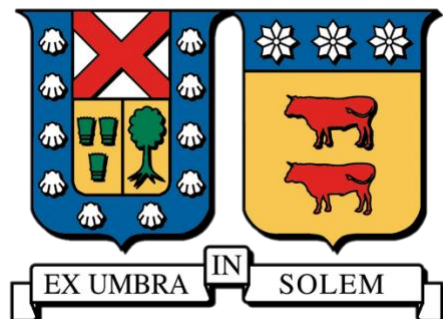


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO-CHILE



**MÉTODOS DE MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE
CARBONO NEGRO GENERADO POR
VEHÍCULOS MOTORIZADOS**

IVO BASTIÁN ORTIZ TELLO

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: DR. MAURICIO OSSES ALVARADO

PROFESORA CORREFERENTE DRA. LINA CASTRO HEREDIA

DICIEMBRE-2024

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a mis padres, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, me formaron como persona y me entregaron valores los cuales estoy orgulloso de portar día a día. Agradezco que siempre me dieron todo su apoyo en estos años universitarios lejos de mi hogar y a punta de esfuerzo me entregaron todas las herramientas necesarias para seguir adelante, sin ustedes nada de esto sería posible.

Agradecer también a mis abuelos que me mimaron y siempre se mostraron felices y orgullosos que uno de sus nietos fuera universitario. Mama Ema, muchas gracias, jamás olvidaré cada detalle que me entregabas el día domingo antes de viajar y que me alentaba a seguir en la semana.

Agradezco a mi novia llego a mi vida en los momentos universitarios más duros y siempre fue mi apoyo incondicional. A mis hermanos, tíos, tía y primos, son parte de mi vida y sé que siempre estaremos los unos a los otros.

A mis amigos y a cada una de las personas que se sumaron en este camino universitario, gracias, este camino lo recorrimos juntos de principio a fin, me llevo los mejores recuerdos de cada uno de ustedes.

Finalmente agradezco al profesor Mauricio Osses, el cual me orientó y me dio calma en todo momento en el cual estaba desorientado, gracias por hacerme partícipe de distintos proyectos los cuales fueron muy provechosos profesionalmente. Agradecer al proyecto USM de investigación multidisciplinaria PI_M_24_03, al FONDECYT 1241477 y al proyecto interno USM 2023 PI_LIR_23_21

Resumen

Por el tubo de escape de los vehículos motorizados se emanan distintos gases y material particulado que dañan tanto al medio ambiente como a la salud de las personas. Dentro del material particulado se encuentra el carbono negro, el cual se produce a través de una combustión incompleta. Este compuesto tiene un impacto climático significativo, con un potencial de calentamiento global entre 460 y 1500 veces superior al del dióxido de carbono. Este estudio analiza las emisiones de carbono negro provenientes de vehículos motorizados en Chile, determinando factores de emisión para todas las categorías vehiculares que circulan en el país. Por ejemplo, los camiones pesados interurbanos bajo la norma EURO I presentan un factor de emisión de 0.417 [g/km]. En el documento se detallan los factores de emisión para cada norma y categoría vehicular. Además, se calculan las emisiones totales de carbono negro emitidas por vehículos en el país para el año 2023 obteniendo un total de 1387 toneladas. También, se realiza una desagregación espacial para todo el territorio nacional identificando claramente los “hotspots” de concentración del contaminante. Finalmente, se realiza una campaña de medición en Portillo, Santiago y el embalse el Yeso, obteniendo datos de concentración de carbono negro en distintos entornos: uno con emisiones exclusivamente vehiculares, otro sin fuentes cercanas y una zona urbana con diversas fuentes de emisión.

Abstract

Different gases and particulate matter are emitted from the exhaust pipes of motor vehicles, which are harmful to the environment and to people's health. Black carbon, a type of particulate matter produced through incomplete combustion, has a significant climate impact, with a global warming potential that is 460 to 1500 times greater than that of carbon dioxide. This study analyzes black carbon emissions from motor vehicles in Chile, determining emission factors for all vehicle categories circulating in the country. For example, heavy intercity trucks under the EURO I standard have an emission factor of 0.417 [g/km]. The document provides a detailed overview of the emission factors for each standard and vehicle category. Additionally, the total emissions of black carbon emitted by vehicles in the country for the year 2023 are calculated, obtaining a total of 1387 tons. A spatial disaggregation is also made for the entire national territory, clearly identifying the "hotspots" of pollutant concentration. Finally, a measurement campaign is carried out in Portillo, Santiago, and the El Yeso reservoir, obtaining black carbon concentration data in different environments: one with exclusively vehicular emissions, another without nearby sources, and an urban area with various emission sources.

Glosario

ATN: Atenuación de la luz transmitida

Babs: Coeficiente de absorción de luz

BC: Carbono negro

CAPE: Energía potencial convectiva disponible

CCVC: Contaminantes climáticos de vida corta

CFC: Clorofluorocarbonos

CH₄: Metano

CN: Carbono negro

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Dióxido de carbono

COPERT: Programa informático para calcular la emisión del transporte por carretera.

DPF: Filtro partículas diésel

eBC: Carbono negro equivalente

EC: Carbono elemental

EURO: Normativas sobre emisiones vehiculares desarrollada por la Unión Europea.

FE: Factor de emisión

HCFC: hidroclorofluorocarbonos

HFCs: Hidrofluorocarbonos

INGEI: Instituto nacional de gases de efecto invernadero

LCV: Vehículo liviano comercial

LPV: Vehículo liviano de pasajero

MMA: Ministerio de medio ambiente

MOT: Motocicletas

NO_x: Óxidos de nitrógeno

O₃: Ozono troposférico

OC: Carbono orgánico

PM: Material particulado

PM2.5: Material particulado fino

SEC: Superintendencia de electricidad y combustibles

VKT: Kilómetros recorridos por cada vehículo

VOCs: Componente orgánico volátil

Índice general

<i>Agradecimientos</i>	<i>i</i>
<i>Resumen</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
<i>Glosario</i>	<i>iv</i>
<i>Introducción</i>	<i>3</i>
<i>Objetivos</i>	<i>5</i>
Objetivo General	5
Objetivos Específicos	5
<i>Capítulo 1</i>	<i>6</i>
<i>1. Estado del Arte</i>	<i>6</i>
<i>1.1. Carbono negro (B.C.)</i>	<i>6</i>
1.1.1. Descripción contaminantes climáticos de vida corta(C.C.V.C)	6
1.1.2. Propiedades del Carbono negro	13
<i>1.2. Métodos de medición de carbono negro</i>	<i>14</i>
1.2.1. Quincey et al. (2009)	18
1.2.2. Amara et al. (2014)	20
1.2.3. Li et al. (2019)	25
<i>Capítulo 2</i>	<i>31</i>
<i>2. Factores de emisión</i>	<i>31</i>
2.1.1. Metodología	32
2.1.2. Cálculo factores de emisión	33
2.1.3. Resultados	34
<i>Capítulo 3</i>	<i>43</i>
<i>3. Inventario nacional</i>	<i>43</i>
<i>3.1. Metodología</i>	<i>44</i>
3.1.1. Cálculo VKT	44
3.1.2. Cálculo inventario nacional	46
3.1.3. Desagregación espacial	47
<i>3.2. Resultados</i>	<i>49</i>
3.2.1. Actividad vehicular(VKT)	49
3.2.2. Emisiones de carbono negro en Chile	50
3.2.3. Desagregación espacial para Chile en el año 2023	58
<i>Capítulo 4</i>	<i>66</i>
<i>4. Campaña de medición</i>	<i>66</i>
<i>4.1. Metodología</i>	<i>67</i>
4.1.1. MICROAETH MA300	67
4.1.2. MicroAeth Manager	69

4.1.3.	Dashboard Aethlabs	70
4.1.4.	Embalse el Yeso	73
4.1.5.	Portillo	73
4.1.6.	Santiago Centro	74
4.2.	Resultados	74
4.2.1.	Embalse el Yeso	74
4.2.2.	Portillo	77
4.2.3.	Santiago centro	79
Capítulo 5		81
5.	Conclusiones	81
6.	Bibliografía	83

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de los múltiples impactos asociados al carbono negro [5].-----	8
Figura 2: Forma pictórica que muestra la perturbación en el perfil de temperatura para una condición de alto BC en comparación con una condición de bajo carbono negro (BC). En donde la línea morada representa la temperatura de la parcela de aire y la línea roja la temperatura ambiente. Se destaca la línea roja discontinua para baja concentración de carbono negro y la roja continua para alta concentración [6].-----	9
Figura 3: Tendencia de las emisiones de carbono negro a nivel nacional entre 1990 y 2020 [7]. ----	10
Figura 4: Emisiones de escape totales según el tipo de vehículo en Chile, 1990-2020 [9]. -----	12
Figura 5: La distribución de tamaño numérico normalizada del carbono negro sin recubrimiento a partir de observaciones in situ de emisiones urbanas [11] y principalmente de fuentes de tráfico[12][10].-----	13
Figura 6: Ejemplos de morfologías de carbono negro a partir de imágenes de microscopía electrónica de transmisión [13] y partículas irregulares generadas numéricamente [10].-----	14
Figura 7: Diagramas esquemáticos de varios instrumentos comunes para medir el coeficiente de absorción: (A) AE de un solo punto; (b) AE de doble punto; (c) PSAP; (d) MAAP; (e) PAX; (f) interferómetro Jamin plegado [14]. -----	16
Figura 8: Diagramas esquemáticos y termograma de TOA [14]. Donde TOR es “Thermal optical reflectance method” y TOT es “Thermal optical transmittance method”.-----	17
Figura 9: Diagramas esquemáticos de los instrumentos de detección de carbono negro refractario (rBC): (a) SP2; (b) SP-AMS [14]. -----	18
Figura 10: Concentraciones medias diarias de carbono elemental de un sitio junto la acera de Londres [15] -----	19
Figura 11: Mediciones medias diarias de etalómetro y concentración de carbono elemental en un sitio rural de Escocia [15]. -----	20
Figura 12: (A) Distribución del tamaño de las partículas medidas por el EEPS y SP2 promediada en una vuelta por carretera. (b) Distribución de masa de SP2 se ajusta asumiendo una distribución lognormal.-----	23
Figura 13: Gráficos de caja de (a) velocidad (b) aceleración (c) concentración de UFP (d) concentración de acumulación (e) BC (AE-42) (f) albedo de dispersión única a 532 nm para diferentes condiciones de conducción. Los bigotes corresponden a los percentiles 10 y 90 y el diamante negro corresponde al valor medio. -----	24
Figura 14: Diagrama de caja y bigote para la distribución de las proporciones <i>ECBC</i> (a PAX) de pares individuales de instrumentos a través de los tres grupos. Dentro de cada grupo, cinco subgrupos de proporciones <i>ECBC</i> (de la izquierda Offline OCEC (IMPROVE-A)/PAX-870, Offline OCEC (NIOSH-870)/PAX-870, SP2/PAX-870, TAP/PAX-870 y CLAP/PAX-870) se muestran en diferentes colores. Los rangos de la caja presentan el cuartil inferior (percentil 25) y el cuartil superior (percentil 75) y la altura de la caja es el rango intercuartil (IQR). Los bigotes corresponden a los percentiles 10 y 90. La línea en el centro de la caja representa la mediana, y los puntos representan los valores atípicos. 29	
Figura 15: Metodología para la búsqueda de nuevos factores de emisión de carbono negro en el cálculo y revisión de inventarios.-----	33
Figura 16:Diagrama de cálculo VKT [42].-----	46
Figura 17: Diagrama de flujo de la metodología empleada para lograr la desagregación espacial. --	48

Figura 18: Comparativa de consumo de combustible en el período de años desde 1990 hasta 2023, se observa la venta real de combustible informada por la SEC y el consumo calculado corregido por su respectivo factor de corrección. -----	49
Figura 19: Actividad vehicular(VKT) de Chile desde el año 1990 hasta el 2023. La línea azul representa la actividad vehicular de todos los vehículos que se trasladan en el país mientras que la gris con la naranja representan a la actividad vehicular por combustible. -----	50
Figura 20: Emisiones anual de carbono negro a nivel nacional según categoría vehicular. -----	52
Figura 21: Emisiones anual de carbono negro a nivel nacional según la región. -----	54
Figura 22: Emisiones anual de carbono negro a nivel nacional según el combustible utilizado. -----	54
Figura 23: Emisiones anual de carbono negro a nivel nacional según la norma utilizada en el parque vehicular. -----	55
Figura 24: Curvas normalizadas de emisiones de contaminantes a través de los años respecto a 1990. -----	56
Figura 25; Comparación resultados obtenidos con MMA. -----	57
Figura 26: Comparación de resultados obtenidos con Osses et. al. -----	58
Figura 27: Desagregación espacial de zona norte, zona centro y zona sur hasta el fin de la ruta 5. ---	59
Figura 28: Desagregación de emisiones de carbono negro para la ciudad de Santiago. -----	60
Figura 29: Desagregación de emisiones de carbono negro para la ciudad de Valparaíso. -----	61
Figura 30: Desagregación de emisiones de carbono negro para la ciudad de Concepción. -----	62
Figura 31: Desagregación de emisiones de carbono negro para la ciudad de Rancagua -----	63
Figura 32: Interfaz microAeth Manager conectado al equipo MA300 utilizado junto con datos para descargar luego de una toma de datos. -----	69
Figura 33: Interfaz previa para la utilización del Dashboard. -----	70
Figura 34: Gráfica entregada por el Dashboard para cada una de las longitudes de onda. -----	71
Figura 35: Datos entregados por el Dashboard post procesamiento. -----	72
Figura 36: Concentración de BC primer punto de medición en el Embalse el Yeso. -----	74
Figura 37: Concentración de BC segundo punto de medición en el Embalse el Yeso. -----	75
Figura 38: Concentración de BC inicio en Embalse el Yeso termino en pueblo San José de Maipo. --	75
Figura 39: Concentración de BC desde estación de servicio hasta centro de ski Portillo. -----	77
Figura 40: Concentración de BC en Portillo. -----	77
Figura 41: Concentración de BC desde centro de ski Portillo hasta estación de servicios. -----	78
Figura 42: Concentración de BC en Agustinas con Bandera previo al día nacional sin autos. -----	79
Figura 43: Concentración de BC durante el día nacional sin autos, en la intersección de Agustinas con Bandera. -----	80

Índice de tablas

Tabla 1: Actividades que causaron emisiones de metano antropogénico [4].	7
Tabla 2: Emisiones anuales totales de escape producidas por el transporte por carretera en Chile, 1990-2020 [9].	11
Tabla 3: Emisiones anuales totales de escape por tipo de vehículo en Chile, 1990-2020 [9].	12
Tabla 4: Comparación por pares de las mediciones promediadas de BC en período de 2 segundos para todo el conjunto de datos.	21
Tabla 5: Comparación por pares de las mediciones promediadas de BC en período de 10 segundos para todo el conjunto de datos.	22
Tabla 6: Resumen de los instrumentos BC utilizados durante la campaña de laboratorio FIREX 2016	27
Tabla 7: <i>EFBC</i> derivado de los cinco instrumentos a través de los tres grupos de incendios (media \pm desviación estándar). El número de incendios para cada combinación de grupo e instrumento se muestra entre paréntesis.	29
Tabla 8: Categorías vehiculares y normas que rigen a estas.	31
Tabla 9: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada en FE de buses para el modelo. Fuente [45].	35
Tabla 10: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de camiones livianos para el modelo [45].	35
Tabla 11: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para camiones medianos para el modelo [43].	35
Tabla 12: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de camiones livianos para el modelo [45].	36
Tabla 13: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) diésel para el modelo [43].	36
Tabla 14: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) a gasolina para el modelo [45] Los valores de incertidumbre no especificada son propuestos por Bond [43].	37
Tabla 15: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) a gasolina para el modelo [46].	37
Tabla 16: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) a diésel para el modelo [46].	38
Tabla 17: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de camiones para el modelo [46].	38
Tabla 18: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de categoría L que incluye todo tipo de motocicletas para el modelo [46].	39
Tabla 19: Fracciones de BC/PM2.5 para tecnologías de emisión de vehículos en Chile [9].	40
Tabla 22: Factores de emisión de carbono negro por categoría vehicular en el ámbito interurbano	40
Tabla 23: Factores de emisión de carbono negro por categoría vehicular en el ámbito urbano	41
Tabla 20: Nivel de actividad anual por región y tipo de vehículo [9].	43
Tabla 24: Emisiones de carbono negro anual desde 1990 hasta 2023 con su respectiva comparación respecto a 1990.	51
Tabla 25: Emisiones de carbono negro anual por categoría vehicular cada 5 años.	53

Tabla 25: Características del equipo MA300	67
Tabla 27: Configuración utilizada en equipo de medición.	73
Tabla 28: Datos críticos de medición punto 1.	74
Tabla 29: Datos críticos de medición punto 2.	75
Tabla 30: Puntos críticos de medición trayecto El Yeso-San José de Maipo.	76
Tabla 31: Puntos críticos de medición trayecto estación de servicio-Portillo.	77
Tabla 32: Puntos críticos de medición en Portillo.	78
Tabla 33: Puntos críticos de medición Portillo-estación de servicio.	78
Tabla 34: Puntos críticos de medición previo al día nacional sin autos.	79
Tabla 35: Puntos críticos de medición día nacional sin autos.	80

Introducción

La contaminación vehicular representa uno de los principales desafíos ambientales y de salud pública en la sociedad actual. En las ciudades, los vehículos motorizados constituyen una fuente significativa de emisiones contaminantes, en incluyendo gases de efecto invernadero y partículas finas. Estas emisiones contribuyen tanto al cambio climático como también en la generación de enfermedades respiratorias en la población.

Dentro de los contaminantes emitidos por los vehículos motorizados destaca el carbono negro. Este contaminante se produce a partir la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. Sus partículas, extremadamente finas, tienen la capacidad de absorber radiación solar, contribuyendo al calentamiento global. Además, el carbono negro puede depositarse en todas las superficies que se encuentren cercanas, en las ciudades, por ejemplo, se depositan en las viviendas permitiendo que estas aumenten la temperatura de las paredes, como también sea inhalado en todo momento por las personas, otro punto importante es que se deposita tanto en glaciares como en la nieve elevando la temperatura de estos acelerando su derretimiento.

La estimación anual de las emisiones de carbono negro provenientes del parque vehicular en Chile es de suma relevancia. En el país las emisiones de carbono negro producidas por vehículos motorizados representa un 11,5 % del total de la producción de este contaminante [1]. En Chile el inventario entregado por el sistema nacional de inventarios de gases de efecto invernadero es del año 2020 por lo que se necesita obtener un documento actualizado para observar cómo se ha comportado este contaminante hasta la actualidad. Esta estimación permite identificar tendencias, analizar el efecto de las normas vehiculares aplicadas en los años que se obtengan y establecer metas concretas para su reducción, considerando que el parque vehicular crece cada año.

Finalmente, la desagregación espacial de estas estimaciones a lo largo del territorio chileno es sumamente importante, considerando las vías urbanas e interurbanas. Analizar las concentraciones de un contaminante considerando las diferencias comunales y de todas las vías terrestres permite identificar rápidamente las áreas prioritarias en donde se deben generar medidas de mitigación, optimizando los recursos a invertir y el tiempo que es crucial en la lucha contra el cambio climático.

En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica sobre los métodos de carbono negro, sus funcionamientos, las características de ellos y como las propiedades del carbono negro afecta su rendimiento. También se definen los factores de emisión de carbono negro para cada categoría vehicular con sus respectivas normas EURO.

Posterior a ello se calcula la actividad vehicular en todo el territorio nacional, que permitirá junto a los factores de emisión obtener las emisiones de carbono negro totales en todo el país. Finalmente se realiza una desagregación espacial para todo Chile con estos valores, donde se identifican claramente los puntos donde se encuentra la mayor concentración de este contaminante en el año.

Objetivos

Objetivo General

- Evaluar métodos de medición y estimación de carbono negro generado por vehículos motorizados.

Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la generación y métodos de medición de carbono negro en vehículos motorizados.
- Determinar factores de emisión de Carbono Negro para distintas categorías vehiculares.
- Actualizar inventario nacional de emisiones de carbono negro para vehículos motorizados, con desagregación espacial.
- Realizar campaña de medición de carbono negro en zonas urbanas identificadas con distintos niveles de emisión de carbono negro.

Capítulo 1

1. Estado del Arte

1.1. Carbono negro (B.C.)

1.1.1. Descripción contaminantes climáticos de vida corta(C.C.V.C)

Dentro del universo de contaminantes que aportan en el cambio climático se encuentran los contaminantes climáticos de vida corta como los de vida larga. La diferencia entre ambos es la duración del contaminante dentro de la atmósfera, en donde los contaminantes de vida corta logran estar latentes en un rango de días a décadas, mientras que los contaminantes de vida larga pueden estar presentes en siglos hasta milenios antes de ser eliminados de la atmósfera. Si bien es necesario restringir la emisión de ambos tipos de contaminantes, es importante reducir la cantidad de contaminantes climáticos de vida corta debido a su efecto inmediato sobre el planeta, dentro de este espectro de contaminantes se destacan algunos como los principales motores del calentamiento global, los cuales son el Metano (CH₄), Hidrofluorocarbonos (HFCs), Ozono troposférico (O₃) y el Carbono negro.

Ozono troposférico: El ozono está presente en la atmósfera tanto a gran altura, constituyendo la famosa capa protectora, como próximo a la superficie terrestre, donde, por el contrario, es nocivo para el ambiente y la salud del hombre. Haciendo referencia concretamente al ozono a baja altura, o sea al de la tropósfera, podríamos decir, además de que posee una dinámica muy compleja en la que también están involucradas otras especies químicas, que depende de las condiciones atmosféricas. Este ozono se forma a través de una red de reacciones en las que intervienen numerosos precursores emitidos a la atmósfera por la industria y por el tráfico de vehículos [2]. En esta red de reacciones destacan principalmente la reacción del sol con monóxido de carbono, óxido de nitrógeno como también los compuestos orgánicos volátiles. Se estima que el ozono es responsable cada año de alrededor de 150 mil muertes prematuras en el mundo. Además, disminuye la capacidad de los cultivos para absorber CO₂, reduciendo su rendimiento [3].

Metano: El metano es un poderoso gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento veinte veces mayor que el CO₂. Permanece en la atmósfera aproximadamente doce años. Además de influir en el clima, este contaminante afecta la salud humana y los ecosistemas, especialmente por su rol como propulsor del ozono troposférico [3]. En la tabla 1 se observa que actividades producen este contaminante.

Tabla 1: Actividades que causaron emisiones de metano antropogénico [4].

Sectores que causan emisiones de metano			
Energía	Industria	Agricultura	Desperdicios
Actividades de minería del carbón.	Producción química	Manejo de estiércol	Vertederos de Residuos Sólidos
Sistemas de gas natural y petróleo.	Producción de hierro y acero	Fermentación entérica	Aguas residuales
Combustión estacionario y móvil.	Productos minerales	Cultivo de arroz	Combustión de residuos
Combustión de biomasa.	Producción química	Otro	Uso de disolventes y otros productos
	Producción de metales		Vertederos de Residuos Sólidos
	Producción petroquímica		Aguas residuales
	Producción carburo de silicona.		Combustión de residuos

Hidrofluorocarbonos: Los hidrofluorocarbonos (HFC) entraron al mercado en reemplazo de los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) cuando la comercialización de estos fue limitada por el Protocolo de Montreal. Dicho protocolo, que entró en vigor en 1989, tuvo por objeto proteger la capa de ozono, degradada por los CFC al punto de producirle un agujero sobre la Antártida. El uso de los HFC se da comúnmente en aires acondicionados, refrigeración y aerosoles, entre otros. No se sabe de fuentes naturales de emisión de estos contaminantes [3]. Actualmente en comparación con los demás contaminantes de climáticos de vida corta, sus concentraciones son menores, aunque si no se mantiene un plan de mitigación estos pueden aumentar considerablemente.

Carbono negro: Dentro de los contaminantes climáticos de vida corta el carbono negro destaca ya que a diferencia de los demás este no es un gas sino que un aerosol, el cual corresponde a parte de la composición sólida que se emite en una combustión incompleta, ya sea de combustibles fósiles, biomasa en general y biocombustibles. Es parte importante del material particulado 2.5.

Aunque el carbono negro no es un gas de efecto invernadero, sí contribuye al calentamiento global con un impacto entre 460 a 1500 veces mayor que el dióxido de carbono. Su potencial de interferir en el clima adquiere tres formas: En la primera, sus partículas oscuras absorben la luz solar, elevando los niveles de la temperatura a su alrededor. En la segunda, el carbono negro actúa como agente acelerador en el derretimiento de glaciares y nieve al depositarse sobre ellos oscureciéndolos. La tercera forma, referida a la interacción del carbono negro con las nubes y a la influencia que tiene en su reflectividad, duración, estabilidad y precipitación, requiere más estudios, pues aún existe incertidumbre sobre el efecto climático causado. El carbono negro

permanece en la atmósfera entre unos pocos días a unas pocas semanas[3]. En la figura 1 se observan algunos impactos que el carbono negro tiene sobre el planeta.

