M.; RAMOS, C.; FLÓREZ, S. & MOLINA, F. 2021. Determinación de metales pesados en material particulado atmosférico por espectroscopía de absorción atómica: validación. *Revista Politécnica*. Vol. **17** (34): 153-169.

SEINFELD, J. & PANDIS, S. 2016. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. Tercera Edición. 1149 pp. Estados Unidos.

SILVA, J., RODRIGUEZ, M., CARRASCO, I., MEYER, M., MANRIQUEZ, N. 2017. Actualización inventario de emisiones para la zona saturada de Coyhaique. Ministerio del Medio Ambiente. 20 pp.

SIPPULA, O. 2010. Fine particle formation and emissions in biomass combustion. Department of Environmental Science. Faculty of Science and Forestry. University of Eastern Finland. Finland.

SKARMETA, J. 1976. Antecedentes geomorfológicos de la precordillera patagonica a la latitud de Coyhaique, Chile. Primer Congreso Geológico Chileno. 18 pp. Santiago.

SOLÍS, R.; TORO, R.; GOMEZ, L.; VÉLEZ-PEREIRA, M.; LÓPEZ, M.; FLEMING, Z; FIERRO, N. & LEIVA, M. 2022. Long-term airborne particle pollution assessment in the city of Coyhaique, Patagonia, Chile. *Urban Climate*. Vol. **43**: 101144.

VALDÉS, A.; POLVÉ, M.; MUNOZ, M.; TOUTAIN, J. & MORATA, D. 2013. Geochemical features of aerosols in Santiago de Chile from time series analysis. *Environmental earth sciences*. Vol. **69** (6): 2073-2090.

WICKHAM H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4. Acceso: <https://ggplot2.tidyverse.org>

ZHANG, R., & LI, Q. (2012). *Meteorological influences on PM_{2.5} concentrations in urban areas: A review*. *Environmental Chemistry Letters*, 10(4), 209–216.

ANEXOS

ÍNDICE

ANEXOS		Página
1	DATOS DE CLIMA EN LA CIUDAD DE COYHAIQUE.....	1
2	CLASIFICACIÓN DE PENDIENTES SEGÚN DEMEK (1972).....	3
3	DATOS DE GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS FLUVIALES ACTIVOS EN CUENCA RIO AYSÉN DE ROTH (2016).....	4
4	BASE DE DATOS DE METALES Y METALOIDES.....	6
5	SUMA DE CONCENTRACIONES DE METALES Y METALOIDES.....	7
6	CÁLCULO DE PROPORCIÓN DE METALES Y METALOIDES POR m ³	8
7	ELEMENTOS MAYORES EN ZONAS PRIORITARIAS DE MONITOREO.....	9
8	ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS EN ZONAS PRIORITARIAS DE MONITOREO.....	9
9	ALZAS DE MP _{2,5} SEGÚN LA HORA.....	10

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1.	Datos de temperaturas máximas (°C) mensuales entre los años 2011 y 2021.....	1
2.	Datos de temperaturas medias (°C) mensuales entre los años 2011 y 2021.....	1
3.	Datos de temperaturas mínimas (°C) mensuales entre los años 2011 y 2021.....	2
4.	Datos de precipitaciones acumuladas (mm) entre los años 2011 y 2021.....	2
5.	Clasificación de pendientes para mapas geomorfológicos. Tomado de Demek (1972)	3
6.	Base de datos de metales y metaloides identificados por Roth (2016) en sedimentos activos de la cuenca río Aysén.....	4
7.	Base de datos de metales y metaloides utilizados en este trabajo.....	6
8.	Suma de concentraciones de elementos mayores y traza en cada vivienda.....	7
9.	Resumen del cálculo de proporción de elementos mayores y traza por m ³	8
10.	Mediana de elementos mayores en cada zona prioritaria de monitoreo.....	9
11.	Mediana de elementos traza y tierras raras en cada zona prioritaria de monitoreo.....	9
12.	Alzas según horas de monitoreo interior y exterior de las viviendas.....	10

ANEXO 1: DATOS DE CLIMA DE LA CIUDAD DE COYHAIQUE

Tabla 1. Datos de temperaturas máximas (°C) mensuales entre los años 2011 y 2021. Obtenidos Estación Aeródromo Teniente Vidal.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	\bar{x} anual
2011	20,5	21,7	16	14	10,5	7,7	5,9	7,2	11	15,1	16,4	21,9	14,0
2012	22,9	17,5	18,4	13	9,4	6,4	6,3	8,9	12,7	14,1	17,7	16,2	13,6
2013	24	20,8	17,8	16,2	10,9	9,2	6,1	6,7	11,2	15,8	15,9	19,5	14,5
2014	18,6	20,5	17,2	14,8	9,7	7,7	6,6	10,1	11	14,5	15,7	18,1	13,7
2015	21,1	22,2	17,7	14	10,3	7,3	7,6	7,8	11,2	13,8	17,4	18,1	14,0
2016	23,3	19,9	20,5	13	9,2	8,2	7,3	9	14,1	15,5	17,7	18	14,6
2017	17,3	20,4	17,4	14,1	9,5	4,7	7,6	8,6	11,6	12,7	16,5	18,6	13,3
2018	19,6	21,5	15,6	12,6	10	4,7	5,6	10,2	11	14,1	16,4	19,7	13,4
2019	17,7	21,1	18,1	14,3	10	6,4	7,1	8,9	11	14	16	17,9	13,5
2020	20,2	19,6	19,4	14	10,8	6,4	3,9	8,4	11,8	14,7	18,4	18,7	13,9
2021	19,7	24,9	20	15	10	6,2	8,6	9,4	12,7	14,7	17,8	22,9	15,2
\bar{x}	20,45	20,92	18,01	14,09	10,03	6,81	6,60	8,65	11,75	14,45	16,90	19,05	

Tabla 2. Datos de temperaturas medias (°C) mensuales entre los años 2011 y 2021. Obtenidos Estación Aeródromo Teniente Vidal. Teniente Vidal.

Años	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	\bar{x} anual
2011	14,7	14,8	11,1	9,8	6,5	4,4	2,7	3,2	6,9	9,2	11,2	15,1	9,13
2012	16,6	13	13,3	8,1	6,4	2,9	3,1	4,7	7,5	8,9	11,9	11,6	9,00
2013	17	15	11,7	11,3	7,3	6,3	2,8	3,3	5,7	10,1	10,7	14	9,60
2014	13,5	14,1	11,5	9,3	6,1	4,6	3,1	6,6	7	9,5	11	13,2	9,13
2015	15,4	15,2	12,4	9,4	7,3	4,5	4,5	4,5	6	8	11,4	13,1	9,31
2016	16,5	14,2	13,8	6,8	5,3	4,3	3,7	5,5	7,6	9,7	11,9	13,3	9,38
2017	12,6	14,6	11,7	8,8	6	2	3,6	4,5	6,5	8	10,9	13,1	8,53
2018	14,1	15	10,5	8	5,9	1,1	1,5	4,9	6,3	8,2	10,4	13,9	8,32
2019	12,1	14,2	11,6	9	6,1	3,4	3,4	4,8	5,7	8,1	10,6	12,6	8,47
2020	14,1	13	13	9	6,5	3	0,8	3,9	6,1	8,3	12,1	13,1	8,58
2021	13,5	16,2	13,2	10,8	5,7	2,4	5,1	4,4	7,2	9,1	11,6	15,7	9,58
\bar{x}	14,55	14,48	12,16	9,12	6,28	3,54	3,12	4,57	6,59	8,83	11,25	13,52	

