UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN Y PROPAGACIÓN DEL CARBONO NEGRO HACIA ZONAS CORDILLERANAS DESDE FUENTES URBANAS Y VIALES EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE MEDIANTE MODELACIÓN ATMOSFÉRICA

Memoria de Título presentada por

Ignacio Alejandro Espinosa Molina

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Mauricio Osses A.

Profesora Correferente
Lina Castro H.

MARZO, 2026

xt

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Estimación de la emisión y propagación del carbono negro hacia zonas cordilleranas desde fuentes urbanas y viales en la zona central de Chile mediante modelación atmosférica

Nombre del candidato(a): Ignacio Alejandro Espinosa Molina

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Obras Civiles

Campus: San Joaquin **Departamento:** Obras civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mauricio Osses Alvarado, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26/03/2026 **Firma:**

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/03/2026 **Firma:**

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN Y PROPAGACIÓN DEL CARBONO NEGRO HACIA ZONAS CORDILLERANAS DESDE FUENTES URBANAS Y VIALES EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE MEDIANTE MODELACIÓN ATMOSFÉRICA

AUTOR:

IGNACIO ESPINOSA

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	Nombre	Firma
Mauricio Osses A.	.....	.....
Lina Castro H.	.....	.....

Santiago, Chile, 12/03/2026

Agradecimientos

El presente trabajo se desarrolló en el marco de los proyectos FONDECYT Regular N°1241477 y FONDAP N°1523A0002, los cuales proporcionaron el apoyo científico y académico necesario para la realización de esta memoria. Junto a este, también se agradece el apoyo del Proyecto FONDECYT Iniciación en Investigación N°11220482 y del proyecto USM Interno Multidisciplinario PI_M_24_03, cuyo respaldo contribuyó al desarrollo de este estudio.

Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC), bajo el marco del proyecto CCSS210001. *Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (CCSS210001).*

Asimismo, se agradece a Kevin Basoa Barraza por el apoyo científico–técnico brindado en la generación y provisión de las simulaciones del modelo EMEP utilizadas en este estudio, así como por la orientación entregada para su correcto análisis.

Agradezco también a mi familia —hermanos, tíos y primos—, quienes sin duda han sido un apoyo esencial a lo largo de este camino. En especial, a mis padres, Juany y Erik, por haberme brindado las oportunidades, la guía y los valores necesarios para ir alcanzando cada una de mis metas. Este logro también es de ustedes.

Mis amigos también fueron fundamentales durante este proceso: Moisés, Tomás, Cristofer, Paolo, Mariano y Maximiliano, con quienes pasamos noches enteras preparando certámenes o terminando tareas. El equipo de "Estudio Serio", con el que siempre había espacio para una risa, una conversación o incluso un simple almuerzo que nos permitía desconectarnos por un momento de la presión de los estudios.

Finalmente, agradezco a María José por estar siempre a mi lado. Su apoyo y compañía fueron fundamentales en este proceso, aportando calma en los momentos que mas se necesitó. Espero que sigamos cumpliendo nuestros objetivos y etapas juntos, para siempre.

ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN Y PROPAGACIÓN DEL CARBONO NEGRO HACIA ZONA CORDILLERANAS DESDE FUENTES URBANAS Y VIALES EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE MEDIANTE MODELACIÓN ATMOSFÉRICA

Ignacio Espinosa[1], Mauricio Osses A.[1]

[1] Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

El carbono negro es un contaminante atmosférico cuyo transporte hacia zonas cordilleranas resulta relevante por su potencial impacto en los sectores de nieve y glaciares. En la zona central de Chile, la proximidad entre la cuenca de Santiago y la cordillera, sumado a la circulacion valle-montaña, forman condiciones favorables para el transporte de contaminantes hacia sectores de altura. En este contexto, esta memoria tiene como objetivo estimar la propagación del carbono negro desde Santiago (cuenca del Maipo) y desde la carretera Los Libertadores (Aconcagua) hacia la cordillera mediante modelación atmosférica. Para ello, se analizaron simulaciones del modelo *EMEP MSC -W* correspondientes a enero, julio y septiembre de 2019, forzadas con meteorología WRF e inventario de emisiones *CAMS-ANT 5.3*. El análisis se basó en archivos NetCDF, utilizando la variable SURF_ug_ECFINE como concentración superficial de carbono negro, y extrayendo series temporales mediante máscaras espaciales (GeoJSON) para cuatro zonas de interés: Paso Los Libertadores, Embalse El Yeso, Glaciar Olivares y La Paloma. Se obtuvieron ciclos diurnos a partir de medianas horarias y percentiles P25-P75, complementando la interpretación con informacion del inventario y del campo de viento. Los resultados evidencian una estacionalidad marcada, con concentraciones más altas en enero, intermedias en septiembre y más bajas en julio. Además, se observa que las mayores concentraciones en zonas cordilleranas no son necesariamente explicadas por mayores emisiones locales: El Embalse El Yeso presenta altas concentraciones pese a bajas emisiones, mientras que el Paso Los Libertadores muestra lo opuesto, lo que destaca la influencia de la conectividad valle-montaña y la topografía en la eficiencia del transporte de contaminante.

Palabras claves: EMEP, Transporte Atmosférico, Carbono Negro, circulación valle-montaña, zona central de Chile.

ESTIMATION OF BLACK CARBON EMISSION AND PROPAGATION TOWARD MOUNTAINOUS AREAS FROM URBAN AND ROAD SOURCES IN CENTRAL CHILE THROUGH ATMOSPHERIC MODELING

Ignacio Espinosa[1], Mauricio Osses A.[1]

[1] Universidad Técnica Federico Santa María

Abstract

Black carbon is an atmospheric pollutant whose transport toward mountainous regions is relevant due to its potential impact on snow and glacier systems. In central Chile, the proximity between the Santiago basin and the Andes, together with the valley–mountain circulation, creates favorable conditions for the transport of pollutants to high-altitude areas. In this context, this thesis aims to estimate the propagation of black carbon from Santiago (Maipo basin) and from the Los Libertadores highway (Aconcagua) toward the Andes through atmospheric modeling. To this end, simulations from the *EMEP MSC-W* model corresponding to January, July, and September 2019 were analyzed, forced with WRF meteorology and the *CAMS-ANT 5.3* emission inventory. The analysis was based on NetCDF files, using the variable SURF_ug_ECFINE as surface black carbon concentration, and extracting time series through spatial masks (GeoJSON) for four areas of interest: Paso Los Libertadores, Embalse El Yeso, Glaciar Olivares, and La Paloma. Diurnal cycles were obtained from hourly medians and P25–P75 percentiles, complementing the interpretation with information from the emission inventory and wind fields. The results show a marked seasonality, with higher concentrations in January, intermediate levels in September, and lower concentrations in July. Furthermore, the highest concentrations in mountainous areas are not necessarily explained by higher local emissions: Embalse El Yeso exhibits high concentrations despite low emissions, whereas Paso Los Libertadores shows the opposite behavior, highlighting the influence of valley–mountain connectivity and topography on pollutant transport efficiency.

Keywords: EMEP, Atmospheric Transport, Black Carbon, valley–mountain circulation, central Chile.

Índice

1. Introducción **8**
1.1. Motivación . . . 9
1.2. Objetivos . . . 10
Objetivo General . . . 10
Objetivos Específicos . . . 10

2. Marco Teórico **10**
2.1. Carbono negro y su relevancia en regiones cordilleranas . . . 10
2.2. Mecanismos de transporte atmosférico de carbono negro hacia la cordillera. . . . 11
2.3. Modelación Atmosférica de Contaminantes . . . 14

3. Metodología **15**
3.1. Zona de estudio . . . 15
3.2. Bases de datos . . . 19
Inventario de emisiones del modelo EMEP . . . 19
Campos meteorológicos . . . 20
Condiciones iniciales y de borde . . . 20
Configuración del modelo EMEP . . . 21
3.3. Esquema metodológico . . . 22
Selección del modelo . . . 23
Datos de entrada y funcionamiento del modelo . . . 23
Procesamiento inicial de las simulaciones . . . 23
Procesamiento por zonas de interés . . . 24
Validación de resultados con datos SINCA . . . 24

4. Resultados y discusión **26**
4.1. Validez de los resultados . . . 26
4.2. Exploración inicial del transporte de carbono negro en el dominio definido . . . 30
4.3. Ciclos diurnos mensuales de concentración de carbono negro . . . 43
4.4. Análisis del inventario de emisiones CAMS-ANT 5.3 en las zonas de interés . . . 46
4.5. Análisis del campo de viento proveniente del WRF . . . 50

5. Conclusiones **52**
Generales . . . 52
Específicas . . . 54
Recomendaciones . . . 56

6. Anexos **59**

Índice de figuras

1. Distribución espacial de emisiones de carbono negro en Asia utilizada por Li et al. (2016) para el análisis del transporte hacia glaciares del Himalaya–Tíbet. 11
2. Rutas de transporte atmosférico (*pathways*) de trazadores emitidos desde la cuenca de Santiago hacia la cordillera durante episodios invernales. 12
3. Esquema conceptual de la circulación valle–cordillera y del ciclo diurno de la capa límite atmosférica en el cañón del Maipo, mostrando las diferencias entre condiciones diurnas y nocturnas. 13
4. Ubicación general de la zona de estudio en el contexto de Sudamérica. Se destaca la localización del área analizada en la zona central de Chile, dentro del margen occidental del continente. Elaboración propia. 16
5. Detalle ampliado de la zona de estudio en Chile central, indicando el dominio definido y las cuatro zonas específicas de análisis: Embalse El Yeso, Paso Los Libertadores, Glaciar La Paloma y Glaciar Olivares. Elaboración propia. 17
6. Zonas de interés del estudio. Elaboración propia. 18
7. Esquema general de la metodología aplicada en este estudio. (Elaboración Propia, 2025,) 22
8. Ubicación de las estaciones en la zona de estudio 24
9. Comparación entre la concentración de $PM_{2.5}$ simulada por el modelo EMEP y la observada en la estación Las Condes (SINCA) para los meses de enero, julio y septiembre de 2019. Se incluyen las métricas estadísticas de desempeño (r, BIAS, RMSE y NMB) para cada período analizado. 27
10. Comparación entre la concentración de $PM_{2.5}$ simulada por el modelo EMEP y la observada en la estación Puente Alto (SINCA) para los meses de enero, julio y septiembre de 2019. Se incluyen las métricas estadísticas de desempeño (r, BIAS, RMSE y NMB) para cada período analizado. 28
11. Representación estática de la animación de concentración superficial de carbono negro para enero de 2019. Se muestran nueve instantes representativos correspondientes al inicio, período intermedio y final del mes, permitiendo visualizar la evolución espacial del transporte del contaminante en una escala homogénea. 31
12. Representación estática de la animación de concentración superficial de carbono negro para julio de 2019. Se muestran nueve instantes representativos correspondientes al inicio, período intermedio y final del mes, manteniendo la misma escala de colores para permitir la comparación estacional. 32
13. Representación estática de la animación de concentración superficial de carbono negro para septiembre de 2019. Se muestran nueve instantes representativos correspondientes al inicio, período intermedio y final del mes, facilitando la comparación con los demás períodos estudiados. 33
14. Instantes de máxima concentración superficial de carbono negro en la zona cordillerana definida para enero de 2019. Se muestran nueve eventos correspondientes al inicio, período intermedio y final del mes, seleccionados en función del valor máximo registrado dentro del área cordillerana. 35
15. Instantes de máxima concentración superficial de carbono negro en la zona cordillerana definida para julio de 2019. Se presentan nueve eventos representativos distribuidos a lo largo del mes, permitiendo evaluar la intensidad extrema del transporte hacia sectores de altura. 36

16. Instantes de máxima concentración superficial de carbono negro en la zona cordillerana definida para septiembre de 2019. Se incluyen nueve eventos seleccionados a partir del valor máximo horario dentro del área cordillerana, facilitando la comparación estacional. 37
17. Instantes de mayor dispersión espacial de carbono negro en la zona cordillerana definida para enero de 2019. Se presentan nueve eventos seleccionados en función de la fracción del área que supera el umbral de $0.01\,\mu$g m^{-3}, permitiendo evaluar la extensión territorial del transporte. 39
18. Instantes de mayor dispersión espacial de carbono negro en la zona cordillerana definida para julio de 2019. Se muestran nueve eventos representativos distribuidos a lo largo del mes, bajo el mismo umbral de concentración, facilitando la comparación estacional. 40
19. Instantes de mayor dispersión espacial de carbono negro en la zona cordillerana definida para septiembre de 2019. Las figuras muestran los eventos con mayor cobertura espacial por sobre el umbral establecido, permitiendo comparar la extensión del transporte entre meses. 41
20. Ciclos diurnos de concentración y depósito de carbono negro para las cuatro zonas de interés durante enero, julio y septiembre de 2019.(Elaboración propia a partir de Python, 2025.) 44
21. Inventario CAMS ANT v5.3 de emisiones locales de $PM_{2.5}$ (ton/mes) para enero 2019 en las zonas de estudio. Se muestran los totales mensuales y los principales sectores SNAP. 46
22. Inventario CAMS ANT v5.3 de emisiones locales de $PM_{2.5}$ (ton/mes) para julio 2019 en las zonas de estudio. Se muestran los totales mensuales y los principales sectores SNAP. 47
23. Inventario CAMS ANT v5.3 de emisiones locales de $PM_{2.5}$ (ton/mes) para septiembre 2019 en las zonas de estudio. Se muestran los totales mensuales y los principales sectores SNAP. 47
24. Campo de viento a 10 m proveniente del modelo WRF para el período vespertino de enero de 2019 (14:00–18:00 h).El patrón observado es consistente con una advección predominante de poniente a oriente, característica de la circulación valle-montaña descrita durante el estudio.(Elaboración propia a partir de Python, 2025.) 50
25. Resumen de la validación del modelo EMEP mediante la comparación entre concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ simuladas y observadas en estaciones de la red SINCA para enero, julio y septiembre de 2019. Se presentan la correlación de Pearson (r), el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo normalizado (NMB) para cada estación analizada. 52
26. Comparación entre las emisiones locales totales de $PM_{2.5}$ (ton/mes) y las concentraciones representativas promedio de carbono negro (BC) en las zonas de interés para enero, julio y septiembre de 2019. 55
27. Código QR para acceder a las animaciones de concentración y deposición de carbono negro. 59
28. Criterios recomendados para la evaluación del desempeño de modelos mediante métricas estadísticas como el sesgo normalizado (NMB), el error medio normalizado (NME) y el coeficiente de correlación (r) para distintas especies atmosféricas. *Fuente:* Adaptado de Emery et al., 2017. 60

Índice de tablas

1. Contaminantes disponibles en el inventario de emisiones CAMS-ANT 5.3 utilizado en este estudio.(Elaboración propia a partir de Python, 2025.) 59
2. Variables meteorológicas utilizadas por el modelo EMEP MSC-W como campos meteorologicos. 59
3. Categorías SNAP y sus actividades correspondientes. 60

1. Introducción

El carbono negro o BC es un contaminante atmosférico que se produce por la combustión incompleta de biomasa y combustibles fósiles. Su estudio es de alta relevancia, ya que su impacto en la salud humana y en el clima es considerable. En particular, desde el punto de vista climático, el carbono negro acelera el derretimiento de la nieve y el hielo al disminuir el albedo Lapere et al. (2023). Este efecto se denomina Snow Darkening Effect, el cual ha sido documentado en regiones como los Alpes y el Himalaya, donde las zonas urbanas constituyen una de las principales fuentes de emisiones que finalmente llegan a los glaciares Li et al. (2016)Kang (2020). En Santiago, se combina una alta producción de emisiones urbanas y viales con su proximidad a la cordillera Lapere et al. (2021).

En Chile, a pesar de la existencia de estudios que avalan el transporte de carbono negro hacia las zonas cordilleranas Huneeus et al. (2021), siguen existiendo limitaciones como la baja resolución temporal de los inventarios de emisiones, la cobertura espacial limitada y la falta de emisiones acumulativas anuales Lapere et al. (2021). El problema central se encuentra en la ausencia de metodologías y modelos aplicados en el país que permitan estimar el transporte de carbono negro emitido por las fuentes urbanas y viales hacia la cordillera. Por esto, no es posible determinar la magnitud ni la frecuencia con que son afectadas las zonas de altura, lo que dificulta anticipar los efectos sobre la nieve Huneeus et al. (2021).

Existen antecedentes que indican que, en verano, las emisiones de Santiago son más del 50 % de las que llegan a zonas de altura, particularmente en La Parva, mientras que en invierno se reducen al 20 % Lapere et al. (2023). Además, se ha evidenciado que la circulación valle-montaña desempeña un papel importante en el transporte de contaminantes hacia la cordillera Lapere et al. (2021). Gracias a estos estudios, se entiende por qué es tan marcada la estacionalidad en el transporte de carbono negro.

La presente investigación aborda la implementación de un modelo para analizar el transporte atmosférico de carbono negro. El estudio se enfoca en dos fuentes principales de emisión: Santiago (cuenca del Maipo) y la carretera Los Libertadores. El análisis se centra en las emisiones vinculadas al transporte urbano y vial, de acuerdo con el alcance y las características del inventario de emisiones utilizado. Si bien en los sectores cordilleranos existe actividad minera que podría contribuir a la producción de contaminantes, dichas emisiones no se abordan explícitamente en este estudio y, por lo tanto, quedan fuera de su alcance. El uso del modelo EMEP permite simular el transporte atmosférico del carbono negro Denby et al. (2024)Denby et al. (2020)Wind et al. (2020). Esto permite identificar las zonas cordilleranas que reciben mayores cantidades de carbono negro y, con ello, aportar información relevante para el estudio del transporte.

1.1. Motivación

El carbono negro es uno de los componentes más relevantes del material particulado fino debido a su doble impacto sobre la salud humana y el sistema climático. Desde el punto de vista sanitario, su presencia en el aire se asocia a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, dado que forma parte del $PM_{2.5}$ inhalable que penetra profundamente en el sistema respiratorio. Sin embargo, su importancia trasciende el ámbito urbano y sanitario, ya que el carbono negro es también un potente absorbente de radiación solar, lo que le confiere un rol significativo en el balance energético atmosférico.

En regiones donde existen superficies cubiertas de nieve , la presencia de carbono negro adquiere una relevancia aún mayor. Al depositarse sobre la nieve, reduce su albedo y aumenta la absorción de radiación, acelerando los procesos de derretimiento. En zonas cordilleranas este fenómeno contribuye a la disminución de la cobertura nival, afectando la disponibilidad hídrica, los ecosistemas de montaña y la estabilidad de los sistemas glaciales.

La zona central de Chile presenta una configuración particularmente sensible a este problema, ya que combina una cuenca urbana con fuertes emisiones, como Santiago, con una cordillera cercana que concentra importantes reservas de nieve y hielo. Esta proximidad geográfica genera una condición ideal para el transporte de contaminantes desde el valle hacia zonas de altura, lo que plantea interrogantes sobre la magnitud y frecuencia con que el carbono negro urbano alcanza la criósfera andina.

Debido a esto, surge la necesidad de analizar y caracterizar el transporte atmosférico del carbono negro desde la cuenca de Santiago hacia la cordillera, con el fin de comprender su distribución espacial y temporal, Además de aportar evidencia sobre su potencial impacto en zonas de montaña. Esta motivación justifica el desarrollo de la presente memoria y orienta el enfoque metodológico adoptado.

1.2. Objetivos

Objetivo General

Estimar la propagación del carbono negro desde Santiago (Maipo) y desde la carretera Los Libertadores (Aconcagua) hacia la cordillera, mediante la implementación de un modelo de simulación atmosférica que permita caracterizar su transporte y evaluar su impacto potencial en zonas de altura.

Objetivos Específicos

1. Implementar un modelo que permita estimar el transporte del carbono negro desde Santiago y la carretera Los Libertadores hacia zonas cordilleranas.

2. Analizar los resultados, identificando las zonas donde hay una gran concentración de emisiones transportadas a las zonas cordilleranas y responder por qué ocurre esto.

2. Marco Teórico

2.1. Carbono negro y su relevancia en regiones cordilleranas

En regiones cordilleranas como la zona de enfoque de este estudio, la concentración y deposición de aerosoles absorbentes de radiación, como el carbono negro (BC), pueden modificar de manera significativa el balance energético superficial de la nieve, influyendo en los procesos de derretimiento. Este efecto ha sido analizado en distintos sistemas de montaña, donde se ha demostrado que la presencia de carbono negro en la nieve constituye un factor relevante en el balance energético superficial a escala regional (Lapere et al., 2023).