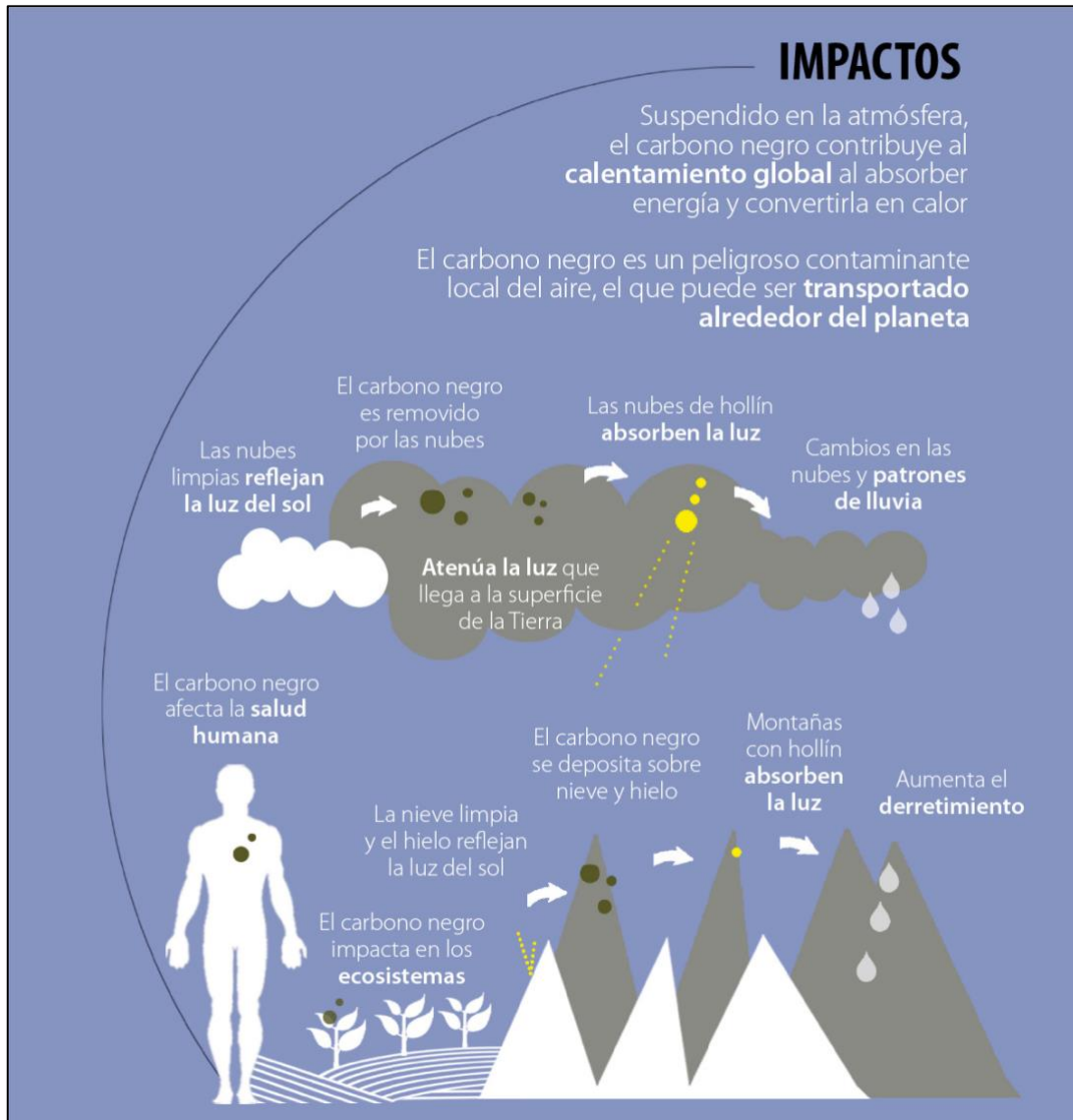


Figura 1: Esquema de los múltiples impactos asociados al carbono negro [5].

En un estudio denominado Influence of Black Carbon Aerosol on the Atmospheric Instability [6] se estudia el efecto del carbono negro sobre la atmósfera, en donde se destaca la alteración del carbono negro en un indicador climático C.A.P.E., el cual mide la inestabilidad atmosférica permitiendo tormentas y/o lluvias. En el siguiente gráfico realizado por los investigadores se observa claramente como la alta concentración de carbono negro afecta este indicador.

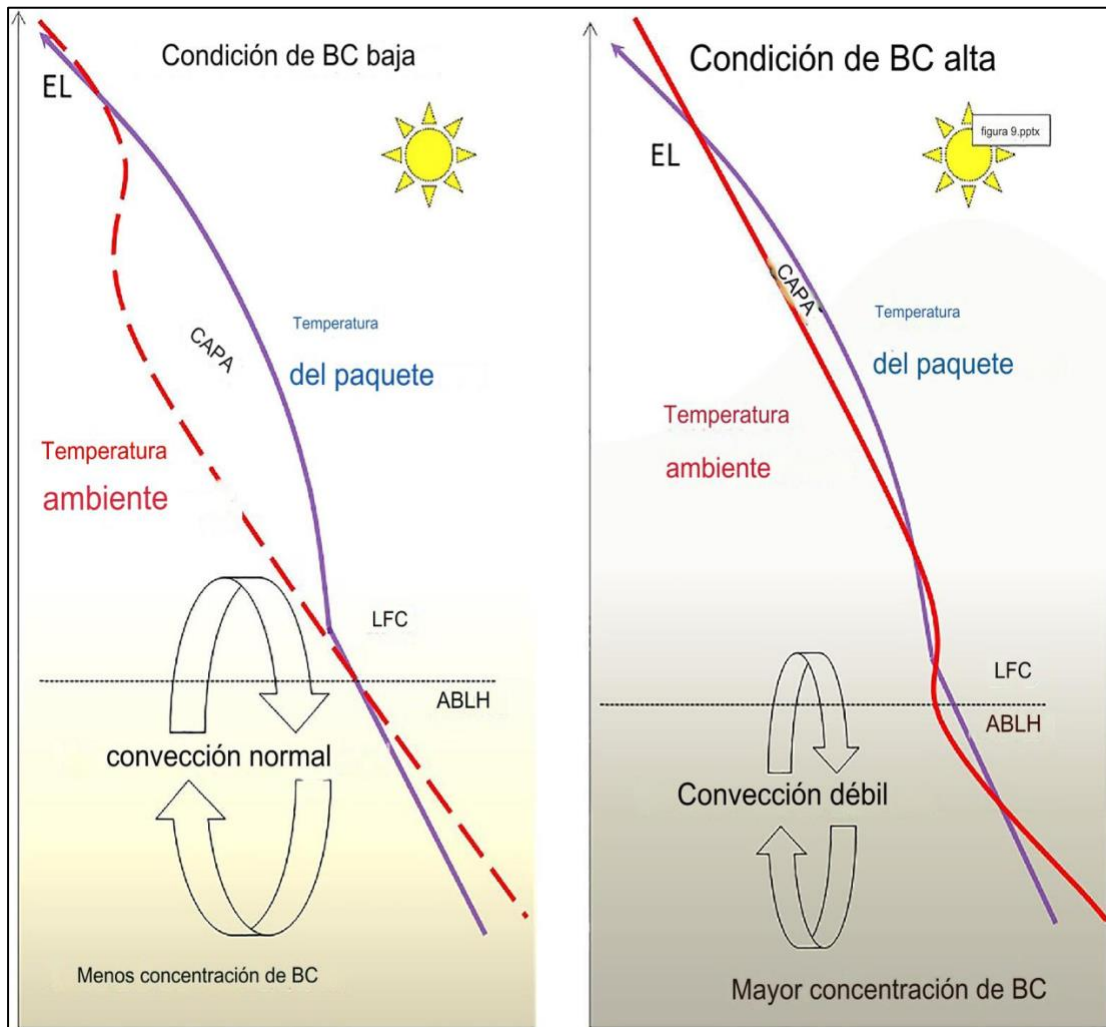


Figura 2: Forma pictórica que muestra la perturbación en el perfil de temperatura para una condición de alto BC en comparación con una condición de bajo carbono negro (BC). En donde la línea morada representa la temperatura de la parcela de aire y la línea roja la temperatura ambiente. Se destaca la línea roja discontinua para baja concentración de carbono negro y la roja continua para alta concentración [6].

A nivel nacional, en 2020 las emisiones de carbono negro alcanzaron las 19,8 kton, lo que representó un aumento del 49% respecto de 1990 y un incremento de 6% respecto del 2018. La tendencia de la serie está dominada en casi todo el periodo por las emisiones producto de la quema de combustibles fósiles y biocombustibles, las que se contabilizan bajo el sector Energía, sin embargo, en algunos años (1998, 1999, 2002, 2014, 2015 y 2017) las emisiones producto de incendios forestales, emisiones contabilizadas en el sector UTCUTS, cambian la tendencia de la serie pasando a ser parte importante de las emisiones de BC a nivel nacional. Esto último queda claramente reflejado en el año 2017, en donde las emisiones totales del país llegaron a los 31,4 kton de BC y las emisiones producto de incendio forestales alcanzan un nivel similar a las emisiones del sector Energía [7]. En la figura 3 se puede apreciar que las emisiones de carbono negro en este periodo de tiempo es producido en mayor parte por el sector

energía, en donde la tendencia año tras año, es aumentar la cantidad de contaminante anual.

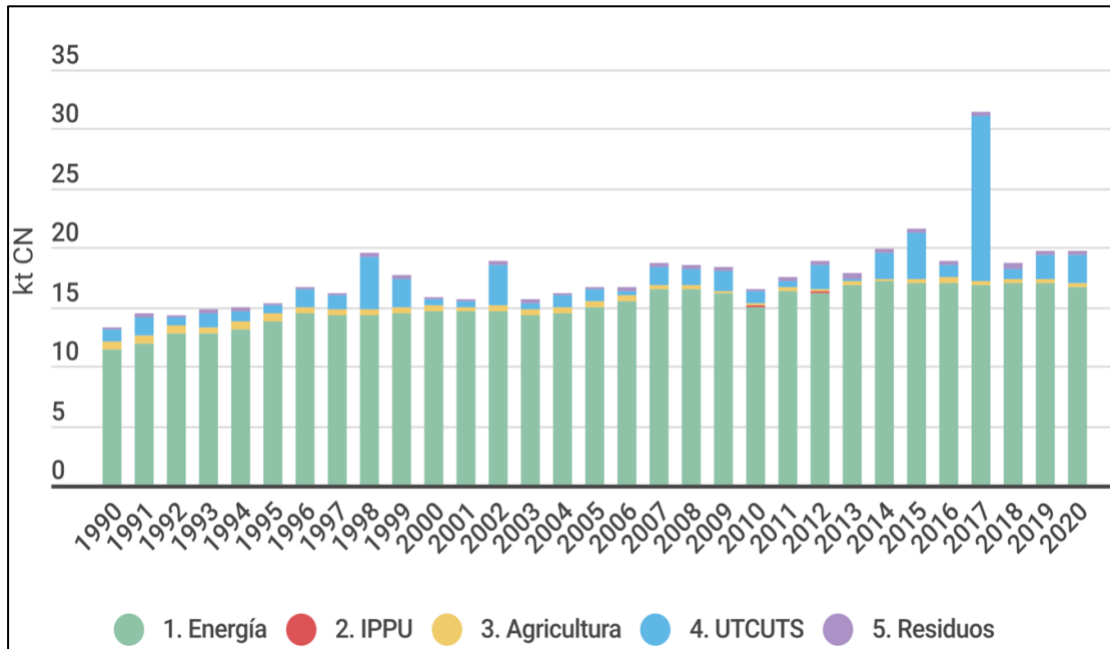


Figura 3: Tendencia de las emisiones de carbono negro a nivel nacional entre 1990 y 2020 [7].

En el 2020 Chile actualiza su contribución en el acuerdo de Paris, en donde por primera vez se compromete a una reducción de al menos un 25% de las emisiones totales de carbono negro al 2030, con respecto al 2016. Este compromiso se implementará principalmente a través de las políticas nacionales asociadas a calidad del aire. Además, será monitoreado a través de un trabajo permanente y periódico en la mejora de la información del inventario de carbono negro [8].

En el artículo, “Mapas de distribución espacial de alta resolución de las emisiones de gases de escape del transporte por carretera en Chile 1990-2020” [9], se realiza el cálculo de un inventario nacional de emisiones de la flota de vehículos disponibles hasta aquella fecha. Para el cálculo de este inventario se realiza la categorización de la flota vehicular, como también los años en que se comenzaron a aplicar las normativas en los automóviles en circulación. Con lo anterior se obtienen los siguiente resultados hasta el año 2020.

Tabla 2: Emisiones anuales totales de escape producidas por el transporte por carretera en Chile, 1990-2020 [9].

Contaminante	Año							(2020-1990)/ 1990 crecimiento(+) y decrecimiento
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	
$CO_2 [Tg * año^{-1}]$	8.6	12.4	14.6	14.9	19.2	22.1	26.6	+207.7%
$NO_x [t * año^{-1}]$	75.0	100.0	103.0	101.1	99.7	87.4	90.3	+20.4%
$BC [t * año^{-1}]$	1.0	1.4	1.6	1.8	2.1	1.6	1.2	16.9%
$PM_{2.5} [t * año^{-1}]$	2.0	2.7	2.8	3.0	3.1	2.3	1.7	-12.5%
$CH_4 [t * año^{-1}]$	2.6	3.4	3.3	2.7	2.0	1.3	0.7	-71.6%
$CO [t * año^{-1}]$	546.8	671.7	594.8	436.4	247.0	155.0	85.1	-84.4%
$VOC_s [t * año^{-1}]$	54.6	67.9	59.6	43.2	25.1	15.0	6.8	-87.5%

Estos resultados se tabulan a continuación respecto a la categoría vehicular. Por razones del estudio, se presenta el ítem exclusivo de BC.

Tabla 3: Emisiones anuales totales de escape por tipo de vehículo en Chile, 1990-2020 [9].

	Categoría	Año						
		1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
$BC[t * año^{-1}]$	LPV	0.08	0.10	0.12	0.18	0.25	0.20	0.13
	Bus	0.35	0.45	0.46	0.47	0.42	0.29	0.27
	Camiones	0.52	0.74	0.75	0.80	0.78	0.54	0.39
	LCV	0.07	0.13	0.22	0.30	0.59	0.55	0.40
	Taxi	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
	MOT	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Para una mejor visualización y observar de mejor forma lo que representa dentro del total cada categoría se presenta la figura 4.

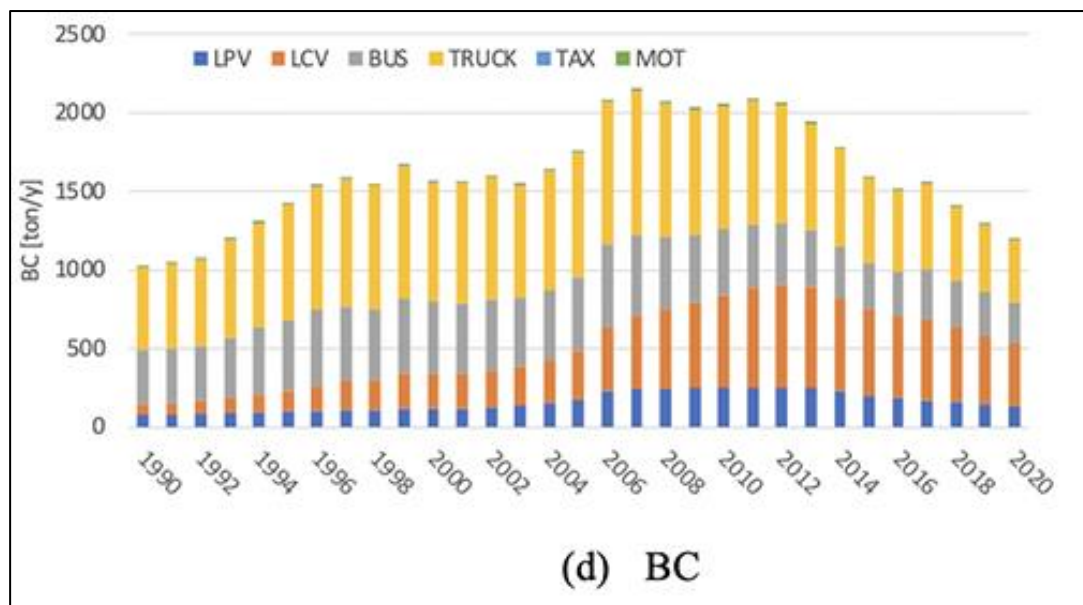


Figura 4: Emisiones de escape totales según el tipo de vehículo en Chile, 1990-2020 [9].

1.1.2. Propiedades del Carbono negro

Propiedades microfísicas: Se han analizado muchas campañas de campo y mediciones de laboratorio para determinar las características microfísicas del BC y los estados de mezcla que influyen significativamente en sus propiedades ópticas. Consideramos algunos hechos esenciales sobre las propiedades de BC derivados de observaciones globales en el desarrollo de nuestro modelo: los núcleos de BC muestran una distribución lognormal con diámetros medios de conteo (CMD) que varían de 50 a 80 nm para las emisiones urbanas [10]. En este estudio se realiza un gráfico comparativo entre la información entregada por Bond [11] en el artículo “Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment” y por Liu et al en el artículo “Size distribution, mixing state and source apportionment of black carbon aerosol in London during wintertime”. En este gráfico se aprecia con línea continua la observación entregada por Bond y con línea punteada el aporte de Liu.

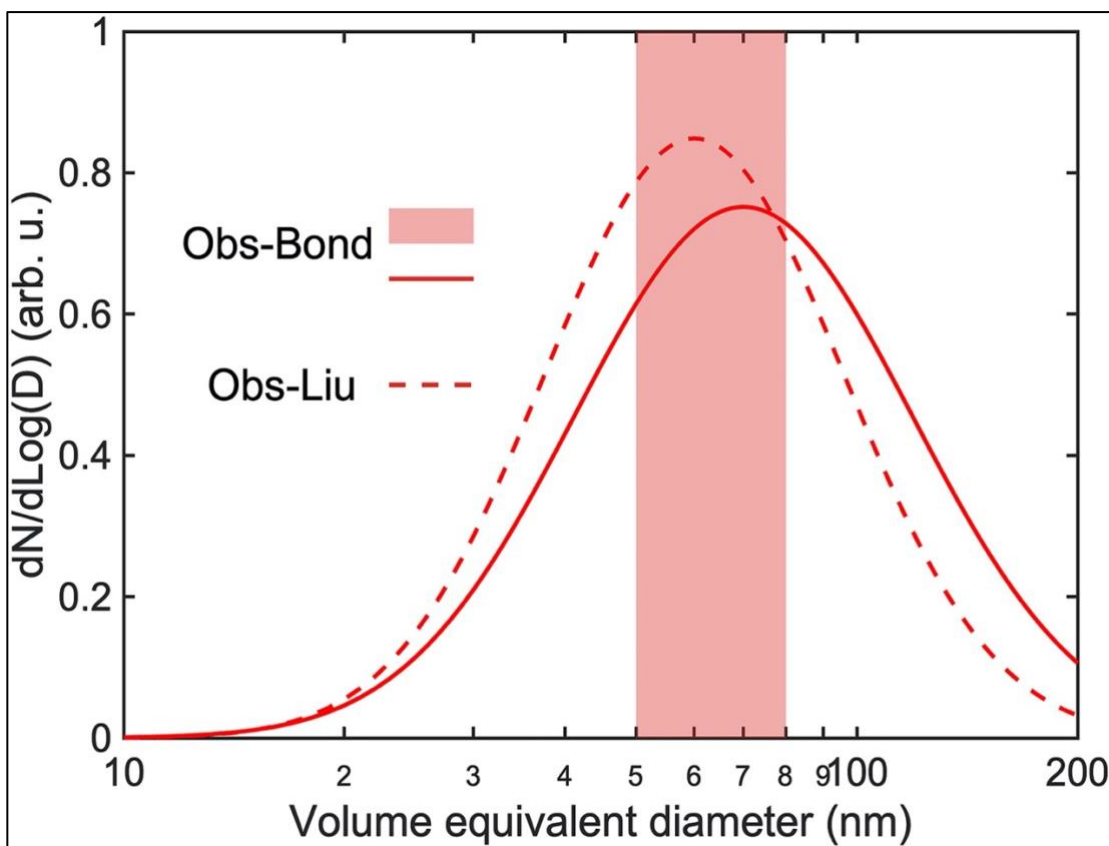


Figura 5: La distribución de tamaño numérico normalizada del carbono negro sin recubrimiento a partir de observaciones in situ de emisiones urbanas [11] y principalmente de fuentes de tráfico[12][10].

Propiedades ópticas: La mejora de la absorción de luz, de las partículas de BC es uno de los parámetros más importantes pero inciertos en la cuantificación de los efectos radiativos de BC y se define como la relación entre los coeficientes de absorción de masa antes y después de mezclar con otros componentes. La absorción de la luz varía mucho debido a las propiedades de las partículas BC, así como a las incertidumbres de la medición. Los valores de energía absorbida varían de 1 a 1,8 [-] cuando se utilizan

instrumentos tecnológicamente avanzados para las propiedades ópticas y microfísicas de carbono negro, como el SP2, el espectrómetro de masas de aerosoles de partículas de hollín (SP-AMS), el analizador de carbono orgánico y carbono elemental (OC-EC), el analizador fotoacústico, espectrómetro (PAS), medidor de extinción fotoacústico (PAX), espectrómetro fotoacústico de hollín de tres longitudes de onda (PASS-3) y etalómetro (AE)[10]. Para fines de esta investigación se destaca el valor de energía absorbida realizada con etalómetro que es de 1.5 ± 0.48 [-].

Las propiedades ópticas se vuelven un factor importante en la caracterización del carbono negro ya que estas propiedades son las que aportan directamente en la relación del carbono negro sobre el calentamiento global. La morfología de las partículas de carbono negro y la capacidad de este para unirse una a otra partícula explica la gran incertidumbre que existe en la utilización de equipos de medición y definiciones en la caracterización del contaminante. En la siguiente figura se observan ejemplos de la distribución de las partículas de carbono negro.

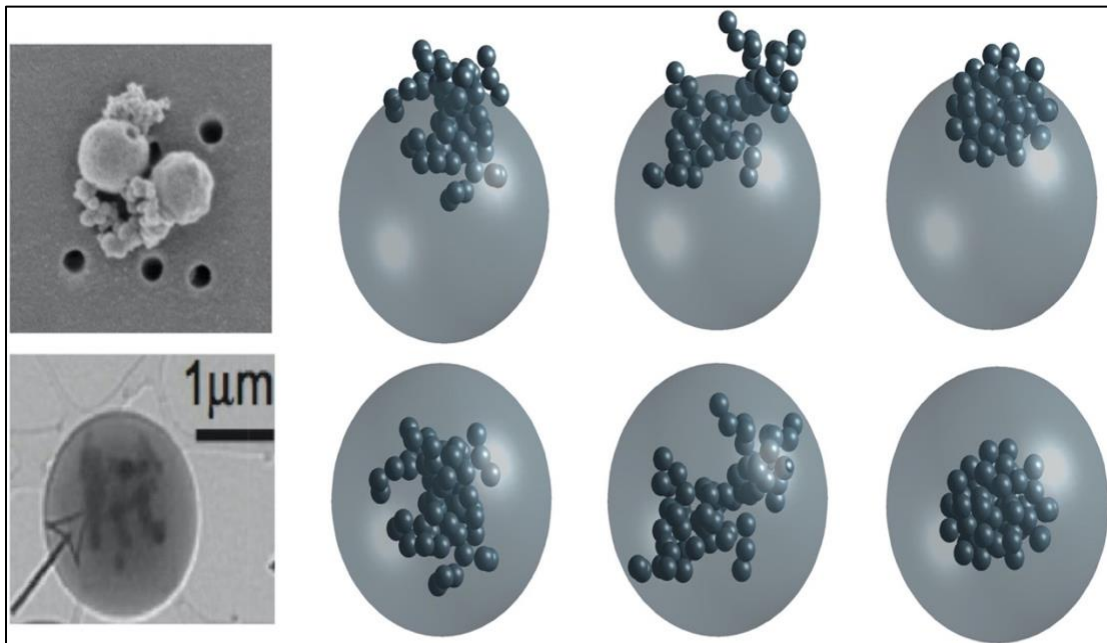


Figura 6: Ejemplos de morfologías de carbono negro a partir de imágenes de microscopía electrónica de transmisión [13] y partículas irregulares generadas numéricamente [10].

1.2. Métodos de medición de carbono negro

Para la medición del carbono negro existen muchos métodos utilizados al día de hoy, entre ellos se destacan diferencias principalmente para el objetivo de medición como también el tipo de combustión que emite carbono negro, ya sea emanado por motores a combustión interna, industrias, biomasa, entre otros.

Los métodos más utilizados por la comunidad científica para realizar campañas de medición con son los siguientes:

Absorción óptica: El método óptico es una técnica indirecta utilizada para medir la concentración de masa de BC. Implica determinar el eBC midiendo los babs de carbono

de absorción de luz (LAC) y luego aplicando el factor de conversión MAC (sección transversal de absorción masiva, $C = \text{babs}/\text{MAC}$). Sobre la base del principio de medición, los métodos ópticos se pueden clasificar en in situ y técnicas basadas en filtros [14].

Técnica basado en filtros: El principio de medición es cuantificar indirectamente los babs de PM depositados utilizando la cantidad de ATN del láser a través del filtro. De acuerdo con la ley Beer-Lambert:

$$I = I_0 e^{-b_{pf}x}$$

$$b_{pf} = \frac{A \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)}{V \Delta t}$$

Donde I_0 es la intensidad de la luz antes de la transmisión, I es la intensidad de la luz después de la transmisión, $b_{pf} (m^{-1})$ es el babs producido por PM y el filtro, x es el grosor del filtro (m), A es el área de recolección del filtro (m^2), V es la velocidad del gas que pasa a través del filtro ($\frac{m^3}{s}$), y Δt es el tiempo de muestreo (s). La precisión de b_{pf} se basa en el hecho de que el cambio en la intensidad del láser solo es causado por el efecto de absorción de luz del filtro y el PM [14].