Tabla 3. Datos de temperaturas mínimas (°C) mensuales entre los años 2011 y 2021. Obtenidos Estación Aeródromo Teniente Vidal.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	\bar{x} anual
2011	9,0	7,9	6,3	5,5	2,6	1,1	-0,6	-0,7	2,8	3,3	5,9	8,4	4,3
2012	10,2	8,4	8,3	3,3	3,4	-0,6	0,0	0,6	2,2	3,8	6,2	7,1	4,4
2013	9,9	9,1	5,6	6,4	3,6	3,3	-0,5	0,0	0,1	4,4	5,4	8,6	4,7
2014	8,5	7,6	5,8	3,9	2,6	1,5	-0,3	3,2	3,1	4,5	6,3	8,2	4,6
2015	9,6	8,2	7,1	4,8	4,4	1,7	1,3	1,1	0,8	2,2	5,3	8,0	4,5
2016	9,6	8,4	7,1	0,5	1,5	0,4	0,1	1,9	1,2	4,0	6,1	8,6	4,1
2017	8,4	9,6	7,3	4,6	2,6	-1,4	0,5	1,1	2,1	4,1	5,1	7,8	4,3
2018	8,7	9,4	6,5	4,4	2,8	-2,1	-1,8	1,2	2,7	3,0	5,4	8,5	4,1
2019	6,8	7,6	6,3	5,1	2,5	0,8	0,8	1,4	1,2	3,1	6,3	7,7	4,1
2020	8,6	7,3	7,9	4,9	3,6	0,5	-1,6	0,9	1,4	2,8	6,1	8,1	4,2
2021	7,8	8,3	6,8	7,0	1,6	-0,7	2,1	0,5	3,0	4,0	6,1	8,7	4,6
\bar{x}	8,8	8,3	6,8	4,6	2,8	0,4	0,0	1,0	1,9	3,6	5,8	8,2	

Tabla 4. Datos de precipitaciones acumuladas (mm) entre los años 2011 y 2021. En gris las máximas de precipitaciones en cada año. Obtenidos Estación Aeródromo Teniente Vidal.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total mm/año
2011	74,1	37,4	86,2	66,2	87,5	92,6	156,8	68,2	69,6	63,9	48,9	21,7	873,1
2012	57,3	46,6	58,6	74,1	202,5	185,2	80,0	106,3	46,3	75,0	80,4	85,4	1097,7
2013	39,5	70,0	32,1	30,9	189,6	111,3	140,9	264,3	80,4	11,0	48,6	33,9	1052,5
2014	78,9	24,8	22,4	100,1	248,2	92,5	72,5	120,7	72,7	77,7	79,7	66,8	1057
2015	34,3	13,9	163,6	57,2	251,8	109,5	159,3	158,4	26,6	9,1	30,9	24,4	1039
2016	4,4	34,4	18,9	32,0	10,4	7,4	40,4	121,0	39,0	39,8	126,4	53,8	527,9
2017	124,6	76,8	112,1	111,2	136,4	142,4	239,3	156,6	41,5	81,4	19,2	85,2	1326,7
2018	22,1	16,3	96,3	165,2	75,4	172,2	35,7	85,2	132,0	37,2	78,6	15,8	932
2019	34,8	12,4	67,2	101,0	52,6	174,4	91,2	75,4	24,4	23,8	74,2	51,8	783,2
2020	28,6	73,0	23,0	91,8	201,4	204,4	141,2	116,8	54,4	39,0	34,6	31,0	1039,2
2021	54,4	6,4	42,6	80,6	82,4	127,3	103,8	87,0	15,4	89,2	19,4	12,4	720,9
PROMEDIO													949,92

ANEXO 2: CLASIFICACIÓN DE PENDIENTES SEGÚN DEMEK (1972)

Tabla 5. Clasificación de pendientes para mapas geomorfológicos. Tomado de Demek (1972)

Categoría	Ancho de Clase	Término de pendiente	Gradiente (%)
< 2°	2°	Plano (planicie)	< 3,5
≥ 2°-5°	3°	Ligeramente inclinado	3,6-8,7
≥ 5°-15°	10°	Fuertemente inclinado	8,7-26,8
≥ 15°-35°	20°	Muy inclinado	26,8-70
≥ 35°-55°	20°	Empinado	70-143
≥ 55°	45°	Vertical	> 143

ANEXO 3: DATOS DE GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS FLUVIALES ACTIVOS EN CUENCA RIO AYSÉN DE ROTH (2016)

Tabla 6. Base de datos de metales y metaloides identificados por Roth (2016) en sedimentos activos de la cuenca río Aysén.