Lapere et al. (2023) estudiaron los flujos de exportación y deposición de carbono negro sobre glaciares de los Andes centrales de Chile mediante simulaciones atmosféricas y análisis meteorológico, mostrando que la deposición de partículas absorbentes de radiación sobre la nieve reduce el albedo superficial y favorece el derretimiento. Sus resultados muestran que la interacción entre el carbono negro y la nieve constituye un mecanismo clave para entender el impacto climático de este contaminante en regiones de montaña.

La reducción del albedo asociada a la deposición de carbono negro sobre la nieve ha sido documentada también en otras regiones de alta montaña. En Li et al. (2016) analizaron fuentes de carbono negro depositado en glaciares del Himalaya mediante el estudio isotópico de partículas recolectadas en aerosoles y muestras de nieve. Sus resultados muestran que una fracción sustancial del BC presente en la nieve es de origen antropogénico, transportado desde regiones pobladas del sur y este de Asia. Se destaca que la deposición de este contaminante constituye un forzante climático relevante, ya que puede contribuir al derretimiento glaciar a través de su efecto sobre el albedo.

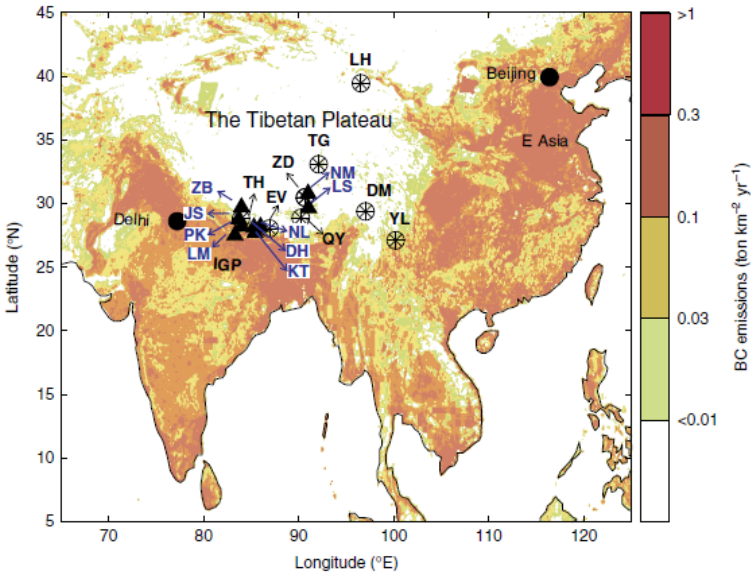


Figura 1: Distribución espacial de emisiones de carbono negro en Asia utilizada por Li et al. (2016) para el análisis del transporte hacia glaciares del Himalaya–Tíbet.
Fuente: adaptado de Li et al. (2016).

La Figura 1 muestra la distribución espacial de las emisiones de carbono negro en Asia, destacando la proximidad entre regiones con altas emisiones y sistemas glaciares de alta montaña. Esta representación fue utilizada por Li et al. (2016) para evaluar la influencia de fuentes antropogénicas distantes sobre la deposición de partículas absorbentes de radiación en nieve, reforzando la idea de que la presencia de carbono negro en glaciares puede estar condicionada no solo por emisiones locales, sino también por el transporte atmosférico regional.

Por lo tanto, la evidencia presentada en la literatura muestra que el carbono negro es un agente relevante en la interacción entre la atmósfera y las zonas de montaña. A través de su deposición sobre la nieve, este contaminante puede modificar el albedo superficial, alterando el balance energético y favoreciendo el derretimiento. Estos efectos son de alta importancia en zonas sensibles como la cordillera, ya que los cambios en el balance energético pueden tener impactos significativos sobre la cobertura nival.

2.2. Mecanismos de transporte atmosférico de carbono negro hacia la cordillera.

El transporte atmosférico de carbono negro desde zonas urbanas hacia regiones cordilleranas es un proceso clave para comprender su presencia en la criósfera, especialmente en sistemas de montaña cercanos a grandes centros emisores. En la zona central de Chile, este transporte está fuertemente condicionado por la interacción entre la circulación atmosférica, la topografía compleja de la zona (valle-cordillera) y la estacionalidad de las condiciones meteorológicas (Huneeus et al., 2021; Lapere et al., 2021).

En este contexto, Lapere et al. (2021) analizaron los mecanismos que controlan la deposición invernal de partículas absorbentes de radiación, como el carbono negro, sobre la criósfera de los Andes centrales. El estudio enfatiza principalmente los procesos de transporte atmosférico desde la

cuenca de Santiago hacia la cordillera. Mediante simulaciones de transporte atmosférico y el análisis de eventos meteorológicos específicos, los autores identificaron rutas de transporte (pathways) asociadas a la circulación valle–cordillera, en la cual los flujos ascendentes que se desarrollan durante el período diurno permiten el desplazamiento de masas de aire contaminado desde el valle urbano hacia sectores de mayor altitud. Además, el estudio muestra que, bajo determinadas configuraciones de la circulación atmosférica, estas corrientes pueden dar lugar a intrusiones profundas de aire urbano en los valles andinos, alcanzando niveles elevados incluso durante el invierno, cuando predominan condiciones de estabilidad en la cuenca de Santiago. Estos episodios pueden facilitar el transporte de carbono negro hacia zonas cubiertas por nieve, estableciendo un vínculo dinámico entre las emisiones urbanas y la criósfera andina.

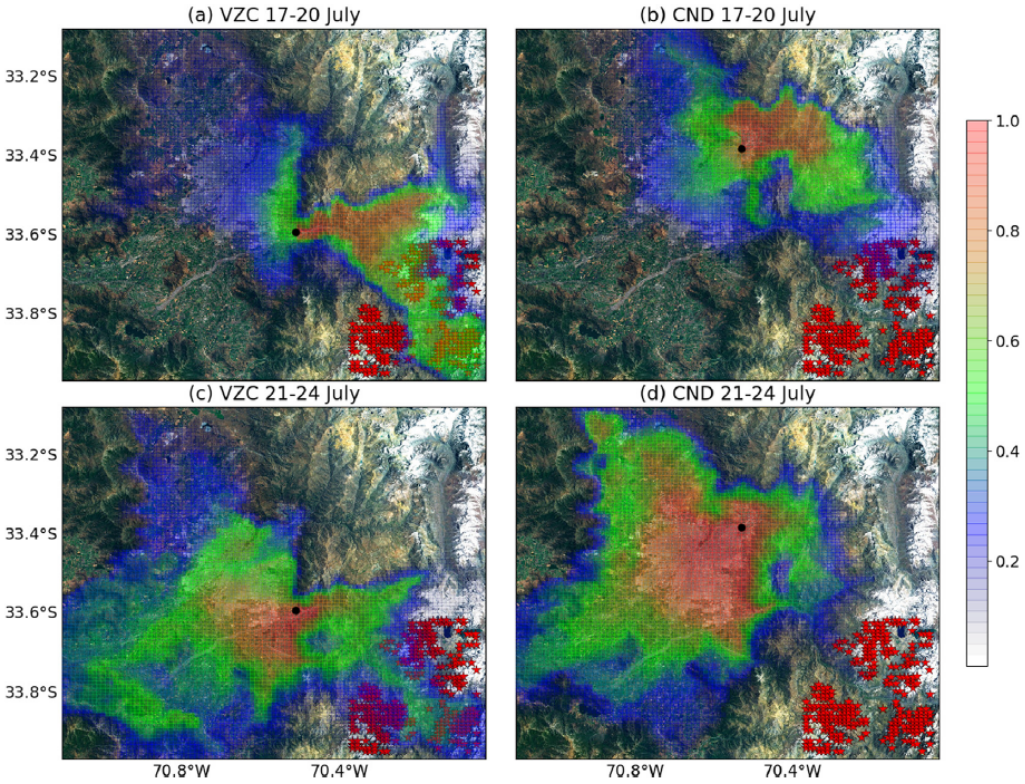


Figura 2: Rutas de transporte atmosférico (*pathways*) de trazadores emitidos desde la cuenca de Santiago hacia la cordillera durante episodios invernales.
Fuente: Adaptado de Lapere et al. (2021).

La Fig. 2 muestra la variabilidad espacial del transporte atmosférico de aerosoles desde la cuenca de Santiago durante distintos episodios invernales. Los resultados evidencian que, bajo determinadas configuraciones atmosféricas, los valles andinos actúan como corredores preferenciales que permiten el transporte de masas de aire contaminado hacia sectores cordilleranos de mayor altitud, incluso en condiciones invernales generalmente estables.



Figura 3: Esquema conceptual de la circulación valle–cordillera y del ciclo diurno de la capa límite atmosférica en el cañón del Maipo, mostrando las diferencias entre condiciones diurnas y nocturnas. Fuente: Adaptado de Lapere et al. (2021).

La Fig. 3 esquematiza el ciclo diurno de la circulación valle–cordillera en el cañón del Maipo y su relación con la estructura de la capa límite atmosférica. Durante la tarde, el calentamiento de las laderas favorece el desarrollo de una capa límite profunda y la generación de flujos ascendentes que permiten el transporte de masas de aire contaminado desde la cuenca de Santiago hacia sectores de mayor altitud. En contraste, durante la noche, el enfriamiento radiativo del suelo conduce a la formación de una capa límite somera y a condiciones de inversión térmica, limitando la mezcla vertical y favoreciendo flujos descendentes hacia el valle. Este comportamiento explica la ocurrencia de intrusiones profundas de aire urbano, principalmente durante el período diurno, incluso en condiciones invernales caracterizadas por estabilidad atmosférica persistente.

Complementando esto, Huneeus et al. (2021) estudiaron episodios de intrusión profunda de BC en el cajón del Maipo, combinando mediciones in situ con análisis meteorológicos. Los resultados evidencian que, bajo determinadas configuraciones atmosféricas, las emisiones urbanas pueden ser transportadas eficientemente hacia la cordillera, alcanzando así sectores de alta montaña. El estudio destaca el rol de la circulación atmosférica y de la geometría del valle en la canalización de contaminantes, mostrando nuevamente que estos eventos pueden ocurrir incluso durante el invierno.

2.3. Modelación Atmosférica de Contaminantes

El análisis de transporte atmosférico de contaminantes requiere herramientas capaces de representar de manera fiel los procesos físicos y químicos que determinan la evolución de las especies en la atmósfera. En este contexto, los modelos de transporte químico (Chemical Transport Models, CTM) son unas de las mejores herramientas para estudiar la distribución de los contaminantes a nivel regional. Estos modelos son en su mayoría formulados en un marco euleriano tridimensional, resuelven la ecuación de continuidad para distintas especies e incorporan procesos como la advección por el viento, la mezcla turbulenta, la deposición seca y húmeda, cuando corresponde, también las transformaciones químicas.

Simpson et al. (2012) presenta una descripción detallada del modelo regional EMEP MSC-W, desarrollado originalmente para el estudio de la contaminación atmosférica transfronteriza en Europa. El trabajo documenta la formulación física y numérica del modelo, así como los principales procesos representados, incluyendo el transporte horizontal y vertical de contaminantes, la mezcla en la capa límite atmosférica, los mecanismos de deposición y la química atmosférica de múltiples especies gaseosas y particuladas. El carbono negro se trata específicamente como un aerosol primario, por lo que su evolución depende principalmente de las emisiones, el transporte atmosférico y los procesos de deposición.

Al integrar inventarios de emisiones con campos meteorológicos, estos modelos permiten simular la variabilidad espacial y temporal de las concentraciones y estimar también la deposición sobre la superficie, incluyendo nieve y hielo. En regiones con topografía compleja, como las zonas cordilleranas, estas aproximaciones resultan relevantes, ya que permiten analizar de manera conjunta la circulación atmosférica regional, la localización de las fuentes emisoras y los procesos de deposición superficial.

De esta forma, los modelos de transporte químico constituyen una base conceptual para el estudio del transporte de carbono negro hacia zonas de montaña, permitiendo evaluar cómo las emisiones generadas en áreas urbanas pueden ser desplazadas por la circulación atmosférica hacia sectores cordilleranos alejados de las principales fuentes.

3. Metodología

3.1. Zona de estudio

El dominio definido abarca el gradiente valle-cordillera de la zona central de Chile. Hacia el oeste, el límite está en $-71.10°$ de longitud, ubicado en el sector de la depresión intermedia al poniente de Santiago. En el extremo oriente, el dominio se extiende hasta $-69.32°$, abarcando el cordón montañoso de los Andes hasta el Paso Los Libertadores.

Latitudinalmente, el límite al norte está en $-32.77°$, a la altura de la zona de Portillo y el valle superior del Aconcagua, mientras que al sur el límite está en $-32.14°$, incluyendo así la cuenca del río Maipo. El dominio cubre un rango altitudinal que va desde los 500 m.s.n.m. en la depresión intermedia hasta más de 5000 m.s.n.m. en las zonas cordilleranas.

Climáticamente, el dominio de estudio, al estar en la zona central de Chile, presenta un régimen mediterráneo semiárido, con precipitaciones concentradas durante el invierno y veranos marcadamente secos Garreaud et al. (2017). Esta distribución de precipitaciones es provocada por el paso de sistemás frontales y por la presencia de la cordillera de los Andes, la cual genera gradientes térmicos y de humedad dentro del dominio analizado. Falvey y Garreaud (2009). En los sectores de cordillera, gran parte de las precipitaciones invernales ocurren en forma de nieve, con acumulaciones entre 2500 y 4000 m.s.n.m. Estas condiciones climáticas contribuyen al transporte de carbono negro hacia zonas de altura, ya que favorecen el desarrollo de patrones de circulación valle-montaña, los cuales controlan el transporte de contaminantes.

El dominio cuenta con estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), las cuales son útiles para obtener información sobre las condiciones de temperatura, precipitación y viento. Además, en el área metropolitana se dispone de información sobre la calidad del aire a través del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), que proporciona datos de contaminantes relevantes.

Dentro del dominio general, se seleccionaron cuatro zonas específicas para el análisis del transporte de carbono negro: El Paso Los Libertadores, el Embalse El Yeso, el Glaciar Olivares y la Paloma. Estas zonas presentan diferentes condiciones topográficas y altitudinales dentro del gradiente valle-cordillera, además de distintos niveles de influencia antrópica y potencial exposición al transporte atmosférico regional.

El Paso Los Libertadores corresponde a un sector cordillerano altamente influenciado por emisiones vehiculares asociadas al tránsito internacional. El Embalse El Yeso representa una cuenca de altura con baja emisión local, pero que es potencialmente afectada por el transporte de contaminantes desde la cuenca de Santiago. El Glaciar Olivares corresponde a un receptor nival dentro de la cordillera, siendo una zona expuesta a la deposición de contaminantes transportados atmosféricamente. Por su parte, el sector de La Paloma se incluye como un punto de referencia adicional dentro del dominio cordillerano.

El análisis comparativo de estas zonas estratégicas proporciona información sobre el comportamiento del transporte de carbono negro desde Santiago hacia zonas cordilleranas en distintos escenarios y condiciones, permitiendo evaluar los factores que influyen en el transporte del contaminante estudiado.

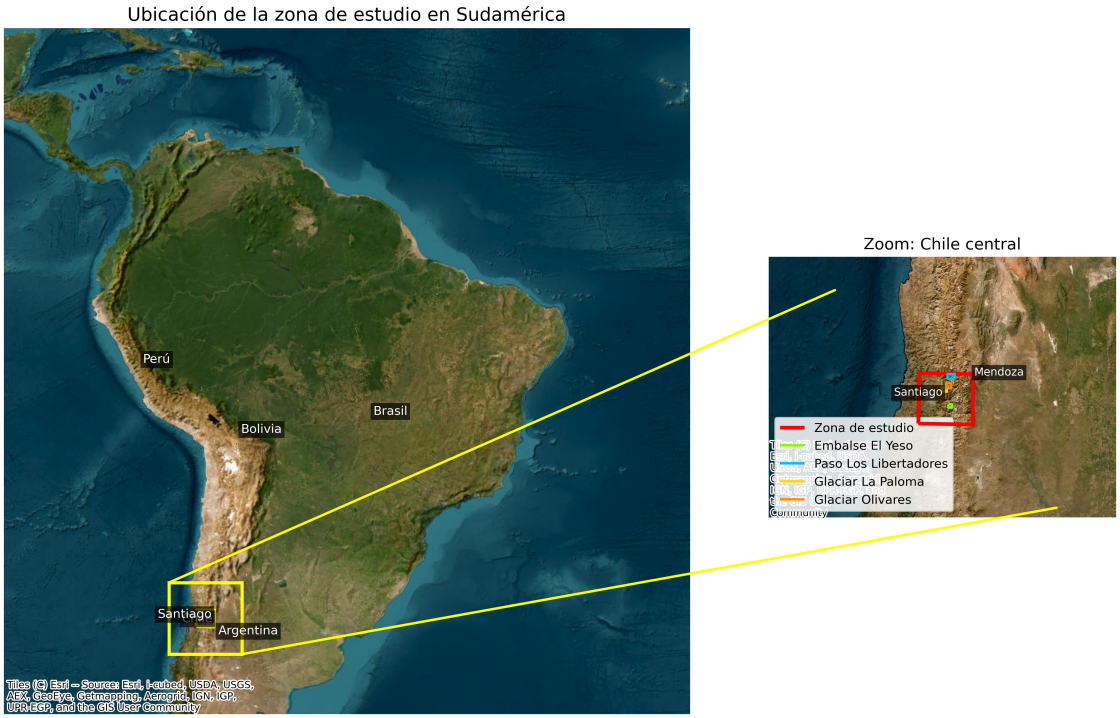


Figura 4: Ubicación general de la zona de estudio en el contexto de Sudamérica. Se destaca la localización del área analizada en la zona central de Chile, dentro del margen occidental del continente. Elaboración propia.