Técnica in situ: La técnica basada en filtros mide el babs de PM depositado, mientras que la técnica in situ mide el babs del PM en suspensión. La técnica in situ ofrece ventajas como la medición en tiempo real y continua, sin interferencia de la carga y efectos de dispersión del filtro. Sin embargo, no tiene en cuenta el sesgo de los componentes que no son de BC en babs y es susceptible a la interferencia de los componentes de gas y el vapor de agua. Comúnmente esta técnica incluye un espectrómetro fotoacústico, interferometría foto termal y un método diferencial. Un ejemplo de esta técnica es el PAS (Espectroscopía Fotoacústica), en donde la muestra se coloca en una celda fotoacústica y se expone a la luz monocromática. La muestra absorbe la energía de la luz y la convierte en energía térmica, causando el calentamiento periódico de ella y del medio circundante de acuerdo con la frecuencia de modulación de la luz. Esto conduce a la generación de ondas de presión periódicas en el medio. Un micrófono de cerámica piezoeléctrico altamente sensible detecta estas ondas de presión y las convierte en señales fotoacústicas. Al ajustar la longitud de onda de la luz incidente, se obtiene un espectro de señales fotoacústicas dependientes de la longitud de onda, que representan las propiedades del medio dentro de la célula fotoacústica [14].

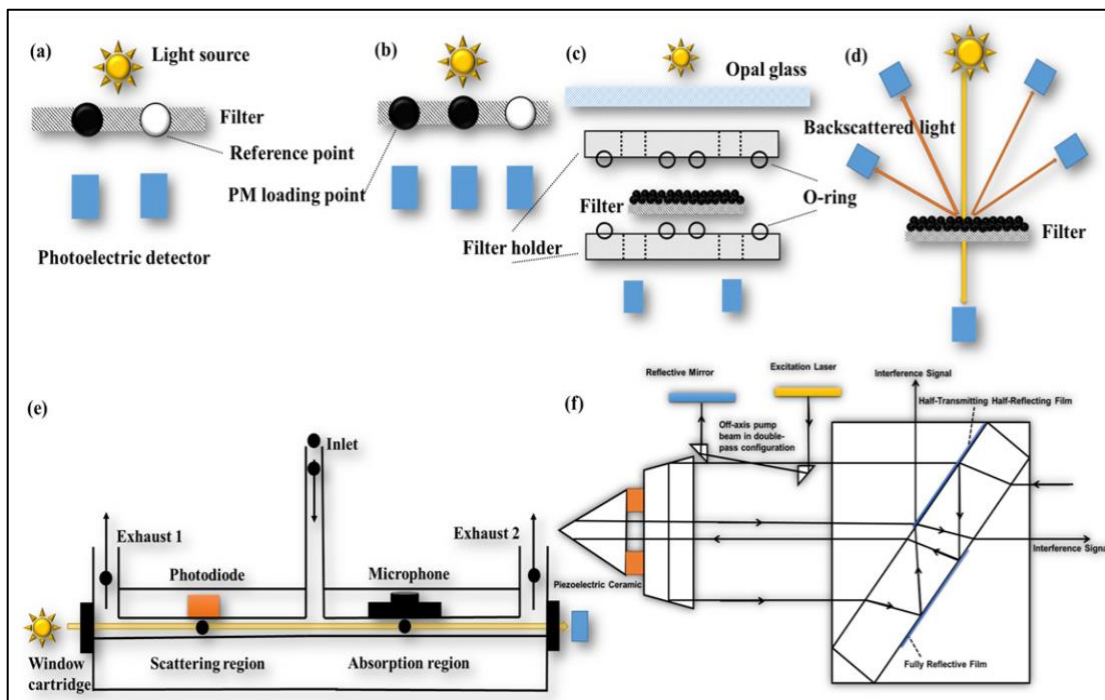


Figura 7: Diagramas esquemáticos de varios instrumentos comunes para medir el coeficiente de absorción: (A) AE de un solo punto; (b) AE de doble punto; (c) PSAP; (d) MAAP; (e) PAX; (f) interferómetro Jamin plegado [14].

Térmico óptico TOA (análisis termo-óptico): ampliamente empleado en redes de monitoreo atmosférico a largo plazo utilizadas por varios países y organizaciones. El principio implica la evolución secuencial de OC y EC en función de sus diferentes propiedades térmicas y ópticas bajo diferentes temperaturas y condiciones atmosféricas. Inicialmente, un filtro que contiene PM se calienta en un horno, siguiendo un protocolo térmico-óptico predefinido. Los diferentes protocolos consisten en configuraciones de parámetros específicos, siendo la temperatura y el tiempo de residencia las variables principales. La temperatura en el modo inerte (usando He como gas portador) es relativamente baja, lo que facilita la evolución del OC y la formación de carbono pirolítico (PC). Posteriormente, en el modo de oxidación (usando He + O₂ como gases portadores), se aplican temperaturas más altas para inducir la combustión de PC y EC. El programa de temperatura determina el número de pasos de calentamiento, la temperatura en cada paso y el tiempo de residencia correspondiente. Después de gasificar el componente carbónico, entra en un horno de oxidación junto con el gas portador, donde se oxida a CO₂. Este CO₂ resultante se cuantifica mediante el análisis infrarrojo no dispersivo (NDIR) o se reduce aún más a CH₄ utilizando un generador CH₄, y el CH₄ generado se cuantifica utilizando un detector de ionización de llama (FID). Al analizar la cantidad de carbono evolucionado en las diferentes etapas de calentamiento, se puede calcular el contenido específico de OC y EC [14].

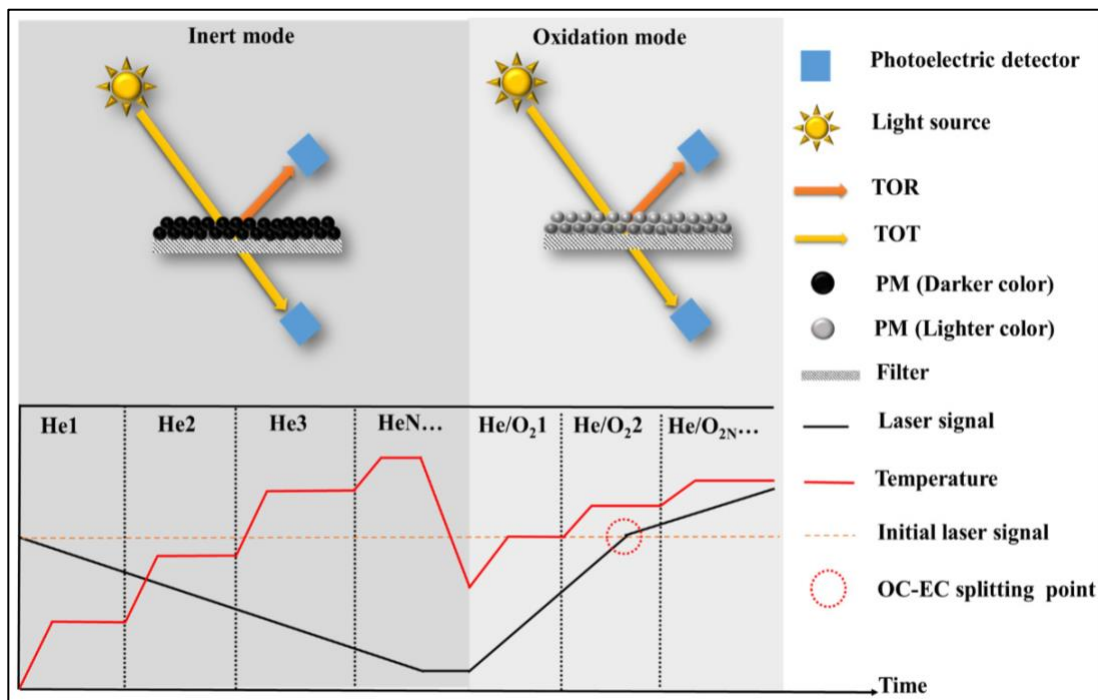


Figura 8: Diagramas esquemáticos y termograma de TOA [14]. Donde TOR es “Thermal optical reflectance method” y TOT es “Thermal optical transmittance method”.

Refractario: El principio fundamental detrás de LII (Incandescencia Inducida por Láser) es explotar las características resistentes al fuego de BC y emplear un rayo láser pulsado de alta energía para irradiar un aerosol que contiene BC. Esta irradiación eleva rápidamente la temperatura de BC desde la temperatura de la llama (~2000 K) hasta la temperatura de vaporización (~4000 K). Como resultado, la emisión de luz incandescente se produce desde BC, lo que sirve como indicador para evaluar la calidad de rBC en función de la intensidad de la señal incandescente. LII es un instrumento ideal para estudiar las propiedades fisicoquímicas y el grado de envejecimiento de las partículas BC individuales; sin embargo, también tiene un efecto de sesgo al cuantificar la concentración de masa de rBC [14].

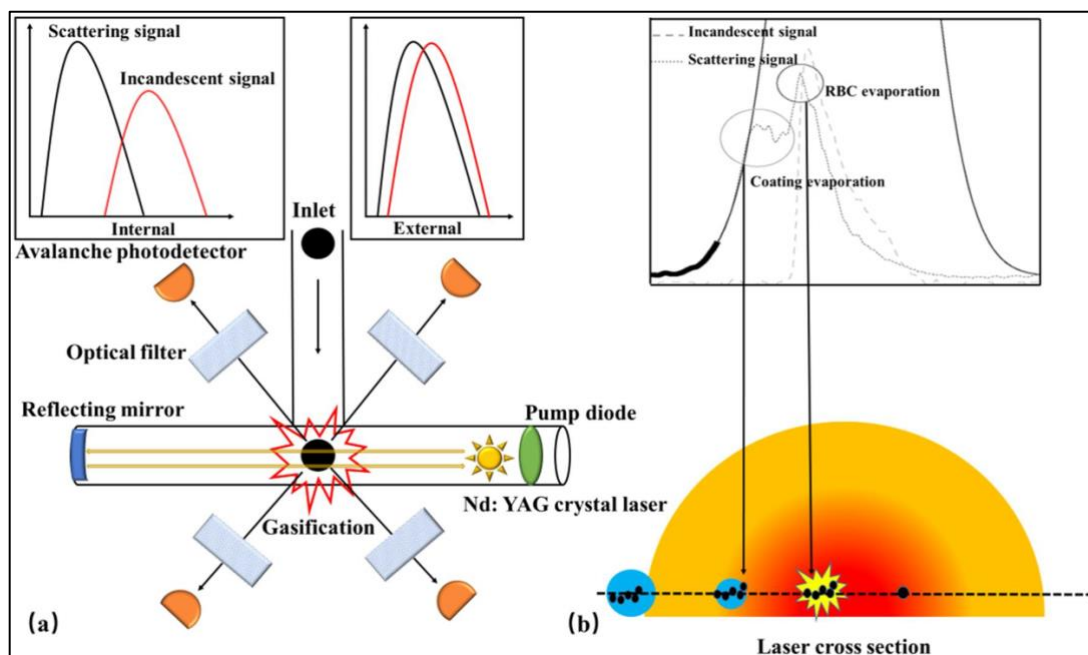


Figura 9: Diagramas esquemáticos de los instrumentos de detección de carbono negro refractario (rBC): (a) SP2; (b) SP-AMS [14].

1.2.1. Quincey et al. (2009)

Quincey (2009) [15] analiza diferentes métodos de medición del carbono negro, orgánico y elemental en muestras de aire ambiente. Se comparan los resultados obtenidos mediante análisis termo-óptico manual, instrumentos automáticos y técnicas ópticas en diferentes sitios de monitoreo en el Reino Unido. Con el fin de comparar las variaciones que existen por cada método utilizado, comparando resultados de cada muestra tomada por los equipos en distintos lugares.

Específicamente para la medición de carbono negro se utilizan los métodos de humo negro y los etalómetro.

El método del humo negro consiste en bombear aire a través de un área conocida de un filtro de celulosa Whatman Número 1 a una velocidad de 0.084 m³/h. Este flujo de aire deja una mancha en el filtro, la cual es analizada a través de un reflectómetro que nos permite obtener la reflectancia. Al obtener la reflectancia y conocer tanto el área como el volumen, se puede determinar el índice de humo negro a través de tablas estándar definidas en la norma ISO9835(1993). A partir de este índice de humo negro y la siguiente ecuación se puede determinar la cantidad de carbono negro.

$$C_{BC}[\mu\text{g m}^{-3}] = \sqrt{4,18I_{BS} + 59,6} - 7,72$$

Por otra parte los etalómetros son instrumentos empleados para la medición de la concentración de "carbono negro" en una muestra de aire. Su funcionamiento se basa en la evaluación de la transmisión de luz a través de la muestra. Para llevar a cabo esta medición, la muestra se deposita en una cinta de cuarzo, y se determina el coeficiente de absorción de la muestra mediante la medición de la transmisión de luz a través de la misma en un solo paso. Posteriormente, esta medición se compara con la transmisión de luz a través de una pieza de filtro limpia, que sirve como punto de referencia. Para

este estudio se utiliza una longitud de onda de luz de 880 [nm]. Se utiliza el equipo Magee AE22.

Posteriormente se realizan mediciones paralelas de humo negro, carbono negro con etalómetro, EC/OC tanto automático como manual en un lugar junto a una acera de Londres entre Septiembre y Diciembre del 2006.

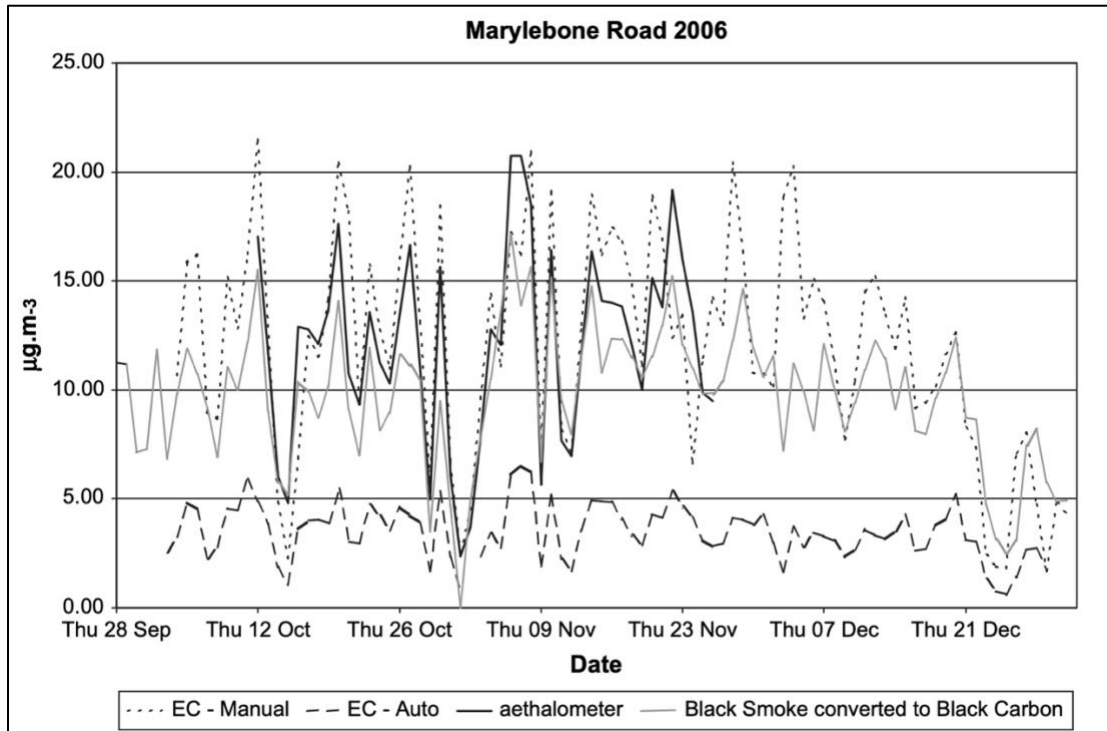


Figura 10: Concentraciones medias diarias de carbono elemental de un sitio junto la acera de Londres [15]

En la imagen se puede observar que los valores adquiridos por el EC manual son superiores a los adquiridos por el etalómetro, lo cual es concordante ya que el EC manual mide el carbono elemental y el carbono negro se encuentra dentro de este. Lo anterior también explica que la curva de la toma de datos con el etalómetro es consistente ya que sigue el orden del EC manual.

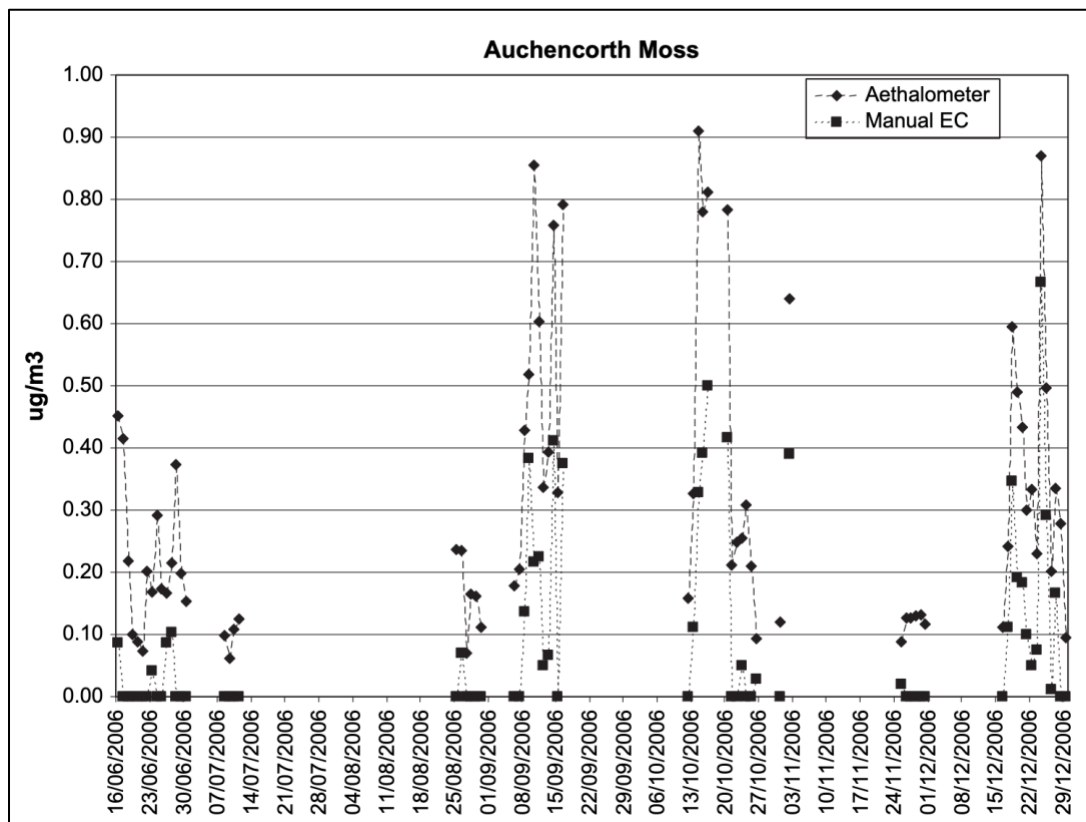


Figura 11: Mediciones medias diarias de etalómetro y concentración de carbono elemental en un sitio rural de Escocia [15].

En este caso se aprecia una diferencia significativa entre ambos tipos de medición, debido a que en el caso de la medición manual el filtro no estaba en condiciones de operar, la corrección utilizada en el instrumento no fue la correcta.

1.2.2. Amara et al. (2014)

Amara et al. (2014) [16] realiza una comparación de métodos de carbono negro, en los cuales destaca la utilización de fotómetro de hollín de una sola partícula (SP2), espectrómetro de hollín fotoacústico y etalómetro. La utilización de estos equipos se realiza en una zona on-road y near-road, por lo que la mayor parte del carbono negro procede de vehículos a combustión interna.

El sector del transporte es actualmente la fuente dominante de emisiones de carbono negro en los Estados Unidos, contribuyendo con un 52 % del total de la masa de emisiones [17] En las zonas urbanas, donde se produce la mayoría de las emisiones de BC, se estima que el 67 % de las concentraciones de BC son atribuibles a los vehículos diésel y el 20 % a los vehículos de gasolina [18].

Para realizar una medición en el entorno de una carretera existen varios desafíos que los equipos de medición deben cumplir, uno de ellos es que deben tener la capacidad de realizar muestreo rápido menor a 10 segundos, lo anterior debido a lo móvil que son las fuentes en una carretera. También deben ser portátiles, precisos en distintas órdenes de magnitud y tener la capacidad de soportar un entorno de muestreo con vibración y ruido. A la fecha no hubo una evaluación completa de múltiples métodos de medición

de BC en el entorno de carretera. Las mediciones de este estudio fueron realizadas a bordo de un vehículo eléctrico, con condiciones de bajo y alto tráfico, en ruta cercana a la carretera y en la carretera. Estas diferentes carreteras y condiciones de conducción fueron elegidas para representar una variedad de patrones de conducción: una sección de fondo con un tráfico bajo e intersecciones con alto tráfico.

Para medir la concentración de carbono negro se utilizarán los siguientes instrumentos:

- Etalómetro (AE-42)
- Espectrómetro foto-acústico de hollín (PASS-3)
- Fotómetro de una sola partícula de hollín (SP2)

Por otra parte, se utiliza un instrumento para medir el tamaño de las partículas, en esta ocasión se utiliza el Engine exhaust particle sizer (EEPS).

Durante la campaña de medición se realizan toma de datos con dos períodos de tiempo distintos seteados en los instrumentos, en primera instancia se utiliza un período de tiempo de 2 segundos y posteriormente se realiza con un período de 10 segundos. El resumen de ambos casos se registra en las siguientes tablas.

Tabla 4: Comparación por pares de las mediciones promediadas de BC en período de 2 segundos para todo el conjunto de datos.

Equipo		Cantidad de datos comparados	BC promedio	
X	Y		$\bar{X}(\mu\text{gm}^{-3})$	$\bar{Y}(\mu\text{gm}^{-3})$
AE-42	P405 ^b	4831	5.00	4.92
AE-42	P532 ^b	4831	5.00	4.61
AE-42	P781 ^b	3278	5.43	5.49
AE-42	SP2	4690	5.19	3.10
P405	SP2	7444	3.60	2.24
P532	SP2	7444	3.47	2.24
P781	SP2	4598	4.51	2.49
P405	P532	9592	3.23	3.05
P405	P781	6685	3.40	3.68
P532	P781	6685	3.14	3.68

^b P405, P532 y P781 son concentraciones de carbono negro calculados desde la medición de absorción PASS-3 a 405, 532 y 781 nm.

Tabla 5: Comparación por pares de las mediciones promediadas de BC en período de 10 segundos para todo el conjunto de datos.

Equipo		Cantidad de datos comparados	BC promedio	
X	Y		$\bar{X}(\mu\text{gm}^{-3})$	$\bar{Y}(\mu\text{gm}^{-3})$
AE-42	P405 ^b	1243	4.15	4.12
AE-42	P532 ^b	1243	4.15	3.88
AE-42	P781 ^b	799	4.57	4.70
AE-42	SP2	1196	4.37	2.61
P405	SP2	1493	3.60	2.24
P532	SP2	1493	3.47	2.24
P781	SP2	922	4.48	2.49
P405	P532	1921	3.23	3.06
P405	P781	1337	3.40	3.67
P532	P781	1337	3.15	3.67

^b P405, P532 y P781 son concentraciones de carbono negro calculados desde la medición de absorción PASS-3 a 405, 532 y 781 nm.

Para resumir las concentraciones de carbono negro de todo el conjunto de datos, se promediaron los datos para 2 segundos y 10 segundos. Las mediciones realizadas con el AE-42 y la configuración de 781 nm del PASS-3 tuvieron los datos más concordantes entre los equipos. Por otra parte, la medición de absorción 781 nm fue el menos estable que los otros y durante la ejecución final, el ruido fue extremadamente grande lo que produjo una gran cantidad de mediciones erróneas (excluidas del análisis) que corresponden al 30% de las mediciones PASS-3. Las medidas de BC del SP2 fueron consistentemente menores que las concentraciones de BC medidas a partir de las técnicas basadas en absorbancia.

Para el caso de las mediciones de 10 segundos, al incrementar el tiempo se disminuyó el efecto del ruido del instrumento y los tiempos de respuesta de este ligeramente diferentes, reduciendo así los valores RMS. Por ejemplo, el RMS para la mayoría de las comparaciones se redujo en un 40 % simplemente aumentando el tiempo promedio de 2 s a 10 s (Tabla 4). Las comparaciones que incluyen el láser de 781 nm del PASS-3 no tuvieron una reducción tan grande en el RMS, lo que refleja la inestabilidad de esta medición en particular incluso en períodos de tiempo más largos.

En el caso del instrumento AE-42, en la medición de 2 segundos solo el 50% de los datos satisfacían el criterio de la ONA. Mientras que en el caso de los 10 segundos en una medición se obtuvo un 65% dentro del criterio y en la siguiente un 100%. Por lo que aumentar el período de tiempo de las muestras en este instrumento tiene un impacto totalmente positivo.

Los valores que son distintos en ambos casos pueden provocar confusión, por lo que hay que tener consideraciones de la causa de estas diferencias. El etalómetro puede estar sujeto a efectos debido a la carga de filtros y la dispersión de aerosoles [19]. La medida PASS-3 puede verse afectada por los gases absorbentes (por ejemplo, NO₂) presentes en el entorno de la carretera. El NO₂ absorbe fuertemente a 405 nm, menos a 532 nm, y puede tener un impacto medible en los valores de absorción en estas longitudes de onda. A pesar de estos desafíos de medición en el entorno de la carretera, existe una gran concordancia entre los datos de las concentraciones de BC entre el PASS-3 y el etalómetro.