Muestras	Ba ppm	Be ppm	Rb ppm	Sr ppm	Cs ppm	Co ppm	Cr ppm	Ni ppm	Ga ppm	Hf ppm	Nb ppm	Sc ppm	Ta ppm	Th ppm	U ppm	V ppm	W ppm	Zr ppm	Y ppm	Sr ppm	La ppm	Ce ppm	Pr ppm	Nd ppm	Sm ppm
2	1.15	0.32	1.18	1.13	1.46	0.60	0.56	0.76	0.95	0.74	0.70	0.76	0.40	0.67	0.63	0.51	0.45	0.77	0.79	0.73	0.74	0.75	0.74	0.75	0.79
27	1.12	0.64	1.15	1.06	1.61	0.95	1.11	1.07	0.97	0.77	0.93	0.99	0.81	0.82	0.74	0.94	0.45	0.81	0.97	0.73	0.89	0.86	0.90	0.95	0.94
41	0.93	0.32	1.06	0.80	0.70	0.97	0.56	0.88	0.81	0.72	0.70	0.64	0.67	0.78	0.77	0.56	0.59	0.69	0.88	1.83	0.89	0.91	0.95	0.94	0.95
42	0.81	0.64	0.92	1.01	0.62	0.78	0.56	0.86	0.93	0.71	0.60	0.82	0.54	0.67	0.57	0.65	0.63	0.68	0.82	0.73	0.65	0.68	0.76	0.79	0.83
43	0.65	0.32	0.82	0.91	0.48	1.65	2.34	2.06	1.08	1.26	1.50	1.40	1.48	0.86	0.57	2.50	0.54	1.24	0.99	1.83	0.83	0.83	0.91	0.97	1.01
44	0.81	0.32	0.93	0.90	0.52	0.89	1.00	1.25	0.90	0.78	0.87	0.94	0.81	0.68	0.60	1.17	0.41	0.72	0.86	1.46	0.75	0.76	0.82	0.83	0.87
45	0.89	0.64	0.96	0.78	0.58	0.98	1.00	1.26	0.86	1.14	1.02	0.94	0.81	0.90	0.80	1.23	0.50	1.11	0.91	1.46	0.88	0.83	0.85	0.89	0.81
46	0.91	0.32	1.29	0.60	0.84	0.73	0.56	0.86	0.92	0.84	1.04	0.76	0.81	1.02	0.74	0.51	0.77	0.77	0.93	1.10	1.00	1.01	1.03	1.02	0.98
57	1.19	1.29	1.22	1.21	1.65	0.74	0.67	0.86	0.99	0.90	0.79	0.82	1.89	0.88	0.77	0.61	0.45	0.92	0.92	0.73	0.87	0.89	0.87	0.88	0.94
58	1.11	0.64	1.18	0.83	1.16	0.66	0.56	0.65	0.95	0.78	0.84	0.88	1.62	0.88	0.84	0.64	0.81	0.79	0.91	1.10	0.92	0.97	0.91	0.92	0.93
59	1.14	0.64	1.22	1.20	1.67	0.69	0.78	0.86	0.90	0.74	0.73	0.82	0.67	0.76	0.63	0.59	0.63	0.74	0.98	0.37	0.81	0.80	0.81	0.77	0.85
65	1.21	0.32	1.28	1.20	2.04	0.75	0.78	0.83	0.97	0.78	0.76	0.76	0.81	0.85	0.74	0.61	0.54	0.83	0.92	0.73	0.92	0.89	0.89	0.89	0.88
66	1.14	0.64	1.23	1.21	1.74	0.79	0.78	0.87	0.96	0.86	0.77	0.82	0.67	0.78	0.67	0.67	0.59	0.85	0.93	0.37	0.81	0.89	0.85	0.85	0.84
80	1.78	1.29	1.65	0.65	2.18	0.92	0.78	0.73	1.07	0.75	0.74	1.05	0.67	0.86	0.70	0.99	0.86	0.73	0.83	1.10	0.80	0.84	0.86	0.88	0.87
81	1.21	0.64	1.17	1.16	1.51	0.68	0.78	0.72	1.01	0.84	0.81	0.76	0.81	0.88	0.67	0.48	0.41	0.84	0.83	0.73	0.82	0.85	0.86	0.94	0.87
82	1.19	3.86	1.14	1.08	1.42	0.67	0.56	0.72	0.92	0.78	0.73	0.70	0.67	0.80	0.90	0.48	0.27	0.73	0.85	0.73	0.86	0.81	0.83	0.79	0.83
102	1.77	0.32	1.09	0.72	1.26	0.51	0.78	1.36	0.82	0.59	0.72	0.82	0.67	0.92	1.40	0.54	0.81	0.59	1.23	0.73	1.04	0.82	0.94	0.92	0.91
103	1.21	0.64	1.30	1.02	2.29	0.65	0.56	0.93	0.96	0.75	0.74	0.70	0.40	0.76	0.70	0.48	0.59	0.76	0.92	0.73	0.83	0.85	0.84	0.86	0.90
104	1.01	0.32	1.07	0.87	0.82	0.82	0.78	1.28	1.10	0.78	0.83	1.11	0.94	0.77	1.00	0.70	0.50	0.71	1.09	0.73	0.96	0.99	0.99	0.98	1.09
105	0.76	3.86	1.25	0.61	1.13	0.80	0.67	0.83	1.01	1.08	1.19	0.82	1.08	1.15	0.84	0.61	0.68	1.09	0.84	0.73	1.04	1.04	1.03	0.94	0.95
106	0.93	0.32	0.90	1.02	1.40	1.11	1.22	1.14	0.99	0.90	1.15	1.17	0.81	0.67	0.63	1.07	0.54	0.99	0.95	0.73	0.84	0.86	0.93	1.01	0.95
107	1.05	2.57	1.20	0.78	1.28	0.73	0.44	0.68	1.03	1.05	1.09	0.82	0.81	1.03	0.80	0.54	0.68	1.04	0.98	0.73	1.06	1.03	1.02	1.00	0.94
108	1.07	1.13	1.20	1.08	1.65	0.91	0.67	0.81	1.00	0.80	0.90	0.99	1.01	0.85	0.79	0.74	1.11	0.83	0.89	0.73	0.91	0.88	0.90	0.94	0.98
109	1.24	0.32	1.37	1.16	2.18	0.80	0.67	0.86	1.01	0.96	0.81	0.82	0.81	0.86	0.60	0.56	0.86	0.98	0.98	0.73	0.91	0.89	0.90	0.89	0.87
119	1.15	0.64	1.00	0.90	0.90	0.93	0.74	0.67	0.74	0.91	0.98	1.05	0.88	0.81	0.78	0.80	0.72	0.32	0.94	0.96	0.73	1.09	1.11	1.06	1.10
130	0.76	1.29	1.20	0.65	0.93	0.74	0.78	0.90	0.93	0.80	1.07	0.82	0.94	1.05	0.74	0.61	0.72	0.74	0.89	1.46	1.04	1.08	1.02	0.97	0.95
132	1.40	1.29	1.11	0.74	1.56	0.59	0.78	1.25	0.90	0.71	0.71	0.88	0.94	1.08	1.37	0.57	0.95	0.62	1.26	0.73	1.07	0.90	1.00	0.99	1.08
133	1.23	0.64	1.41	1.11	1.10	0.53	0.22	0.35	1.04	0.87	0.91	0.76	0.81	0.98	0.80	0.46	0.36	0.83	0.97	0.73	1.09	1.04	1.03	1.05	0.98
134	1.07	0.32	0.62	1.16	0.77	1.33	0.78	0.66	0.91	0.71	0.81	0.88	0.54	0.55	0.50	0.64	0.32	0.71	0.75	0.18	0.71	0.69	0.73	0.74	0.76
135	1.03	1.93	0.76	1.17	0.86	1.05	1.33	0.81	0.98	1.28	1.52	1.23	1.35	0.86	0.63	1.03	0.45	1.41	0.93	0.73	1.25	1.27	1.19	1.08	1.11
136	0.86	0.32	0.54	1.11	0.68	1.09	1.11	0.85	1.01	0.78	0.97	1.05	0.81	0.52	0.47	0.85	0.45	0.85	0.88	0.37	0.78	0.84	0.84	0.81	0.94
137	0.95	0.32	0.74	1.08	0.88	0.97	0.78	0.95	0.95	0.84	0.93	0.99	0.67	0.71	0.67	0.76	0.32	0.85	0.82	0.37	0.83	0.86	0.86	0.82	0.86
138	1.01	1.29	0.82	1.00	0.93	0.95	0.78	0.98	0.85	0.71	0.85	0.94	0.67	0.54	0.60	0.65	0.50	0.68	0.84	0.73	0.83	0.80	0.81	0.79	0.85
145	1.15	0.48	1.15	1.14	1.52	0.70	0.83	0.82	0.91	0.89	0.83	0.82	0.88	0.78	0.79	0.63	0.54	0.89	0.91	0.37	0.88	0.84	0.83	0.82	0.88
146	1.18	1.93	1.24	1.09	1.91	0.79	0.78	0.82	0.88	0.87	0.79	0.76	0.67	0.93	0.70	0.57	0.50	0.87	0.92	0.73	0.84	0.89	0.87	0.92	0.92
149	1.06	0.32	1.08	1.05	1.31	0.78	1.00	0.95	0.91	0.86	0.81	0.94	0.67	0.76	0.57	0.86	0.63	0.89	0.92	0.73	0.84	0.83	0.87	0.89	0.81
150	0.96	0.32	0.94	0.93	0.62	0.95	1.33	1.61	1.04	0.96	0.94	1.23	0.81	0.79	0.80	0.94	0.72	1.03	1.20	1.10	0.94	0.95	1.01	1.04	1.07
151	1.01	1.29	0.97	0.92	0.59	0.76	0.89	1.12	1.02	0.84	0.80	1.11	0.67	0.69	0.90	0.78	0.45	0.91	1.09	1.10	0.93	0.95	1.02	1.04	1.06
152	0.96	0.32	0.94	0.96	0.65	0.91	1.00	1.16	1.06	0.89	0.88	1.23	0.67	0.83	1.24	0.94	0.59	0.92	1.22	1.83	0.99	1.00	1.09	1.10	1.18
153	0.92	0.32	0.91	0.93	0.68	0.89	1.22	1.46	1.08	0.86	0.89	1.17	0.67	0.72	0.77	0.84	0.63	0.87	1.05	0.73	0.92	0.92	0.95	0.99	0.99
155	1.03	0.32	1.09	1.07	1.41	0.74	0.89	0.93	0.91	0.78	0.77	0.94	0.67	0.71	0.57	0.73	0.68	0.77	0.90	0.73	0.83	0.82	0.85	0.89	0.89
156	1.06	1.93	1.09	1.05	1.38	0.70	0.78	0.88	0.88	0.87	0.78	0.88	0.67	0.73	0.67	0.76	0.45	0.93	0.85	0.37	0.76	0.73	0.80	0.79	0.83
157	0.74	0.32	0.31	1.11	0.15	1.12	0.78	1.42	1.09	0.71	0.86	1.34	0.67	0.43	0.37	1.01	1.11	0.78	1.05	0.37	0.87	0.96	1.06	1.12	1.19
158	1.00	0.32	1.08	1.03	1.38	0.77	0.89	1.00	0.88	0.84	0.79	0.94	0.67	0.73	0.57	0.83	0.54	0.87	0.83	0.73	0.75	0.75	0.80	0.81	0.82
159	1.06	0.64	1.12	1.04	1.56	0.68	0.89	0.86	0.89	0.69	0.77	0.88	0.94	0.74	0.60	0.68	0.86	0.70	0.89	0.73	0.78	0.76	0.82	0.85	0.85
161	1.08	1.93	1.15	0.85	1.15	0.72	0.67	0.73	1.04	0.92	1.02	0.82	0.67	0.91	0.90	0.54	0.59	0.92	0.90	0.73	0.99	0.94	0.95	0.94	0.93
162	0.92	1.93	1.11	0.72	1.12	0.65	0.67	0.82	0.93	0.96	0.99	0.88	0.81	0.99	0.77	0.61	0.50	0.98	0.90	0.73	0.95	0.95	0.95	0.93	0.85
163	1.00	0.32	1.21	0.89	1.75	0.75	0.44	0.66	0.91	0.72	0.78	0.94	0.67	0.95	0.74	0.59	0.86	0.74	0.89	0.73	0.80	0.81	0.87	0.89	0.90
164	0.99	0.64	1.05	1.07	1.23	0.84	1.22	1.07	0.94	1.25	0.88	0.94	0.81	0.76	0.67	1.01	0.59	1.41	0.92	0.73	0.84	0.84	0.86	0.89	0.89
172	1.07	0.32	0.95	0.89	0.57	0.76	1.00	1.12	1.07	0.89	0.93	1.05	0.67	0.71	0.94	0.71	0.72	0.92	1.18	1.10	0.98	1.07	1.05	1.07	1.18
207	1.11	1.93	1.08	1.07	1.25	0.75	0.78	0.8																	