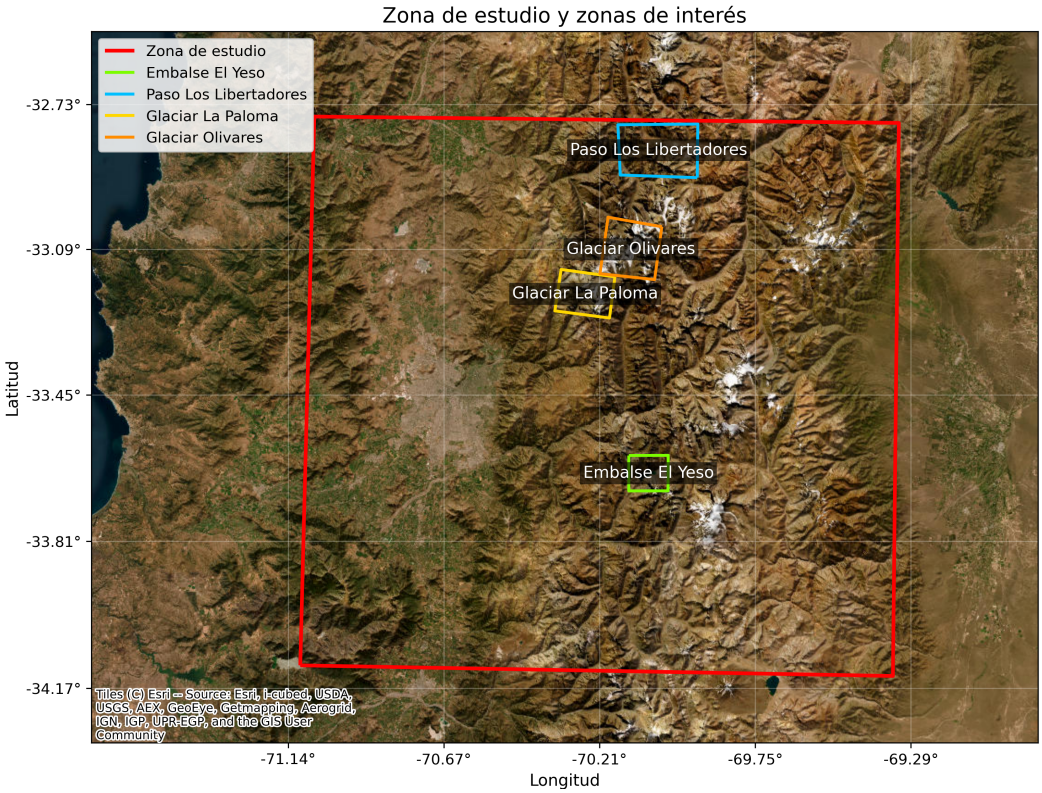
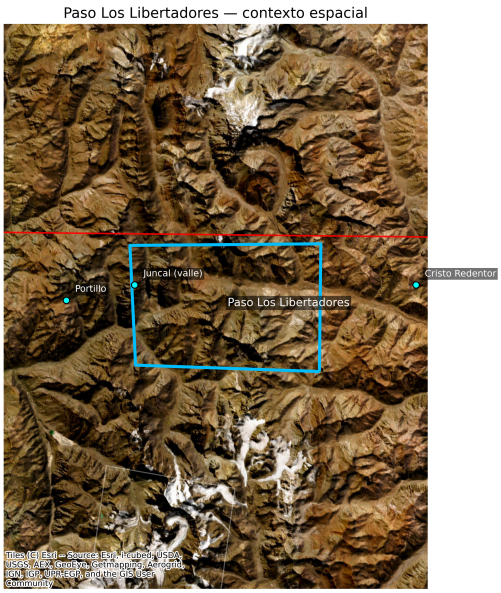


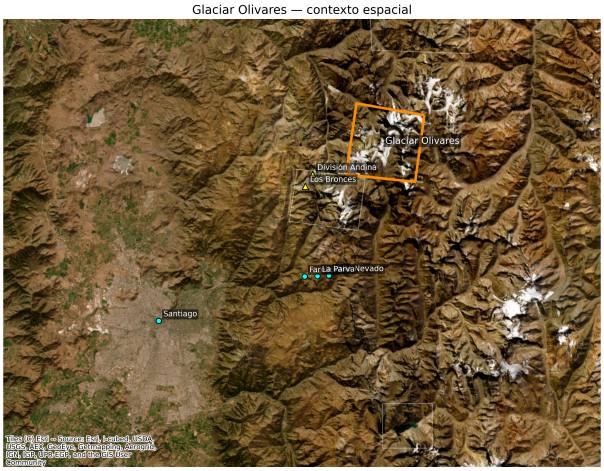
Figura 5: Detalle ampliado de la zona de estudio en Chile central, indicando el dominio definido y las cuatro zonas específicas de análisis: Embalse El Yeso, Paso Los Libertadores, Glaciar La Paloma y Glaciar Olivares. Elaboración propia.



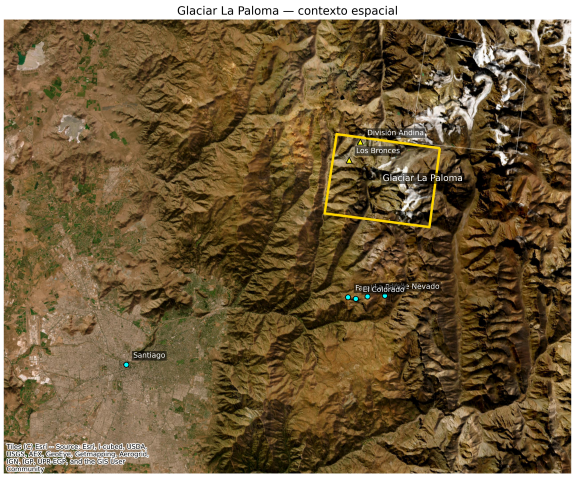
(a) Paso Los Libertadores



(b) Embalse El Yeso



(c) Glaciar Olivares



(d) Glaciar La Paloma

Figura 6: Zonas de interés del estudio. Elaboración propia.

3.2. Bases de datos

Las simulaciones *EMEP* utilizadas en este estudio no fueron generadas en el marco de esta memoria, sino que corresponden a simulaciones previamente procesadas y proporcionadas para su análisis. El modelo *EMEP* requiere dos componentes principales: un inventario de emisiones y los campos meteorológicos. Las simulaciones utilizadas abarcan los meses de enero, julio y septiembre del año 2019.

La elección de estos períodos se fundamenta en dos razones. En primer lugar, dichos meses representan condiciones atmosféricas características de distintas estaciones del año (verano, invierno y un período de transición) en la zona central de Chile, lo que permite evaluar si el transporte de carbono negro presenta una estacionalidad asociada a los patrones de circulación valle-montaña. En segundo lugar, los campos meteorológicos WRF disponibles habían sido procesados previamente como entrada para *EMEP*, precisamente para esos meses, siendo estos los que finalmente definen el período simulado por el modelo.

Con respecto al inventario de emisiones, este corresponde a valores mensuales del año 2019, por lo que se utilizan los meses de enero, julio y septiembre para complementar los campos meteorológicos.

Inventarios de emisiones del modelo EMEP

Los inventarios de emisiones utilizados corresponden al conjunto **CAMS Global Anthropogenic Emissions** (*CAMS-ANT 5.3*), obtenido de **ECCAD** (https://eccad.sedoo.fr/#/metadata/479). Este inventario contiene emisiones sectorizadas para distintos contaminantes, entre ellos CO, NO_x, SO_x, NH_3, compuestos orgánicos volátiles y $PM_{2.5}$ CAMS Atmospheric Service (2023).

Las emisiones se encuentran organizadas en sectores, donde cada uno representa una actividad específica (ver Tabla 3 en Anexos). En el caso del inventario utilizado, el sector 07 corresponde a las emisiones de transporte por carretera, que representan una de las principales fuentes de carbono negro y, por ello, es el sector de mayor interés en este estudio.

CAMS-ANT 5.3 no entrega explícitamente las emisiones de carbono negro; por lo tanto, el modelo reconstruye estas emisiones aplicando fracciones sectoriales al $PM_{2.5}$. Estas fracciones son proporciones fijas de carbono negro y carbono orgánico definidas según el sector (categoría SNAP), de acuerdo con el mecanismo de aerosoles del modelo Simpson et al. (2012). De esta forma, EMEP separa el $PM_{2.5}$ primario en carbono negro y carbono orgánico, y posteriormente incorporarlos como especies de aerosol en la simulación.

Campos meteorológicos

El modelo EMEP requiere un conjunto completo de campos atmosféricos para poder simular los procesos de transporte, mezcla y deposición de contaminantes en la atmósfera. En este estudio se utilizan campos que provienen de simulaciones realizadas con el modelo *Weather Research and Forecasting* (*WRF*). Las simulaciones utilizadas fueron generadas previamente para su uso como forzamiento meteorológico en el modelo EMEP, presentando una resolución temporal horaria y una grilla espacial de 9×9 km.

El dominio meteorológico comprende aproximadamente desde $-74.87°$ a $-67.82°$ de longitud, y $-36.28°$ a $-30.40°$ de latitud. Con esto se cubre un área regional que incluye zonas costeras, la depresión intermedia y la cordillera de los Andes. Contar con un dominio amplio permite representar adecuadamente tanto la circulación regional a gran escala como los procesos locales que influyen en el transporte de carbono negro en la zona definida para este estudio.

Los datos meteorológicos incluyen las variables requeridas por EMEP, como el viento (componentes u y v), la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión atmosférica, la precipitación y la radiación. Estas variables conforman la estructura dinámica y termodinámica de la atmósfera y constituyen la base sobre la cual EMEP resuelve los procesos de advección, difusión, deposición y transformación química del carbono negro dentro del dominio simulado Simpson et al. (2012).

Condiciones iniciales y de borde

Para realizar las simulaciones con EMEP, se utilizan condiciones de borde que corresponden a las concentraciones de contaminantes que ingresan al dominio modelado desde el exterior. Estos datos provienen del sistema global del Servicio de Monitoreo Atmosférico de Copernicus (*CAMS*), el cual proporciona campos globales de gases y aerosoles que permiten mantener coherencia entre la composición atmosférica a gran escala y la simulación regional.

Las condiciones iniciales, por su parte, corresponden al estado químico del dominio al inicio de la simulación. Este estado se estabiliza mediante un spin-up previo, de modo que el modelo alcance un equilibrio dinámico gobernado por las emisiones locales, los campos meteorológicos y las condiciones de borde. En este estudio, el spin-up aplicado fue de dos semanas.

Configuración del modelo EMEP

El modelo utiliza una estructura vertical fija compuesta por 20 niveles atmosféricos, extendiéndose desde la superficie hasta los 100 hPa (16 km aproximadamente). Esta estructura determina cómo serán resueltos los procesos de transporte, mezcla y deposición dentro de la columna atmosférica. Para alimentar esta configuración, EMEP utiliza los campos meteorológicos provenientes de WRF, generados mediante un sistema de dominios anidados donde el dominio más grande o externo es de 27×27 km y el dominio interno es de 9×9 km. El dominio más grande captura la circulación a gran escala y le entrega las condiciones de borde al dominio interno, el cual tendrá los campos atmosféricos definitivos utilizados por EMEP. Estos campos contienen 45 niveles verticales, los cuales son interpolados por EMEP para ajustarse a los 20 niveles que utiliza por defecto, asegurando así la compatibilidad con los datos entregados por WRF. Simpson et al. (2012).

Además de la meteorología, el modelo necesita un inventario de emisiones para cada contaminante considerado. En este trabajo se utilizan datos de CAMS-ANT 5.3, los cuales contienen información correspondiente a valores mensuales. Estas emisiones se adaptan al formato del modelo y se distribuyen espacial y temporalmente en la grilla del dominio de EMEP. A estos datos se les suman las condiciones de borde, obtenidas de CAMS, las cuales representan concentraciones de gases y aerosoles que ingresan desde fuera del dominio. De esta forma, EMEP integra simultáneamente las emisiones locales, la meteorología de alta resolución y la composición atmosférica externa.

Con toda esta información, el modelo resuelve la ecuación de continuidad tridimensional para simular los procesos de advección, difusión turbulenta, deposición seca y húmeda, y la evolución química de aerosoles, como el carbono negro. Antes del inicio del período analizado, se aplica un spin-up de dos semanas para que el modelo alcance un estado químico estable y los resultados no se vean influenciados por condiciones iniciales artificiales.

3.3. Esquema metodológico

La metodología aplicada en esta memoria se resume en la Figura 7, donde se presentan las principales etapas y actividades que estructuran el trabajo. El esquema muestra el flujo metodológico desde la selección del modelo hasta el uso de las simulaciones *EMEP* previamente generadas y puestas a disposición para este estudio, así como el procesamiento de los archivos NetCDF generados por el modelo y la posterior interpretación de los resultados. Cada etapa se aborda de forma secuencial, de modo que la finalización de una fase da inicio a la siguiente.

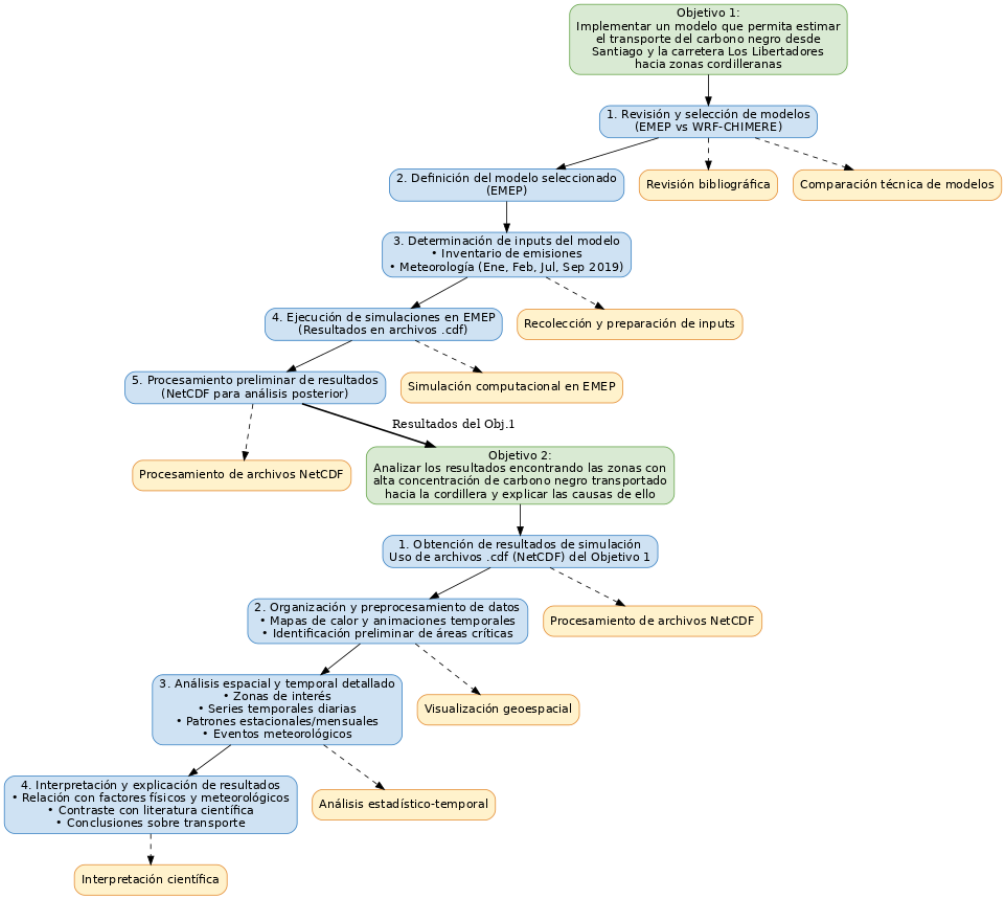


Figura 7: Esquema general de la metodología aplicada en este estudio. (Elaboración Propia, 2025,)

Selección del modelo

En una etapa inicial se consideró la implementación del modelo *WRF-CHIMERE*, el cual presenta un uso extendido en estudios de calidad del aire y transporte de contaminantes. Sin embargo, al analizar sus requerimientos, se determinó que la elevada capacidad computacional y la complejidad de los datos de entrada Mazzeo et al. (2022) excedían el alcance de este estudio. Debido a estas limitaciones, se evaluó el modelo *EMEP MSC-W* como una alternativa metodológica. Este modelo, además de ser de código abierto y requerir una menor capacidad computacional, cuenta con simulaciones previamente generadas por un especialista, las cuales pueden ser utilizadas directamente en este estudio. La disponibilidad de estos insumos, junto con el apoyo técnico asociado, redujo significativamente la complejidad de operar el modelo y consolidó la selección de *EMEP MSC-W* como una herramienta óptima para el desarrollo metodológico de esta memoria.

Datos de entrada y funcionamiento del modelo

Con respecto a la configuración del modelo, se requieren dos conjuntos principales de datos de entrada: un inventario de emisiones y los campos meteorológicos que describen la evolución atmosférica sobre el dominio estudiado. El inventario de emisiones utilizado corresponde a CAMS-ANT 5.3, mientras que los campos meteorológicos provienen de simulaciones realizadas con WRF. Los campos meteorológicos deben ser procesados para ajustarse a los requerimientos de *EMEP*.

Una vez integrados en el modelo, estos datos permiten la generación de simulaciones. Para una descripción detallada del funcionamiento del modelo, se recomienda consultar el manual técnico Simpson et al. (2012). Las simulaciones se representan como archivos en formato NetCDF que contienen concentraciones y deposiciones horarias de las especies químicas modeladas, entre ellas el carbono negro. Estos archivos son la base del análisis realizado en este estudio, ya que permiten examinar de manera temporal y espacial el transporte de contaminantes dentro del dominio definido. Debido a que las simulaciones de *EMEP* utilizadas fueron previamente ejecutadas, el trabajo metodológico se centró en la revisión, organización y procesamiento de estos archivos NetCDF para extraer y representar variables de interés, estructurar períodos de estudio y preparar los datos necesarios para las siguientes etapas del análisis.

Procesamiento inicial de las simulaciones

El procesamiento se realizó a partir de los NetCDF generados por el modelo *EMEP*. Cada archivo representa un período estudiado, por lo que se dispone de tres en total (enero, julio y septiembre). En una primera instancia, se inspeccionaron los archivos mediante *Python* para identificar las variables disponibles y determinar cuál utilizar para el análisis del carbono negro. Además, se confirmó la resolución espacial y temporal de la simulación, verificándose que las simulaciones estaban registradas con una resolución horaria (60 minutos) y que la extensión del dominio de estudio definido estaba dentro del dominio simulado por *EMEP*.

Con el análisis inicial de las variables disponibles en la simulación, se identificó como relevante la variable denominada SURF_ug_ECFINE, ya que esta representa la concentración superficial de carbono negro. Con esto determinado, se generaron, mediante *Python* y a modo de exploración inicial, animaciones que permitieron examinar visualmente la evolución espacial y temporal del contaminante para cada uno de los meses simulados.

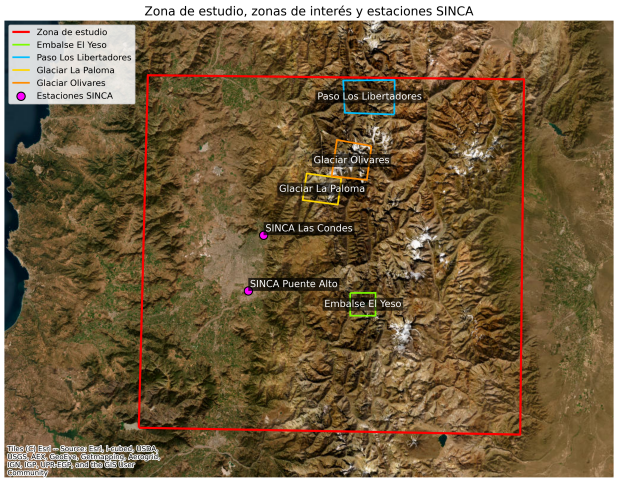


Figura 8: Ubicación de las estaciones en la zona de estudio

Procesamiento por zonas de interés

Los polígonos correspondientes a las zonas de interés fueron exportados en formato GeoJSON para ser incorporados en *Python* mediante el uso de librerías especializadas en el manejo de datos espaciales. Cada polígono fue utilizado como una máscara geográfica para identificar qué celdas de la grilla del modelo *EMEP* coincidían con la zona de interés correspondiente, comparando las coordenadas de cada celda con los límites definidos en el archivo GeoJSON.

Una vez identificadas las celdas pertenecientes a cada zona, se extrajeron las series temporales de concentración superficial para todos los días del mes. Se calculó la mediana horaria mensual, a partir de la cual se construyeron ciclos diurnos (24 horas) para cada mes y cada zona de interés. Finalmente, los datos fueron organizados de modo que las cuatro zonas pudieran ser representadas simultáneamente en gráficos comparativos.

Validación de resultados con datos SINCA

Con el objetivo de evaluar el desempeño del modelo, se realizó una validación utilizando datos observacionales de $PM_{2.5}$ provenientes del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). Se seleccionaron dos estaciones que contaran con registros completos para los meses y el año utilizados en las simulaciones (enero, julio y septiembre de 2019): Las Condes (358305 E, 6305906 N) y Puente Alto (352049 E, 6282013 N).

Para cada estación, se obtuvo la información de la concentración de $PM_{2.5}$ en la zona y se comparó con la misma información, pero simulada por el modelo en la celda donde está ubicada la estación. Posteriormente, se construyeron series temporales comparativas entre las concentraciones modeladas y las observadas, lo que permitió analizar visualmente la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad diaria.

Adicionalmente, se calcularon métricas estadísticas que permiten cuantificar el desempeño y la validez del modelo. Estas incluyeron el coeficiente de correlación de Pearson (r), el sesgo medio (BIAS), el sesgo medio normalizado (NMB) y la raíz de error medio (RMSE)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(M_i - \overline{M})(O_i - \overline{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(M_i - \overline{M})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O})^2}} \tag{1}$$

$$\text{Bias} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(M_i - O_i) \tag{2}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(M_i - O_i)^2} \tag{3}$$

$$\text{NMB}(\,\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N}(M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^{N} O_i} \times 100 \tag{4}$$

donde M_i corresponde a la concentración modelada, O_i a la concentración observada y N al número total de datos comparados.

El coeficiente de correlación permite evaluar la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal observada, mientras que el BIAS y el NMB permiten identificar si el modelo tiende a subestimar o sobrestimar las concentraciones, tanto en términos absolutos como relativos. El RMSE, por su parte, entrega una medida del error global entre las series modeladas y observadas.