Gracias al equipo que mide la distribución de tamaño de las partículas registradas, se puede concluir que una parte sustancial de la masa de BC estaba por debajo del tamaño que logra medir el SP2, por lo que el porcentaje que media de menos el SP2 respecto a sus pares es consecuencia de esta porción no medible por el instrumento.

Concluyó que una parte sustancial de la masa de BC estaba por debajo del rango de tamaño medible con el SP2 y, por lo tanto, sesgó las concentraciones de SP2 BC bajas en comparación con otras mediciones. Para investigar esta posibilidad, seleccionamos períodos de tiempo en los que el albedo de dispersión individual era bajo, es decir, el aerosol era predominantemente BC, y comparamos las distribuciones de tamaño medidas por el EEPS y el SP2. Para comprobar esto, se realiza una medición con el equipo SP2 y el EEPS, teniendo como resultado que el SP2 reduce su efectividad a menor tamaño de las partículas, lo cual se puede asignar a la contaminación de las partículas con algún compuesto orgánico que sobreestima la dimensión de estas. Lo anterior se refleja en el siguiente gráfico.

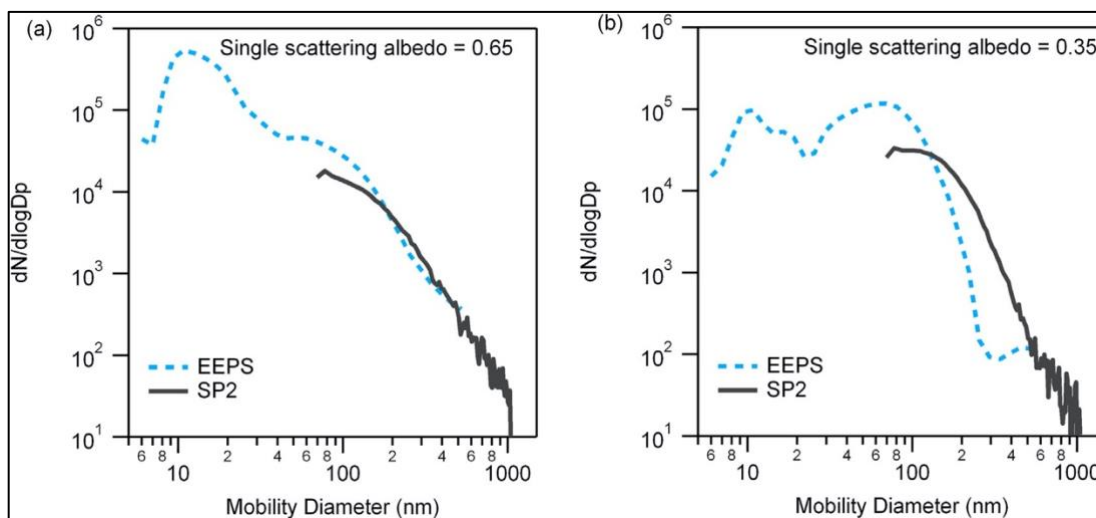


Figura 12: (A) Distribución del tamaño de las partículas medidas por el EEPS y SP2 promediada en una vuelta por carretera. (b) Distribución de masa de SP2 se ajusta asumiendo una distribución lognormal.

Se realiza una comparación de todas las circunstancias de medición y los valores adquiridos en la campaña de medición, los cuales se muestran en el siguiente gráfico caja bigote.

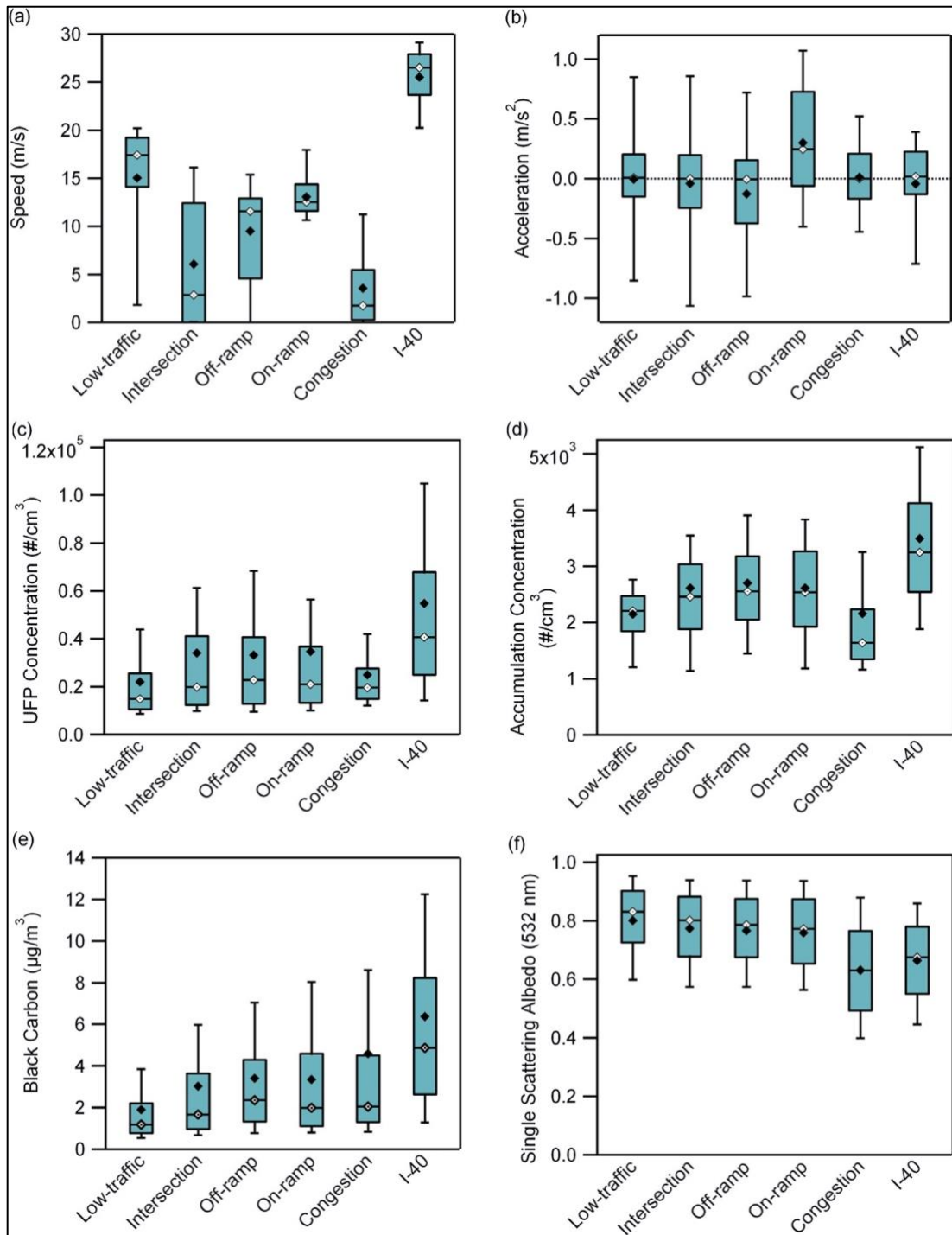


Figura 13: Gráficos de caja de (a) velocidad (b) aceleración (c) concentración de UFP (d) concentración de acumulación (e) BC (AE-42) (f) albedo de dispersión única a 532 nm para diferentes condiciones de conducción. Los bigotes corresponden a los percentiles 10 y 90 y el diamante negro corresponde al valor medio.

En este gráfico se observa a simple vista que los valores de concentración de carbono negro en la carretera son mayor en comparación a las demás condiciones de tránsito,

por lo que la forma de manejar y las condiciones presentadas durante la conducción afecta a la concentración de carbono negro en el ambiente.

Es muy importante considerar el sector donde se van a realizar campañas de medición, ya sea urbana o interurbano que afecta directamente la forma de manejar de los conductores y así escoger correctamente el método de medición que se ajusta de mejor manera al ambiente en que se encuentra.

1.2.3. Li et al. (2019)

Li et al.(2009) [20] realiza una comparación de métodos de medición de carbono negro por quema de biomasa en un espacio abierto. Para comenzar, el equipo de trabajo destaca en su introducción que los métodos para medir carbono negro se dividen en tres amplias técnicas: métodos ópticos, que miden la absorción o atenuación de la luz y la convierten en una masa BC equivalente(eBC) mediante secciones transversales de absorción de masa (MAC) asumidas [21]; Métodos de análisis térmico óptico(TOA) que miden el carbono presente en muestras de filtro y las categoriza ampliamente en fracciones de carbono elemental (EC) y orgánico (OC); e incandescencia inducida por láser (LII) que relacionan las emisiones térmicas con la masa de material refractario presente en las partículas muestreadas (rBC) [22]. Cabe destacar que, la respuesta de los instrumentos de medición de carbono negro puede variar debido a diferencias naturales en las propiedades químicas y ópticas de las partículas que contienen carbono negro muestreadas. Por ejemplo, las propiedades de absorción dependen del estado de la mezcla, forma y tamaño [23], [24], [25].

Se ha demostrado que la respuesta LII tiene cierta variabilidad en respuesta a diferentes materiales de rBC [26]. Por otra parte, las mediciones EC puede verse afectada por especies comuestreadas [27]. Los artefactos de muestreo también afectan a las comparaciones entre instrumentos; estos artefactos pueden surgir de las interacciones entre partículas y filtro, efectos de la humedad relativa (RH) y cientos de otros procesos [19], [28], [29], [30], [31], [32].

Li cita a distintos autores que realizaron comparaciones de los métodos de medición bajo distintas circunstancias, como por ejemplo en laboratorios con condiciones controladas, lugares urbanizadas, entre otras. Una investigación a destacar es la de un equipo que han examinado la respuesta entre diferentes instrumentos para el aire ambiente [33], [34], [35], en esta investigación se informa de una buena concordancia entre las mediciones de eBC y EC basadas en filtros en un área urbana dominada por diésel.

Cabe destacar que estas mediciones se llevan a cabo en el laboratorio de ciencias de incendio del servicio forestal de los Estados Unidos en Missoula, Montana. Durante la campaña de medición se realizaron dos tipos de experimentos. El primero, quema tipo chimenea en donde se tomaron muestras de emisiones en tiempo real a través de una chimenea de escape sobre el fuego; y quemas en una sala, donde las emisiones llenaron una sala ((12.5 X 12,5 X 22) [m]), donde las emisiones llenaron la sala de combustión y luego fueron muestreadas intermitentemente mediante instrumentos durante varias horas. Durante las quemas tipo chimenea, se toman muestras de emisiones desde la etapa inicial (típicamente combustión con llama) hasta alcanzar una concentración de BC en la cámara de muestreo entre 10 y 100 μgm^3 . Para las quemas en habitaciones,

seguimos el enfoque similar al descrito en el anterior t3pico, pero en este caso se adquieren muestras de emisiones bien mezcladas en la sala de combusti3n. En este caso, la propia sala actu3 para integrar las emisiones de todo el incendio, de las cuales luego se extrae una submuestra a nuestra c3mara, debido a que se realiza un muestreo en el rango de horas, se obtienen muestras con distintas concentraciones.

En la siguiente tabla se adjuntan los m3todos y equipos utilizados en la campaa de medici3n de la investigaci3n, junto con los par3metros utilizados para la medici3n.

Tabla 6: Resumen de los instrumentos BC utilizados durante la campaña de laboratorio FIREX 2016

Método	Equipo	ABBR	Medición directa	Parámetro utilizado en el trabajo actual	Incertidumbre de la medición(relativo)	Otras notas
Térmico-óptico (EC)	OCEC Analyzer (Sunset laboratory INC)	Offline OCEC PAX-870	OC y EC densidad en el área del filtro ()	BC Concentración de masa () OC/EC ratio	16% (Liu et al., 2013)	Analice utilizando el protocolo de temperatura mejorado-A tor.
Absorción in situ (eBC)	Photoacoustic extunxiometer(Droplet measurement technologies, model 870 nm) Photoacoustic extunxiometer(Droplet measurement technologies, model 405 nm)	PAX-870 PAX-405	B_abs y B_scatt a 870 nm(Mm-1) B_abs y Bscat a 405 nm(Mm-1)	BC Concentración de masa (ugm-3) SSA,AAE y SAE(inferido con el 405 nm) AAE and SAE (inferido con el 870 nm)	20% (Nakayama et al., 2015) 7% (Nakayama et al., 2015)	Utilice un MAC de 4,74(m2/g) convertido a 870 nm del valor recomendado en Bond y Bergstrom (2006). -
Absorción basada en filtros (eBC)	Aethalometer (Magee Scientific) Micro Aethalometer (Aethlabs) Atmospheric black carbon detector (Lawrence Berkeley National Laboratory) Continuos Light Absorption Photometer (NOAA ESRL GMD) Tricolor Absorption Photometer (Brechtel Manufacturing INC)	AE-31 uAE ABCD CLAP TAP	B_atm a siete longitude de ondas (370,470,520,590,660,880 y 950 nm)(Mm-1) B_atm a 880 nm(Mm-1) B_atm a 880 nm(Mm-1) B_atm a 467, 528 y 652 nm(Mm-1) B_atm a 467, 528 y 652 nm	No incluido en el trabajo actual BC Concentración de masa (ugm-3), AAE, B_abs a 870 nm(Mm-1) BC Concentración de masa (ugm-3), AAE, B_abs y 870 nm(Mm-1)	30% (Ogren et al., 2017) 30% (Laing et al., 2016)	Aplicar correcciones de caudal y presión. Aplique la corrección del tipo de filtro en las muestras. CLAP equipado con filtro Azumi. Corrección de rendimiento utilizando el esquema B1999 y sus parámetros empíricos. Utilice Bscat y SAE derivados de PAX para calcular Bscat en longitudes de onda TAP y CLAP (necesarios en el esquema de corrección). Convierta Babs autoderivados a 870 nm con AAE autocalculado. Utilice la misma MAC que el PAX-870.
Refractario (rBC)	Single Particle Soot Photometer (Droplet SP2 Measurement Technologies)	SP2	Incandescencia inducida por láser y dispersión de luz de una sola partícula	Bc Concentración de masa (ugm-3)	20% (Laborde et al., 2012)	La distribución de la masa de las partículas observadas se ajusta mediante una distribución de tamaño logarítmico normal. Se utiliza un elemento de flujo laminar no estándar para medir los caudales con precisión.

En la tabla 6 se observan todos los métodos utilizados para esta campaña de medición en esta investigación, en donde destacan dos métodos in situ para eBC, cinco métodos basados en filtro para eBC y un método para rBC. En la tabla se describen los parámetros utilizados junto con las especificaciones de cada equipo.

Mediciones in situ eBC: Las propiedades ópticas del aerosol in situ se midieron mediante dos espectrómetros fotoacústicos (PAX) a 870 nm y 405 nm de tecnología de medición de gotas (DMT), que posteriormente se denominarán PAX-870 y PAX-405, respectivamente. En resumen, el PAX mide los coeficientes de absorción de la luz (B_{abs}) y los coeficientes de dispersión (B_{scat}) [36], [37]. Las muestras de emisión de ambos instrumentos pasan por un depurador para eliminar el dióxido de nitrógeno y otros gases que absorben los rayos UV, también pasa por un secador para minimizar los efectos de la humedad relativa que alteran los resultados de las mediciones. El valor MAC recomendado por el fabricante de $4,74 \frac{m^2}{g}$ a 870 nm se utiliza para convertir Babs en masa eBC en el trabajo actual tanto para los métodos in situ como basados en filtros.

Métodos basados en filtro para eBC: Los únicos resultados de eBC basados en filtros que se incluyen en esta ocasión son del fotómetro de absorción tricolor (TAP) de Brechtel Manufacturing Inc (BMI) y el fotómetro de absorción de luz continua (CLAP) de la División de Monitoreo Global del Laboratorio del Sistema Terrestre de NOAA, que se utilizan ampliamente en el seguimiento de redes. Lo anterior debido a que los otros instrumentos tienen un giro automático de la cinta dependiendo la densidad del flujo a analizar, como es el caso del AE31.

Tanto CLAP como TAP son fotómetros que proporcionan mediciones de absorción de luz de partículas depositadas en un filtro, similar al de partículas de hollín/fotómetro de absorción (PSAP) [38] pero con múltiples puntos de filtro (8 puntos de muestra y 2 de referencia). Estos instrumentos son conceptualmente similares entre sí, y proporcionan mediciones de absorción de luz en tres longitudes de onda (467 nm, 528 nm y 652 nm).

Un problema de los métodos basados en filtros es que puede producir sesgos, como puede ser la subestimación debido a la alta carga que estos pueden tener en el instante de la medición que puede reducir la trayectoria óptica del filtro por parte de las partículas depositadas. Por otra parte, la dispersión de las partículas puede llevar el problema de sobrestimación. Para este problema existen varios estudios que proponen un esquema de corrección, para este estudio se adopta el propuesto por Bond [28], que será denominado “B1999”. Este esquema fue integrado en el software TAP y fue utilizado habitualmente en el procesamiento de datos CLAP por parte de la NOAA .

Técnica de incandescencia para rBC: Las mediciones realizadas fueron por el DMT SP2 el cual utiliza LII para cuantificar la masa de rBC en las partículas. El instrumento también detecta la dispersión de la luz de una sola partícula y proporciona información que se puede utilizar para calcular el tamaño óptico de las partículas que contienen BC y el estado de mezcla.

Inter comparación de métodos de carbono negro

Se realiza una primera comparación de los instrumentos tomando como referencia el instrumento PAX-870, debido a su continuo funcionamiento en todas las pruebas realizadas. Para resumir esta primera comparación, se realiza una tabla con el promedio de factores de emisión de carbono negro, mezclado y marrón. Junto a ello se realiza un diagrama de caja y bigote para cada uno de estos tipos de carbonos.

Tabla 7: EF_{BC} derivado de los cinco instrumentos a través de los tres grupos de incendios (media \pm desviación estándar). El número de incendios para cada combinación de grupo e instrumento se muestra entre paréntesis.

Grupo	Pax-870(g-BC kg-fuel ⁻¹)	Offline OCEC(Improve A)(g-BC kg-fuel ⁻¹)	Offline OCEC(NIOSH-870)(g-BC kg-fuel ⁻¹)	SP2(g-BC kg-fuel ⁻¹)	TAP(g-BC kg-fuel ⁻¹)	CLAP(g-BC kg-fuel ⁻¹)
Black	0.99 \pm 0.39 (n = 10)	2.27 \pm 0.74(n=10)	1.99 \pm 0.85 (n=10)	1.61 \pm 0.61 (n=10)	1.55 \pm 0.69 (n=9)	2.00 \pm 0.79 (n=8)
Mixed	0.58 \pm 0.41 (n = 34)	2.11 \pm 0.78(n=34)	1.17 \pm 0.55 (n=28)	0.98 \pm 0.58 (n=15)	0.91 \pm 0.45 (n=17)	1.15 \pm 0.54 (n=19)
Brown	0.54 \pm 0.42 (n = 9)	1.37 \pm 0.88(n=11)	0.88 \pm 0.35 (n=7)	0.29 \pm 0.24 (n=7)	0.62 \pm 0.37 (n=5)	1.00 \pm 0.38 (n=6)

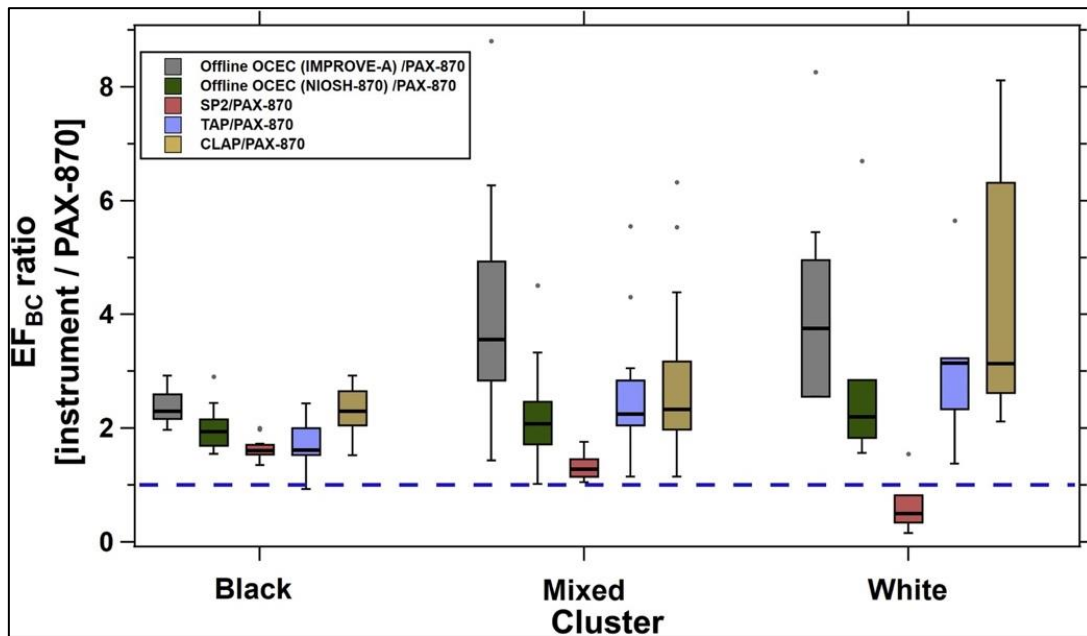


Figura 14: Diagrama de caja y bigote para la distribución de las proporciones EC_{BC} (a PAX) de pares individuales de instrumentos a través de los tres grupos. Dentro de cada grupo, cinco subgrupos de proporciones EC_{BC} (de la izquierda Offline OCEC (IMPROVE-A)/PAX-870, Offline OCEC (NIOSH-870)/PAX-870, SP2/PAX-870, TAP/PAX-870 y CLAP/PAX-870) se muestran en diferentes colores. Los rangos de la caja presentan el cuartil inferior (percentil 25) y el cuartil superior (percentil 75) y la altura de la caja es el rango intercuartil (IQR). Los bigotes corresponden a los percentiles 10 y 90. La línea en el centro de la caja representa la mediana, y los puntos representan los valores atípicos.

Concentrándose en el carbono negro, se observa que en primer lugar la medición del grupo “negro”, es el valor promedio más alto en todos los instrumentos como se declara en la tabla 7. Por otra parte se observa que hay una variación de medición de carbono negro en cada instrumento respecto al PAX-870, como se observa en la figura 14. Sin embargo, se observa que el grupo negro es el que menos variación tiene, lo cual puede ser consecuencia de que en este grupo se tiene un carbono más “puro” respecto de los otros. Lo anterior denota la importancia de las muestras que se están evaluando, ya que a distintas propiedades de muestra los resultados tienen una alta variación.

Durante la campaña FIREX, se realizaron mediciones de BC utilizando un conjunto de instrumentos, lo que permitió un estudio de comparación de aerosoles BB bajo una gama relativamente amplia de parámetros relacionados con el fuego (MCE, SSA, relación OC/EC y AAE). Para normalizar los datos de los diferentes incendios, se calculó EFBC integrado en el tiempo para cada incendio para cada uno de los cinco instrumentos. Sobre la base de los resultados de la EFBC de 55 incendios, la EC, la rBC y la eBC basada en filtros fueron, en promedio, de 4,7, 1,3 y 2,7 veces más altos, respectivamente, que la correspondiente eBC in situ,

Como se mencionó anteriormente en este estudio, uno de los puntos importantes para la selección de un correcto método de medición es el combustible que se está utilizando.

Capítulo 2

2. Factores de emisión

Para la realización de un inventario de emisiones de cualquier partícula a estudiar es necesario definir y/o determinar los factores de emisión de las fuentes de emisión. En este caso se estudian los vehículos motorizados, para ellos es fundamental definir las categorías de estos y las normativas ambientales que rigen en el lugar de estudio. En la siguiente tabla se definen la categorías vehiculares y las respectivas normas que regulan a los que se encuentran en circulación.

Tabla 8: Categorías vehiculares y normas que rigen a estas.

Categoría vehicular	Normativas
Buses	Pre-Euro(convencional)
Camiones livianos	Euro I/1
Camiones medianos	Euro II/2
Camiones pesados	Euro III/3
Vehículos comerciales y de pasajeros diésel	Euro IV/4
Vehículos comerciales y de pasajeros a gasolina	Euro V/5
	Euro VI/6

La COPERT define distintos factores de emisión [39], en los cuales destacan CO , CO_2 , NO_x y $PM_{2.5}$. Sin embargo, COPERT no modela los factores de emisión de carbono negro debido a la dificultad de la clasificación de este tipo de aerosol [11]. Sin embargo, se realizaron estudios para determinar las fracciones de carbono negro en las partículas, distinguiendo entre la tecnología del vehículo y el tipo de combustible [9]. Estos valores de fracción se pueden utilizar para obtener factores de emisión BC de la siguiente manera:

$$FE_{BC} = \%BC * FE_{PM}$$

Donde FE_{PM} es el factor de emisión de todas las partículas PM Exhaust y el $\%BC$ es el porcentaje de carbono negro que hay dentro de del material particulado 2.5. Es este último valor el que se debe determinar para su uso posteriormente, dado que la forma en que se determina es en base a los datos y metodología entregada por Ntziachristos,

en 2007 [40], por lo que debido a la cantidad de años de diferencia con respecto a la realización de este estudio se estima que este se modificó y se definieron valores con menor incertidumbre en sus cálculos.

2.1.1. Metodología

Para la definición de los factores de emisión del carbono negro se realiza una búsqueda de publicaciones científicas en distintas bases de datos en las cuales destacan:

- Science direct
- Google scholar
- Copernicus publications
- Copert

Para la búsqueda se considera la información detallada por Víctor Valdebenito en su memoria denominada “DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO A PARTIR DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO FINO EN VEHÍCULOS DIÉSEL” del año 2017 [41]. En este escrito el autor define los factores de emisión del carbono negro a partir de estudios previos. Es por esto que uno de los filtros a utilizar son la fecha de realización de los artículos a considerar, es decir, se considerarán artículos cuya realización sea desde 2017 a la fecha.