Muestras	Eu ppm	Gd ppm	Tb ppm	Dy ppm	Ho ppm	Er ppm	Tm ppm	Yb ppm	Lu ppm	Mo ppm	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	As ppm	Cd ppm	Sb ppm	Bi ppm	Ag ppm	Au ppb	Hg ppm	Tl ppm	Se ppm	Te ppm	B ppm
2	0.79	0.85	0.76	0.84	0.81	0.90	0.87	0.79	0.82	0.36	0.51	0.39	0.36	0.30	0.13	0.80	0.09	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	0.00
27	1.00	0.93	0.94	0.94	0.96	0.95	0.89	0.93	0.88	0.48	0.81	0.52	0.55	0.38	0.51	1.60	0.36	0.55	0.05	0.68	0.69	1.66	0.89	0.92
41	0.91	0.90	0.90	0.89	0.85	0.87	0.87	0.85	0.90	1.44	1.70	0.96	0.38	0.28	0.51	0.80	0.36	0.55	0.34	1.36	1.38	2.65	0.89	1.17
42	0.87	0.86	0.86	0.88	0.85	0.87	0.80	0.80	0.76	0.60	0.96	0.39	0.34	0.23	0.13	0.80	0.09	0.55	0.26	0.34	0.69	0.83	0.89	0.92
43	0.88	1.00	1.01	1.00	0.97	0.99	0.96	0.96	0.94	0.84	1.19	0.43	0.73	0.17	0.13	0.80	0.09	0.55	0.05	0.68	0.69	0.83	0.89	0.76
44	0.79	0.86	0.89	0.84	0.80	0.77	0.78	0.79	0.80	0.72	1.25	0.49	0.49	0.20	0.26	0.40	0.09	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	0.76
45	0.83	0.85	0.88	0.90	0.91	0.90	0.91	0.89	0.90	1.32	1.13	0.61	0.54	0.28	0.51	0.80	0.18	0.55	0.05	1.36	0.69	0.83	0.89	1.09
46	0.90	0.98	0.96	0.94	0.94	0.89	0.85	0.86	0.82	0.60	0.85	0.87	0.81	0.15	0.13	0.80	0.36	0.55	0.05	0.68	0.69	0.83	0.89	3.19
57	0.97	0.88	0.93	0.94	0.92	0.85	0.89	0.88	0.88	0.48	0.63	0.46	0.45	0.34	0.13	1.20	0.36	0.55	0.05	1.36	0.69	0.83	0.89	1.01
58	0.95	0.89	0.93	0.90	0.85	0.84	0.87	0.88	0.86	0.72	0.90	0.73	0.51	0.41	0.51	1.20	1.26	0.55	0.05	0.68	1.38	0.83	0.89	1.93
59	0.92	0.85	0.86	0.97	0.91	0.87	0.93	0.85	0.82	0.48	1.01	1.42	0.51	0.35	0.26	1.60	0.36	0.55	0.26	6.10	0.69	0.83	0.89	0.34
65	0.89	0.92	0.91	0.97	0.95	0.88	0.87	0.87	0.90	0.36	0.64	0.44	0.40	0.39	0.13	1.20	0.18	0.55	0.05	0.68	0.69	0.83	0.89	1.17
66	0.98	0.87	0.91	0.96	0.92	0.92	0.87	0.91	0.92	0.36	0.59	0.43	0.44	0.38	0.13	1.20	0.18	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	1.09
80	0.93	0.87	0.88	0.84	0.84	0.82	0.78	0.85	0.84	0.96	1.65	2.55	1.09	0.64	2.31	2.79	0.36	1.11	0.48	7.45	4.13	2.98	0.89	2.52
81	0.96	0.91	0.91	0.94	0.95	0.96	0.89	0.98	0.90	0.36	0.61	0.45	0.40	0.25	0.13	0.80	0.36	0.55	0.32	0.68	0.69	0.83	0.89	0.92
82	0.89	0.81	0.85	0.82	0.90	0.85	0.80	0.88	0.84	0.36	0.61	0.43	0.42	0.22	0.26	0.80	0.18	2.21	0.26	1.36	1.38	0.83	0.89	1.09
102	0.93	1.03	1.00	1.01	1.05	1.07	0.98	1.07	0.96	3.35	0.95	0.77	0.77	0.39	1.03	0.80	0.36	1.11	0.14	3.39	0.69	2.98	0.89	3.61
103	0.85	0.93	0.89	0.87	0.95	0.94	0.93	0.94	0.90	0.48	0.77	0.54	0.43	0.50	0.26	0.80	0.36	0.55	0.30	0.68	1.38	0.83	0.89	0.92
104	1.17	1.08	1.11	1.09	1.08	1.03	0.98	1.02	1.02	0.96	0.87	0.72	0.54	0.16	0.51	0.40	0.90	0.55	0.30	0.68	0.69	0.83	0.89	1.68
105	0.83	0.89	0.88	0.84	0.79	0.90	0.89	0.85	0.92	0.60	0.61	0.62	0.52	0.25	0.13	0.40	0.18	0.55	0.20	0.68	1.38	0.83	0.89	3.19
106	1.10	1.01	0.95	0.93	0.91	0.85	0.87	0.85	0.82	0.36	1.16	0.72	0.80	0.29	0.26	0.80	0.18	0.55	0.05	1.36	0.69	0.83	0.89	1.34
107	0.98	1.02	0.96	0.98	0.89	0.96	1.00	0.91	0.98	0.48	0.52	0.64	0.49	0.13	0.13	0.20	0.18	0.55	0.18	1.36	1.38	0.83	0.89	1.93
108	1.12	0.98	0.94	0.88	0.96	0.92	0.96	0.95	0.91	0.36	0.67	0.55	0.55	0.32	0.13	0.80	0.36	0.55	0.15	1.02	2.75	0.83	0.89	1.51
109	1.02	1.00	0.94	0.96	1.03	1.08	1.06	1.07	1.00	0.48	0.65	0.48	0.40	0.50	0.26	1.20	0.36	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	0.67
119	1.14	1.09	1.06	1.03	0.95	0.96	1.00	0.98	0.92	0.36	0.80	0.53	0.50	0.22	0.26	0.40	0.18	0.55	0.12	0.68	0.69	0.83	0.89	2.35
130	0.80	0.86	0.84	0.85	0.83	0.89	0.85	0.83	0.84	0.72	0.87	0.81	0.52	0.18	0.13	0.40	0.36	0.55	0.05	1.36	0.69	1.99	0.89	4.62
132	0.93	1.06	1.11	1.17	1.09	1.15	1.13	1.04	1.06	3.00	0.96	0.85	0.81	0.37	1.28	0.80	0.36	0.55	0.05	4.07	1.38	3.32	0.89	4.36
133	1.06	1.02	1.04	0.96	0.96	0.94	0.96	0.97	0.96	0.24	0.50	0.74	0.34	0.11	0.13	0.20	0.54	0.55	0.44	0.34	1.38	0.83	0.89	3.02
134	1.00	0.80	0.80	0.80	0.76	0.76	0.76	0.68	0.72	0.48	0.40	0.31	0.67	0.32	0.13	0.40	0.09	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	1.43
135	1.15	1.06	1.00	0.98	0.97	0.89	0.91	0.96	0.94	0.36	0.44	0.42	0.72	0.15	0.13	0.40	0.18	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	0.76
136	1.04	0.89	0.94	0.88	0.81	0.75	0.87	0.80	0.78	0.72	0.78	0.37	0.66	0.32	0.13	0.40	0.09	0.55	0.05	2.03	0.69	3.98	0.89	0.76
137	1.07	0.91	0.90	0.87	0.84	0.77	0.78	0.76	0.80	0.72	0.66	0.32	0.53	0.27	0.13	0.40	0.09	0.55	0.05	0.34	0.69	2.32	0.89	0.84
138	0.94	0.84	0.81	0.81	0.79	0.75	0.74	0.73	0.76	0.60	0.70	0.35	0.48	0.27	0.13	0.80	0.09	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	0.76
145	1.00	0.91	0.91	0.92	0.88	0.86	0.90	0.88	0.92	0.36	0.56	0.43	0.41	0.34	0.13	1.20	0.27	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	0.97
146	1.05	0.95	0.93	0.97	0.93	0.92	0.93	0.95	0.98	0.36	0.75	0.52	0.45	0.40	0.13	1.20	0.36	0.55	0.10	0.68	1.38	0.83	0.89	1.09
149	0.96	0.85	0.88	0.91	0.93	0.87	0.87	0.85	0.86	0.48	0.58	0.46	0.51	0.32	0.13	1.20	0.18	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	1.09
150	1.18	1.15	1.16	1.25	1.16	1.18	1.15	1.11	1.12	0.60	0.63	0.64	0.59	0.10	0.13	0.40	1.26	0.55	0.05	0.68	0.69	0.83	1.77	0.84
151	1.14	1.11	1.11	1.10	1.07	1.06	1.06	1.01	1.00	0.60	0.71	0.71	0.54	0.09	0.26	0.40	1.26	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	0.59
152	1.26	1.22	1.21	1.21	1.14	1.18	1.11	1.10	1.06	0.60	0.84	0.84	0.56	0.09	0.26	0.40	0.90	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	0.13
153	1.07	0.99	1.04	1.04	0.96	1.01	0.96	0.94	0.94	0.96	0.76	0.67	0.61	0.13	0.51	0.40	0.90	0.55	0.18	1.36	0.69	1.66	0.89	0.92
155	0.93	0.91	0.91	0.93	0.92	0.91	0.87	0.84	0.86	0.36	0.64	0.44	0.45	0.34	0.13	1.20	0.18	0.55	0.12	0.34	0.69	0.83	0.89	0.92
156	0.92	0.84	0.84	0.87	0.85	0.86	0.85	0.82	0.84	0.36	0.57	0.46	0.44	0.34	0.13	1.20	0.36	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	0.92
157	1.46	1.18	1.13	1.12	1.04	1.01	1.00	0.91	0.92	1.20	1.53	0.61	0.42	0.03	0.13	0.20	0.09	0.55	0.05	2.03	1.38	0.83	0.89	0.84
158	0.87	0.84	0.85	0.87	0.89	0.81	0.85	0.83	0.82	0.48	0.66	0.46	0.49	0.35	0.13	1.60	0.18	0.55	0.05	0.68	1.38	0.83	0.89	1.01
159	0.93	0.83	0.88	0.88	0.85	0.87	0.85	0.87	0.84	0.48	0.65	0.45	0.42	0.36	0.26	1.20	0.18	0.55	0.05	1.36	0.69	0.83	0.89	0.76
161	0.92	0.89	0.88	0.87	0.92	0.89	0.98	0.95	0.90	0.36	0.43	0.43	0.42	0.13	0.13	0.20	0.18	0.55	0.12	0.68	0.69	0.83	0.89	1.76
162	0.83	0.86	0.90	0.84	0.85	0.83	0.83	0.85	0.86	0.48	0.51	0.55	0.50	0.13	0.13	0.20	0.18	0.55	0.05	0.68	0.69	0.83	0.89	2.18
163	0.96	0.86	0.89	0.85	0.86	0.85	0.87	0.84	0.80	0.36	0.71	0.59	0.52	0.26	0.13	0.80	0.36	0.55	0.05	1.36	1.38	0.83	0.89	2.01
164	0.93	0.89	0.84	0.86	0.83	0.85	0.87	0.87	0.94	0.48	0.66	0.47	0.59	0.39	0.26	1.20	0.36	0.55	0.05	0.34	0.69	0.83	0.89	1.09
172	1.15	1.14	1.16	1.13	1.16	1.20	1.13	1.08	1.10	1.08	0.96	0.85	0.57	0.05	0.26	0.40	0.72	0.55	0.05	1.36	1.38	0.83	0.89	0.42
207	0.92	0.90	0.88	0.90	0.90	9 0.88	0.96	0.86	0.88	0.48	0.52	0.47	0.45	0.22	0.13	0.80	0.18	0.55	0.05	0.68	0.69	0.83	0.89	1.01
208	1.01	0.94	0.93	0.98	0.94	1.01	0.98	0.93	0.94	0.48	0.51	0.44	0.46	0.29	0.26	1.20	0.36	0.55	0.14	0.68	0.69	0.83	0.89	0.76
PROMEDIO	0.98	0.94	0.94	0.94	0.92	0.92	0.91	0.90	0.90	0.68	0.78	0.61	0.53	0.27	0.29	0.82	0.35	0.60	0.12	1.12	0.97	1.14	0.91	1.38