Esta validación se realiza para $PM_{2.5}$ dado que corresponde a la variable disponible tanto en el inventario como en los registros del SINCA. Además, como se explicó anteriormente, el modelo ingresa $PM_{2.5}$ y luego lo transforma en carbono negro. Por esta razón, es más razonable y directo comparar el $PM_{2.5}$ simulado y el observado. En consecuencia, si el modelo reproduce de manera razonable el comportamiento del $PM_{2.5}$, se puede asumir con cautela que la representación de carbono negro estará dentro de valores razonables en comparación con lo observado en la realidad.

4. Resultados y discusión

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones del modelo *EMEP MSC-W* para los meses de enero, julio y septiembre del año 2019. Los resultados se organizan siguiendo la lógica de la metodología anteriormente descrita: primero, se examinan los patrones espaciales del transporte de carbono negro mediante la visualización de instantes dentro de las animaciones previamente explicadas; luego, se analiza la variabilidad temporal mediante los ciclos diurnos mensuales; y finalmente, se integran estos resultados con información complementaria, como el inventario de emisiones y los patrones de viento, con el fin de interpretar los procesos que explican el transporte de carbono negro hacia zonas de altitud.

Cada subsección inicia con una descripción clara de la figura o conjunto de figuras, explicando qué representan y cómo se generaron. Finalmente, se realiza un análisis de los patrones observados y se contrasta con la literatura existente.

4.1. Validez de los resultados

Se evalúa el desempeño del modelo comparando la concentración de $PM_{2.5}$ obtenida mediante la simulación EMEP y los datos registrados observados por el SINCA. Se efectúa en las estaciones ubicadas en Las condes y Puente Alto para los meses de enero, julio y septiembre de 2019. Se analizan tanto las series temporales diarias como las métricas estadísticas de desempeño (coeficiente de correlación de Pearson, BIAS, RMSE y NMB), con el objetivo de evaluar la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal observada.

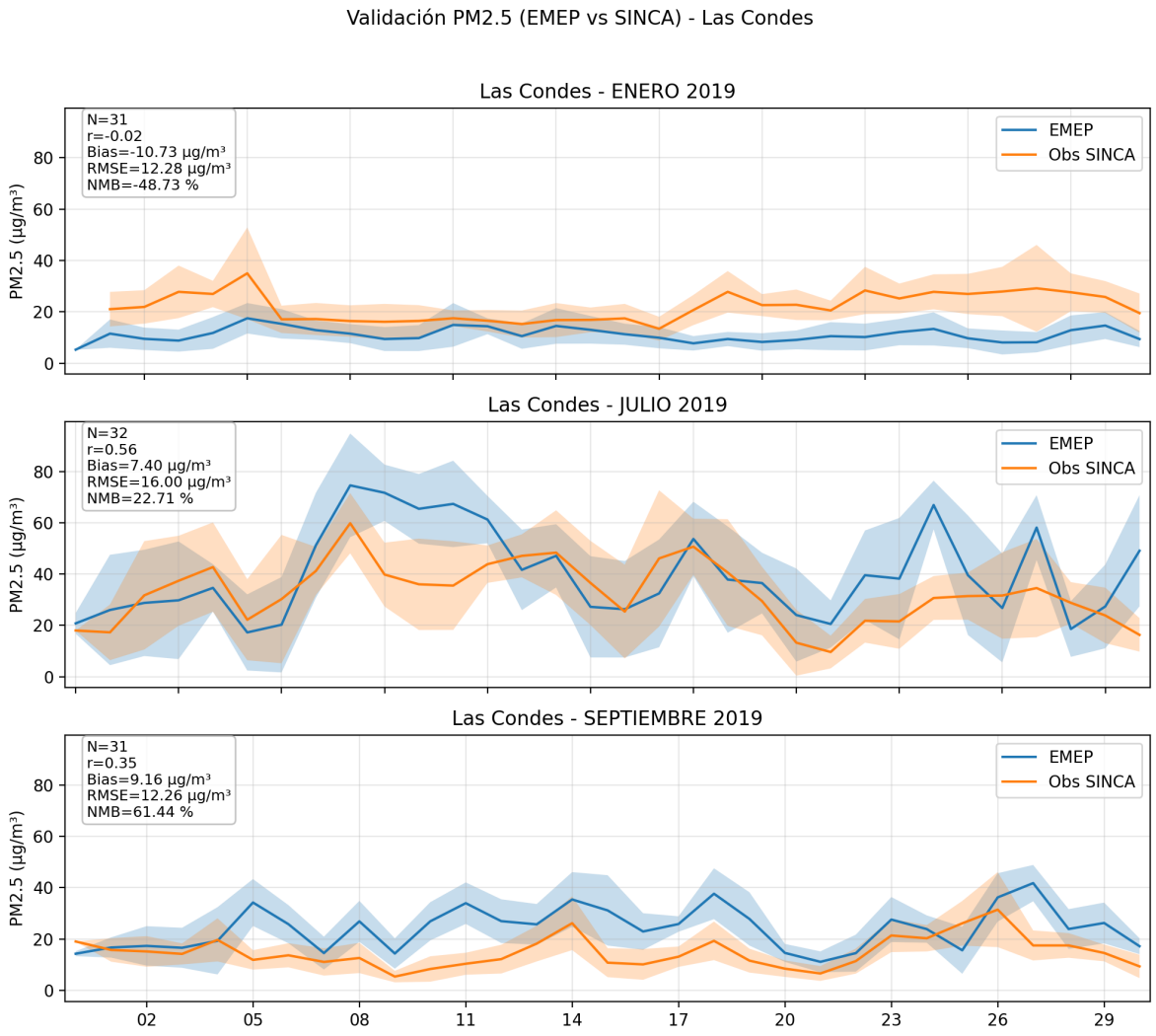


Figura 9: Comparación entre la concentración de $PM_{2.5}$ simulada por el modelo EMEP y la observada en la estación Las Condes (SINCA) para los meses de enero, julio y septiembre de 2019. Se incluyen las métricas estadísticas de desempeño (r, BIAS, RMSE y NMB) para cada período analizado.

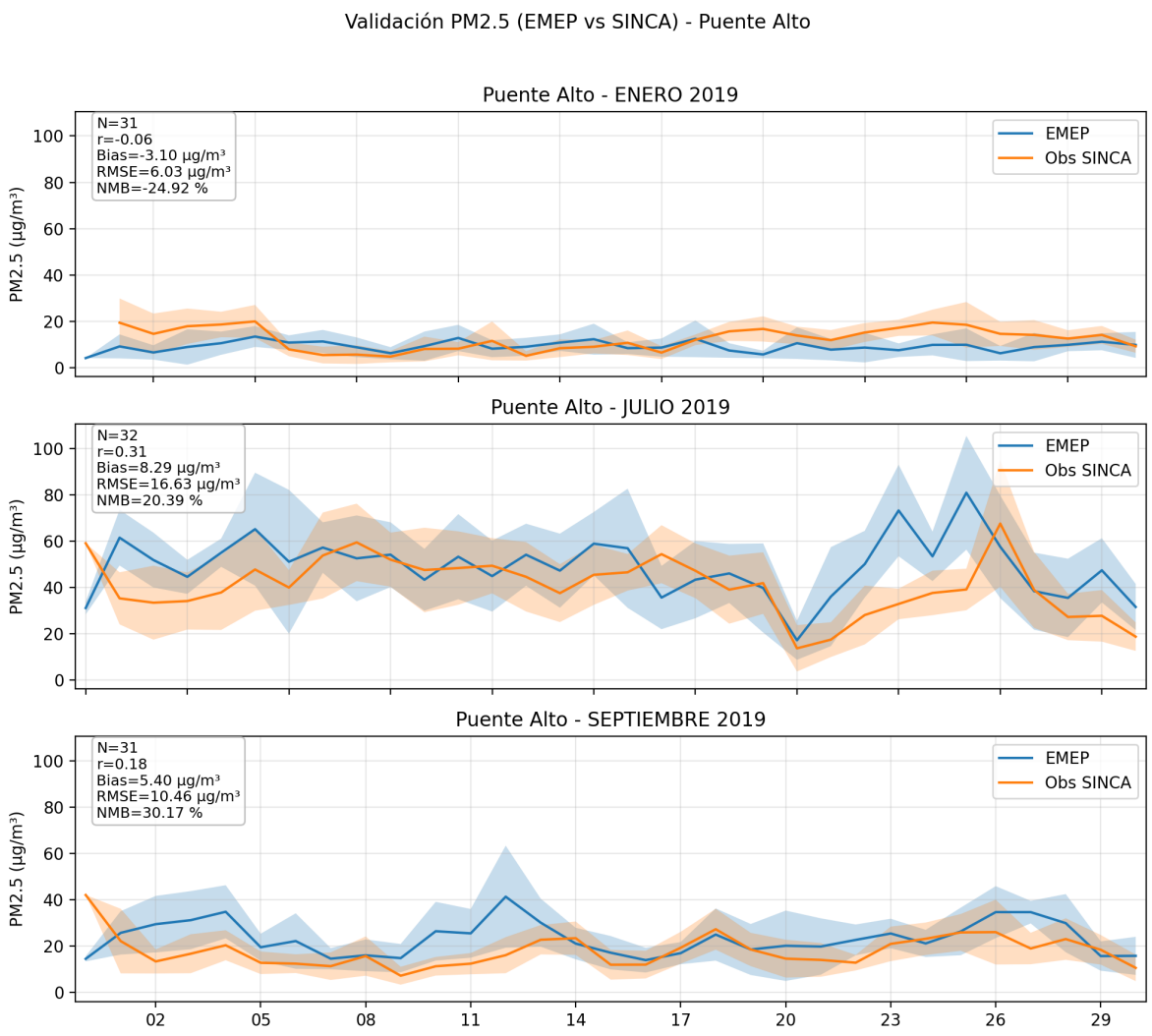


Figura 10: Comparación entre la concentración de $PM_{2.5}$ simulada por el modelo EMEP y la observada en la estación Puente Alto (SINCA) para los meses de enero, julio y septiembre de 2019. Se incluyen las métricas estadísticas de desempeño (r, BIAS, RMSE y NMB) para cada período analizado.

De manera general, los resultados muestran que el modelo reproduce razonablemente la variabilidad temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$, aunque con diferencias en el desempeño según el mes y la estación considerada. En términos de correlación, se observa una mejor representación durante el mes de julio en ambas estaciones, mientras que en enero el ajuste es más débil. Asimismo, los valores de BIAS y NMB indican la presencia de episodios tanto de subestimación como de sobrestimación, dependiendo del período analizado.

En la estación Las Condes (Figura 9), el desempeño del modelo presenta variaciones según el mes que se analice. Durante enero, el coeficiente de correlación (R) es bajo, lo que indica que el modelo no reproduce adecuadamente la variabilidad temporal observada en condiciones de verano. Asimismo, el NMB negativo muestra que se están subestimando los datos de concentración; el comportamiento

general de la serie es coherente con la evolución observacional y se encuentra dentro de los márgenes de incertidumbre comúnmente asociados a modelos.

En julio, el modelo presenta el mejor desempeño; el coeficiente de correlación tiene valores moderados, indicando una representación más consistente de los aumentos y disminuciones en las concentraciones observadas. Aunque se observa una ligera sobrestimación según el NMB, el comportamiento general de la serie es coherente con la evolución observacional y también se encuentra dentro de los márgenes de incertidumbre.

Para septiembre, la correlación disminuye respecto a julio y el sesgo positivo se vuelve más evidente, lo que indica una tendencia a sobrestimar las concentraciones. Sin embargo, la variabilidad general continua siendo representada, manteniéndose las diferencias dentro de los niveles aceptables.

Los resultados para Las Condes indican que, si bien el modelo no reproduce con exactitud todos los eventos observados, si logra representar la escala y la tendencia general de las concentraciones de $PM_{2.5}$, lo que permite considerar su desempeño adecuado para el análisis de este estudio.

En la estación Puente Alto (Figura 10), el desempeño del modelo presenta un comportamiento similar en cuanto a la variabilidad mensual, aunque con correlaciones generalmente más bajas que en Las Condes. Durante enero, el coeficiente de correlación es cercano a cero, lo que indica que el modelo no logra reproducir adecuadamente la variabilidad temporal observada bajo condiciones atmosféricas de verano. Asimismo, el NMB negativo evidencia una tendencia a subestimar las concentraciones registradas en este período. A pesar de esto, el orden de magnitud de las concentraciones simuladas se mantiene comparable al observado, lo que indica que el modelo captura la escala general del material particulado, aun cuando no reproduce con precisión los eventos diarios.

En julio, se observa una mejora en el desempeño del modelo, con una correlación positiva que indica una representación parcial de la variabilidad temporal. Si bien el ajuste no es tan marcado como en Las Condes, el comportamiento general de la serie simulada sigue la tendencia observada y se mantiene dentro de los márgenes. El NMB positivo indica una ligera sobreestimación de los datos durante este período.

Para septiembre, la correlación vuelve a disminuir y el sesgo positivo se mantiene, lo que refleja la tendencia del modelo a sobrestimar las concentraciones en este mes. A pesar de ello, la evolución general de las concentraciones es parcialmente reproducida y se mantiene dentro de niveles compatibles con la incertidumbre aceptable.

Los resultados para Puente Alto muestran que el modelo presenta limitaciones en la reproducción detallada de la variabilidad diaria, particularmente en verano, pero representa de manera aceptable la magnitud general y la tendencia temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$, lo cual es suficiente para respaldar el análisis regional desarrollado en esta investigación.

En términos generales, se nota que los coeficientes de relación obtenidos presentan valores moderados a bajos, especialmente durante el verano. Esto puede explicarse considerando que las concentraciones de $PM_{2.5}$ son altamente sensibles a eventos locales y a variaciones de corta duración que no siempre son completamente representadas por modelos regionales de transporte atmosférico. En invierno, en cambio, la mayor estabilidad atmosférica y la menor altura de la capa límite favorecen

que los patrones sean más consistentes, siendo así reproducidos de una mejor manera por el modelo.

Asimismo, se observa una tendencia a la sobrestimación en meses fríos o de transición y a la subestimación en verano. Este comportamiento podría estar asociado a diferencias en la representación estacional de la mezcla vertical, la ventilación atmosférica o la distribución temporal de las emisiones en el inventario utilizado.

En síntesis, considerando la magnitud de las concentraciones simuladas, los errores obtenidos y la coherencia estacional observada, los resultados se mantienen dentro de rangos aceptables para estudios de transporte atmosférico a escala regional, respaldando con esto el análisis de carbono negro desarrollado en este estudio.

4.2. Exploración inicial del transporte de carbono negro en el dominio definido

La exploración inicial del transporte de carbono negro dentro del dominio definido se realizó a partir de las animaciones generadas con los campos horarios de concentración superficial obtenidos del modelo. Estas animaciones permiten visualizar la evolución espacial del contaminante y analizar de manera cualitativa su propagación desde la cuenca de Santiago hacia las zonas cordilleranas.

Debido a que el formato del presente documento no permite incorporar material audiovisual, se optó por representar los resultados mediante imágenes estáticas seleccionadas a inicio, mitad y fin de mes para con ello resumir los patrones del transporte mensual. Sin embargo, con el fin de permitir la visualización completa de las animaciones originales, se incluye en los anexos un código QR (Figura 27) que da acceso a un repositorio digital donde se encuentran disponibles los archivos en formato video correspondientes a cada mes simulado.

Para cada mes simulado, se consideraron tres tipos de representaciones. En primer lugar, se seleccionaron nueve instantes distribuidos al inicio, medio y fin de mes, con el objetivo de caracterizar la evolución temporal general del transporte dentro del dominio. En segundo lugar, se identificaron los instantes de máxima concentración superficial de carbono negro en la zona cordillerana ubicada dentro del dominio de estudio; esto permitió analizar los episodios de mayor intensidad del contaminante en sectores de altura. Finalmente, se seleccionaron los instantes de mayor dispersión espacial dentro de la misma zona cordillerana, definidos a partir de la fracción del área cordillerana que supera el umbral mínimo de $0.01\,\mu g/m^3$.

En resumen, estas representaciones permiten distinguir entre la magnitud puntual del contaminante y su cobertura espacial, y entregan una visión más completa del comportamiento estacional del transporte de contaminantes en la zona de estudio.

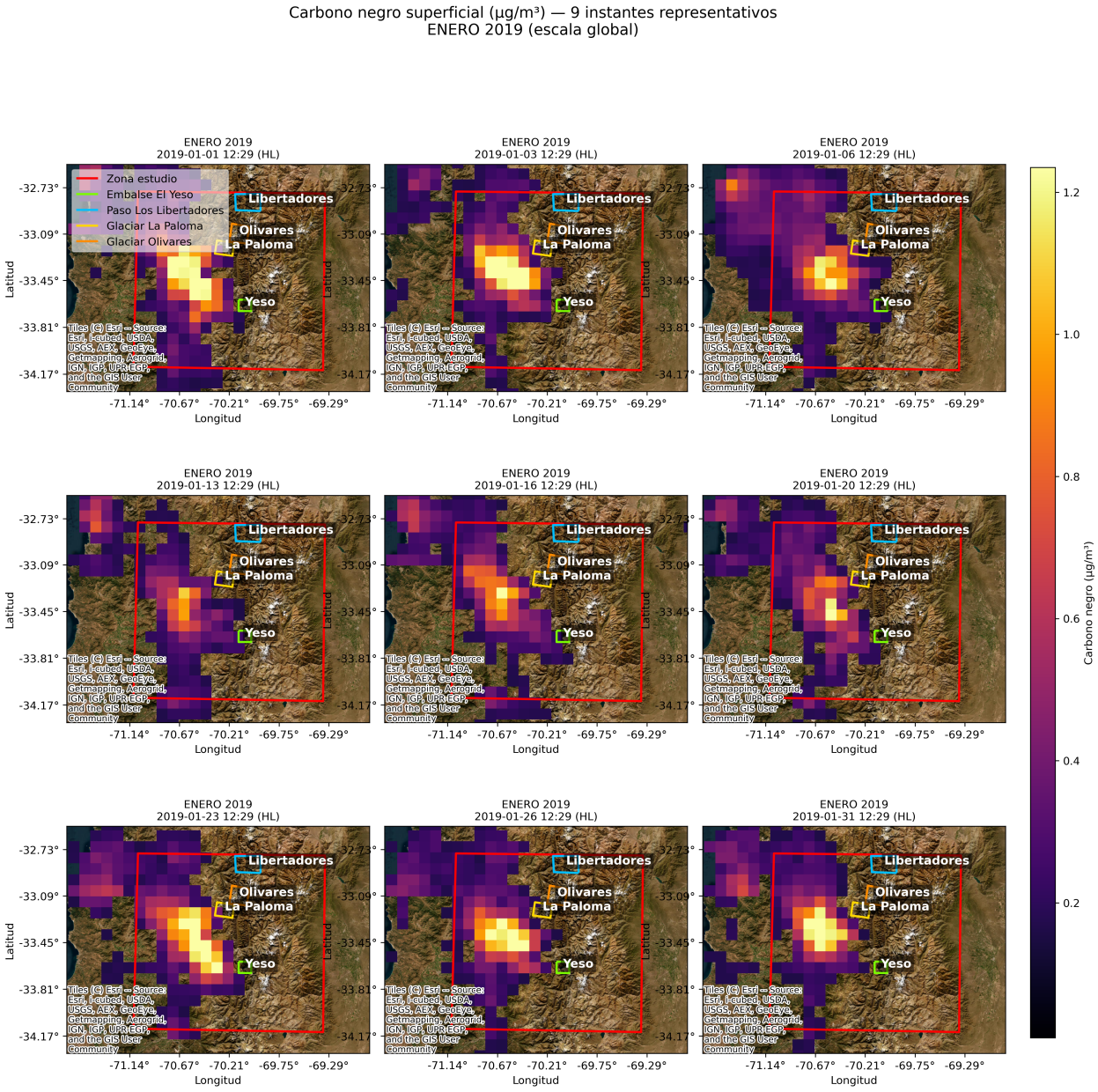


Figura 11: Representación estática de la animación de concentración superficial de carbono negro para enero de 2019. Se muestran nueve instantes representativos correspondientes al inicio, período intermedio y final del mes, permitiendo visualizar la evolución espacial del transporte del contaminante en una escala homogénea.