Otros de los filtros a realizar es el título y objetivos de los artículos, los cuales tienen que tener relación directa con la emisión de carbono negro en vehículos motorizados. En primera instancia se estima y se analizan artículos en los cuales se realizan inventarios de carbono negro y/o reviews sobre el cálculo de estos inventarios.

Posterior a la selección de artículos se procede a verificar cual fue el método que se utiliza para la obtención de los inventarios, en este caso lo importante es que tenga una descripción del cálculo de los factores de emisión para cada categoría vehicular y la estimación usada sobre la relación existente del carbono negro con el material particulado 2.5.

Los artículos que tengan lo anteriormente dispuesto serán considerados y evaluados. Los anteriores serán comparados a los factores de emisión propuestos en COPERT [39].

A continuación se presenta un diagrama que permite visualizar de mejor manera lo planteado anteriormente.

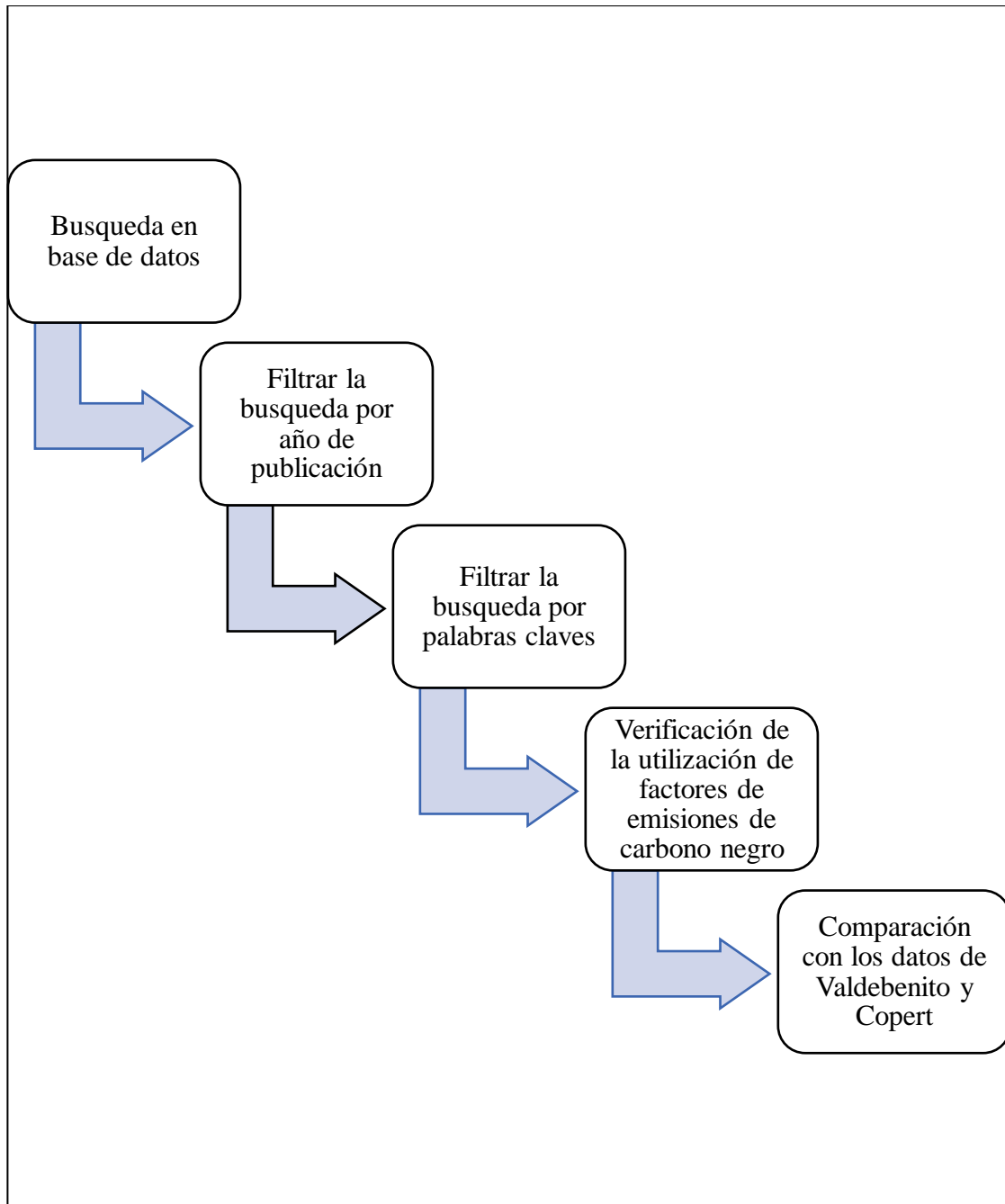


Figura 15: Metodología para la búsqueda de nuevos factores de emisión de carbono negro en el cálculo y revisión de inventarios.

2.1.2. Cálculo factores de emisión

Para obtener los factores de emisión se utiliza la fórmula de FE mencionada anteriormente, en el programa desarrollado en la memoria de Jiménez “Modelo de cálculo de emisiones vehiculares con desagregación espacial para Chile en el período 1990-2020” [42].

En primer lugar se calculan los factores de emisión de material particulado 2.5 ($FE_{PM2.5}$) para cada categoría vehicular y sus respectivas normas de emisión. Para ello

se le entregan archivos input, para este caso se actualizan los kilómetros recorridos promedio de cada categoría vehicular, las velocidades promedio de cada uno de ellos.

Posterior a ello se le entrega el input de las fracciones de material particulado que son carbono negro, en este caso, se entrega el archivo de COPERT que contiene los valores correspondientes para cada categoría vehicular y cada norma. La tabla con mayor relevancia en este programa se definirá en la siguiente sección a través de la revisión bibliográfica

Con lo anterior ya definido y depositado en las carpetas correspondientes, se procede a ejecutar el programa en Rstudio.

2.1.3. Resultados

Posterior a una ardua búsqueda de factores de emisión en artículos científicos, se determina que los valores de estos factores se mantienen vigentes. Lo anterior debido a que en determinaciones de inventarios de carbono negro se utilizaron los mismos factores, como es el caso de Osses et.al [9]. Por último, estos factores de emisión coinciden con los propuestos en Copert [39].

La gran mayoría de los factores de emisión para las distintas categorías vehiculares y sus respectivas normativas reguladoras se extraen de tres estudios principalmente, “un inventario global basado en la tecnología de las emisiones de carbono negro y orgánico de la combustión” [43], “inventarios de emisiones de carbono negro y orgánico: revisión y aplicación en California” [44] y “Actualizaciones del capítulo de la guía sobre el transporte por carretera” [45], siendo este último el principal estudio considerado por Copert en el 2024 en su propuesta.

En estos estudios se propone que el EC como el BC son equivalentes, lo que asume un respectivo sesgo en el resultado ya que un componente está referida al termino refractario y otra a la propiedad óptica de este.

Otro punto a asumir es el tipo de conducción en el país. Tal como se demuestra en el capítulo anterior las distintas formas de manejar un vehículo genera distinta cantidad de carbono negro, es decir, en carretera, ciudad, pueblos o calles aledañas tienen distintas concentraciones de este contaminante.

2.1.3.1. Memoria Víctor Valdebenito (2017)

- **Factor de conversión para buses.**

Para el caso de los buses, se determina el FE de acuerdo a los propuesto por Ntziachristos (2007) [45], en el que se entrega un valor para la relación de BC sobre PM2.5 en unidad porcentual. Junto a ello se entrega un porcentaje de incertidumbre, por lo que un ejemplo de valor de la relación BC/PM2.5 es 60% y el de incertidumbre es 20%, el valor real está entre un intervalo de 50% a 70%.

Los valores se presentan continuación.

Tabla 9: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada en FE de buses para el modelo. Fuente [45].

Normativas de emisión	$BC/PM_{2.5}(\%)$	Rango de incertidumbre (%)
Convencional	50	20
Euro I	65	20
Euro II	65	20
Euro III	70	20
Euro IV	75	20
Euro V	75	20
Euro VI	15	30

- **Factor de conversión para camiones livianos**

En el caso de los camiones livianos, este fue completado con otro factor estimado por Chow et al .

Tabla 10: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de camiones livianos para el modelo [45].

Normativas de emisión	$BC/PM_{2.5}(\%)$	Rango de incertidumbre (%)
Convencional	55	10
Euro I	70	10
Euro II	80	10
Euro III	85	5
Euro IV	87	5
Euro V	10	50
Euro VI	29 [44]	No informada

- **Factor de conversión para camiones medianos**

Ntziachristos (2007) no propone datos para esta categoría vehicular, por lo que se presentan los utilizados por Bond (2004). En este caso no se presentan valores de incertidumbre explícitamente.

Tabla 11: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para camiones medianos para el modelo [43].

Normativas de emisión	$BC/PM_{2.5}(\%)$	Rango de incertidumbre (%)
Convencional	47	No informada
Euro I	70	No informada
Euro II	81	No informada
Euro III	72	No informada
Euro IV	69	No informada
Euro V	23	No informada
Euro VI	25	No informada

- **Factor de conversión para camiones pesados**

En el caso de los camiones pesados, Ntziachristos (2007) considera el mismo factor de conversión de los buses.

Tabla 12: Tasas de vinculación de PM_{2.5} a BC utilizada para FE de camiones livianos para el modelo [45].

Normativas de emisión	BC/PM_{2.5}(%)	Rango de incertidumbre (%)
Convencional	50	20
Euro I	65	20
Euro II	65	20
Euro III	70	20
Euro IV	75	20
Euro V	75	20
Euro VI	15	30

- **Factor de conversión para vehículos livianos de pasajeros/comerciales diésel**

Valdebenito durante su investigación define al factor de emisión de los vehículos livianos de pasajeros como comerciales como iguales. Lo cual lo confirma con los valores entregados por COPERT en ese año. Estos valores se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 13: Tasas de vinculación de PM_{2.5} a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) diésel para el modelo [43].

Normativas de emisión	BC/PM_{2.5}(%)	Rango de incertidumbre (%)
Convencional	47	No informada
Euro 1	70	No informada
Euro 2	80	No informada
Euro 3	72	No informada
Euro 4	69	No informada
Euro 5	25	No informada
Euro 6	25	No informada

- **Factor de conversión para vehículos livianos de pasajeros/comerciales y taxis a gasolina**

En este caso al igual que en el caso de los diésel, se considera el mismo factor tanto para vehículos livianos de pasajeros como comerciales. Por otra parte se considera dentro de esta categoría vehicular a los taxis.

En este caso se puede observar con facilidad la disminución del valor porcentual del carbono negro sobre el PM_{2.5}, esto debido al tipo de combustible utilizado en estas vehículos, lo cual entrega una clara disminución de la emisión de BC en los vehículos a gasolina con respecto a los diésel. A continuación se presentan los valores de esta categoría vehicular.

Tabla 14: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) a gasolina para el modelo [45] Los valores de incertidumbre no especificada son propuestos por Bond [43].

Normativas de emisión	BC/PM_{2.5}(%)	Rango de incertidumbre (%)
Catalítico	30	30
Euro 1	25	25
Euro 2	17	No informada
Euro 3	25	25
Euro 4	15	15
Euro 5	17	No informada
Euro 6	17	No informada

2.1.3.2. COPERT 5.8 “Guía del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de EMEP/EEA 2023 – Actualización 2024”

La EEA en su guía de inventario de emisiones actualizada el 2024, en unos de sus métodos de cálculo para el inventario de carbono negro propone los en su mayoría los mismos factores de conversión para las categorías vehiculares que ellos definen con respecto a los utilizados por Valdebenito, solo cambian algunos valores mínimamente considerando el rango de incertidumbre de ambos. Lo anterior confirma que estos valores son los utilizados hasta la realización de esta investigación.

Junto a lo anterior cabe destacar que esta guía además tabula los factores de corrección para los vehículos livianos de pasajeros considerando el equipamiento de DPF junto a aditivo de combustible y el equipamiento de cDPF. Todos los valores con su respectiva norma se presentan a continuación.

Tabla 15: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) a gasolina para el modelo [46].

Normativas de emisión	BC/PM_{2.5}(%)	Rango de incertidumbre (%)
Catalítico	30	30
Euro 1	25	30
Euro 2	25	30
Euro 3	25	30
Euro 4	15	30
Euro 5	15	30
Euro 6	15	30

En el caso de los vehículos diésel livianos de pasajeros o comerciales, se actualizan los factores de conversión respecto a Valdebenito. Además agrega detalles de tecnología como es el DPF por ejemplo.

Tabla 16: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) a diésel para el modelo [46].

Normativas de emisión	$BC/PM_{2.5}(\%)$	Rango de incertidumbre (%)
Pre Euro	55	10
Euro 1	70	30
Euro 2	80	30
Euro 3	85	30
Euro 4	87	30
Euro 3, Euro 4, Euro 5 y Euro 6, equipado con DPF y aditivo de combustible	10	50
Euro 3, Euro 4, Euro 5 y Euro 6, equipado con cDPF	20	50

Respecto a los camiones, COPERT considera una gran categoría vehicular para los camiones y/o vehículos de carga. Estos valores coinciden con los valores de Valdebenito en su categoría de camiones pesados. A continuación se presentan los respectivos factores de conversión.

Tabla 17: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de camiones para el modelo [46].

Normativas de emisión	$BC/PM_{2.5}(\%)$	Rango de incertidumbre (%)
Pre Euro	50	20
Euro I	65	20
Euro II	65	20
Euro III	70	20
Euro IV	75	20
Euro V	75	20
Euro VI	15	30

Finalmente, COPERT entrega su categoría L, la cual incluye a todo tipo de motocicletas, ya sean de dos y cuatro tiempo sus motores, tal como se observa a continuación.

Tabla 18: Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de categoría L que incluye todo tipo de motocicletas para el modelo [46].

Normativas de emisión	BC/PM_{2.5}(%)	Rango de incertidumbre (%)
2 tiempos convencional	10	50
Euro 1, 2 tiempos	20	50
Euro 2, 2 tiempos	20	50
4 tiempos convencional	15	50
Euro 1, 4 tiempos	25	50
Euro 2, 4 tiempos	25	50
Euro 3, 4 tiempos	25	50

Los valores de las anteriores tablas se originan a partir de los datos disponibles en la literatura y las estimaciones de ingeniería de los efectos de tecnologías específicas (catalizadores, DPF, etc.) sobre las emisiones [46].

Las estimaciones también se basan en la suposición de que los combustibles con bajo contenido de azufre (< 50 ppm t. S). Por lo tanto, la contribución del sulfato a las emisiones de partículas es generalmente baja [46].

En los casos en que se utiliza un tratamiento posterior avanzado (como los DPF catalizados), entonces EC y OM no suman hasta el 100 %. Se supone que la fracción restante son cenizas, nitratos, sulfatos, agua y sales de amonio [46].

2.1.3.3. Osses et al.

En este documento presenta una estimación y un análisis detallados y consistentes de las emisiones de contaminantes de escape generadas por la actividad de transporte por carretera de Chile durante el período 1990-2020.

Entre los contaminantes estimados, se encuentra el carbono negro. Para estimar la cantidad generada en el periodo de tiempo descrito se debe realizar un cálculo de factores de emisión para cada uno de la categoría vehicular que circulan por el país. Para lo anterior, se utilizan factores de conversión porcentuales entregados por BC sobre PM2.5. Estos valores coinciden con los entregados por Valdebenito. Esta vez en este artículo lo adjuntan resumidamente en la siguiente tabla.

Tabla 19: Fracciones de BC/PM2.5 para tecnologías de emisión de vehículos en Chile [9].

Categoría vehicular	Pre Euro	Euro I/1 [%]	Euro II/2 [%]	Euro III/3 [%]	Euro IV/4 [%]	Euro V/5 [%]	Euro VI/6 [%]
Bus	50	65	65	70	75	75	15
Camiones liviano	55	70	80	85	87	10	29
Camiones medianos	47	70	81	72	69	23	25
Camiones pesados	50	65	65	70	75	75	15
Vehículo liviano Diesel de pasajeros/comercial	47	70	80	72	69	25	25
Vehículo liviano a gasolina de pasajeros/comercial	30	25	25	25	15	17	17

En resumen se actualizan solo algunos datos para distintas categorías vehiculares, se agregan valores para una L categoría que incluyen todos los tipos de motocicletas ya sean 2 o 4 tiempos.

Por otra parte, dentro de la categoría vehículos livianos de pasajeros o comerciales diésel se destaca la inclusión de nuevos valores dependiendo la tecnología utilizada en el tratamiento de los contaminantes del escape, como lo es el DPF.

2.1.3.4. Factores de emisión de Carbono negro por categoría vehicular

Mediante los datos mencionados en la metodología se procede a calcular los factores de emisión para cada categoría vehicular definida y considerando si está en un ámbito urbano o interurbano.

Tabla 20: Factores de emisión de carbono negro por categoría vehicular en el ámbito interurbano

Categoría vehicular	Pre Euro [g/km]	Euro I/1 [g/km]	Euro II/2 [g/km]	Euro III/3 [g/km]	Euro IV/4 [g/km]	Euro V/5 [g/km]	Euro VI/6 [g/km]
Bus Interprovincial	0,153	0,176	0,089	0,087	0,021	0,076	0,001
Camiones liviano	0,162	0,114	0,064	0,056	0,012	0,006	0,002
Camiones medianos	0,182	0,209	0,118	0,092	0,018	0,024	0,002
Camiones pesados	0,238	0,256	0,119	0,114	0,024	0,104	0,002

Categoría vehicular	Pre Euro [g/km]	Euro I/1 [g/km]	Euro II/2 [g/km]	Euro III/3 [g/km]	Euro IV/4 [g/km]	Euro V/5 [g/km]	Euro VI/6 [g/km]
Vehículo liviano diésel de pasajeros	0,080	0,075	0,040	0,032	0,018	0,00003	0,00003
Vehículo liviano a gasolina de pasajeros	0,00009	0,0003	0,0001	0,00008	0,0001	0,00005	0,00005
Vehículo liviano diésel comercial	0,167	0,108	0,124	0,075	0,037	0,00003	0,00003
Vehículo liviano a gasolina comercial	0,0007	0,0006	0,0004	0,0003	0,0001	0,00009	0,00005
Motocicletas	0,01	0,01	0,0025	0,0025	0,0004	0,0004	0,0004

Tabla 21: Factores de emisión de carbono negro por categoría vehicular en el ámbito urbano

Categoría vehicular	Pre Euro [g/km]	Euro I/1 [g/km]	Euro II/2 [g/km]	Euro III/3 [g/km]	Euro IV/4 [g/km]	Euro V/5 [g/km]	Euro VI/6 [g/km]
Bus articulado	0,588	0,385	0,204	0,189	0,048	0,129	0,002
Bus rígido	0,412	0,290	0,145	0,148	0,040	0,096	0,002
Camiones liviano	0,240	0,171	0,092	0,103	0,024	0,007	0,002
Camiones medianos	0,313	0,346	0,188	0,176	0,038	0,030	0,003
Camiones pesados	0,400	0,417	0,198	0,206	0,049	0,132	0,003
Vehículo liviano diésel de pasajeros	0,127	0,049	0,046	0,025	0,023	0,00003	0,00003
Vehículo liviano a gasolina de pasajeros	0,00009	0,0003	0,0001	0,00008	0,0001	0,00005	0,00005
Vehículo liviano diésel comercial	0,132	0,069	0,079	0,048	0,024	0,00003	0,00003

Categoría vehicular	Pre Euro [g/km]	Euro I/1 [g/km]	Euro II/2 [g/km]	Euro III/3 [g/km]	Euro IV/4 [g/km]	Euro V/5 [g/km]	Euro VI/6 [g/km]
Vehículo liviano a gasolina comercial	0,0007	0,0006	0,0004	0,0003	0,0001	0,00009	0,00005
Motocicletas	0,01	0,01	0,0025	0,0025	0,0004	0,0004	0,0004

Tanto en la tabla 22 como en la tabla 23 se puede observar que los factores de emisión son más elevados en los vehículos de gran envergadura como son todos los buses y los camiones. Se observa una gran diferencia con los vehículos livianos de pasajeros y vehículos livianos comerciales con combustible a gasolina.

Por otra parte, se observa que a medida que en la medida que la norma Euro se actualiza también lo realizan sus factores de emisión reduciendo las emisiones de carbono negro. Un ejemplo claro es el bus interprovincial que reduce sus emisiones desde 0,153 [g/km] hasta 0,001[g/km].

En comparación de ambas tablas, la tabla 22 en las mismas categorías vehiculares tiene factores de emisión superiores a los de la tabla 21, salvo en el caso de los vehículos livianos comercial diésel. Lo anterior tiene como causa principal el distinto comportamiento al conducir entre zonas interurbanas y urbanas, en donde se destaca el cambio de velocidad en la que se transita en ambas circunstancias. Bajo esta condición es esperable que las emisiones en el ámbito urbano sean más elevadas que en una ruta interurbana (considerando las mismas condiciones para una misma categoría vehicular).

Capítulo 3

3. Inventario nacional

Tal como nos indica la INGEI en la Figura 3, existe un inventario nacional de carbono negro hasta el 2020 oficialmente. En el caso de la categoría de los vehículos motorizados, estos se encuentran dentro del sector de energía. En este punto no hay una categorización dentro de vehículos motorizados, ya sea por su normativa o tipo de vehículo ya sea liviano, pesado, entre otros. Lo anterior, genera la necesidad de actualizar este inventario por la cantidad de tiempo desde su actualización, aún más considerando que el sector energía representa un gran porcentaje de emisión de carbono negro en el país.

Para el cálculo del inventario nacional de contaminante se utiliza la cantidad de kilómetros recorridos en un año por cada categoría vehicular individualmente y en cada región, esto se define y se indica en la siguiente tabla.

Tabla 22: Nivel de actividad anual por región y tipo de vehículo [9].

Región	Kilómetros viajados por año [$km * año^{-1}$]					
	LPV	LCV	MOT	TAXI	BUS	PESADO
I, XIV	8228	9873	5000	16455	40361	30271
II	13302	15962	5000	26604	66618	46120
III	14382	17259	5000	28765	57942	43456
IV	15241	18289	5000	30482	54292	37587
V	13986	16784	5000	27973	33598	23260
VI	12127	14552	5000	24254	28935	20032
VII	12582	15099	5000	25165	39394	27273
VIII	12390	14869	5000	24781	54455	37700
IX	13515	16217	5000	27029	56173	38889
X, XV	14494	17393	5000	28989	58059	40195

Región	Kilómetros viajados por año [$km * año^{-1}$]					
	LPV	LCV	MOT	TAXI	BUS	PESADO
XI	12089	14507	5000	24178	31175	21175
XII	7284	8741	5000	14569	45503	34877
XIII	14956	17498	5000	37405	67368	29471

3.1. Metodología

Para realizar el cálculo del inventario nacional de carbono negro actualizado en Chile, se utilizará el programa realizado en la memoria de Mauricio Jiménez [42] Este es un programa realizado en el lenguaje de Rstudio. Este programa consta de 4 grandes partes:

- Cálculo de factores de emisión
- Cálculo VKT
- Cálculo de inventario
- Desagregación espacial

Las categorías vehiculares que se utilizan en este método definen en la tabla 8 anteriormente descrita.

Cabe destacar que los factores de emisiones se obtuvieron anteriormente en el capítulo de factores de emisión.

3.1.1. Cálculo VKT

Para el cálculo de los kilómetros recorridos por cada vehículo (VKT), en ámbitos generales, se considera la cantidad de vehículos que hay por región geográfica, la categoría vehicular y por último la zona en que este circula, ya sea urbana o interurbana.

Para el cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$VKT = \sum_{i,j,k}^N N_{i,j,k} * KM_{i,j,k}$$

Donde N es el número de vehículos, i es la categoría vehicular, j la región donde se encuentra y k si es urbano o interurbano. Por otra parte KM es la cantidad de kilómetros recorridos, con la misma descripción de sus subíndices.

Este valor se obtiene a través del programa realizado por Jiménez anteriormente mencionado. Para poder ejecutar el programa de forma correcta se deben entregar los siguientes archivos inputs:

- N-PKM y N-TKM (número de pasajeros por kilómetro y número de toneladas por kilómetro respectivamente): Este archivo contiene información desagregado por región, tipo de carga y categoría vehicular.
- Ámbito.csv: Este archivo contiene las proporciones de vehículos que se desplazan en zonas urbanas o interurbanas variando según año y categoría vehicular.

- Subcategoría.csv: Este archivo contiene las proporciones de vehículos Gasolina y Diesel, en donde varían según tecnología, región y categoría vehicular.
- Nivel de actividad.csv: Este archivo contiene los niveles de actividad de los vehículos dependiendo su zona geográfica y su categoría.
- Factores de consumo.csv: Factor de consumo de combustible, este archivo fue obtenido en el programa ejecutado para el cálculo de FE para todas las categorías del modelo.
- TC-TO.csv: Archivo que contiene las tasas de carga y ocupación, según región geográfica y categoría vehicular.
- Consumo real hasta 2023.csv: Este archivo contiene el consumo real de los combustibles que utilizan los vehículos como son el diésel y las gasolinas hasta el año 2023 clasificado por región.
- Parque histórico hasta 2023.csv: Documento que resume los permisos de circulación informados por el INE anualmente, por región y categoría vehicular.
- Componente tecnológica.csv: Este archivo contiene las proporciones de la tecnología empleada por los vehículos desde 1990, según categoría vehicular, región y año.