ANEXO 4: BASE DE DATOS DE METALES Y METALOIDES

Tabla 7. Base de datos de metales y metaloides utilizados en este trabajo.

Client ID	Site	UTM Este	UTM Norte	Sample Date	Colector	Zona prioritaria	Tipo de calcificación	Deposit Area (cm2)	Volume (m3)	Units	Ni	Na	Na Unc.	Mg	Mg Unc.	Al	Al Unc.	Si	Si Unc.	P	P Unc.	S	S Unc.	Cl	Cl Unc.	K	K Unc.	Ca	Ca Unc.	Ti	Ti Unc.	V	V Unc.	Cr	Cr Unc.	Mn	Mn Unc.	Fe	Fe Unc.
COY TE 0027	CRO1-EXT	729920.026	4948252.956	28-02-2022	EPAM5000	ZONA CENTRO	Estufa a parafina + cocina a leña	12	11.46	ug/m3	0.2000	0.0734	0.0059	0.0229	0.1838	0.0194	0.5430	0.0415	0.0032	0.0046	0.1175	0.0135	0.5307	0.0396	0.1770	0.0136	2.2952	0.4546	0.0208	0.0022	0.0000	0.0013	0.0003	0.0014	0.0060	0.0013	0.2550	0.0184	
COY TE 0002	CRO1-INT	729920.026	4948252.956	28-02-2022	PEM	ZONA CENTRO	Estufa a parafina + cocina a leña	9.62	11.43	ug/m3	0.2833	0.0605	0.0210	0.1800	0.0408	0.0098	0.1586	0.0140	0.0093	0.0035	0.0614	0.0059	0.1957	0.0295	0.2309	0.0198	1.3257	0.1883	0.0887	0.0046	0.0000	0.0042	0.0060	0.0039	0.0056	0.0024	0.8755	0.0071	
COY TE 0003	SR01-INT	729887.326	4948326.479	28-02-2022	PEM	ZONA CENTRO	Estufa a leña	9.62	11.43	ug/m3	0.1368	0.0259	0.0038	0.0174	0.0298	0.0089	0.0618	0.0078	0.0041	0.0029	0.0226	0.0341	0.1572	0.0276	0.1637	0.0172	0.0577	0.0092	0.0100	0.0041	0.0180	0.0040	0.0013	0.0024	0.0667	0.0057			
COY TE 0004	CRO2-INT	728453.663	4947667.461	01-03-2022	PEM	ZONA MACKAY	Estufa a pellet	9.62	11.1	ug/m3	0.2552	0.0636	0.0169	0.0292	0.0690	0.0110	0.0953	0.0101	0.0053	0.0034	0.0401	0.0467	0.1167	0.0277	0.0679	0.0131	1.2105	0.192	0.0161	0.0050	0.0040	0.0043	0.0095	0.0041	0.0000	0.0025	0.0652	0.0057	
COY TE 0028	SR02-EXT	728475.556	4947625.957	01-03-2022	EPAM5000	ZONA MACKAY	Estufa a leña	12	11.48	ug/m3	0.2416	0.0657	0.0063	0.0623	0.0221	0.0861	0.0126	0.1441	0.0137	0.0060	0.0037	0.0762	0.0114	0.2475	0.0201	0.1404	0.0121	0.0971	0.0273	0.0070	0.0015	0.0000	0.0030	0.0000	0.0014	0.0000	0.0021	0.0178	0.0055
COY TE 0005	SR02-INT	728475.556	4947625.957	01-03-2022	PEM	ZONA MACKAY	Estufa a leña	9.62	11.14	ug/m3	0.1921	0.0606	0.0300	0.0196	0.0484	0.0102	0.0894	0.0097	0.0516	0.0055	0.1128	0.0376	0.3627	0.0388	0.8916	0.0455	1.052	0.3030	0.1030	0.0048	0.0073	0.0043	0.0041	0.0033	0.0025	0.0782	0.0066		
COY TE 0007	SR03-EXT	730537.662	4948530.146	10-03-2022	PEM	ZONA DIVISADERO	Estufa a leña	9.62	5	ug/m3	0.4583	0.1402	0.0390	0.0437	0.2634	0.0312	0.4598	0.0390	0.0173	0.0079	0.1713	0.0865	0.7652	0.0854	0.7786	0.0651	1.3675	0.5902	0.0119	0.0110	0.0055	0.0100	0.0077	0.0092	0.0192	0.0057	0.2329	0.0248	
COY TE 0008	CRO4-EXT	728616.173	4948541.319	10-03-2022	PEM	ZONA CENTRO	Estufa a parafina	9.62	11.4	ug/m3	0.1371	0.0564	0.0035	0.0180	0.1055	0.0126	0.2365	0.0193	0.0000	0.0030	0.5658	0.0504	0.0350	0.0252	1.405	0.161	1.1305	0.131	0.0159	0.0050	0.018	0.0043	0.0000	0.0041	0.0068	0.0024	0.1751	0.0131	
COY TE 0030	CRO4-INT	728616.173	4948541.319	10-03-2022	EPAM5000	ZONA CENTRO	Estufa a parafina	12	11.6	ug/m3	0.0811	0.0632	0.0223	0.0216	0.0647	0.0121	0.2226	0.0190	0.0081	0.0042	0.6861	0.0066	0.0262	0.0072	0.0782	0.0070	0.0695	0.0258	0.0051	0.0014	0.0000	0.0012	0.0025	0.0014	0.0005	0.0010	0.0680	0.0053	
COY TE 0031	SR04-INT	728959.411	4948564.694	10-03-2022	EPAM5000	ZONA CENTRO	Estufa a leña	12	11.6	ug/m3	0.1623	0.0601	0.0310	0.0200	0.0401	0.0098	0.1075	0.0111	0.0058	0.0036	0.389	0.0103	0.0661	0.0090	0.0806	0.0071	0.0282	0.0034	0.0022	0.0012	0.0014	0.0011	0.0018	0.0012	0.0002	0.0010	0.372	0.0031	
COY TE 0010	CRO5-EXT	729149.083	4949333.823	13-03-2022	PEM	ZONA RIO COYHAIQUE	Estufa a parafina + cocina a leña + estufa a leña	9.62	11.4	ug/m3	0.0967	0.0556	0.0284	0.0183	0.0570	0.0104	0.1047	0.0106	0.0060	0.0031	0.0659	0.0060	0.1338	0.0274	0.401	0.0329	0.0531	0.0097	0.00219	0.0051	0.0055	0.0043	0.0025	0.0041	0.0010	0.0024	0.0967	0.0078	
COY TE 0033	CR05-INT	729149.083	4949333.823	13-03-2022	EPAM5000	ZONA RIO COYHAIQUE	Estufa a parafina + cocina a leña + estufa a leña	12	11.5	ug/m3	0.0739	0.0674	0.0284	0.0167	0.0124	0.1787	0.0162	0.0375	0.0054	0.0061	0.0109	0.1440	0.134	0.2835	0.0210	0.2618	0.0522	0.0031	0.0014	0.0014	0.0013	0.0000	0.0004	0.0010	0.0014	0.0039	0.0012	0.9901	0.0068