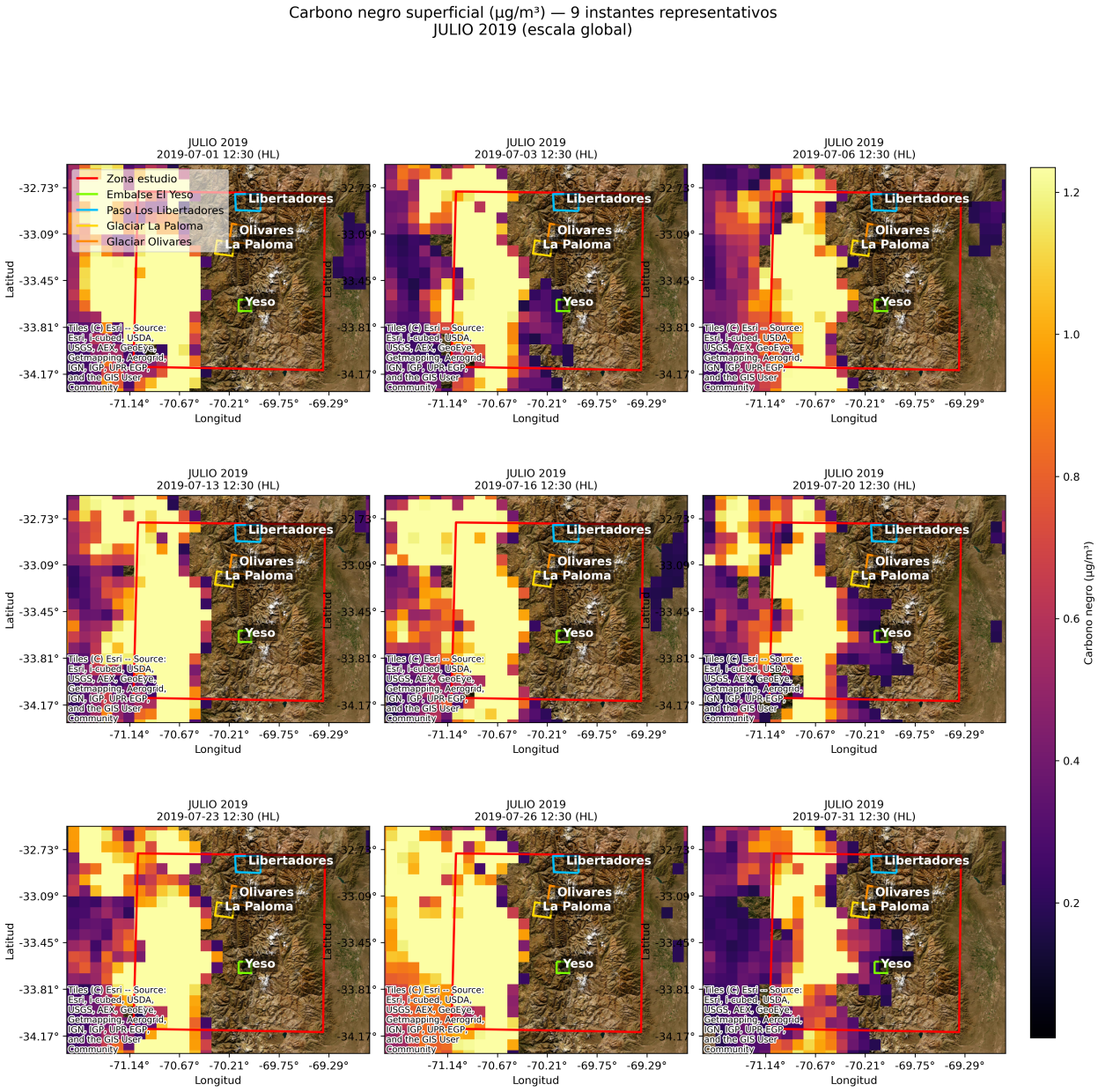


Figura 12: Representación estática de la animación de concentración superficial de carbono negro para julio de 2019. Se muestran nueve instantes representativos correspondientes al inicio, período intermedio y final del mes, manteniendo la misma escala de colores para permitir la comparación estacional.

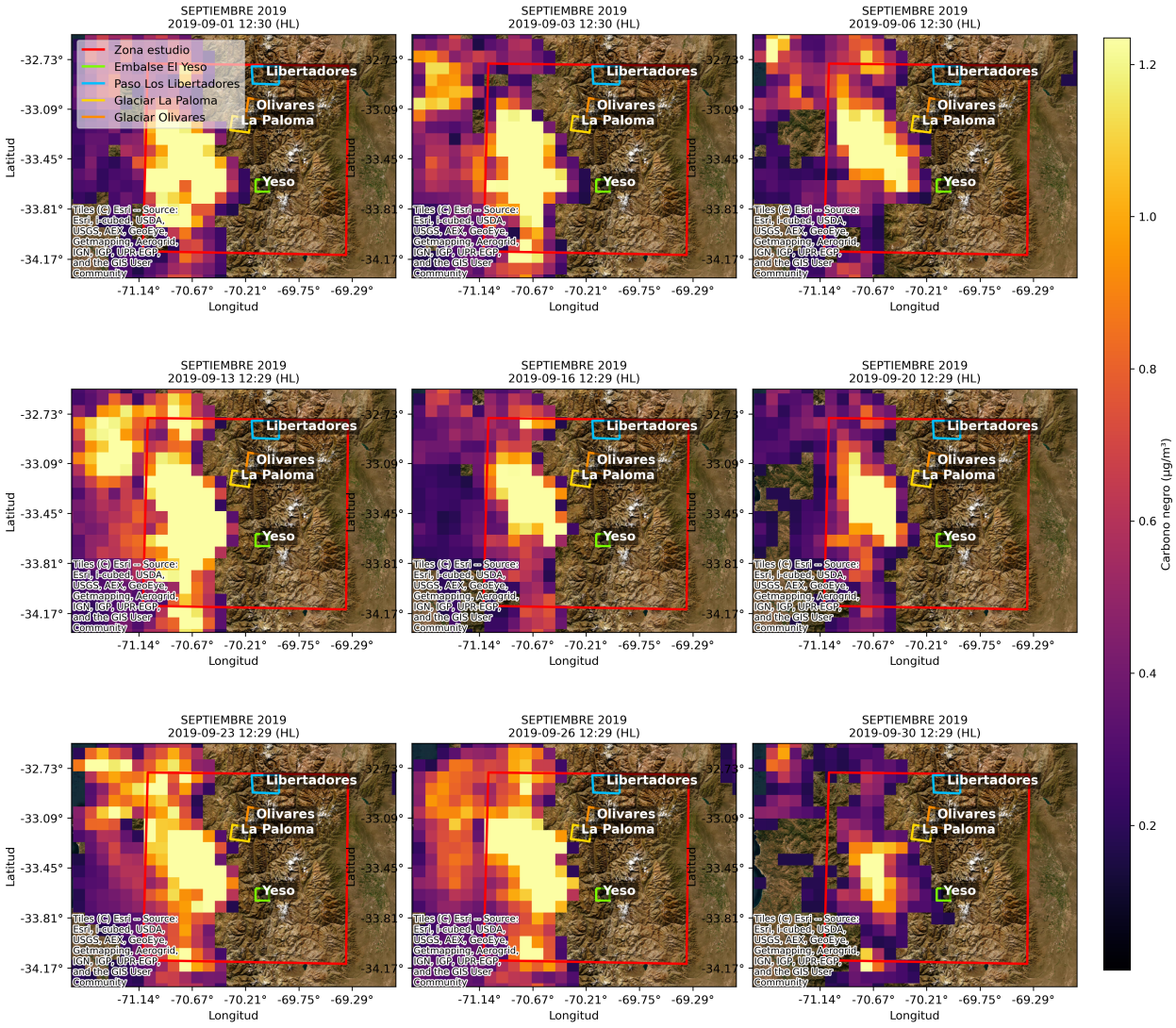


Figura 13: Representación estática de la animación de concentración superficial de carbono negro para septiembre de 2019. Se muestran nueve instantes representativos correspondientes al inicio, período intermedio y final del mes, facilitando la comparación con los demás períodos estudiados.

Gracias a que las representaciones mensuales se muestran utilizando una escala homogénea de concentración, es posible comparar directamente la magnitud relativa del carbono negro entre los distintos períodos. A partir de esta comparación visual se observa que durante julio se registran las concentraciones superficiales más elevadas sobre la cuenca de Santiago, seguido por septiembre (mes de transición) y, finalmente, enero presenta las menores magnitudes relativas. Este comportamiento es coherente con la estacionalidad típica del material particulado en la zona central de Chile. Durante el invierno, el aumento de emisiones asociadas a la calefacción residencial, junto con condiciones de mayor estabilidad atmosférica y una menor altura de la capa límite, favorecen la acumulación del contaminante dentro de la cuenca. En contraste, durante el verano, la mayor ventilación y el desarrollo vertical de la atmósfera promueven un transporte más eficiente, reduciendo las concentraciones superficiales observadas en la cuenca de Santiago.

No obstante, si bien en julio se observa una mayor acumulación del contaminante sobre Santiago, la exportación hacia las zonas cordilleranas resulta menos intensa en comparación con enero. En el período estival, aunque las concentraciones urbanas sean relativamente menores, la conectividad atmosférica entre el valle y la cordillera es más eficiente, favoreciendo así el transporte del carbono negro hacia los sectores de altura. Este contraste es consistente con los mecanismos de circulación valle-montaña y exportación de contaminantes previamente documentados para la zona central de Chile Huneeus et al. (2021) y Lapere et al. (2021). En consecuencia, la magnitud de las concentraciones de la cuenca no necesariamente se traduce en una mayor propagación hacia la cordillera, ya que la eficiencia del transporte depende de las condiciones dinámicas que dominan cada estación.

Con el fin de complementar el análisis, se identificaron los instantes horarios en los cuales la concentración superficial de carbono negro alcanzó su valor máximo dentro de una zona cordillerana definida dentro del dominio general de estudio.

Las Figuras 14, 15 y 16 muestran los nueve instantes de máxima concentración superficial de carbono negro para enero, julio y septiembre de 2019, respectivamente.

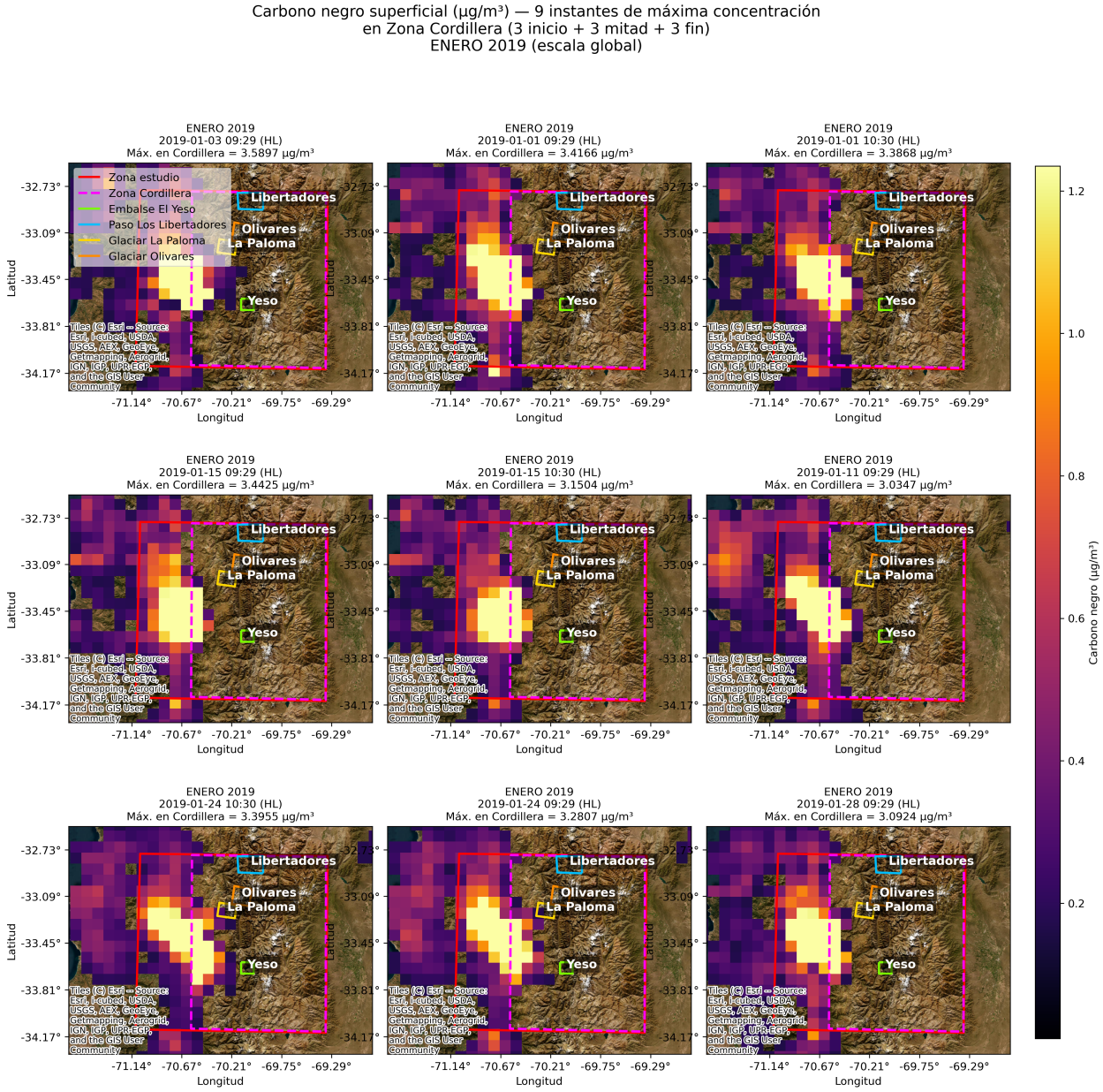


Figura 14: Instantes de máxima concentración superficial de carbono negro en la zona cordillerana definida para enero de 2019. Se muestran nueve eventos correspondientes al inicio, período intermedio y final del mes, seleccionados en función del valor máximo registrado dentro del área cordillerana.

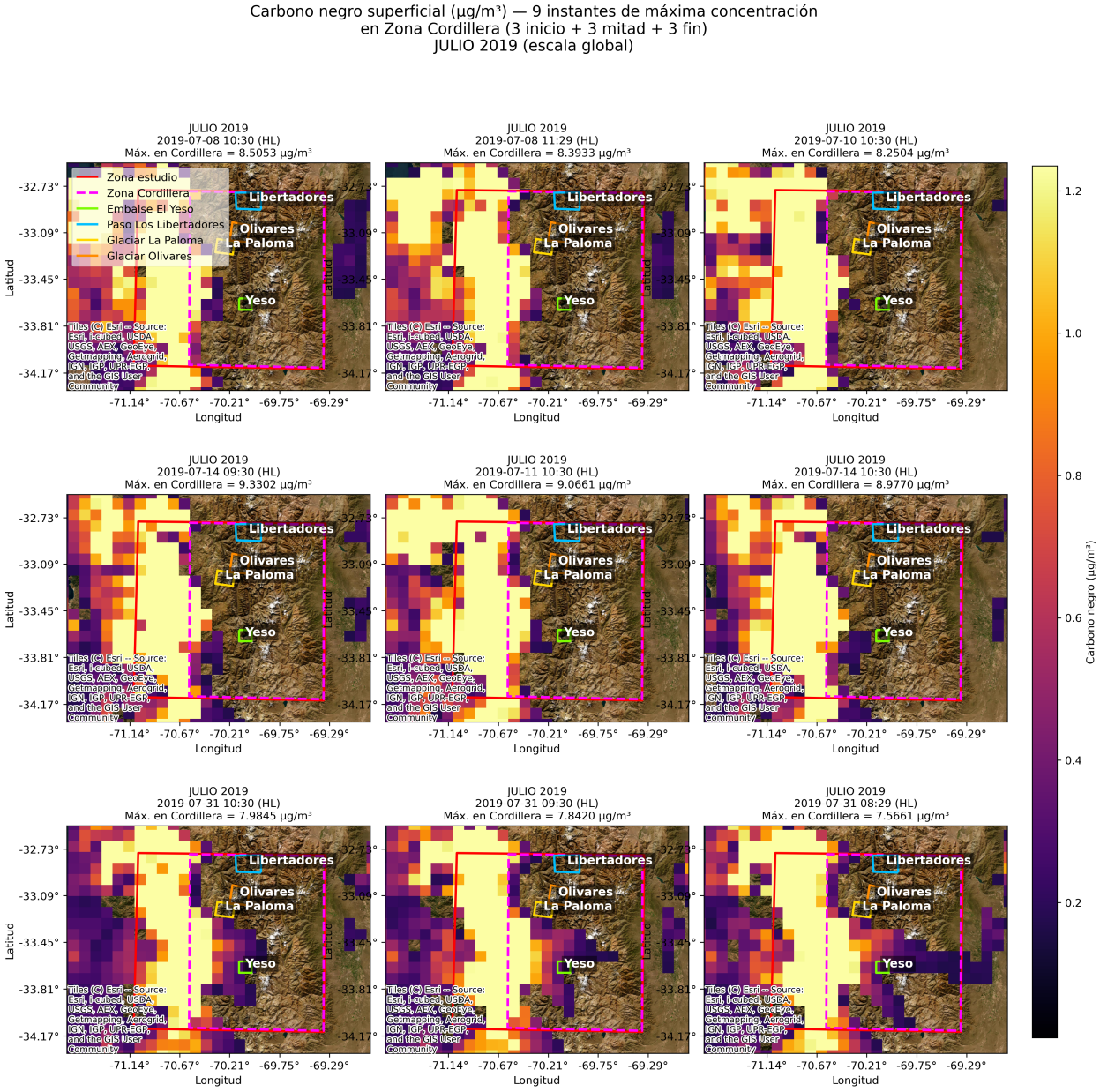


Figura 15: Instantes de máxima concentración superficial de carbono negro en la zona cordillerana definida para julio de 2019. Se presentan nueve eventos representativos distribuidos a lo largo del mes, permitiendo evaluar la intensidad extrema del transporte hacia sectores de altura.

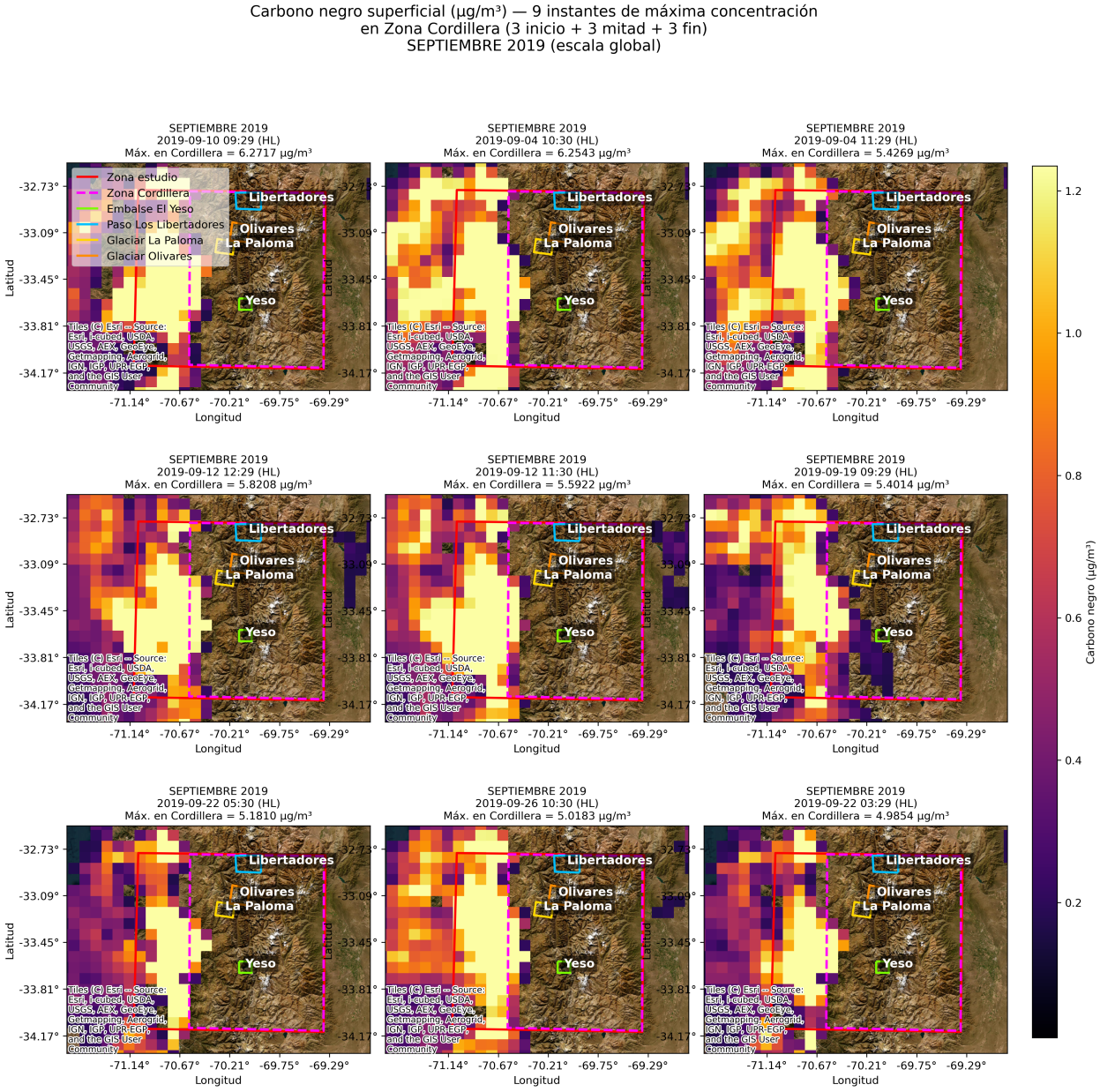


Figura 16: Instantes de máxima concentración superficial de carbono negro en la zona cordillerana definida para septiembre de 2019. Se incluyen nueve eventos seleccionados a partir del valor máximo horario dentro del área cordillerana, facilitando la comparación estacional.