Luego de trabajar la ecuación anterior y con los datos que se entregan al programa la ecuación adquiere la siguiente forma:

$$VKT_{i,j,k,l,m,n} = \frac{Ccor_{i,j,k,l,m,n}}{FC_{i,j,k,l,m,n}}$$

Donde Ccor corresponde al consumo de combustible corregido para el parque vehicular mientras que FC corresponde al factor de consumo calculado. Por otro lado, los subíndices son definidos como: i la categoría vehicular, j la región, k el ámbito, l el año que se estudia, m la motorización y n la norma que se está rigiendo.

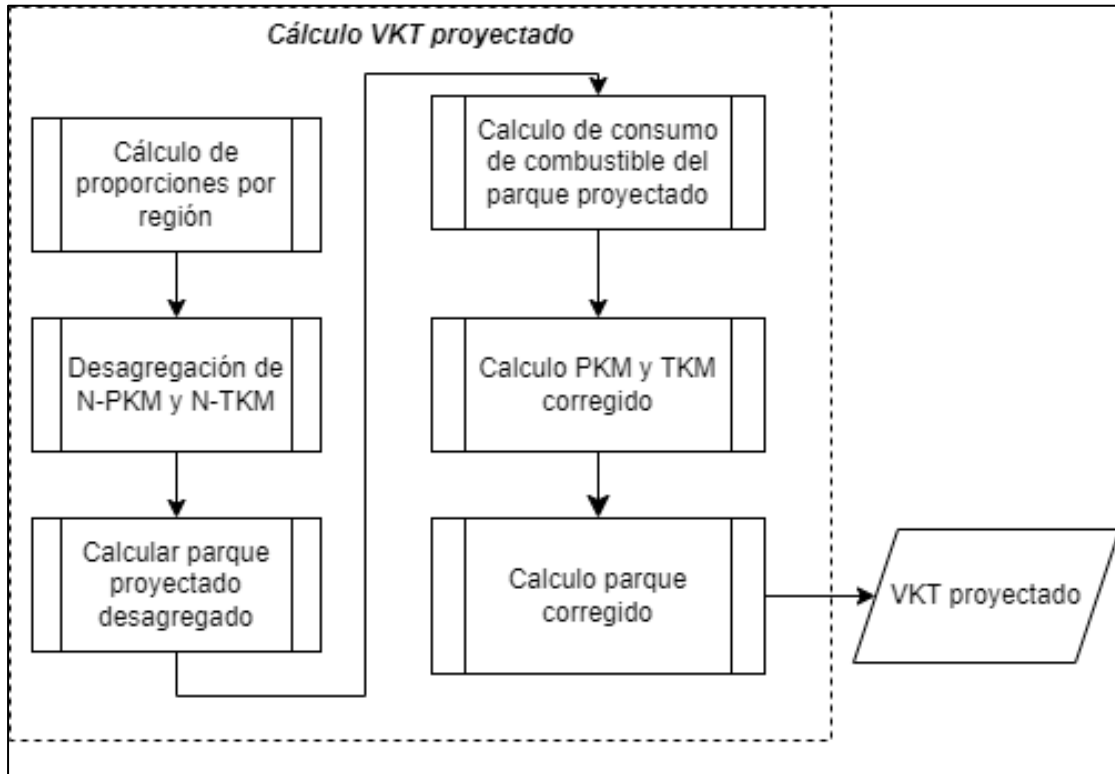


Figura 16:Diagrama de cálculo VKT [42].

Para el cálculo de un VKT actualizado, se debe actualizar el parque vehicular del país y el consumo de combustible para el año solicitado. Para actualizar los datos del parque vehicular se utilizan la información detallada por parte del INE [47] respecto a los permisos de circulación emitidos el 2023, donde se detalla la categoría vehicular y la cantidad de cada uno de ellos por región geográfica. Mientras que el consumo de combustible se actualiza respecto a la cantidad de ventas que existieron por región en este año, estos datos son entregados por la SEC anualmente.

Luego de actualizar los valores de estos archivos se procede a ejecutar el programa en Rstudio.

3.1.2. Cálculo inventario nacional

Para el cálculo del inventario nacional, se trabaja con los anteriores datos obtenidos a través del programa, que son los factores de emisiones y VKT calculados para cada categoría vehicular, estos se relación tal como lo indica la ecuación a continuación:

$$E = FE * VKT$$

En la cual E corresponde a las emisiones totales de carbono negro, FE al factor de emisión y VKT a los kilómetros recorridos por cada vehículo. En donde se realiza el cálculo en esta oportunidad regionalmente y nacional, también para cada categoría vehicular y así obtener gráficamente cual es la proporción de aporte para cada categoría vehicular.

Con lo calculado en este ítem se lleva a cabo la comparación con estudios realizados anteriormente y observar si los valores de este contaminante están al alza o a la baja según corresponda.

3.1.3. Desagregación espacial

Finalmente, para realizar una desagregación espacial de las concentraciones del carbono negro en el país se desarrolla una grilla de espaciamiento de 1 [km] x 1 [km]. Esto se realiza tanto para las rutas urbanas como interurbanas por separado para luego consolidar ambas desagregaciones. Lo anterior se realiza mediante el programa realizado por Jiménez.

Posterior a ello, mediante el programa QGIS utilizando Open Street Map y los shapfiles de las rutas urbanas como interurbanas de Chile, se revelan las vías nacionales donde se denotan de mejor manera todas la vías vehiculares a lo largo del país. Esta información detallada de cómo se calcula la grilla, los archivos input que se le entregan al programa y la descripción de los pesos vehiculares por cada región se encuentran detalladas en la memoria de Jiménez mencionada anteriormente.

A modo de resumen se indica el siguiente diagrama para observar gráficamente el flujo de esta metodología.

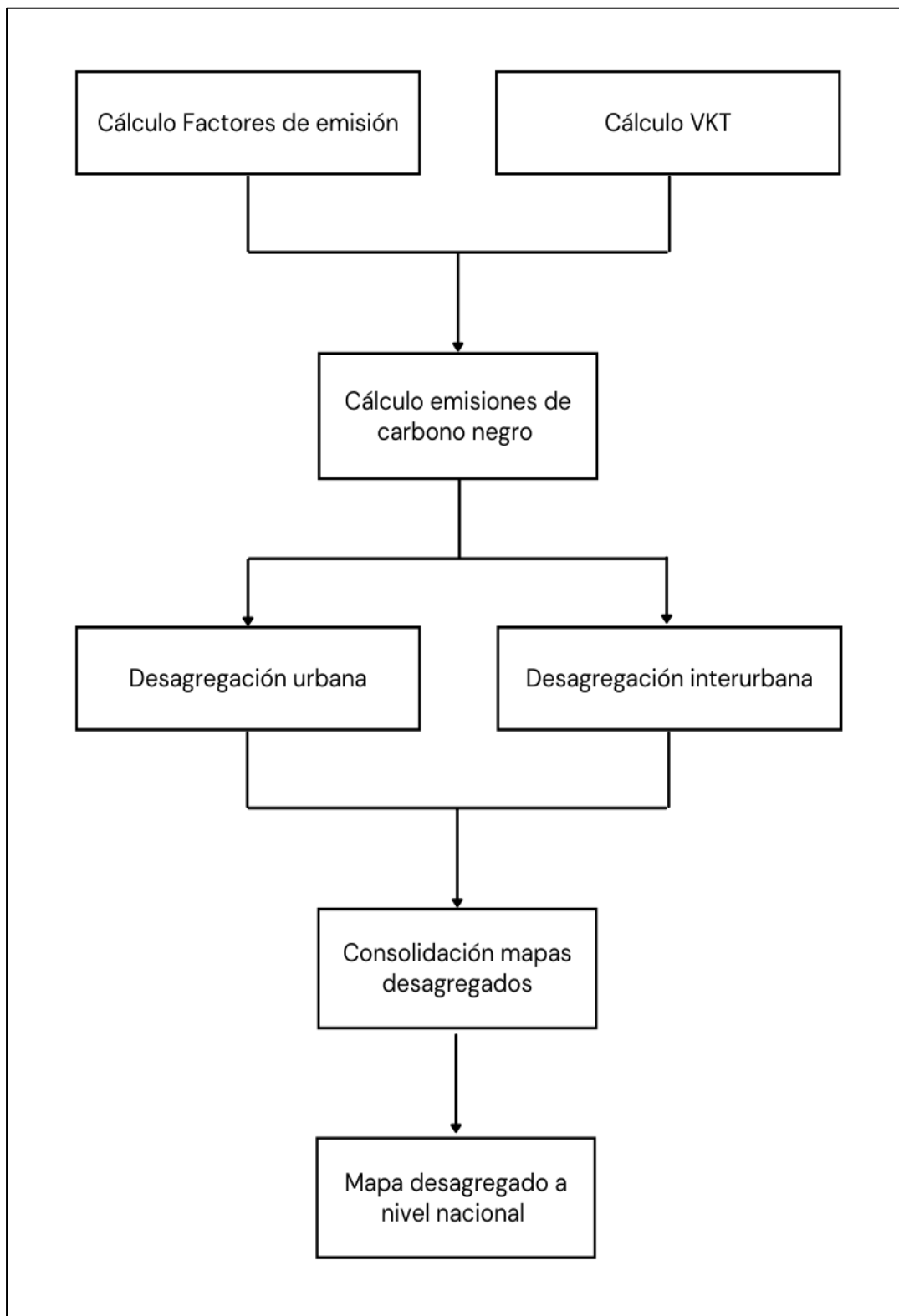


Figura 17: Diagrama de flujo de la metodología empleada para lograr la desagregación espacial.

3.2. Resultados

3.2.1. Actividad vehicular(VKT)

Dado que para calcular la actividad vehicular se requiere de actualizar el consumo de combustible se realiza una comparación de cómo se comporta anualmente este ítem, como se muestra en el siguiente gráfico

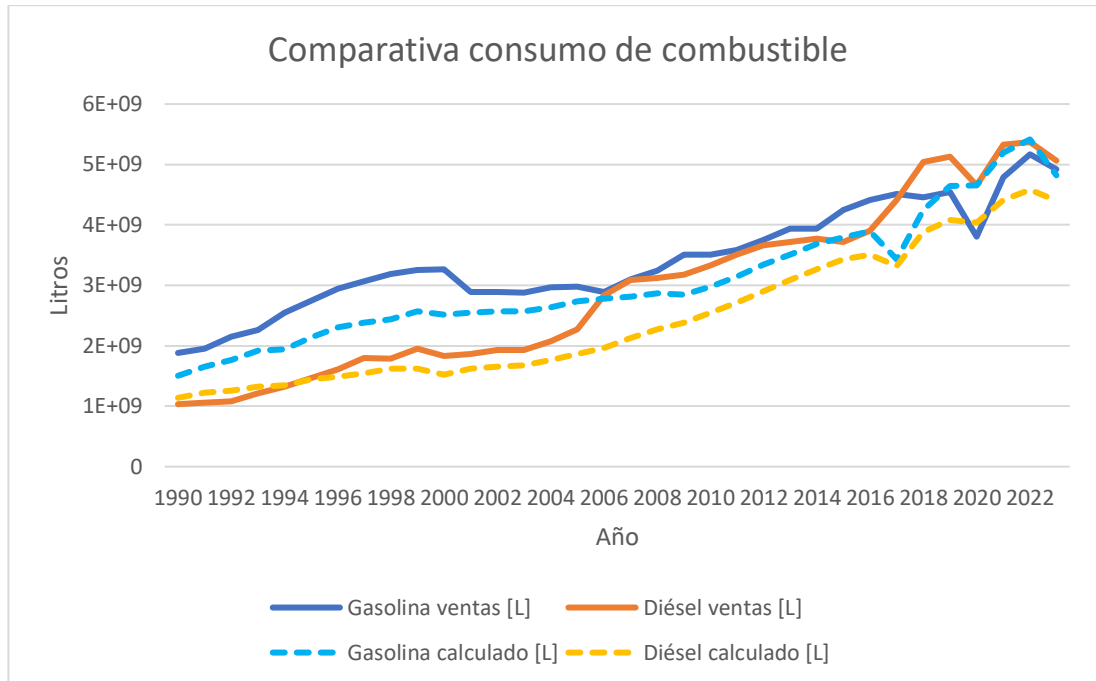


Figura 18: Comparativa de consumo de combustible en el período de años desde 1990 hasta 2023, se observa la venta real de combustible informada por la SEC y el consumo calculado corregido por su respectivo factor de corrección.

En la figura 18 se plantea una comparativa de consumo real con el calculado desde 1990 hasta el 2023. En el cual se observa que normalmente los valores de las curvas calculadas son menores a las de las ventas debido a los factores de corrección aplicados, una de las principales causas de esta baja es que existen autos “fantasmas” los cuales no están regulados y no tienen sus permisos de circulación al día, también se considera que no todo el combustible vendido se utiliza en el parque vehicular nacional y tiene otros usos.

Es importante observar que en el año 2020 el consumo de combustible disminuye considerablemente y que el combustible calculado está sobre estas ventas, lo cual ocurre por la cantidad de vehículos en el parque vehicular que no disminuye como si lo realiza el combustible a causa de la pandemia, por lo que el factor de corrección en este caso eleva al consumo calculado.

Con los consumos de combustibles obtenidos, se calcula la actividad vehicular a lo largo de todo el país considerando también las categorías vehiculares y el parque vehicular. Para una comparación respecto a años anteriores se grafica desde el año 1990 hasta el 2023.

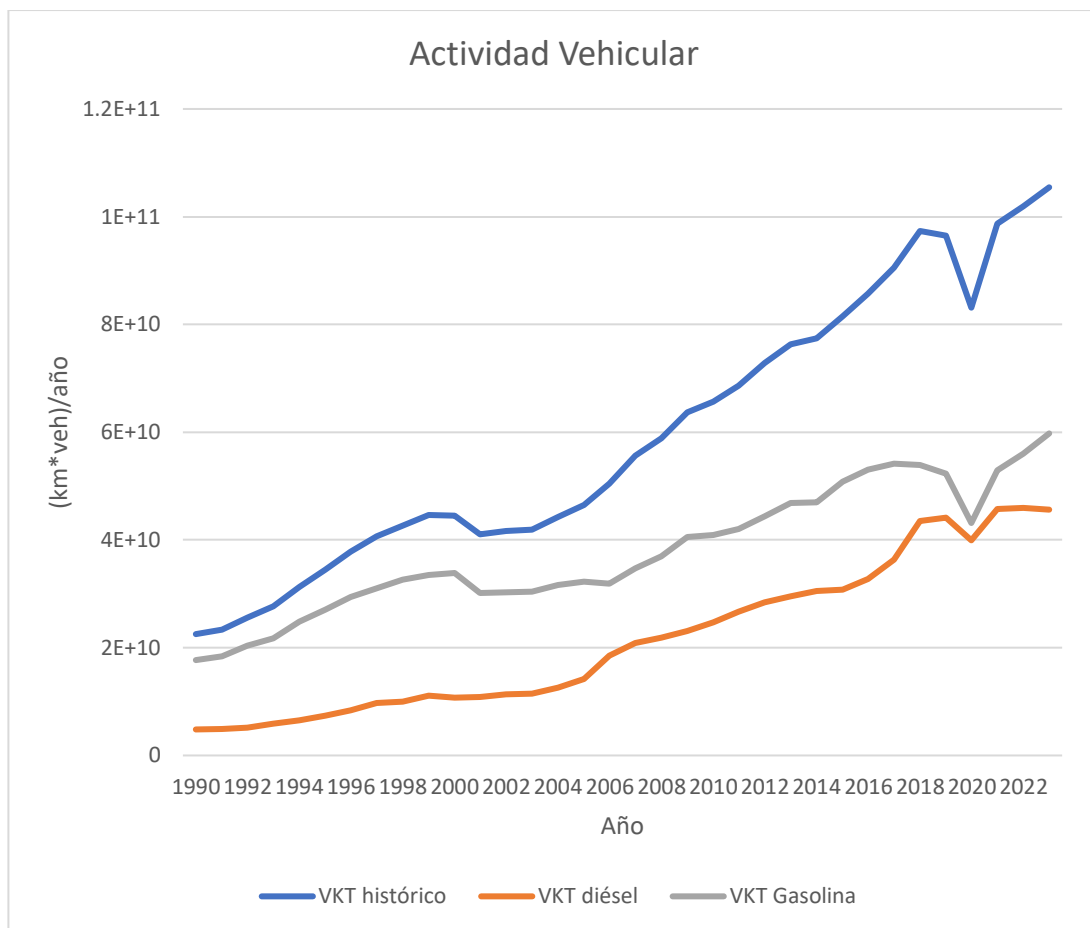


Figura 19: Actividad vehicular(VKT) de Chile desde el año 1990 hasta el 2023. La línea azul representa la actividad vehicular de todos los vehículos que se trasladan en el país mientras que la gris con la naranja representan a la actividad vehicular por combustible.

Finalmente, se presentan los resultados de la actividad vehicular en la figura 19, como se observa esta tiene un crecimiento la gran parte del periodo histórico, teniendo una baja importante como se observa en el 2020 debido a la pandemia que se vivió ese año. Con respecto al 2023 tiene un alza respecto al 2022 muy similar a la de 2021-2022. El crecimiento de esta curva se debe a que todos los años el parque vehicular ha ido aumentando y es una de las variables directamente proporcionales para el cálculo del VKT.

Por otra parte, se observa que la actividad de los vehículos a gasolina representan un mayor porcentaje del total respecto de los vehículos diésel, con un incremento significativo en sus últimos años.

3.2.2. Emisiones de carbono negro en Chile

A continuación se presentan los valores obtenidos de las emisiones de carbono negro anualmente en el Chile.

Tabla 23: Emisiones de carbono negro anual desde 1990 hasta 2023 con su respectiva comparación respecto a 1990.

Año	Emisión anual de BC [ton/año]	Comparación a 1990
1990	1166,3	0%
1991	1193,5	2%
1992	1224,0	5%
1993	1383,4	19%
1994	1502,8	29%
1995	1654,5	42%
1996	1802,3	55%
1997	2006,5	72%
1998	1962,6	68%
1999	2126,4	82%
2000	1990,3	71%
2001	2003,7	72%
2002	2055,3	76%
2003	2030,4	74%
2004	2159,9	85%
2005	2325,3	99%
2006	2736,2	135%
2007	2825,8	142%
2008	2710,5	132%
2009	2638,6	126%
2010	2659,8	128%
2011	2696,8	131%
2012	2653,8	128%
2013	2467,2	112%
2014	2267,6	94%
2015	2031,0	74%
2016	1951,6	67%
2017	2050,4	76%

Año	Emisión anual de BC [ton/año]	Comparación a 1990
2018	2048,0	76%
2019	1837,9	58%
2020	1524,8	31%
2021	1599,7	37%
2022	1489,1	28%
2023	1387,1	19%

En la tabla 24 se observa que desde el año 1990 hasta el 2007 existe un incremento de emisiones de carbono negro anualmente, luego existe un descenso en las toneladas anuales. Como se observa el año 2023 hay un total de 1387 toneladas de carbono negro emitida por vehículos en el país, un 19% más que las emisiones de 1990. Si bien estas emisiones aumentaron respecto al año inicial, en comparación al 142% de aumento en el año 2007 se ve una notable mejora en el control de las emisiones de carbono negro.

Para una mejor visualización, se realizan gráficos anuales de emisión identificando cuanto representa cada categoría vehicular, cada región, cada norma vehicular y cada combustible desde el 1990 hasta 2023.

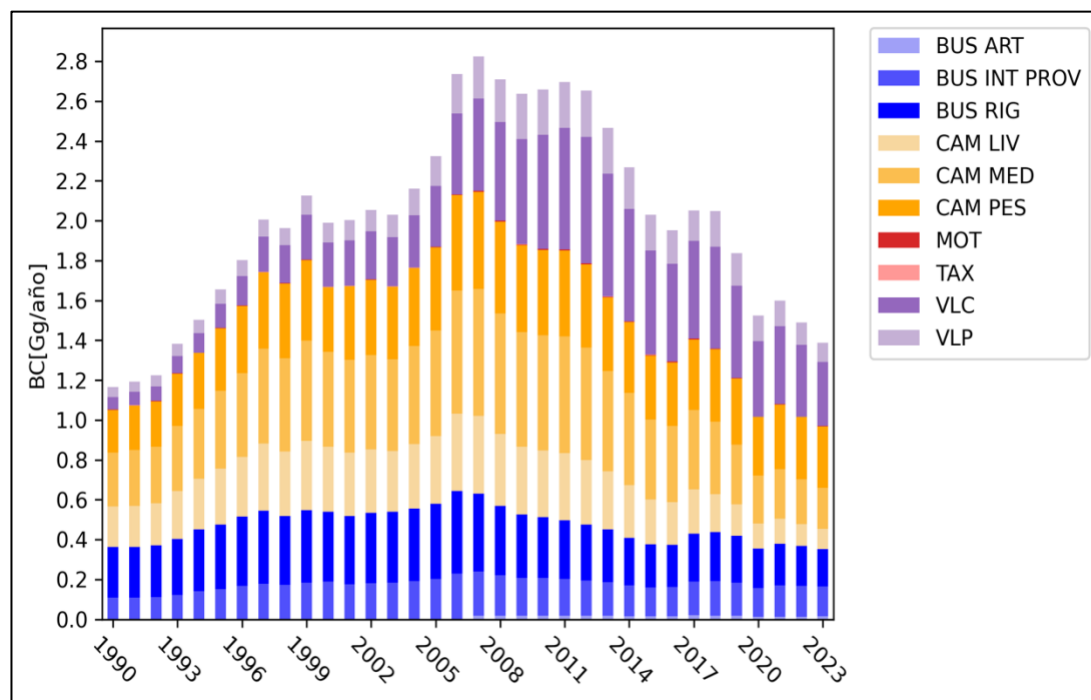


Figura 20: Emisiones anual de carbono negro a nivel nacional según categoría vehicular.

Tabla 24: Emisiones de carbono negro anual por categoría vehicular cada 5 años.

Categoría vehicular	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023
Bus Interprovincial [kton/año]	0,11	0,15	0,19	0,20	0,19	0,14	0,14	0,15
Bus articulado [kton/año]	0	0	0	0	0,017	0,016	0,012	0,014
Bus rígido [kton/año]	0,25	0,32	0,35	0,38	0,31	0,22	0,20	0,19
Camiones liviano [kton/año]	0,20	0,28	0,33	0,34	0,33	0,23	0,13	0,10
Camiones medianos [kton/año]	0,27	0,39	0,48	0,53	0,58	0,40	0,24	0,20
Camiones pesados [kton/año]	0,22	0,31	0,32	0,42	0,43	0,32	0,29	0,31
Vehículo liviano de pasajeros [kton/año]	0,051	0,072	0,10	0,15	0,22	0,18	0,13	0,094
Taxi [kton/año]	0,00020	0,00056	0,00085	0,00078	0,00067	0,00049	0,00018	0,00019
Vehículo liviano comercial [kton/año]	0,062	0,12	0,22	0,30	0,57	0,52	0,38	0,32
Motocicletas [kton/año]	0,0014	0,0019	0,0018	0,0015	0,0040	0,0038	0,0015	0,0020

Para el año 2023, se puede observar que las dos categorías que mayor emisión de carbono negro producen en Chile anualmente son los vehículos livianos comercial junto con los camiones pesados aportando entre ambos cerca del 50% de las emisiones, posterior a estos todos los buses como los otros camiones también aportan una elevada cantidad de carbono negro.

En la figura 20 se observan las emisiones de carbono negro según categoría vehicular, desde el 2007 al 2023 ha estado en descenso como se mencionó anteriormente. Se ve representado los valores de la tabla 25, en donde los colores de los camiones pesados como de vehículos livianos comerciales tienen una mayor presencia en la columna.

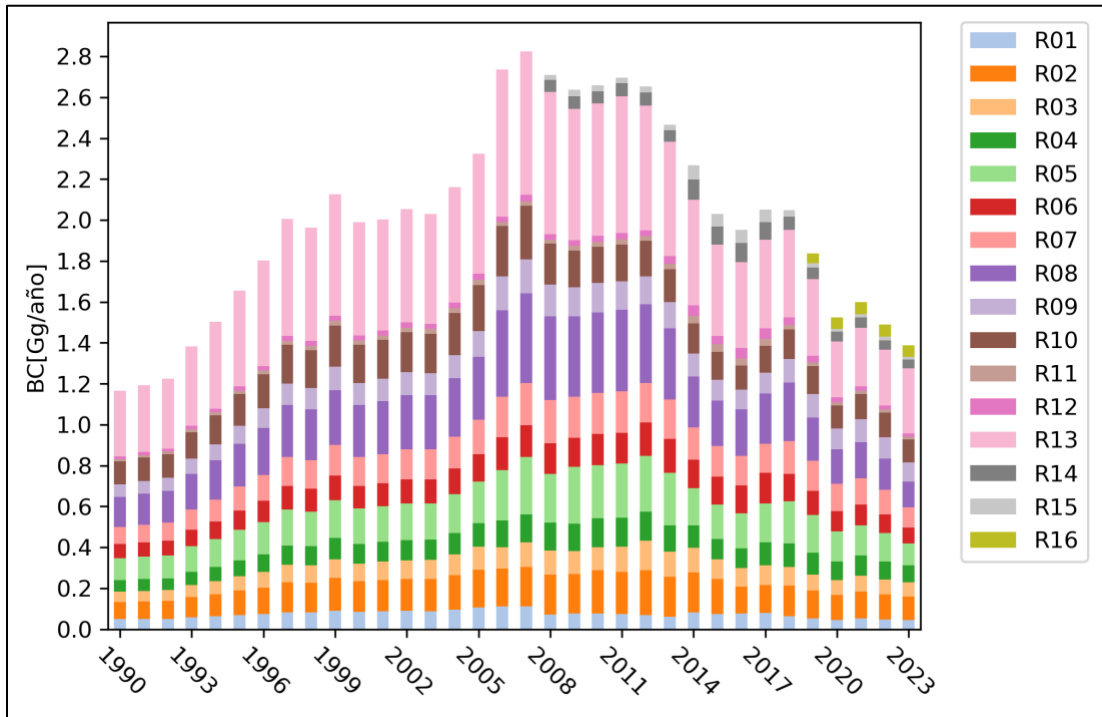


Figura 21: Emisiones anual de carbono negro a nivel nacional según la región.