COY TE 0034	SR05-INT	729261.068	4949111.101	13-03-2022	EPAM5000	ZONA CENTRO	Estufa a leña	12	11.8	ug/m3	0.1022	0.0667	0.0166	0.0214	0.1410	0.0175	0.3384	0.0302	0.0177	0.0045	0.0528	0.0062	0.1564	0.0140	0.2191	0.0165	0.2017	0.0377	0.0136	0.0107	0.0000	0.0012	0.0011	0.0013	0.0022	0.0010	0.1562	0.0110	
COY TE 0011	CRO6-EXT	730980.315	4947549.763	16-03-2022	PEM	ZONA DIVISADERO	Estufa a parafina	9.62	11.3	ug/m3	0.2110	0.0610	0.0407	0.0817	0.1819	0.0131	0.1046	0.0245	0.070	0.0032	0.0084	0.3568	0.2959	0.3088	0.1551	0.171	1.659	0.333	0.015	0.0050	0.0043	0.0408	0.0040	0.0022	0.0025	0.1746	0.0131		
COY TE 0035	CR06-INT	730980.315	4947549.763	16-03-2022	EPAM5000	ZONA DIVISADERO	Estufa a parafina	12	11.3	ug/m3	0.2388	0.0697	0.0422	0.0200	0.0948	0.0123	0.2546	0.0211	0.0401	0.0039	0.0170	0.1101	0.1064	0.1010	0.0992	0.0083	1.253	0.318	0.0073	0.0015	0.004	0.0013	0.0002	0.0014	0.0014	0.0011	0.0006	0.0062	
COY TE 0012	SR06-EXT	730225.363	4951540.278	16-03-2022	PEM	-	Estufa a parafina	9.62	11.3	ug/m3	0.2178	0.0590	0.0131	0.0182	0.0215	0.0086	0.0522	0.0179	0.0008	0.0029	0.0899	0.0361	0.1921	0.0303	0.0199	0.0115	0.0639	0.0096	0.0214	0.0050	0.014	0.0043	0.0000	0.0040	0.0002	0.0025	0.4545	0.0050	
COY TE 0036	SR06-INT	730225.363	4951540.278	16-03-2022	EPAM5000	-	Estufa a parafina	12	11.5	ug/m3	0.1471	0.0620	0.0090	0.0201	0.0613	0.0119	0.1754	0.0158	0.0118	0.0042	0.0746	0.0113	0.1648	0.0146	0.3151	0.0233	0.0775	0.0296	0.0069	0.0014	0.0000	0.0013	0.0011	0.0014	0.0004	0.0010	0.4276	0.0038	
COY TE 0037	CR07-EXT	730202.127	4947504.122	21-03-2022	EPAM5000	ZONA DIVISADERO	Estufa a pellet	12	11.5	ug/m3	0.1711	0.0702	0.0490	0.0410	0.2034	0.0234	0.7720	0.0576	0.0102	0.0044	0.1518	0.2041	0.0173	0.4331	0.0316	1.3549	0.4555	0.1013	0.0019	0.010	0.0014	0.016	0.0015	0.0085	0.0014	0.0050	0.0030	0.246	0.0038
COY TE 0013	SR07-EXT	730311.885	4947751.096	21-03-2022	PEM	ZONA DIVISADERO	Estufa a leña	9.62	11.3	ug/m3	0.2454	0.0741	0.0629	0.0236	0.5227	0.0419	1.6890	0.1238	0.0138	0.0044	0.1744	0.0396	0.2635	0.0334	0.4519	0.0361	1.6000	0.1154	0.0776	0.0078	0.0074	0.0045	0.0000	0.0041	0.0050	0.0030	0.342	0.0031	
COY TE 0038	SR07-INT	730311.885	4947751.096	21-03-2022	EPAM5000	ZONA MACKAY	Estufa a leña	12	11.3	ug/m3	0.1828	0.0705	0.0216	0.0229	0.2745	0.0250	0.7962	0.0594	0.0087	0.0046	0.0960	0.0127	0.1434	0.0135	0.2705	0.0202	0.5016	0.0626	0.0194	0.0021	0.0013	0.0013	0.0000	0.0014	0.0067	0.0013	0.761	0.0067	
COY TE 0014	CRO8-EXT	728453.561	4947692.662	24-03-2022	PEM	ZONA MACKAY	Estufa a pellet + cocina a leña	9.62	11.5	ug/m3	0.0877	0.0599	0.0243	0.0201	0.1859	0.0180	0.5933	0.0446	0.0033	0.0034	0.0635	0.0099	0.1415	0.0270	0.2854	0.0246	2.6666	0.2491	0.0274	0.0052	0.0076	0.0042	0.0054	0.0039	0.0028	0.0024	0.2778	0.0217	
COY TE 0042	CR08-INT	728453.561	4947692.662	24-03-2022	EPAM5000	ZONA MACKAY	Estufa a pellet + cocina a leña	12	11.4	ug/m3	0.1145	0.0729	0.0243	0.0246	0.1866	0.0161	0.5611	0.0427	0.0251	0.0052	0.1173	0.0135	0.1286	0.0124	0.2551	0.0091	0.4146	0.0459	0.0102	0.0017	0.0000	0.0013	0.0014	0.0017	0.0007	0.0004	0.192	0.0117	
COY TE 0039	SR08-INT	728456.875	4947690.794	24-03-2022	EPAM5000	ZONA MACKAY	Estufa a leña	12	11.4	ug/m3	0.2128	0.0794	0.0806	0.0542	0.1516	0.0171	0.4894	0.0377	0.0278	0.0052	0.2119	0.0393	0.3017	0.0239	0.4959	0.0561	0.5620	0.0520	0.0214	0.0022	0.0000	0.0013	0.0015	0.0014	0.0054	0.0013	0.4158	0.0298	
COY TE 0016	CRO9-EXT	726163.45	4947554.839	28-03-2022	PEM	ZONA RIO SIMPSON	Estufa a pellet	9.62	11.3	ug/m3	0.0977	0.0618	0.0068	0.0203	0.2153	0.0201	0.5127	0.0389	0.0002	0.0035	0.0507	0.0053	0.1179	0.0270	0.1865	0.0167	0.2199	0.0253	0.0339	0.0056	0.0023	0.0043	0.0066	0.0039	0.0068	0.0025	0.3001	0.0219	
COY TE 0041	CRO9-INT	726163.45	4947554.839	28-03-2022	EPAM5000	ZONA RIO SIMPSON	Estufa a pellet	12	11.4	ug/m3	0.2611	0.1023	0.1448	0.0552	1.4740	0.1266	3.0000	0.0900	0.0059	0.0211	0.0213	0.4220	0.0255	0.7668	0.0556	1.9850	0.1759	0.2185	0.0158	0.0072	0.0107	0.0010	0.0015	0.0015	0.0061	0.0003	1.9390	0.1375	
COY TE 0015	SR09-EXT																																						