A partir de estas representaciones, se observa que julio tiene las máximas magnitudes absolutas de concentración del contaminante; estas se localizan principalmente en el sector occidental del polígono definido como zona cordillerana, evidenciando con esto que para este mes existe un limitado transporte hacia las zonas cordilleranas de mayor altitud. Enero, por ejemplo, tiene menos magnitud en los valores, pero sí se ubica más hacia el oriente del polígono definido. Septiembre, por otro lado, sigue remarcando su calidad de época de transición al tener valores medios.

Este comportamiento confirma la marcada estacionalidad del contaminante en la zona central de Chile. Durante el invierno, el aumento de emisiones, asociado principalmente a la calefacción residencial y a otras fuentes urbanas, junto con condiciones de mayor estabilidad atmosférica y una menor altura de la capa límite, favorece la acumulación de particulado dentro de la cuenca. Por otro lado, en verano, la mayor ventilación y el desarrollo vertical de la atmósfera reducen la concentración superficial dentro del valle, aun cuando se mantenga el transporte hacia sectores cordilleranos.

Para terminar de complementar el análisis, se evaluó también la extensión espacial del transporte hacia la zona cordillerana. Para ello, se identificaron los instantes en los cuales la mayor fracción del área definida superó el umbral de $0.01 \mu g\ m^{-3}$, permitiendo así analizar la cobertura territorial del contaminante.

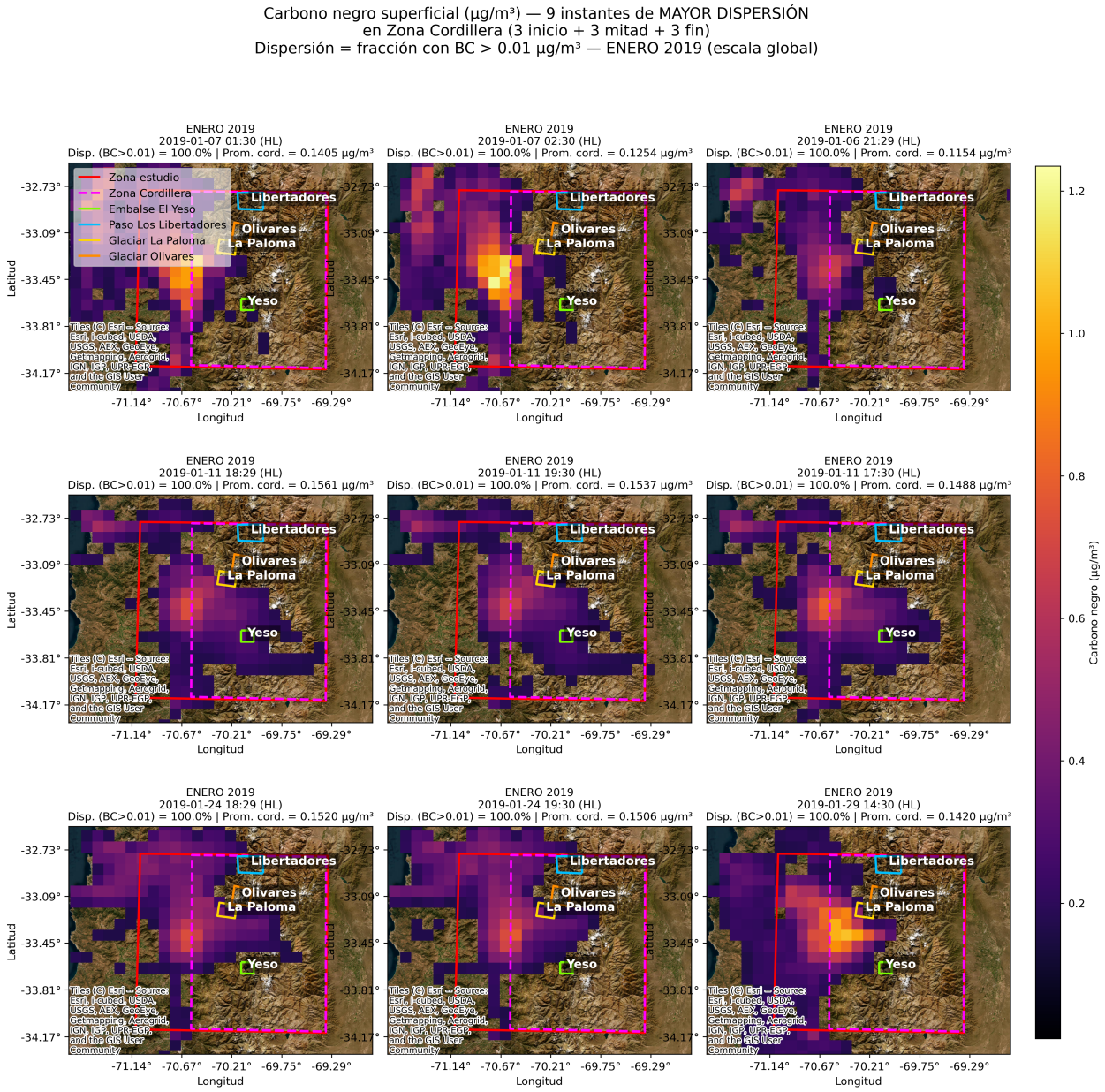


Figura 17: Instantes de mayor dispersión espacial de carbono negro en la zona cordillerana definida para enero de 2019. Se presentan nueve eventos seleccionados en función de la fracción del área que supera el umbral de $0.01\,\mu g\ m^{-3}$, permitiendo evaluar la extensión territorial del transporte.

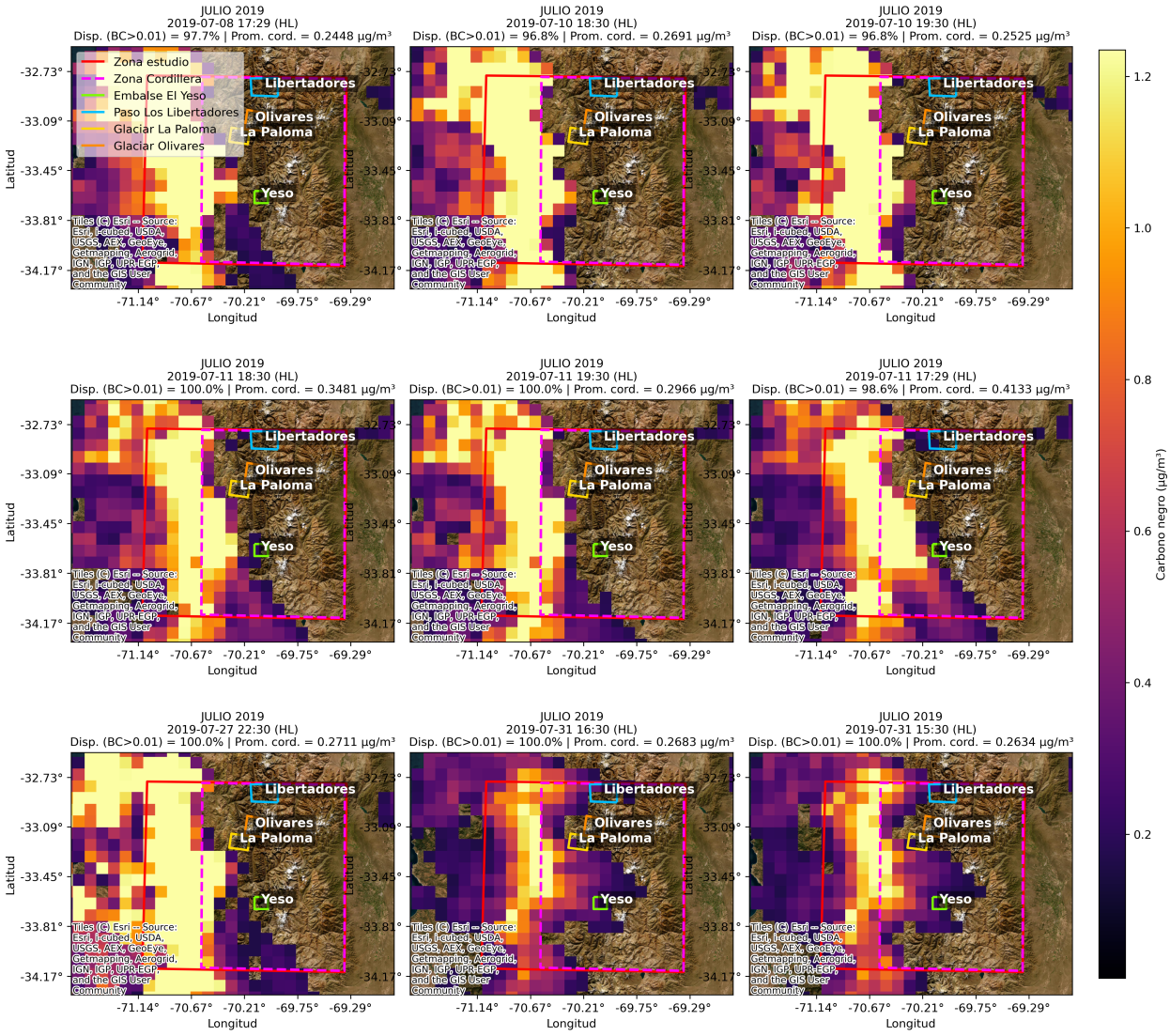


Figura 18: Instantes de mayor dispersión espacial de carbono negro en la zona cordillerana definida para julio de 2019. Se muestran nueve eventos representativos distribuidos a lo largo del mes, bajo el mismo umbral de concentración, facilitando la comparación estacional.

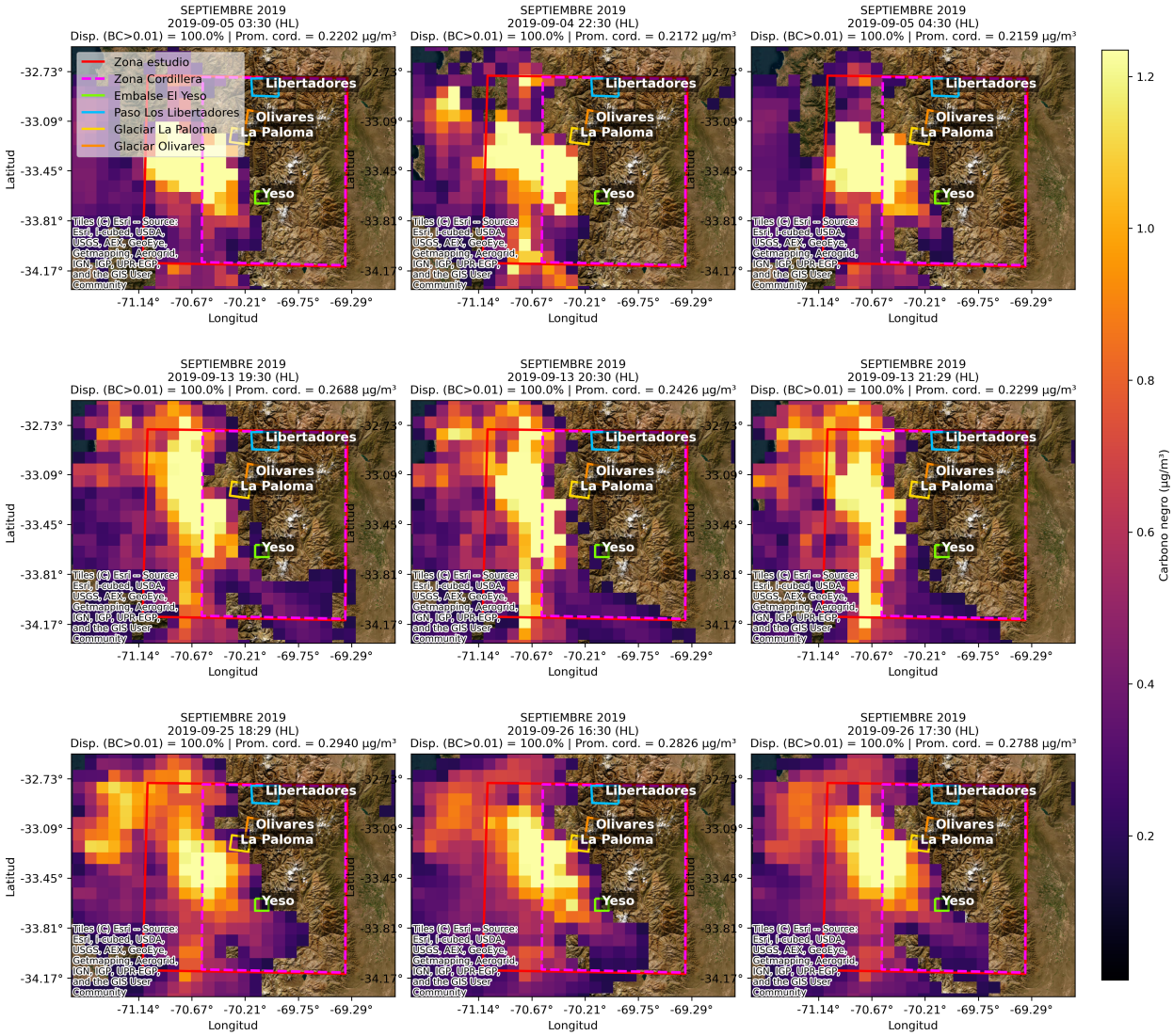


Figura 19: Instantes de mayor dispersión espacial de carbono negro en la zona cordillerana definida para septiembre de 2019. Las figuras muestran los eventos con mayor cobertura espacial por sobre el umbral establecido, permitiendo comparar la extensión del transporte entre meses.

Observando las figuras 17,18,19, julio presenta los valores absolutos más elevados; la extensión territorial del contaminante dentro de la zona cordillerana resulta relativamente más amplia durante enero. En este mes, una mayor fracción del área definida supera el umbral mínimo, lo que indica una propagación más extendida del carbono negro hacia sectores de altura.

Durante julio, aunque las concentraciones alcanzan mayores magnitudes, la señal espacial se mantiene más confinada al eje valle-cordillera, evidenciando una menor cobertura relativa dentro del dominio cordillerano. Septiembre presenta un comportamiento intermedio tanto en intensidad como en extensión.

Estos resultados refuerzan la idea de que la eficiencia del transporte atmosférico no depende exclusivamente de la magnitud de la concentración acumulada en la cuenca de Santiago, sino también de las condiciones dinámicas predominantes en cada estación. Mientras el invierno favorece la acumulación del contaminante en el valle, el verano presenta una mayor conectividad atmosférica entre la cuenca y la cordillera, lo que facilita una dispersión espacial más amplia del carbono negro hacia zonas de altura.

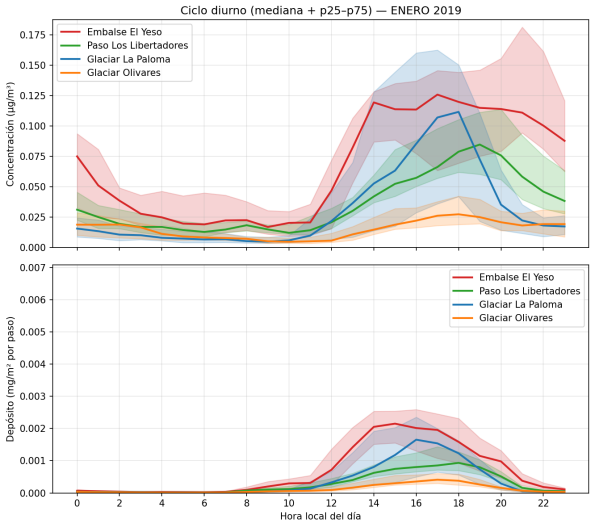
En conclusión, el análisis de los instantes representativos, los máximos de concentración y los episodios de mayor dispersión espacial permite concluir que el transporte de carbono negro hacia la cordillera presenta una marcada dependencia estacional y dinámica. Mientras el invierno se caracteriza por una mayor acumulación del contaminante en la cuenca de Santiago y por eventos de alta intensidad puntual en sectores de altura, el período estival muestra una mayor extensión espacial relativa dentro de la zona cordillerana, evidenciando una conectividad atmosférica más eficiente entre el valle y la montaña. Estos resultados indican que la magnitud de la concentración urbana no es, por sí sola, un indicador directo del impacto en altura, sino que el comportamiento del transporte responde a la interacción entre emisiones, estabilidad atmosférica y mecanismos de circulación regional. Este análisis inicial proporciona así un marco cualitativo que sustenta los análisis posteriores, donde se profundiza en la cuantificación y caracterización del comportamiento del contaminante específicamente en las zonas de interés.

4.3. Ciclos diurnos mensuales de concentración de carbono negro

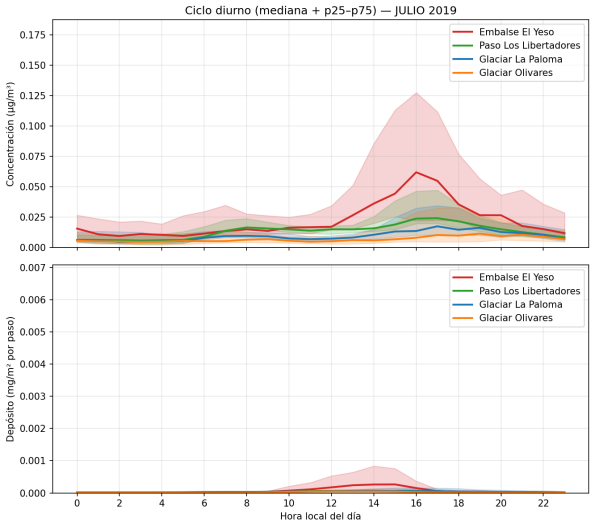
Los ciclos diurnos permiten analizar cómo varía la concentración de carbono negro a lo largo del día, enfocándose especialmente en las cuatro zonas de interés. Se identifican en ellas los momentos en que ocurre el mayor transporte hacia los sectores cordilleranos. Para obtener estos gráficos, se utilizaron todas las series horarias del mes correspondiente y se calculó la mediana para cada hora del día, junto con los percentiles P25-P75, lo que ofrece una representación de la variabilidad diaria. Con estas herramientas, es posible comparar entre meses y zonas, incluso bajo condiciones meteorológicas variadas.

Las Figuras 20a, 20b y 20c representan los ciclos diurnos mensuales para enero, julio y septiembre en cada una de las zonas de interés.