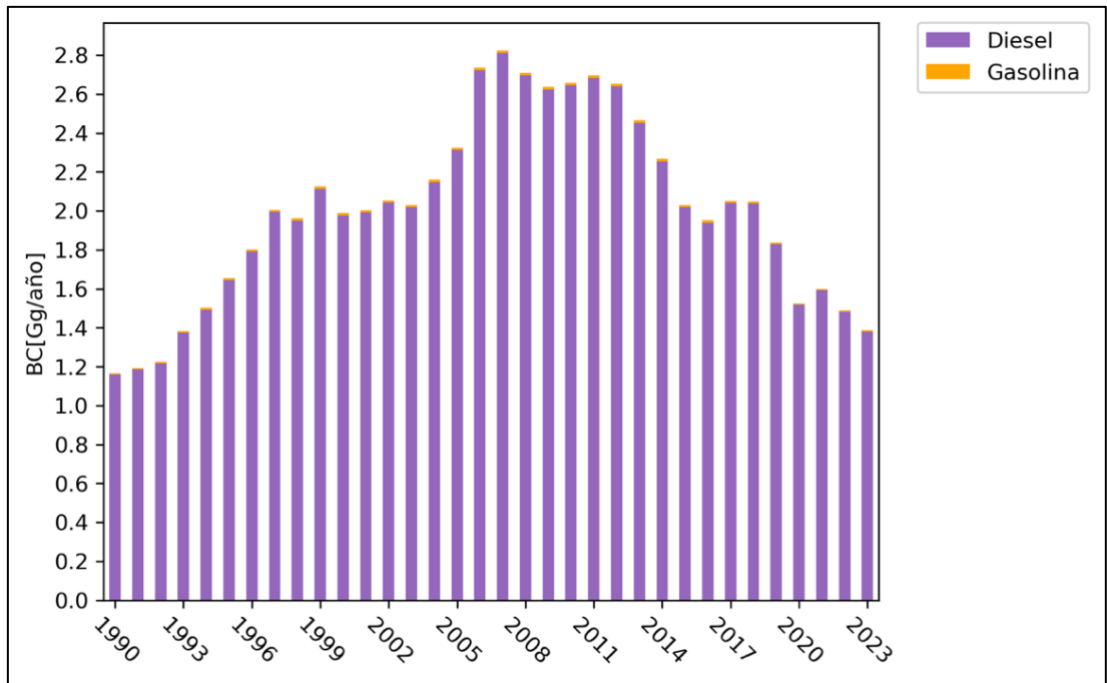


Figura 22: Emisiones anual de carbono negro a nivel nacional según el combustible utilizado.

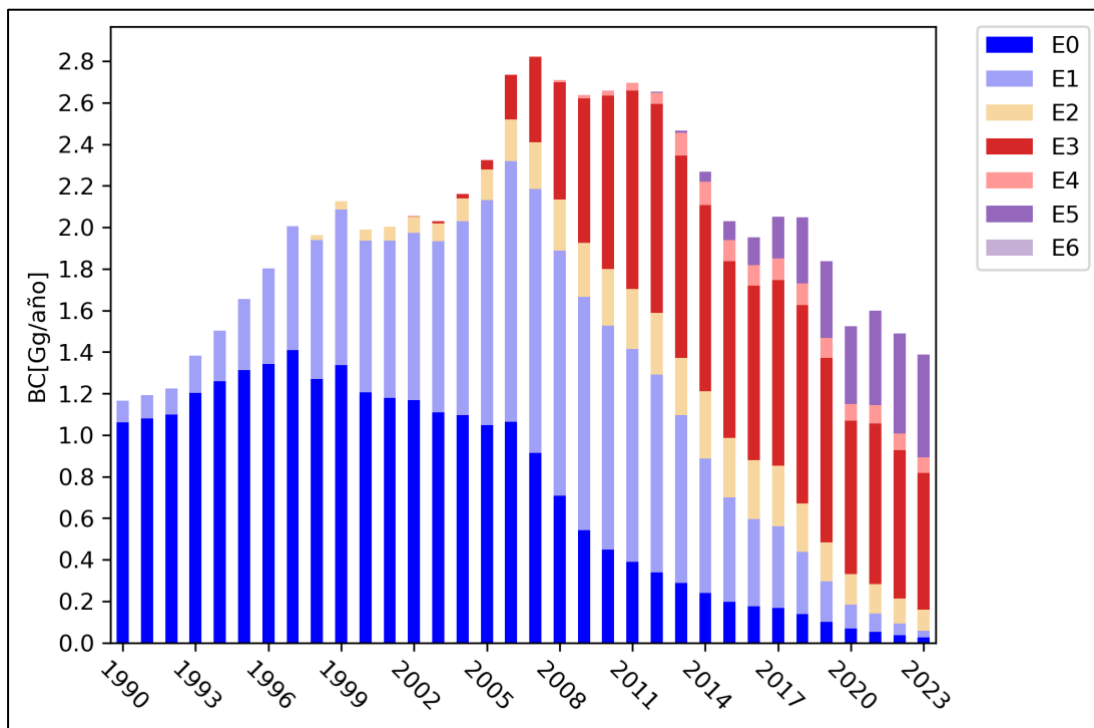


Figura 23: Emisiones anual de carbono negro a nivel nacional según la norma utilizada en el parque vehicular.

Respecto a la figura 21 que representa las emisiones anuales de carbono negro según la región que es emitido. Se observa claramente para el año 2023 que la mayor cantidad de estas emisiones se concentra en la región 13 que representa a la región metropolitana.

Como se puede observar en la figura 22, casi la totalidad de las emisiones de carbono negro durante todos los años estudiados es producido por vehículos que utilizan combustible diésel, esto es de esperar luego de los resultados de los factores de emisión anteriormente obtenidos.

Por otra parte, en la figura 23 que plasmado como la actualización del parque vehicular según la norma aplicada afecta directamente en las emisiones de este contaminante. A pesar de que en 2023 la cantidad de vehículos es mayor que los años anteriores las emisiones descienden, esto debido a la casi nula presencia de vehículos EURO 1 y 2 y al crecimiento de vehículos Euro 5 siendo esta norma muy estricta con las emisiones de material particulado.

Finalmente, se presenta el siguiente gráfico comparativo para distintos contaminantes y su evolución a través de los años, en donde se normaliza con respecto a 1990.

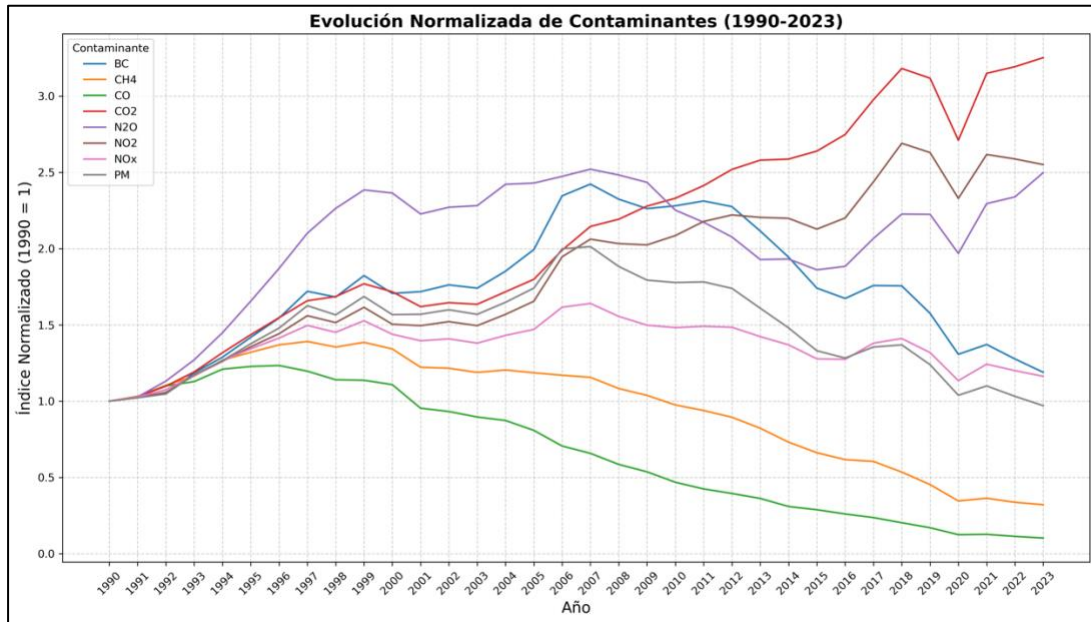


Figura 24: Curvas normalizadas de emisiones de contaminantes a través de los años respecto a 1990.

En la figura 24 se observa que no todas las emisiones han sido controladas con el resultado del carbono negro por ejemplo que con las nuevas normas de emisión han ido a la baja a medida que el parque vehicular se actualiza. También se observa que el carbono negro disminuye tal cual lo realizada el PM ya que el BC es parte de este contaminante.

En las emisiones que han ido a la baja se puede ver el punto de inflexión cuando se aplica una norma que controla al contaminante, como en el caso del CO que comenzó en aumento hasta la implementación de las primeras normas y comenzó su descenso con el paso de los años.

Se realiza una comparación de resultados obtenidos en estudios previos con los de esta investigación para realizar una validación de que los resultados están correctos, en los siguientes gráficos se realiza una comparación con un estudio de Osses [9] y el MMA [1].

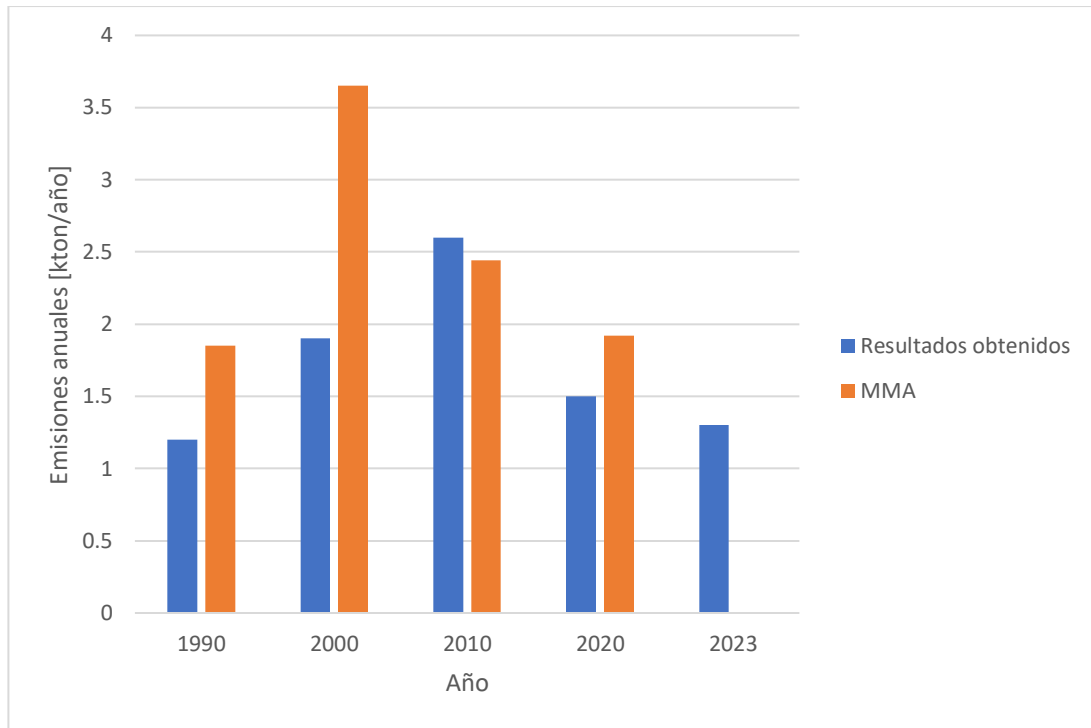


Figura 25; Comparación resultados obtenidos con MMA.

Con respecto al MMA no existen grandes variaciones desde el año 2010 hasta el 2020, sin embargo para el año 2000 existe una variación del 47% que es alto, uno de los factores de este cambio son los datos utilizados históricamente para esos años los cuales deben ser analizados.

Con respecto al estudio de Osses et. al se observa que no hay grandes variaciones, se asemejan en los valores y siguen la misma tendencia a través de los años.

Respecto al año 2023 no hay resultados pero se observa que sigue la tendencia de los años anteriores de los 3 estudios que es descender y el valor es menor que en el año 2020 lo cual está correcto por la actualización del parque vehicular y sus respectivas normas.

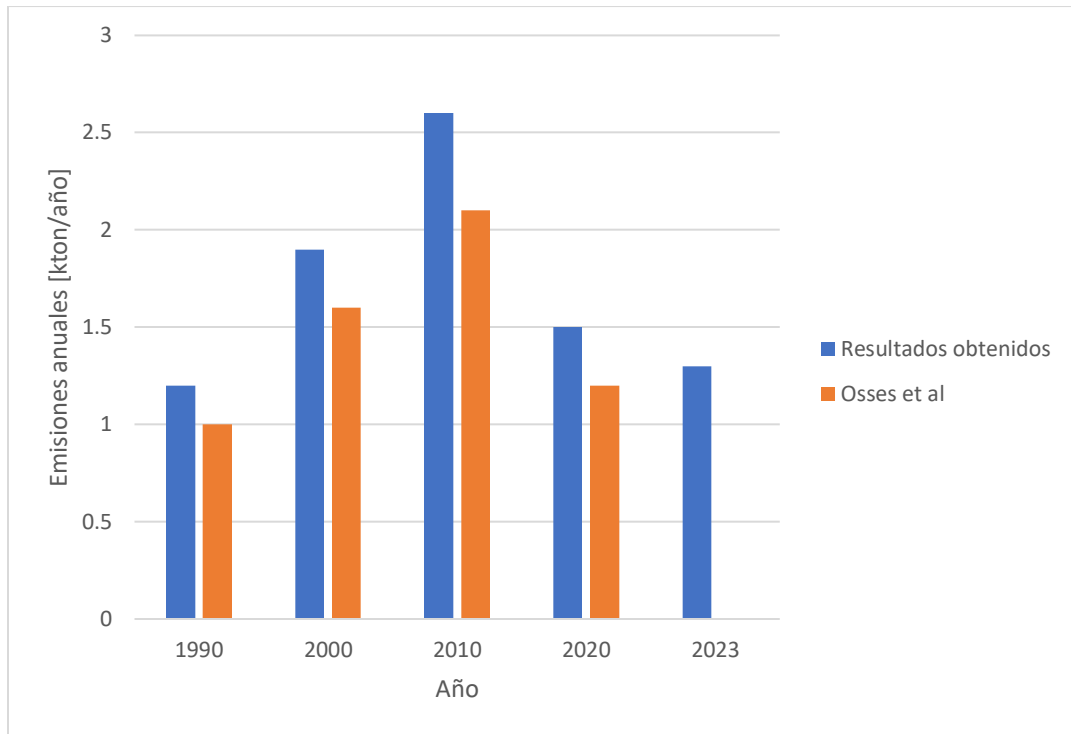


Figura 26: Comparación de resultados obtenidos con Osses et. al.

3.2.3. Desagregación espacial para Chile en el año 2023

Para visualizar las concentraciones de carbono negro por pixel en el mapa de la desagregación espacial, se utiliza una escala de 0,0019[Gg/año], esta escala se utiliza en la desagregación espacial de todo el territorio nacional.

Se utiliza una escala de color denominada Magma invertido en Qgis, la cual permite visualizar de color más claro las bajas concentraciones y de color más oscuro donde se encuentra más concentrado el carbono negro.

A continuación se presentan las desagregaciones espaciales de la zona norte, centro y sur, así como de las ciudades de Santiago, Valparaíso, Concepción y de Rancagua.

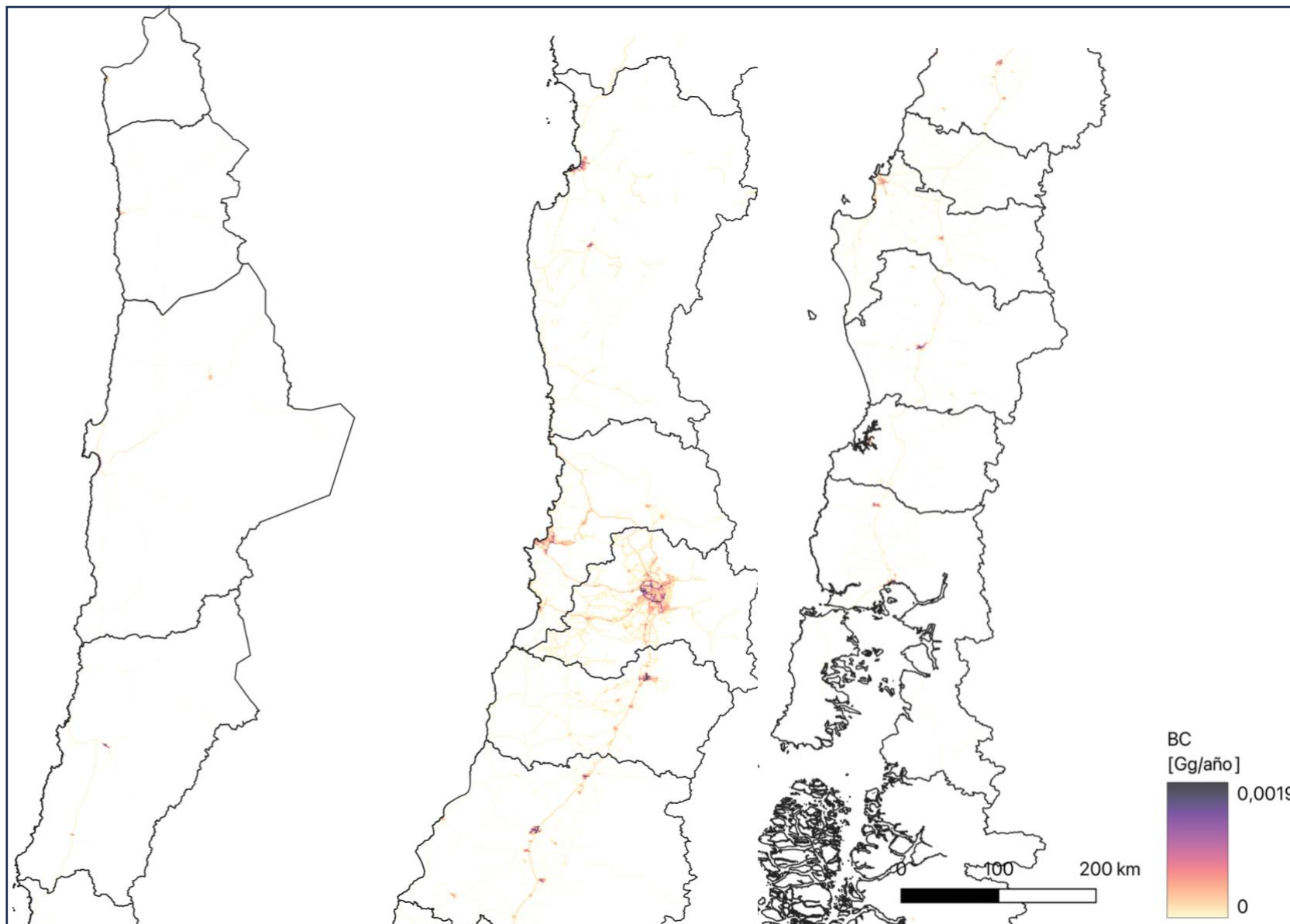


Figura 27:Desagregación espacial de zona norte, zona centro y zona sur hasta el finde la ruta 5.

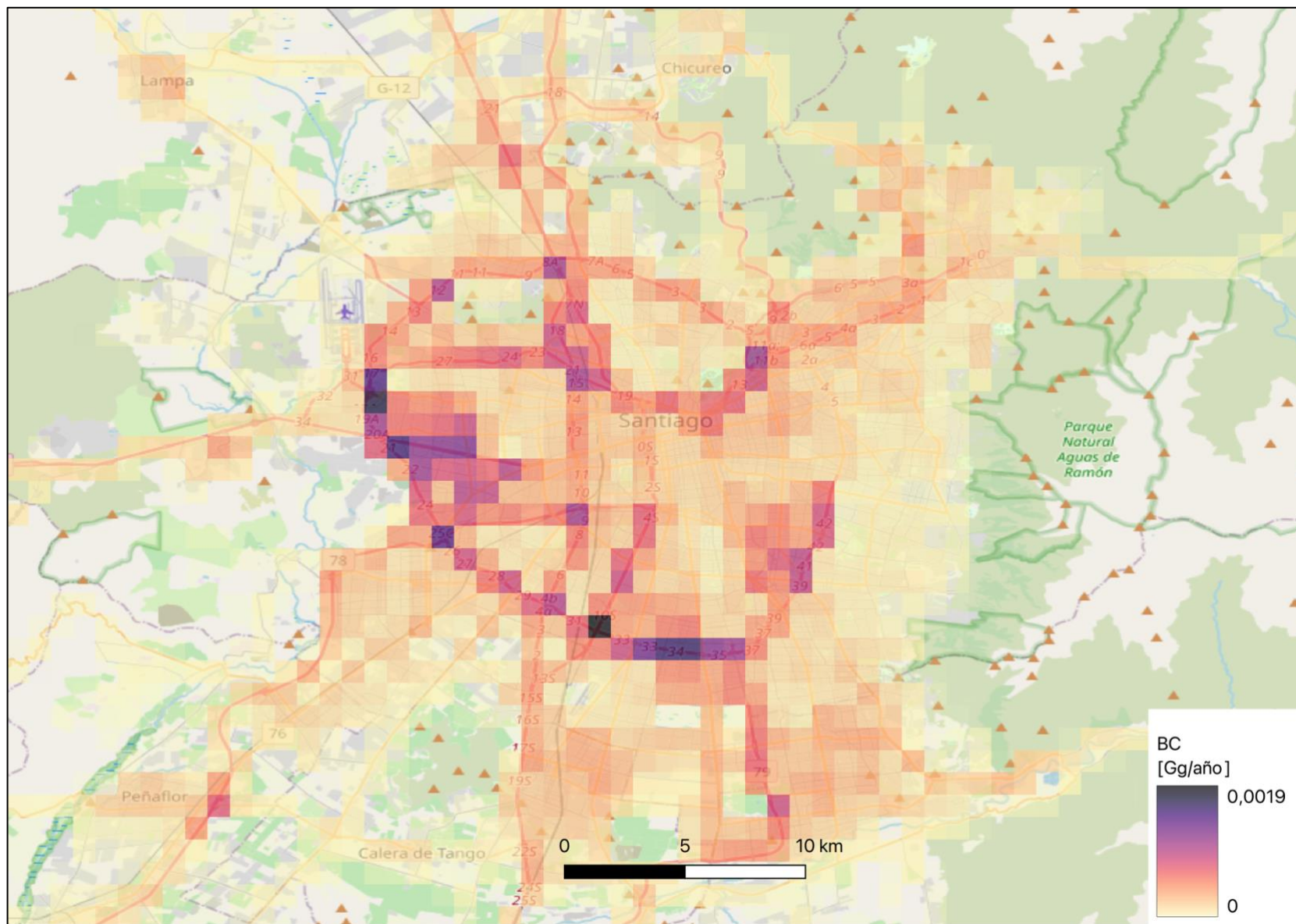


Figura 28: Desagregación de emisiones de carbono negro para la ciudad de Santiago.