ANEXO 5: SUMA DE CONCENTRACIONES DE METALES Y METALOIDES POR VIVIENDA

Tabla 8. Suma de concentraciones de elementos mayores y traza en cada vivienda.

INTERIOR				EXTERIOR			
Site	Suma de concentración de Elementos Mayores ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Suma de concentración de Elementos traza y Tierras raras ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Total $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Site	Suma de concentración de Elementos Mayores ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Suma de concentración de Elementos traza y Tierras raras ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Total $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CR09-INT	11.7175	0.1345	11.852	SR07-EXT	5.8688	0.6976	6.5664
SR03-INT	3.7796	0.9357	4.7153	CR01-EXT	2.3384	0.1073	2.4457
SR08-INT	2.9798	0.1505	3.1303	CR08-EXT	1.9935	0.6016	2.5951
CR07-INT	2.671	0.1419	2.8129	CR09-EXT	1.7459	0.7476	2.4935
SR07-INT	2.5548	0.0977	2.6525	CR06-EXT	1.4439	0.5043	1.9482
CR08-INT	1.9593	0.1171	2.0764	SR09-EXT	1.1867	0.5988	1.7855
SR02-INT	1.6856	0.4718	2.1574	SR02-EXT	1.1841	0.1239	1.308
SR05-INT	1.5706	0.0846	1.6552	CR05-EXT	1.0603	0.4838	1.5441
CR05-INT	1.2303	0.0634	1.2937	CR04-EXT	1.039	0.4381	1.4771
CR01-INT	1.2135	0.4344	1.6479	SR06-EXT	0.7577	0.4376	1.1953
CR06-INT	1.1804	0.1225	1.3029				
SR06-INT	1.0926	0.0552	1.1478				
CR02-INT	0.8867	0.6428	1.5295				
SR09-INT	0.8287	0.0761	0.9048				
SR01-INT	0.7785	0.5071	1.2856				
CR04-INT	0.7167	0.0882	0.8049				
SR04-INT	0.6033	0.0706	0.6739				