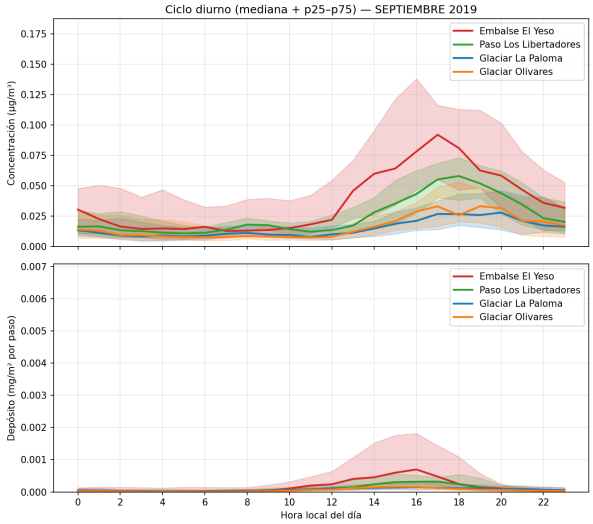
Las figuras incluyen información de deposición de carbono negro; el análisis presentado en este estudio se centrara en los valores de concentración. Se utiliza la deposición únicamente como un elemento de apoyo para la identificación de patrones.



(a) Enero 2019



(b) Julio 2019



(c) Septiembre 2019

Figura 20: Ciclos diurnos de concentración y depósito de carbono negro para las cuatro zonas de interés durante enero, julio y septiembre de 2019.(Elaboración propia a partir de Python, 2025.)

Para los tres meses analizados, se observa un patrón común: las concentraciones son mínimas durante la madrugada y comienzan a aumentar progresivamente hacia el mediodía, alcanzando un máximo entre las 14:00 y las 18:00 horas.

Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura existente, donde se señala que los vientos ascendentes durante la tarde transportan masas de aire contaminado desde Santiago hacia los Andes, y que la circulación valle-montaña controla la evolución diurna de la exportación de carbono negro. Además, los valores reducidos durante la madrugada observados coinciden también con lo señalado anteriormente sobre que la estabilidad nocturna y las piscinas de aire frío inhiben el transporte durante las primeras horas de la mañana Huneeus et al. (2021).

La magnitud de los ciclos diurnos presenta una estacionalidad clara. Enero presenta las concentraciones más altas, lo que es consistente con la afirmación de que el verano presenta los mayores flujos de exportación debido a vientos valle-montaña más intensos Huneeus et al. (2021). En contraste, julio presenta valores más bajos, lo que está de acuerdo con que el transporte durante el invierno se ve limitado por la estabilidad persistente y por vientos ascendentes más débiles Lapere et al. (2021). Septiembre presenta valores intermedios, lógicos para un mes de transición en el que la circulación comienza a intensificarse tras el período invernal.

Un aspecto que llama la atención de estos resultados es que el Embalse El Yeso muestra concentraciones superiores a las de Paso Los Libertadores, aun cuando este último está asociado a una fuente emisora directa (el tránsito vehicular intenso por la ruta internacional), mientras que en el Yeso no existe una actividad local tan potente. Esta diferencia resulta contra-intuitiva desde un punto de vista geográfico y de emisiones esperadas; este resultado motivó un análisis detallado del inventario de emisiones utilizado, CAMS-ANT 5.3, para revisar qué actividades estaban siendo asignadas a cada zona y si estas podían explicar la disparidad observada. Este análisis se presenta en la siguiente subsección.

4.4. Análisis del inventario de emisiones CAMS-ANT 5.3 en las zonas de interés

El patrón observado en los ciclos diurnos mensuales muestra diferencias marcadas entre las zonas de interés. En particular, el Embalse El Yeso muestra concentraciones superiores a las observadas en el Paso Los Libertadores, aun cuando este último está asociado a una fuente de emisión directa, como el tránsito vehicular intenso en la ruta internacional 60-CH. Esta situación, en primera instancia, resulta contraintuitiva desde el punto de vista de las emisiones esperadas y, por ello, se realiza un análisis detallado del inventario de CAMS-ANT 5.3, obteniendo las emisiones de cada zona de interés, separadas por actividad según la categoría SNAP.

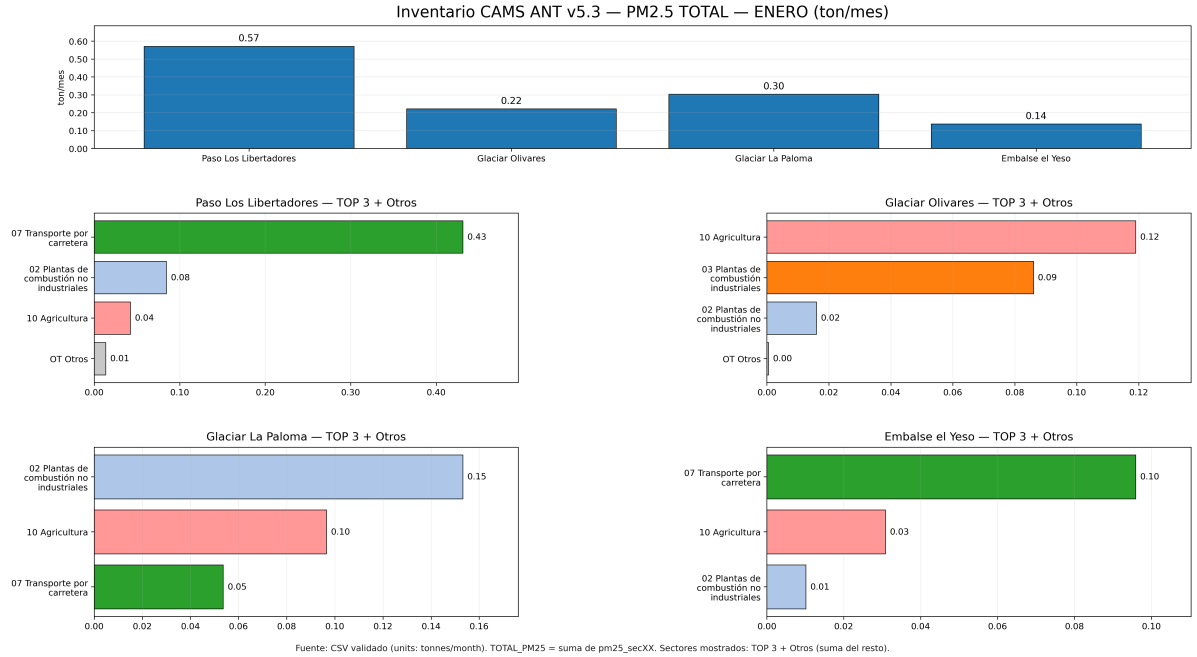


Figura 21: Inventario CAMS ANT v5.3 de emisiones locales de $PM_{2.5}$ (ton/mes) para enero 2019 en las zonas de estudio. Se muestran los totales mensuales y los principales sectores SNAP.

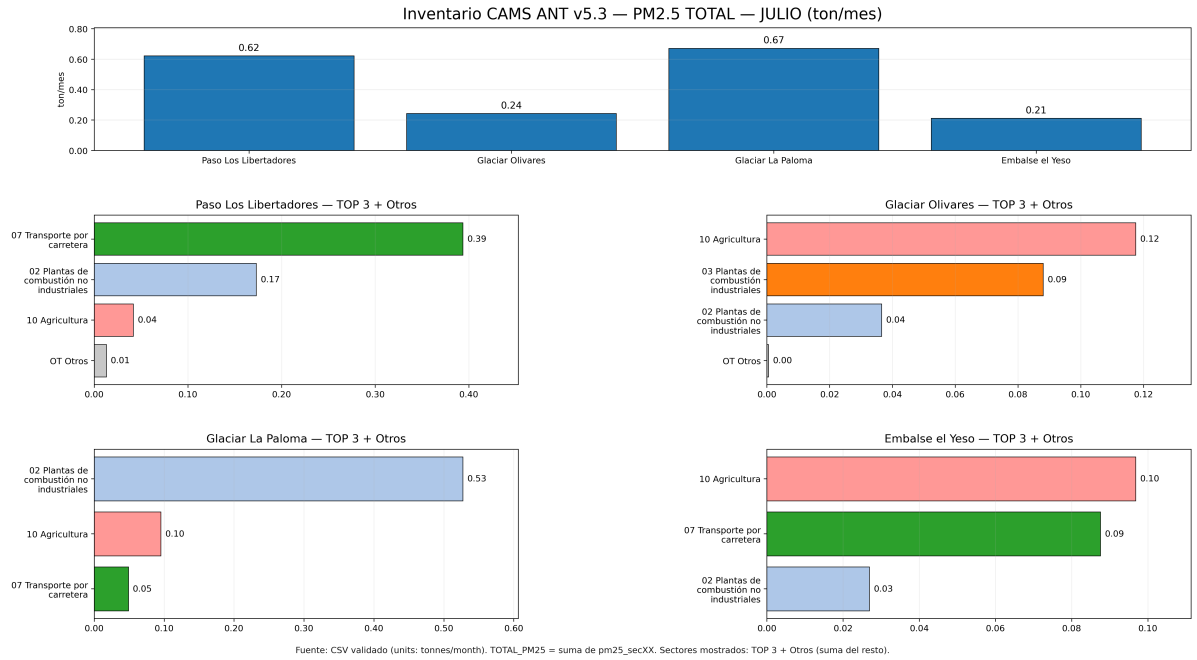


Figura 22: Inventario CAMS ANT v5.3 de emisiones locales de $PM_{2.5}$ (ton/mes) para julio 2019 en las zonas de estudio. Se muestran los totales mensuales y los principales sectores SNAP.

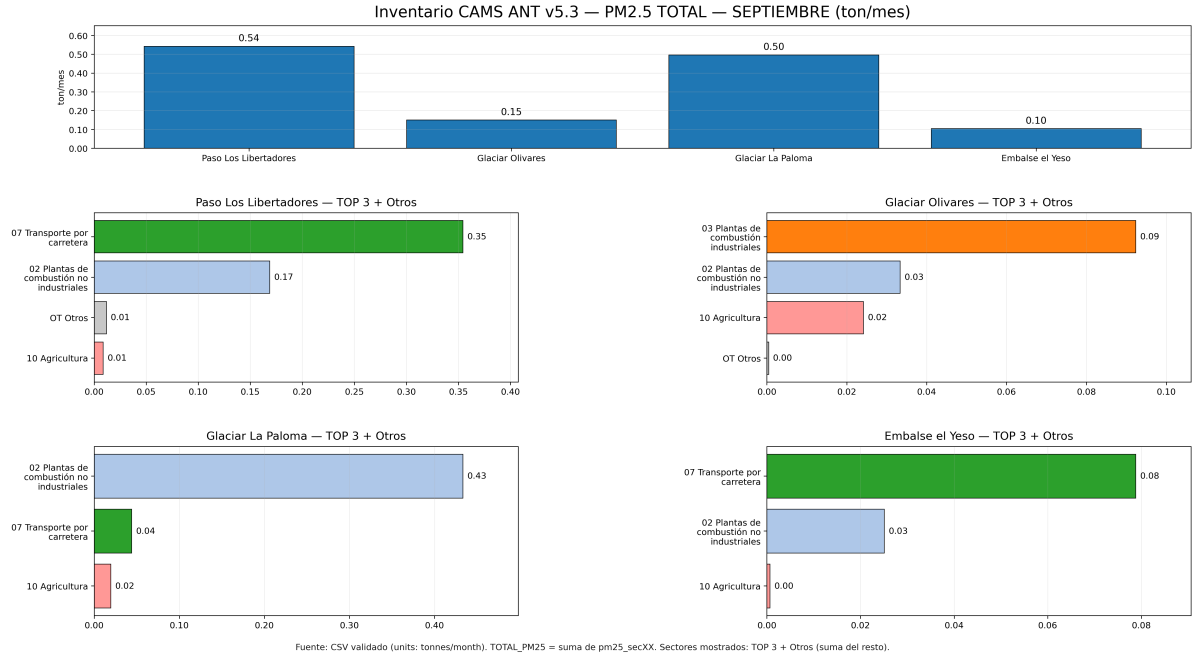


Figura 23: Inventario CAMS ANT v5.3 de emisiones locales de $PM_{2.5}$ (ton/mes) para septiembre 2019 en las zonas de estudio. Se muestran los totales mensuales y los principales sectores SNAP.

El inventario CAMS-ANT v5.3 entrega emisiones de $PM_{2.5}$, las cuales son transformadas por el modelo EMEP mediante factores de especiación para representar el carbono negro. Esto se describe de mejor manera en la sección de inventario de emisiones. Las emisiones se encuentran clasificadas de acuerdo con la nomenclatura SNAP, por lo que es posible identificar la composición sectorial representada en cada zona de interés.

A partir del análisis de cada mes simulado (Figuras 21, 22 y 23), se observa que el Embalse el Yeso representa sistemáticamente la zona de interés con menos emisiones locales durante todo el período estudiado. En esta zona domina SNAP 07 ("Transporte por carretera"), lo cual es acorde a lo que se esperaría en la zona. Además, se tiene el aporte del sector SNAP 10 ("Agricultura"); este debe ser analizado con cautela, ya que en el contexto de la zona cordillerana estudiada, esta categoría no necesariamente representa actividad agrícola local directa, sino que puede estar capturando fuentes difusas de material particulado dentro de la celda asignada a la zona, tales como re-suspensión de polvo o la inclusión parcial de sectores precordilleranos donde sí existen actividades agropecuarias.

Por otro lado, El Paso Los Libertadores presenta las mayores emisiones totales en promedio para todo el período simulado. En los tres meses analizados, predomina el sector SNAP 07 ("Transporte por carretera"); esto es consistente, ya que la zona cuenta con el corredor internacional y tiene un intenso tránsito vehicular asociado.

El caso del Glaciar Olivares, el máximo se observa en julio (Figura 22), lo cual coincide con el aumento de las categorías SNAP 03 (“Plantas de combustión industriales”) y SNAP 02 (“Combustión no industrial”). Una posible explicación es que estas categorías podrían representar emisiones asociadas a la actividad minera ubicada cerca de esta zona (Andina y los Bronces) y también a los campamentos mineros donde residen los trabajadores de dichas mineras. Lo mismo sucede con respecto al Glaciar La Paloma, donde domina el SNAP 02 (“Combustión no industrial”) en los tres meses (Figuras 21–23), lo que podría estar relacionado también con los campamentos mineros.

A partir del análisis sectorial del inventario, es posible establecer una relación clara entre las emisiones locales y las concentraciones simuladas. Los resultados muestran que las zonas con mayores concentraciones superficiales de carbono negro no coinciden necesariamente con aquellas que presentan mayores emisiones locales. En particular, el Embalse El Yeso exhibe de manera sistemática concentraciones superiores en comparación con el Paso Los Libertadores, a pesar de que este último presenta mayores emisiones totales según el inventario utilizado. Este comportamiento, que en primera instancia podría parecer contra-intuitivo, sugiere que las concentraciones observadas no están controladas principalmente por la emisión local, sino por la eficiencia del transporte atmosférico desde la cuenca de Santiago hacia las zonas cordilleranas.

Este resultado es consistente con lo documentado por Huneeus et al. (2021) y Lapere et al. (2021), quienes muestran que la circulación valle-montaña y la configuración topográfica del valle del Maipo facilitan la exportación de masas de aire urbano hacia sectores específicos de la cordillera. Asimismo, Lapere et al. (2023) destacan que la contribución de las emisiones de Santiago puede dominar las concentraciones observadas, especialmente bajo condiciones favorables de transporte. En este contexto, la mayor exposición del Embalse el Yeso al eje principal de ventilación del valle podría explicar por que esta zona registra mayores concentraciones en las simulaciones, aun cuando sus emisiones locales son de las menores.

Es importante señalar que la interpretación sectorial presentada se basa en un análisis lógico de las categorías SNAP del inventario en relación con las actividades efectivamente conocidas en cada zona de estudio, buscando explicar los patrones observados. Sin embargo, estas relaciones, como por ejemplo, la vinculación entre categorías industriales y actividad minera, o entre la combustión no industrial (residencial) y los campamentos mineros, son hipótesis razonadas y no validaciones directamente apoyadas por estudios específicos de las fuentes locales. El inventario CAMS-ANT v5.3 posee una resolución espacial y una clasificación sectorial agregada que no permite identificar con precisión fuentes puntuales individuales. Por lo tanto, las explicaciones propuestas deben entenderse como interpretaciones coherentes con la realidad observada en los sectores, pero requieren estudios más detallados para ser confirmadas de manera específica.

4.5. Análisis del campo de viento proveniente del WRF

A partir de lo ya observado, el transporte de carbono negro hacia las zonas cordilleranas se encuentra altamente condicionado por la circulación atmosférica regional, específicamente por los vientos asociados a la circulación valle-montaña. Con el objetivo de complementar la interpretación de los resultados obtenidos, se realizó un análisis del campo de viento superficial (10 m) proveniente de las simulaciones del modelo WRF utilizadas como forzamiento meteorológico para *EMEP*.

El campo de viento disponible corresponde a un período acotado de la simulación de enero de 2019, por lo que este análisis se incorpora como referencia cualitativa con el fin de apoyar la interpretación física de los patrones de transporte observados. A pesar de esta limitación temporal, el patrón de viento analizado resulta coherente con los mecanismos descritos en las secciones anteriores y con lo documentado en la literatura para la zona central de Chile, donde se ha identificado que durante el verano los vientos se intensifican durante la tarde y presentan una orientación predominante de poniente a oriente, favoreciendo con esto el transporte de contaminantes desde la cuenca de Santiago hacia la cordillera Huneeus et al. (2021) y Lapere et al. (2023).

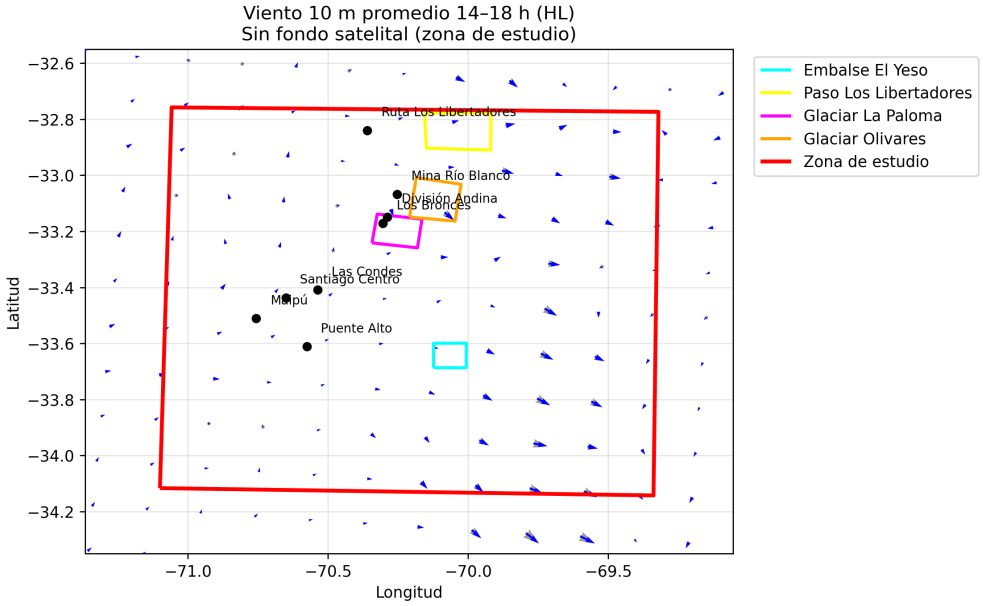


Figura 24: Campo de viento a 10 m proveniente del modelo WRF para el período vespertino de enero de 2019 (14:00–18:00 h).El patrón observado es consistente con una advección predominante de poniente a oriente, característica de la circulación valle-montaña descrita durante el estudio.(Elaboración propia a partir de Python, 2025.)

La Figura 24 muestra el campo de viento promedio entre las 14:00 y las 18:00 horas, intervalo horario asociado al pico de desarrollo de la circulación valle-montaña. En ella se observa una intensificación del flujo hacia el oriente, alineado con el eje principal del valle, lo que favorece la conectividad atmosférica entre la cuenca de Santiago y sectores como el Embalse El Yeso.