ANEXO 6: CALCULO DE PROPORCIÓN DE METALES Y METALES EN MP_{2,5} por m³

Tabla 9. Resumen del calculo de proporción de elementos mayores y traza por m³

Filtro	LUGAR	Site	Peso final de filtro (ug)	Volumen que paso en cada filtro (m3)	Concentración total (µg/m ³)	Σ Total de Elementos mayores (µg/m ³)	% Elementos mayores por m ³	Σ Total de Elementos traza y La (µg/m ³)	% Elementos traza y La por m ³
COY TE 0027	EXTERIOR	CR01-EXT	400.0	11.5	34.9	2.3384	6.7	0.1073	0.3
COY TE 0002	INTERIOR	CR01-INT	433.3	11.43	37.9	1.2135	3.2	0.4344	1.1
COY TE 0004	INTERIOR	CR02-INT	233.3	11	21.2	0.8867	4.2	0.6428	3.0
COY TE 0008	EXTERIOR	CR04-EXT	400.0	11.4	35.1	1.039	3.0	0.4381	1.2
COY TE 0030	INTERIOR	CR04-INT	400.0	11.6	34.5	0.7167	2.1	0.0882	0.3
COY TE 0010	EXTERIOR	CR05-EXT	233.3	11.4	20.5	1.0603	5.2	0.4838	2.4
COY TE 0033	INTERIOR	CR05-INT	333.3	11.5	29.0	1.2303	4.2	0.0634	0.2
COY TE 0011	EXTERIOR	CR06-EXT	533.3	11.3	47.2	1.4439	3.1	0.5043	1.1
COY TE 0035	INTERIOR	CR06-INT	300.0	11.3	26.5	1.1804	4.4	0.1225	0.5
COY TE 0037	INTERIOR	CR07-INT	800.0	11.5	69.6	2.671	3.8	0.1419	0.2
COY TE 0014	EXTERIOR	CR08-EXT	666.7	11.5	58.0	1.9935	3.4	0.6016	1.0
COY TE 0042	INTERIOR	CR08-INT	600.0	11.4	52.6	1.9593	3.7	0.1171	0.2
COY TE 0016	EXTERIOR	CR09-EXT	533.3	11.3	47.2	1.7459	3.7	0.7476	1.6
COY TE 0041	INTERIOR	CR09-INT	866.7	11.4	76.0	11.7175	15.4	0.1345	0.2
COY TE 0003	INTERIOR	SR01-INT	433.3	11.4	38.0	0.7785	2.0	0.5071	1.3
COY TE 0028	EXTERIOR	SR02-EXT	333.3	11.48	29.0	1.1841	4.1	0.1239	0.4
COY TE 0005	INTERIOR	SR02-INT	466.7	11.14	41.9	1.6856	4.0	0.4718	1.1
COY TE 0007	INTERIOR	SR03-INT	633.3	5	126.7	3.7796	3.0	0.9357	0.7
COY TE 0031	INTERIOR	SR04-INT	266.7	11.6	23.0	0.6033	2.6	0.0706	0.3
COY TE 0034	INTERIOR	SR05-INT	233.3	11.8	19.8	1.5706	7.9	0.0846	0.4
COY TE 0012	EXTERIOR	SR06-EXT	600.0	11.3	53.1	0.7577	1.4	0.4376	0.8
COY TE 0036	INTERIOR	SR06-INT	400.0	11.5	34.8	1.0926	3.1	0.0552	0.2
COY TE 0013	EXTERIOR	SR07-EXT	800.0	11.3	70.8	5.8688	8.3	0.6976	1.0
COY TE 0038	INTERIOR	SR07-INT	533.3	11.3	47.2	2.5548	5.4	0.0977	0.2
COY TE 0039	INTERIOR	SR08-INT	600.0	11.4	52.6	2.9798	5.7	0.1505	0.3
COY TE 0015	EXTERIOR	SR09-EXT	333.3	11.3	29.5	1.1867	4.0	0.5988	2.0
COY TE 0040	INTERIOR	SR09-INT	633.3	11.3	56.0	0.8287	1.5	0.0761	0.1

ANEXO 7: ELEMENTOS MAYORES EN ZONAS PRIORITARIAS DE MONITOREO

Tabla 10. Mediana de elementos mayores en cada zona prioritaria de monitoreo.

Zona Centro		Zona pie de monte Co. Divisadero		Zona pie de monte Co. Mackay		Zona valles fluviales ríos Simpson y Coyhaique	
Elemento	Mediana (µg/m³)	Elemento	Mediana (µg/m³)	Elemento	Mediana (µg/m³)	Elemento	Mediana (µg/m³)
K	0.164	Si	0.616	K	0.376	K	0.299
Na	0.162	Ca	0.361	Si	0.292	Si	0.177
Si	0.159	K	0.352	Ca	0.268	Ca	0.173
Cl	0.156	Al	0.257	Cl	0.215	Cl	0.156
Ca	0.070	Fe	0.242	Na	0.202	Na	0.142
Fe	0.068	Na	0.233	Fe	0.119	S	0.081
S	0.061	Cl	0.174	S	0.115	Fe	0.077
Al	0.041	S	0.127	Al	0.098	Al	0.068
Mg	0.021	Mg	0.036	Mg	0.029	P	0.025
Ti	0.009	Ti	0.014	P	0.027	Mg	0.023
P	0.008	P	0.008	Ti	0.015	Ti	0.006
Mn	0.003	Mn	0.008	Cr	0.006	Mn	0.003
Cr	0.002	V	0.001	Mn	0.004	V	0.001
V	0.000	Cr	0.001	V	0.002	Cr	0.000

ANEXO 8: ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS EN ZONAS PRIORITARIAS DE MONITOREO

Tabla 11. Mediana de elementos traza y La en cada zona prioritaria de monitoreo.

Zona Centro		Zona pie de monte Co. Divisadero		Zona pie de monte Co. Mackay		Zona valles fluviales ríos Simpson y Coyhaique	
Elemento	Mediana (µg/m³)	Elemento	Mediana (µg/m³)	Elemento	Mediana (µg/m³)	Elemento	Mediana (µg/m³)
Sn	0.0236	Zn	0.0284	Sn	0.0519	Pb	0.0087
Mo	0.0098	Mo	0.0151	Pb	0.0369	Sr	0.00645
Hg	0.0094	Pb	0.01425	Mo	0.02825	As	0.00605
Pb	0.0074	Sn	0.01005	Hg	0.0182	Zn	0.00585
Se	0.0072	Hg	0.0096	Rb	0.0148	Rb	0.00565
Br	0.0068	Rb	0.0058	Y	0.0137	Ge	0.0053
Ge	0.006	Sr	0.0055	As	0.0111	Se	0.0048
Rb	0.0057	Br	0.0053	Br	0.00945	Cu	0.0046
As	0.0045	Se	0.00495	Zr	0.00885	Ag	0.00435
Sr	0.0041	Ga	0.00465	Sr	0.0082	Zr	0.00325
Sb	0.0038	Zr	0.00445	Zn	0.0068	Y	0.00305
Ni	0.0036	Sb	0.00405	Se	0.00675	Br	0.00245
Zr	0.0036	Ge	0.00255	La	0.00615	Ni	0.0021
Y	0.0035	As	0.0025	Cu	0.00535	Ba	0.00175
Zn	0.0033	Ba	0.0019	Pd	0.005	La	0.00135
La	0.001	Y	0.0012	Ni	0.00225	Sb	0.00095
Ag	0	Cu	0.00075	In	0.00215	Mo	0.0007
Ba	0	Ag	0.00045	Ag	0.00105	Hg	0.0002
Cu	0	La	0.0002	Ga	0.00105	Ga	0.00015
Ga	0	Pd	0.0002	Ge	0.0007	In	0
In	0	Ni	0.00015	Ba	0	Pd	0
Pd	0	In	0	Sb	0	Sn	0

ANEXO 9: ALZAS DE MP_{2,5} SEGÚN LA HORA

Tabla 12. Alzas según horas de monitoreo interior y exterior de las viviendas.

	Lugar	DIA 1					DIA 2					DIA 3				
		Madrugada 01:00 - 06:00	Mañana 06:00 - 12:00	Medio día 12:00 - 13:00	Tarde 13:00 - 20:00	Noche 20:00 - 24:00	Madrugada 01:00 - 06:00	Mañana 06:00 - 12:00	Medio día 12:00 - 13:00	Tarde 13:00 - 20:00	Noche 20:00 - 24:00	Madrugada 01:00 - 06:00	Mañana 06:00 - 12:00	Medio día 12:00 - 13:00	Tarde 13:00 - 20:00	Noche 20:00 - 24:00
CR01	Interior	-	-	-	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	-
SR01	Interior	-	-	-	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	-
CR01/SR01	Exterior	-	-	-	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	-
CR04	Interior	-	-	-	-	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	-
SR04	Interior	-	-	-	-	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	-
CR04/SR04	Exterior	-	-	-	-	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	-
CR05	Interior	-	-	-	-	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0
SR05	Interior	-	-	-	-	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0
CR05/SR05	Exterior	-	-	-	-	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
CR06	Interior	-	-	-	-	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	-
SR06	Interior	-	-	-	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	-
CR06	Exterior	-	-	-	-	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	-
CR07	Interior	-	-	-	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	-
SR07	Interior	-	-	-	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	-
CR07/SR07	Exterior	-	-	-	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	-
CR08	Interior	-	-	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	-	-	-
SR08	Interior	-	-	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	-	-	-
CR08/SR08	Exterior	-	-	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	-	-	-
CR09	Interior	-	-	-	-	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	-
CR09	Exterior	-	-	-	-	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	-
SR09	Interior	-	-	-	-	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	-
SR09	Exterior	-	-	-	-	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	-
1	Aumento de MP _{2,5}															
0	Disminución de MP _{2,5}															