En contraste, el patrón de viento dirigido hacia el Paso Los Libertadores presenta una menor continuidad, asociado esto a una topografía más compleja y encajonada del sector, limitando así la eficiencia del transporte directo desde Santiago hacia esta zona.

En conjunto, esta figura resulta consistente con los patrones observados en secciones anteriores y contribuye a reforzar la interpretación de que las diferencias entre las zonas de estudio están condicionadas principalmente por la geometría del valle y la eficiencia del transporte atmosférico regional. Si bien el análisis se basa en un período temporal limitado, su inclusión permite aportar un respaldo físico coherente a los resultados obtenidos.

5. Conclusiones

Generales

Los resultados obtenidos a partir del análisis de las simulaciones EMEP disponibles permitieron estimar la propagación del carbono negro desde la cuenca de Santiago hacia sectores cordilleranos seleccionados, cumpliendo así el objetivo general planteado en esta memoria. Mediante el procesamiento de los archivos NetCDF entregados por las simulaciones y la extracción de concentraciones superficiales en zonas de interés, fue posible caracterizar la distribución espacial y la variabilidad temporal del contaminante en el dominio definido.

Los resultados muestran que la cuenca de Santiago constituye la principal fuente emisora dentro del área de estudio y que el transporte atmosférico regional juega un rol dominante en la distribución del contaminante hacia la cordillera. Se identificó una variabilidad temporal marcada, donde la intensidad de la propagación hacia zonas de altura depende de las condiciones meteorológicas predominantes en cada período, particularmente de los mecanismos de ventilación y la conectividad atmosférica entre el valle y la cordillera.

Además, se observó que las concentraciones registradas en sectores cordilleranos no están determinadas exclusivamente por la magnitud de las emisiones locales asignadas a cada zona, lo que refuerza la importancia del transporte regional con respecto a la magnitud de la concentración de carbono negro en zonas de altura.

Con respecto al desempeño del modelo, se presenta lo siguiente:

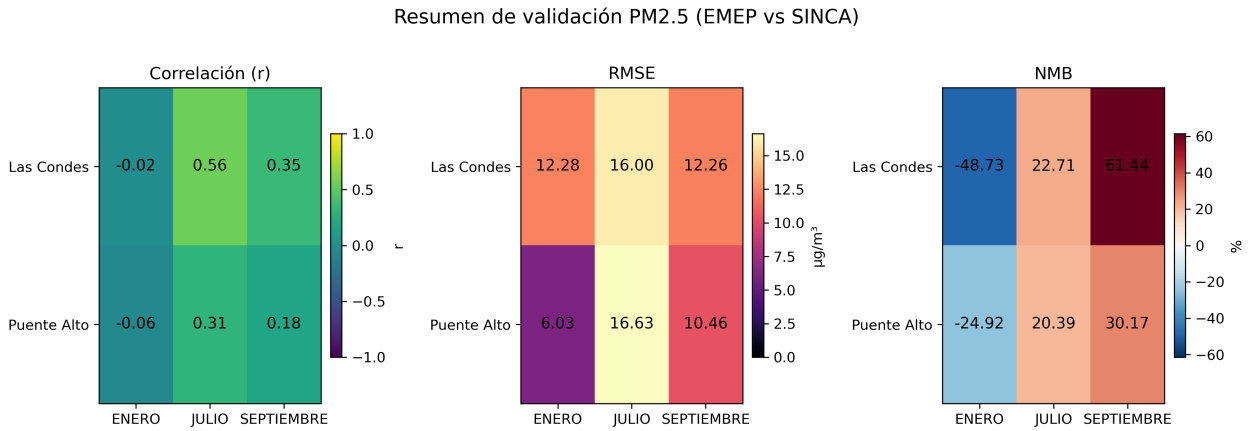


Figura 25: Resumen de la validación del modelo EMEP mediante la comparación entre concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ simuladas y observadas en estaciones de la red SINCA para enero, julio y septiembre de 2019. Se presentan la correlación de Pearson (r), el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo normalizado (NMB) para cada estación analizada.

Los valores de correlación entre las concentraciones diarias modeladas y observadas oscilan entre -0.06 y 0.56, alcanzando los valores más altos durante el mes de julio. Si bien la correlación es una métrica útil para evaluar la capacidad del modelo de reproducir la variabilidad temporal de las concentraciones, su valor no necesariamente es el indicador más relevante en este estudio. Esto se debe a que la correlación puede verse influenciada por episodios puntuales o procesos locales que no siempre están representados en los inventarios regionales de emisiones ni en los modelos de escala regional. Por esto, los valores bajos de R no implican una representación incorrecta de los patrones de transporte atmosférico.

Por ello, es más importante considerar los valores asociados al error y al sesgo del modelo. El error cuadrático medio (RMSE) vario entre 6.03 y 16.63 $\mu g/m^3$, valores que se encuentran dentro de rangos normales, considerando las incertidumbres asociadas a inventarios de emisiones, resolución espacial del modelo y simplificaciones en la representación de procesos químicos y meteorológicos. Por su parte, el sesgo normalizado (NMB) presento una subestimación durante enero (hasta -48.73 %) y una sobrestimación en septiembre (hasta 61.44 %), lo cual puede atribuirse a limitaciones en la representación de emisiones locales y procesos de formación secundaria en el inventario utilizado.

Los resultados obtenidos para evaluar el desempeño del modelo están dentro de los rangos reportados en la literatura. De acuerdo con Emery et al., 2017, evaluaciones de este tipo suelen presentar sesgos normalizados dentro del orden de $\pm 30\,\%$ y correlaciones moderadas debido a las incertidumbres inherentes en los inventarios de emisiones, la resolución espacial del modelo y la representación de procesos atmosféricos. En algunos casos, se observan desviaciones superiores a estos valores, especialmente durante el período de transición estacional; el modelo logra reproducir adecuadamente el orden de magnitud de las concentraciones y su comportamiento estacional. Por esto, el desempeño del modelo se considera adecuado para el propósito del estudio.

Específicas

Con respecto al primer objetivo planteado, se implementó un esquema de análisis basado en simulaciones previamente generadas con el modelo EMEP, las cuales fueron forzadas con información meteorológica proveniente de WRF y el inventario de emisiones CAMS-ANT v5.3. A partir de los archivos NetCDF proporcionados, se realizó el procesamiento sistemático de la variable de concentración superficial del carbono negro, permitiendo su análisis espacial y temporal dentro del dominio definido.

Se definieron zonas de interés mediante máscaras geográficas, lo que permitió extraer series temporales representativas para cada sector cordillerano analizado. Con estos datos se construyeron ciclos diurnos mensuales, se analizaron patrones de concentración y se vincularon los resultados con la distribución sectorial del inventario de emisiones. Además, se realizó la validación de resultados mediante la comparación de $PM_{2.5}$ simulado por EMEP y observado por estaciones del SINCA.

Por todo esto, se logró cumplir el objetivo implementando un sistema de procesamiento y análisis que permite estimar y caracterizar el transporte de carbono negro hacia zonas cordilleranas a partir de simulaciones atmosféricas.

En relación con el segundo objetivo planteado, el análisis desarrollado permitió identificar diferencias claras en la distribución espacial y temporal del carbono negro en las zonas de interés, así como interpretar los factores que explican estos patrones.

Los resultados muestran que las mayores concentraciones superficiales en altura no coinciden necesariamente con las zonas que presentan mayores emisiones locales, según el inventario utilizado. En particular, el Embalse El Yeso registró concentraciones constantemente superiores a las del Paso Los Libertadores, aun cuando este último presenta mayores emisiones locales asociadas al intenso transporte carretero de la zona. Por ejemplo, como se aprecia en la figura 26 durante enero, el Paso Los Libertadores presenta la mayor emisión local de $PM_{2.5}$ (0.57 ton/mes), mientras que el Embalse El Yeso registra una emisión considerablemente menor (0.14 ton/mes), pero alcanza la mayor concentración promedio representativa de carbono negro (0.067 $\mu g/m^3$). Un comportamiento similar se observa en julio y septiembre, donde el Embalse El Yeso presenta las mayores concentraciones promedio de carbono negro (0.022 y 0.037 $\mu g/m^3$, respectivamente), a pesar de registrar emisiones locales inferiores a otras zonas del dominio. Este contraste evidencia que la magnitud de la emisión local no es el factor dominante en la determinación de las concentraciones en cordillera, sugiriendo que el transporte atmosférico regional juega un rol predominante en la distribución del carbono negro en estas zonas.

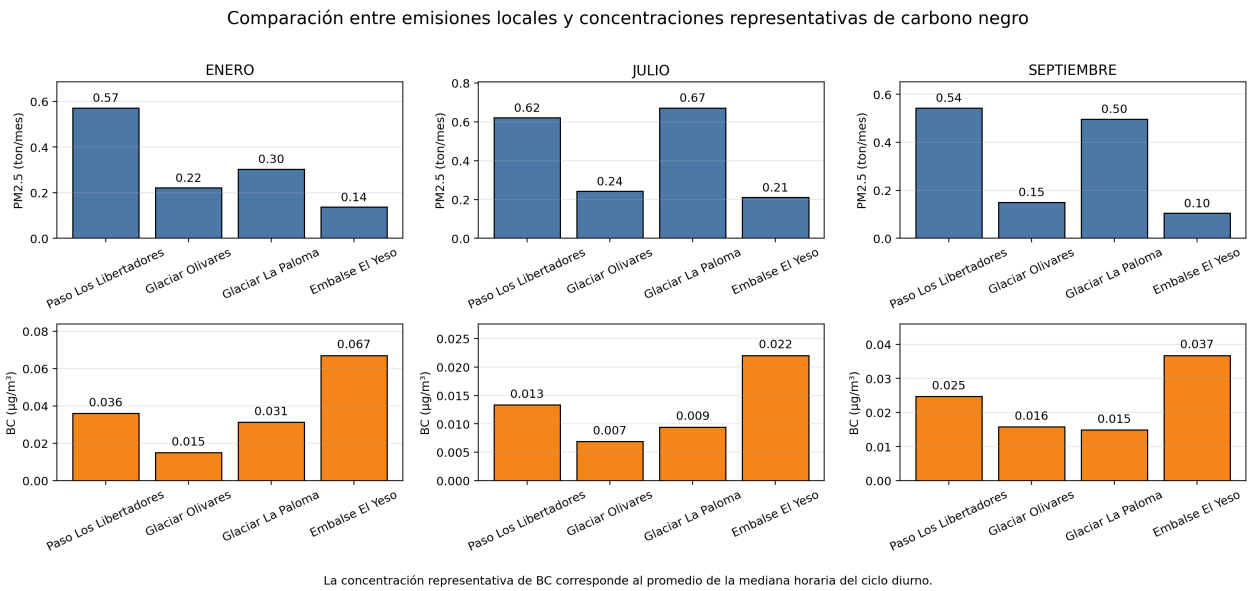


Figura 26: Comparación entre las emisiones locales totales de $PM_{2.5}$ (ton/mes) y las concentraciones representativas promedio de carbono negro (BC) en las zonas de interés para enero, julio y septiembre de 2019.

Además, el análisis comparativo mensual permitió observar una marcada variabilidad estacional. Durante julio, se registraron mayores niveles de contaminante sobre la cuenca de Santiago, pero una menor propagación hacia las zonas de interés. A diferencia de enero, en el que el transporte de contaminantes hacia la cordillera fue más intenso y extendido, septiembre, siendo un mes de transición, presenta un comportamiento intermedio. Este patrón sugiere que la eficiencia del transporte atmosférico depende fuertemente de las condiciones meteorológicas predominantes en cada período.

En resumen, estos resultados indican que la propagación del carbono negro hacia zonas cordilleranas está controlada principalmente por la eficiencia del transporte regional desde la cuenca de Santiago, condicionada por la configuración topográfica y la circulación valle-montaña. De esta manera, la fuente urbana domina el sistema de transporte dentro del dominio estudiado, por lo que las emisiones locales en las zonas de interés planteadas toman un rol secundario. Con esto se da cumplimiento al segundo objetivo del estudio.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en esta memoria, se proponen las siguientes recomendaciones para futuros estudios:

En primer lugar, se recomienda desarrollar estudios específicos sobre el transporte y la concentración de carbono negro en zonas cordilleranas cercanas a faenas mineras, considerando detalladamente la ubicación de las actividades realizadas, las plantas de tratamiento asociadas y los campamentos mineros adjuntos. Un análisis más detallado del inventario de emisiones, con mayor resolución espacial, permitiría evaluar con mayor precisión la contribución de dichas fuentes locales a las concentraciones de las zonas de interés.

Además, se recomienda ampliar el período de análisis a múltiples años, quizás manteniendo los mismos meses representativos (verano, invierno, transición) para poder comparar si, con el paso del tiempo, se mantienen las mecánicas de transporte o si estas van siendo afectadas o cambiando sus formas de trabajar.

Finalmente, se sugiere extender el análisis hacia el estudio de la deposición de carbono negro en las zonas estudiadas. Incorporar estas métricas permitiría estimar directamente el impacto potencial del contaminante sobre la nieve y el balance energético superficial, fortaleciendo con ello la importancia del transporte de contaminantes desde Santiago hacia las zonas de cordillera.

Referencias

CAMS Atmospheric Service. (2023). CAMS Global Anthropogenic Emissions (CAMS-ANT) v5.3 [Disponible en ECCAD: https://eccad.sedoo.fr/#/metadata/479].

Denby, B. R., et al. (2024). Sub-grid variability and its impact on exposure in regional scale air quality and integrated assessment models: application of the uEMEP downscaling model. *Atmospheric Environment*, *333*, 205862. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.205862

Denby, B. R., Sundvor, I., Johansson, C., Pirjola, L., Ketzel, M., Norman, M., Kupiainen, K., Gustafsson, M., Blomqvist, G., Omstedt, G., Kauhaniemi, M., & Karppinen, A. (2020). Description of the uEMEP_v5 downscaling approach for calculating pollutant concentrations at fine spatial scales in Norway. *Geoscientific Model Development*, *13*(12), 6303-6323. https://doi.org/10.5194/gmd-13-6303-2020

Emery, C., Liu, Z., Russell, A. G., Odman, M. T., Yarwood, G., & Kumar, N. (2017). Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *67*(5), 582-598. https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027

Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *114*(D4), D04102. https://doi.org/10.1029/2008JD010519

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(12), 6307-6327. https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017

Huneeus, N., Lapere, R., Mazzeo, A., Ordoñez, C., Donoso, N., Muñoz, R., & Rutllant, J. A. (2021). Deep winter intrusions of urban black carbon into a canyon near Santiago, Chile: A pathway towards Andean glaciers. *Environmental Pollution*, *291*, 118124. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118124

Kang, S. e. a. (2020). Dramatic loss of glacier accumulation area on the Tibetan Plateau revealed by ice core tritium and mercury records. *The Cryosphere*, *9*(3), 1213-1222. https://doi.org/10.5194/tc-9-1213-2015

Lapere, R., Huneeus, N., Mailler, S., Menut, L., & Couvidat, F. (2023). Meteorological export and deposition fluxes of black carbon on glaciers of the central Chilean Andes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *23*, 1749-1768. https://doi.org/10.5194/acp-23-1749-2023

Lapere, R., Mailler, S., Menut, L., & Huneeus, N. (2021). Pathways for wintertime deposition of anthropogenic light-absorbing particles on the Central Andes cryosphere. *Environmental Pollution*, *272*, 115901. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115901

Li, C., Bosch, C., Kang, S., Andersson, A., Chen, P., Zhang, Q., Cong, Z., Chen, B., Qin, D., & Gustafsson, Ö. (2016). Sources of black carbon to the Himalayan–Tibetan Plateau glaciers. *Nature Communications*, *7*(12574), 1-9. https://doi.org/10.1038/ncomms12574

Mazzeo, A., Burrow, M., Quinn, A., Marais, E. A., Singh, A., Ng'ang'a, D., Gatari, M. J., & Pope, F. D. (2022). Evaluation of the WRF and CHIMERE models for the simulation of $PM_{2.5}$ in large East African urban conurbations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*, 10677-10701. https://doi.org/10.5194/acp-22-10677-2022

Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L. D., Fagerli, H., Flechard, C. R., Hayman, G. D., Gauss, M., Jonson, J. E., Jenkin, M. E., Nyíri, A., Richter, C., Semeena, V. S., Tsyro, S., Tuovinen, J.-P., Valdebenito, Á., & Wind, P. (2012). The EMEP MSC-W chemical transport model – technical description. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *12*, 7825-7865. https://doi.org/10.5194/acp-12-7825-2012

Wind, P., Walker, S.-E., & Denby, B. R. (2020). Local fractions – a method for the calculation of local source contributions to urban air quality. *Atmospheric Environment*, *224*, 117305. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117305

6. Anexos

Tabla 1: Contaminantes disponibles en el inventario de emisiones CAMS-ANT 5.3 utilizado en este estudio.(Elaboración propia a partir de Python, 2025.)

Contaminante	**Descripción**
$PM_{2.5}$	Material particulado fino primario
CO	Monóxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrógeno (NO + NO_2)
SO_x	Óxidos de azufre (principalmente SO_2)
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
NH_3	Amoniaco

Tabla 2: Variables meteorológicas utilizadas por el modelo EMEP MSC-W como campos meteorologicos.

Variable meteorológica	**Descripción**	**Unidad**
Viento (u, v)	Componentes zonal y meridional del viento	m/s
Temperatura del aire	Temperatura en superficie y niveles verticales	Celcius
Humedad relativa	Proporción de humedad en el aire	%
Presión atmosférica	Presión del aire en superficie y niveles verticales	hPa
Precipitación	Tasa de precipitación acumulada o instantánea	mm/h
Radiación	Radiación solar y radiación infrarroja	W/m^2

Figura 27: Código QR para acceder a las animaciones de concentración y deposición de carbono negro.

Código SNAP	Categoría	Principales actividades / tipos de fuente
01	Combustión en la producción y transformación de energía	Centrales eléctricas y térmicas, plantas de cogeneración, refinerías, producción de combustible sólido, extracción y compresión de hidrocarburos.
02	Plantas de combustión no industriales	Plantas comerciales e institucionales (edificios públicos, hospitales), domésticas/residenciales, agrícolas/forestales que usan combustión.
03	Plantas de combustión industriales	Hornos, calderas en industria, procesos industriales que queman combustibles.
04	Procesos industriales sin combustión	Procesos industriales que generan emisiones sin quema (como procesamiento químico, metalurgia, producción de cemento, etc.).
05	Extracción y distribución de combustibles fósiles y energía geotérmica	Minas, extracción de petróleo/gas, compresores de tuberías, distribución de gas/combustible.
06	Uso de disolventes y otros productos	Uso de solventes, pinturas, adhesivos, productos químicos que emiten contaminantes atmosféricos.
07	Transporte por carretera	Automóviles, camiones, autobuses, motocicletas que circulan por carretera.
08	Otras fuentes móviles y maquinaria	Maquinaria fuera de carretera (excavadoras, barcos, aviones), transporte ferroviario, marítimo, etc.
09	Tratamiento y disposición de residuos	Vertederos, incineración de residuos, tratamiento de aguas residuales, emisiones fugitivas de rellenos.
10	Agricultura	Actividades agrícolas, ganaderas, emisiones de amoníaco, polvo agrícola, uso de fertilizantes, etc.
11	Otras fuentes y sumideros (naturales)	Emisiones de fuentes naturales o mixtas: suelos, vegetación, erupciones, actividades biogénicas; también sumideros de contaminantes.

Tabla 3: Categorías SNAP y sus actividades correspondientes.

	NMB		NME		*r*	
Species	Goal	Criteria	Goal	Criteria	Goal	Criteria
1-hr or MDA8 Ozone	<±5%	<±15%	<15%	<25%	>0.75	>0.50
24-hr $PM_{2.5}$, SO_4, NH_4	<±10%	<±30%	<35%	<50%	>0.70	>0.40
24-hr NO_3	<±15%	<±65%	<65%	<115%	None	None
24-hr OC	<±15%	<±50%	<45%	<65%	None	None
24-hr EC	<±20%	<±40%	<50%	<75%	None	None

Figura 28: Criterios recomendados para la evaluación del desempeño de modelos mediante métricas estadísticas como el sesgo normalizado (NMB), el error medio normalizado (NME) y el coeficiente de correlación (r) para distintas especies atmosféricas. *Fuente:* Adaptado de Emery et al., 2017.