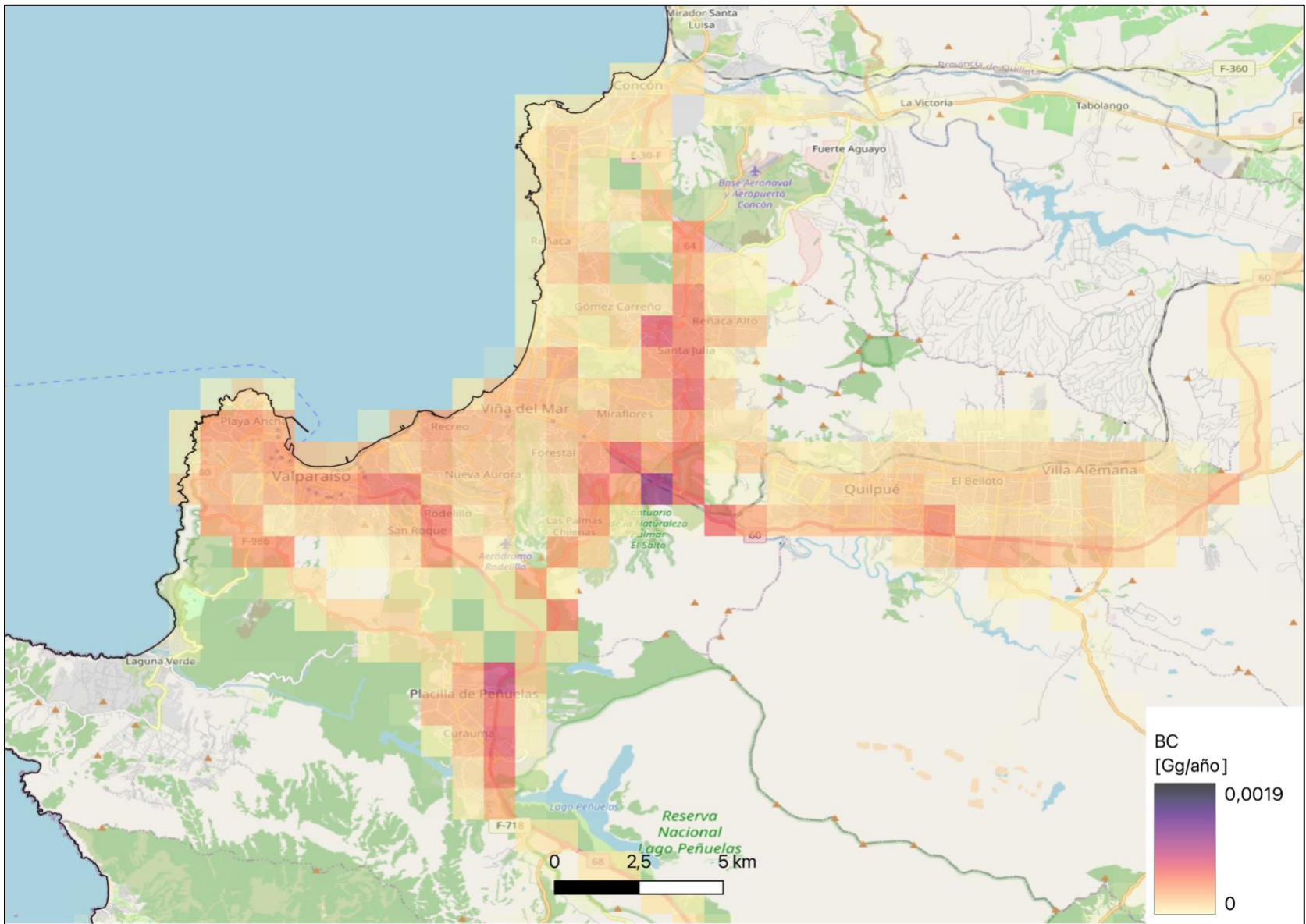


Figura 29: Desagregación de emisiones de carbono negro para la ciudad de Valparaíso.

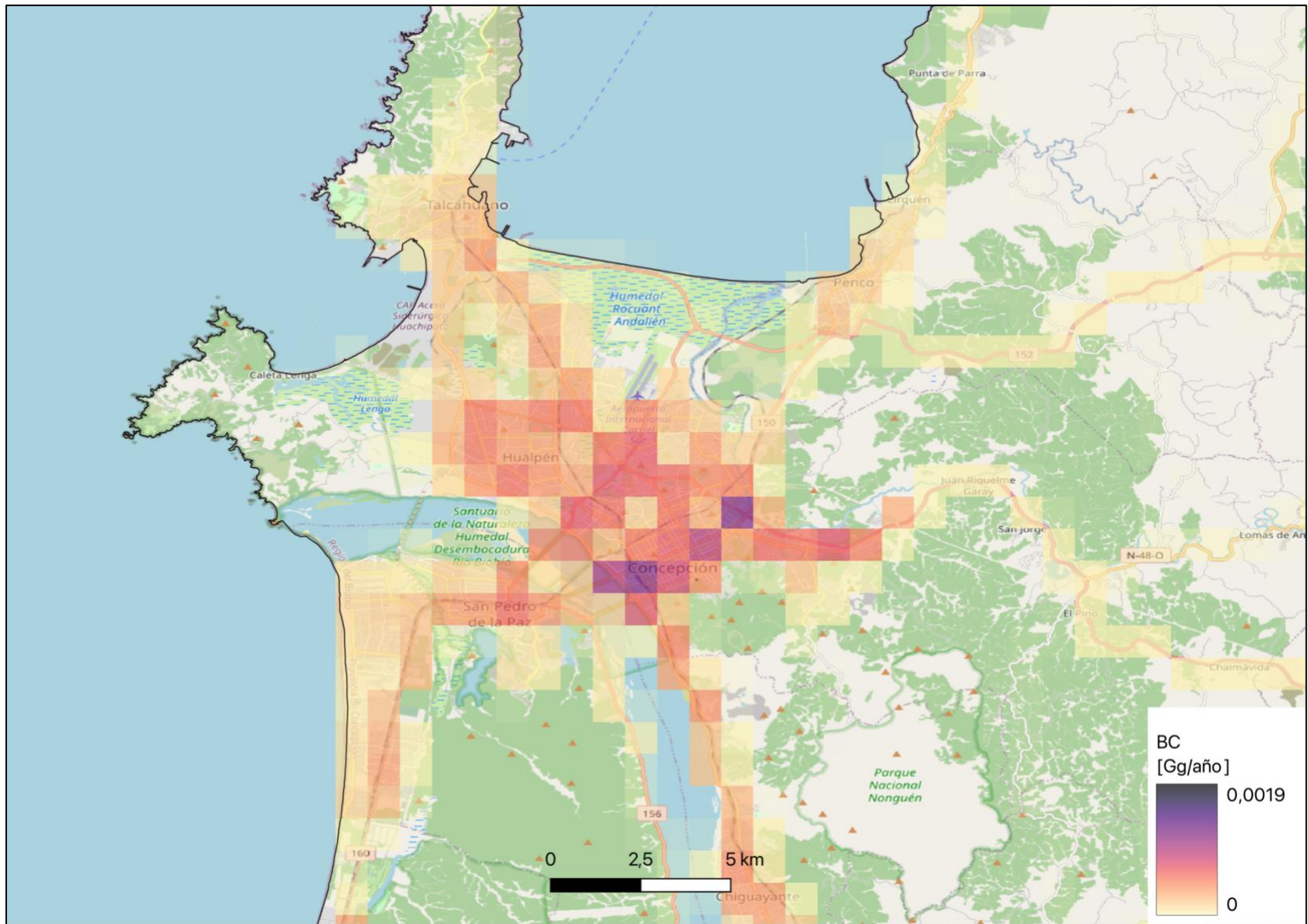


Figura 30: Desagregación de emisiones de carbono negro para la ciudad de Concepción.

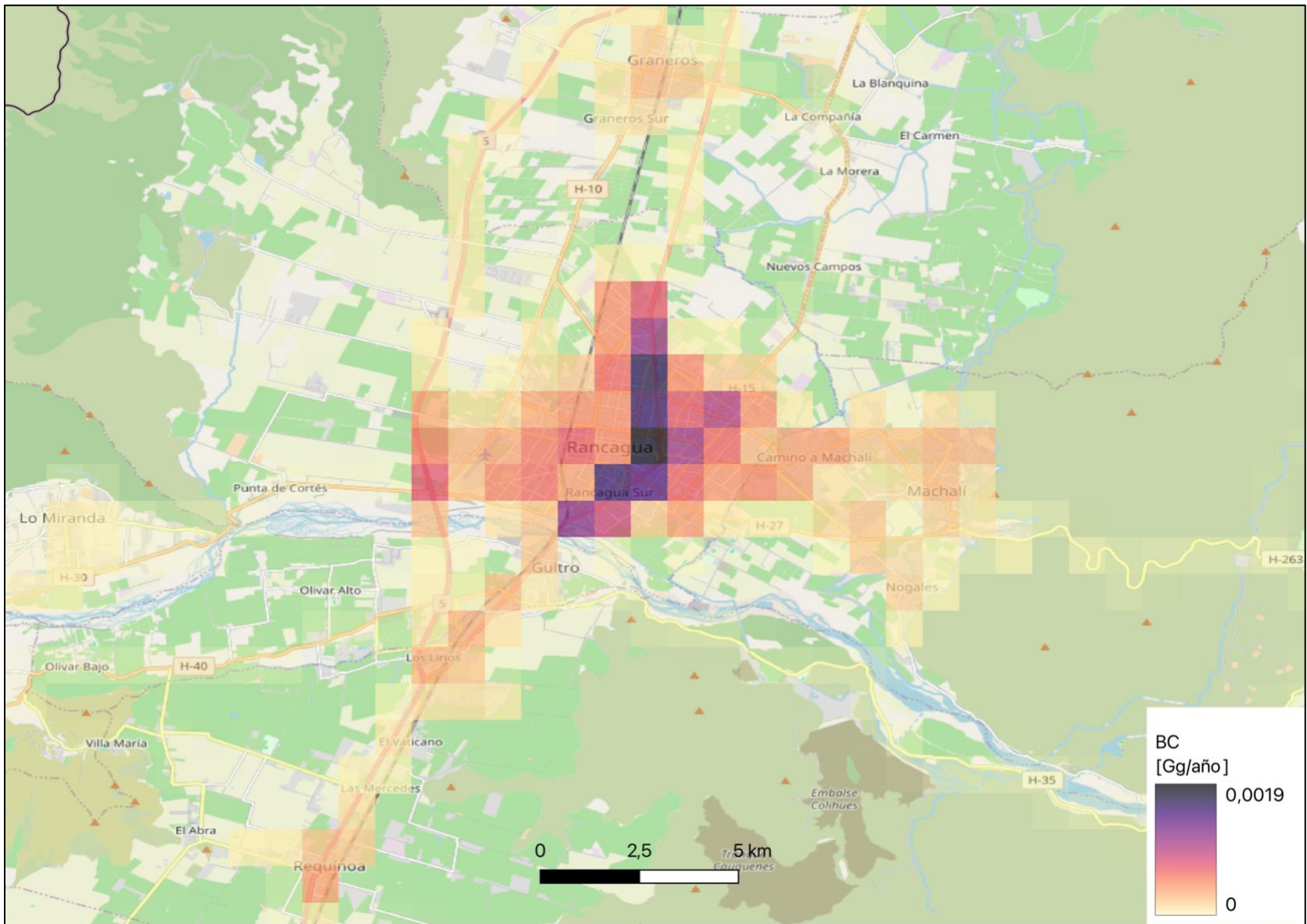


Figura 31: Desagregación de emisiones de carbono negro para la ciudad de Rancagua

En todas las ciudades se puede observar que las mayores concentraciones de carbono negro se encuentran en las autopistas que existe un mayor tráfico de vehículos comerciales y/o vehículos de carga como son los camiones. Lo anterior se debe a que estos son los principales fuentes de emisión de este contaminante, por lo que al concentrarse en una misma zona permite observar claramente donde hay una mayor concentración.

En el caso de Santiago se observa en la Figura 28 que las mayores concentraciones de carbono negro se encuentran principalmente en el anillo de Américo Vespucio, con mayor concentración a su cercanía a la Ruta 68 donde hay un alto ingreso y salida de camiones con dirección a los puertos y al acceso sur de la ciudad, como era de esperarse en la conexión de Américo Vespucio con la autopista central. Posterior a ello se observa una mayor concentración en la avenida Costanera aumentando en el conglomerado de avenidas como lo son Costanera norte, avenida Santa María, túnel San Cristóbal y los Conquistadores.

En la ciudad de Valparaíso en la Figura 29, se observa que las mayores concentraciones se encuentran en la llegada a la ciudad por la ruta 68 y alrededor de la ciudad a través de la ruta 64 en el punto más cercano a la autopista troncal. En el sector de la ciudad donde está más urbanizado se observa una mayor concentración en avenida Argentina, Independencia y Manuel Montt que se destacan por la llegada de buses interprovinciales y en el caso puntual de Manuel Montt concentrar una gran cantidad de buses urbanos.

En el caso de Concepción se observa una mayor concentración en la rotonda ubicada en la autopista a Concepción-Cabrero y el camino a Penco que son las rutas que unen a Concepción con la ruta 5 tanto hacia el norte como al sur, junto a esta zona también se observa a la llegada del puente Llacolén por la avenida Padre Hurtado. Esta ciudad se destaca por tener una gran concentración en su centro por su alta circulación vehicular y gran cantidad de vehículos comerciales.

En Rancagua se observa una gran concentración del contaminante en la ruta travesía y sus alrededores, especialmente en la conexión con la avenida Miguel Ramírez la cual une a Rancagua con Machalí. Cabe destacar que esta ruta tiene mayor concentración de vehículos pesados por la presencia de bodegas e industrias.

Finalmente, en el país se denota un comportamiento similar en todas las ciudades, es decir, se encuentra mayormente concentrado en las rutas o autopistas cercanas a la ciudad ya que es donde llegan productos de abastecimientos para estas comunas y sus alrededores.

Como es de esperarse los hotspots de Santiago son más frecuentes en comparación a las demás ciudades con valores entre 0,00078 [Gg/año] hasta su punto máximo de 0,0019 [Gg/año], en comparación con las otras 3 ciudades estos puntos se ven mucho más seguidos, se logran observar con facilidad en el anillo Américo Vespucio. Los siguientes hotspots más altos se logran observar en Rancagua con valores entre los 0,00080[Gg/año] hasta 0,0018[Gg/año], en esta región solo se observan puntos de alta concentración en esta comuna debido a que al programa se le entregan pesos dependiendo de la cantidad de habitantes, mayor a 5.000 habitantes se considera ciudad y mayor a 100.000 se considera ciudad mayor, en el caso de Rancagua es la única

comuna de la región que se considera ciudad mayor por ende es la única comuna con un peso distinto lo cual genera que la mayor concentración de la región se le entregue a esta sector en específico. En el caso de la ciudad de Valparaíso se observan hotspots con valores desde los 0,00052[Gg/año] hasta los 0,0011[Gg/año], estos valores se encuentran más bajos por la cantidad de vehículos que se encuentran en la región y la cantidad de ciudades mayores que existe, entre las cuales destacan Valparaíso, Viña del mar, Villa Alemana y Quilpué lo que produce que el peso de la región esté con una mayor distribución entre ellas. Finalmente en la ciudad de Concepción existen hotspots con valores desde los 0,00077[Gg/año] hasta 0,0012[Gg/año], estos se generan en baja cantidad y más distribuido porque también en la región existen más comunas con el mismo peso que esta.

Capítulo 4

4. Campaña de medición

Como parte de un proyecto multidisciplinario llevado a cabo por el departamento de mecánica y de obras civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María, cuyo objetivo es estudiar el comportamiento de la nieve y la relación que este conlleva con el carbono negro, identificando el potencial que tiene este contaminante sobre las características físicas y la conservación de esta en el tiempo.

Junto a este proyecto, también se participa en el día nacional sin auto año 2024, en el cual se trabaja en colaboración al Ministerio del Medio Ambiente y al Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de Latino América(CALAC+). En esta participación se busca interactuar con la ciudadanía dando a conocer el impacto que tienen los CCVC sobre la ciudad en que estos conviven diariamente y como afecta sobre ellos. Junto a lo anterior se plantean los métodos con lo cual se busca mitigar las emisiones de estos contaminantes.

Debido a la disponibilidad de un etalómetro modelo MA300 se utilizará este método de medición en la campaña. Con este equipo se puede medir la concentración de carbono negro en el lugar que se defina y bajo las condiciones que el equipo de trabajo estime conveniente.

En el marco del proyecto universitario se realiza la campaña de medición en dos sectores de la cordillera de los Andes. El primer punto es en el embalse el Yeso, ubicado en la comuna de San José de Maipo en la región Metropolitana al día siguiente de caída de nieve. Este lugar se escoge debido a la lejanía existente entre el embalse y la localidad de San José de Maipo. Además se considera que posterior a la nevazón hay poco tránsito en la ruta camino al embalse.

En este mismo proyecto, se realiza una campaña de medición en Portillo ubicado en la provincia de los Andes en la región de Valparaíso, a 6 km del paso internacional Los Libertadores. Este es un punto importante de analizar debido a la cercanía que existe entre las zonas de nieve con respecto a la ruta que está a un costado. En esta ruta circula muchos camiones nacionales como internacionales por lo que se espera que sea un punto con altas concentraciones de carbono negro y a su vez la nieve tenga un distinto comportamiento respecto de su par en el Embalse el Yeso. Otro punto importante de

este lugar es que al no existir una población cercana a Portillo, los datos adquiridos por el etalómetro es prácticamente producido en su totalidad por el la circulación vehicular por la ruta aledaña.

Finalmente, en la participación del día nacional sin autos, se trabaja con el ministerio del medio ambiente, el cual se adjudica un stand en esta actividad, la cual se lleva a cabo en el centro de Santiago en la calle Agustinas, entre Teatinos y Estado. Durante esta actividad el día 29 de septiembre no circularán vehículos por Agustinas. Debido a este antecedente, se lleva a cabo una toma de datos con el etalómetro el día anterior al corte de tráfico con un flujo normal de autos y se realiza otra toma de datos durante el día nacional sin autos, con el fin de poder comparar cómo se comporta la concentración de carbono negro en el mismo sector, en mismo horario con la diferencia que en un caso hay flujo vehicular y en el otro no.

4.1. Metodología

4.1.1. MICROAETH MA300

Para la medición de carbono negro se utiliza un etalómetro marca Aethlabs modelo MA300, el cual tiene las siguientes características:

Tabla 25: Características del equipo MA300

Característica	Desempeño
Método de medición	Análisis del espectro de 5 longitudes de onda en tiempo real midiendo la tasa de cambio de la luz transmitida debido a la deposición continua de partículas en el filtro.
Rango de medición	Desde 0 a 1 mg de BC/m ³
Resolución	0,001 µg BC/m ³
Tiempo de muestreo	1, 5, 10, 30, 60 o 300 segundos.
Flujo de entrada	50, 57, 100, 125 o 150 ml/min.
Longitudes de onda de medición	880 nm, 625 nm, 528 nm, 470 nm y 375 nm.
Condiciones de operación	Desde 5° a 40° C en funcionamiento.
Funcionamiento eléctrico	Batería interna recargable de iones de Litio de 4 celdas, 3.6 V, 12800mAh (46,08 Wh)

Característica	Desempeño
Tipo de filtro	Cinta filtrante modelo MA300 de material politetrafluoroetileno(PTFE). Con 85 lugares de muestreo
Dimensiones	Largo: 165,20 mm Ancho: 125,20 mm Profundidad: 39,70 mm
Peso	715 gramos
Accesorios	Kit de protección entrada de flujo (equipo que permite filtrar la humedad).

El fabricante describe que los instrumentos de la serie MA de MicroAeth son instrumentos de cinco longitudes de onda en miniatura, portátiles y altamente sensibles, diseñados para medir las partículas de carbono que absorben la luz («LAC»).

El MicroAeth extrae una muestra de aire a un caudal que el usuario defina antes de la medición el cual pasa por una porción de 3 mm de diámetro de la cinta filtrante. Esta recolección de partículas en el filtro se ilumina con fuentes de luz led a distinta longitud de onda dependiendo el objetivo de la toma de muestras, lo cual permite mediante un detector medir la transmisión óptica, obteniendo así una atenuación óptica (ATN). Esta ATN se compara con una parte de referencia adyacente al filtro en el cual no se acumulan partículas y está establecida por el fabricante. La electrónica y el microprocesador miden y almacenan los datos en cada período de base de tiempo para determinar el incremento de la ATN durante cada base de tiempo. A continuación, se convierte en una concentración de masa de BC expresada en nanogramos por metro cúbico (ng/m^3) utilizando la absorbancia óptica conocida por unidad de masa de material de carbono negro [48]. Durante el funcionamiento, el microprocesador realiza las mediciones ópticas, mide y estabiliza el flujo de aire, calcula la concentración de masa de BC y registra los datos en la memoria interna. Finalmente los datos se adquieren en un Excel a través del programa entregado por el fabricante a este tipo de instrumento.

El equipo cuenta con 5 longitudes de onda las cuales tiene un objetivo distinto de medición, como se observa a continuación

- 880 nm: Interpreta mediciones principalmente de BC.
- 375 nm: Interpreta la materia particulada ultravioleta, que es indicativa de humo de leña, tabaco y quema de biomasa principalmente.
- 625, 528, 470 nm: Estas ondas entregan información adicional sobre el aerosol investigado y permite al equipo calcular el exponente de Angstrom que se utiliza en la asignación de fuentes y otras investigaciones.

Por otra parte, el equipo entrega la opción de utilizar el método de compensación de carga DualSpot, el cual permite recolectar simultáneamente muestras de aerosol en dos puntos de análisis en paralelo y a diferentes velocidades, mientras se mide la tasa de cambio de absorción de la luz. Este algoritmo permite al equipo entregar datos de mayor calidad y facilita el post procesamiento de estos.

4.1.2. MicroAeth Manager

Tanto para la configuración como para la extracción de los datos recolectados por el equipo en la campaña de medición Aethlabs entrega el programa MicroAeth Manager.

Es en este programa donde se determina el tiempo en que se toma cada medición, el flujo de entrada de aire al equipo, la utilización de single o dual spot, entre otras características.

Para la extracción de los datos recolectados por el equipo se conecta el equipo al computador donde está instalado y entrega archivos formatos Excel por cada período de muestreo para su posterior post procesamiento

A continuación se aprecia la interfaz de este software.

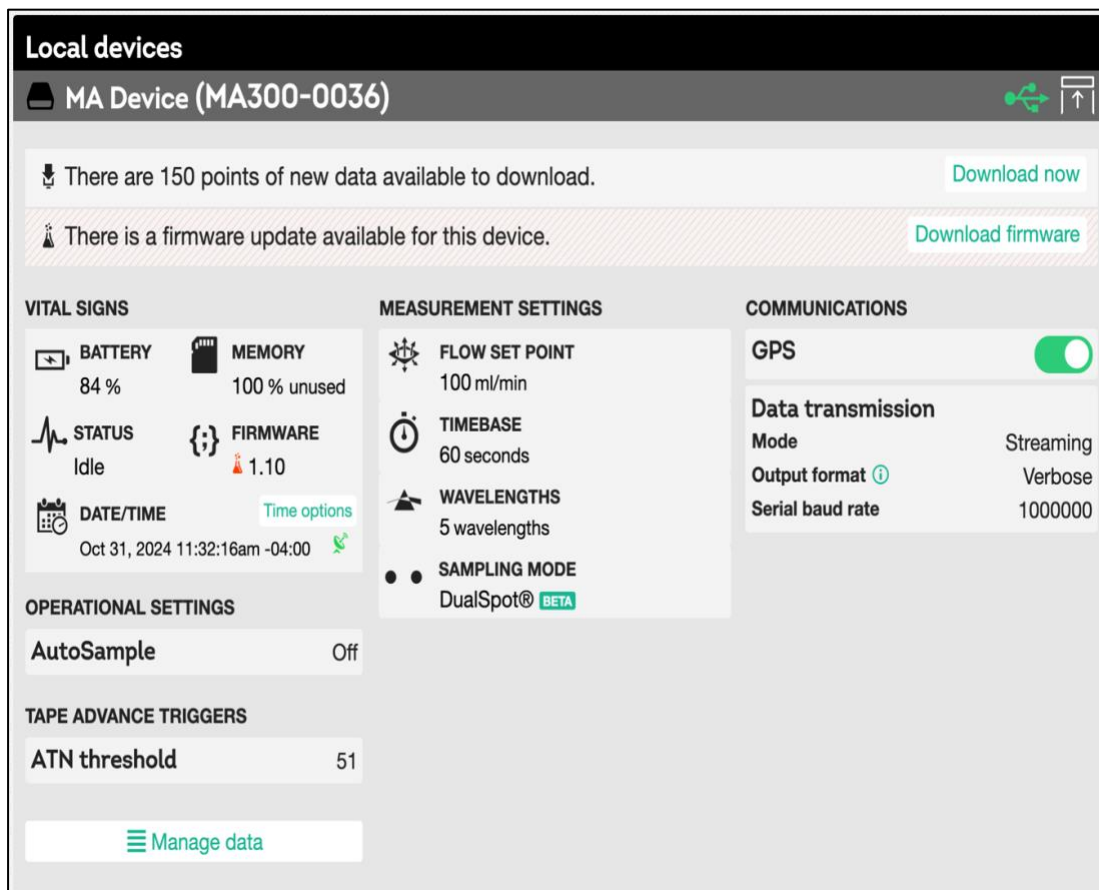


Figura 32: Interfaz microAeth Manager conectado al equipo MA300 utilizado junto con datos para descargar luego de una toma de datos.

4.1.3. Dashboard Aethlabs

Para el procesamiento de datos, se utiliza el Dashboard de la marca Aethlabs. Con esta herramienta se pueden graficar los datos fácilmente e identificar puntos críticos de la medición. Para su utilización se suben los archivos obtenidos y se seleccionan la información que se considere adecuada para cada estudio. En la siguiente figura se observa todos los puntos que se deben seleccionar para su procesamiento.

Dashboard Add data file My account Log out

AETHLABS

About Products Support Request quote Search

Upload data files

Add a new file

Seleccionar archivos | ningún archivo seleccionado **Upload**

Files must be less than **100 MB**.

Allowed file types: **dat csv**.

Multiple files will be separated into individual instances upon submission.

⚠ Excel and spreadsheet users, please read

▾ **Flagging**

Flag data points with status errors

Status errors are recorded while the measurement happens on the instrument. These errors can indicate several different things, including errors in the measurement.

Boundary points with a deviation above twice the average

Data points at the beginning or end of a file which have a BC value deviation of over twice the average deviation for the file.

Hide flagged data points in the post-processed dataset and analytics

If checked, this option will hide the flagged data points in the post-processed dataset and analytics.

▾ **Smoothing**

Smoothing type

- None -

Please choose the type of smoothing algorithm to use.

▾ **Visualization**

Show raw attenuation data

Checking this option provides a separate visualization of the raw attenuation values along side the post-processed data series.

Figura 33: Interfaz previa para la utilización del Dashboard.

Luego de subir los archivos a la nube y seleccionar las características necesarias para el procesamiento según el estudio, se da inicio al Dashboard el cual entrega los resultados tal como lo muestran las siguientes figuras.

En la figura 20 se observa la gráfica entregada por el sistema. En el eje vertical se encuentra la concentración de BC y en el eje horizontal se observa la fecha y horario de cada uno de los puntos de medición adquiridos. Como se puede observar, se encuentran las 5 longitudes de onda que el equipo puede registrar.

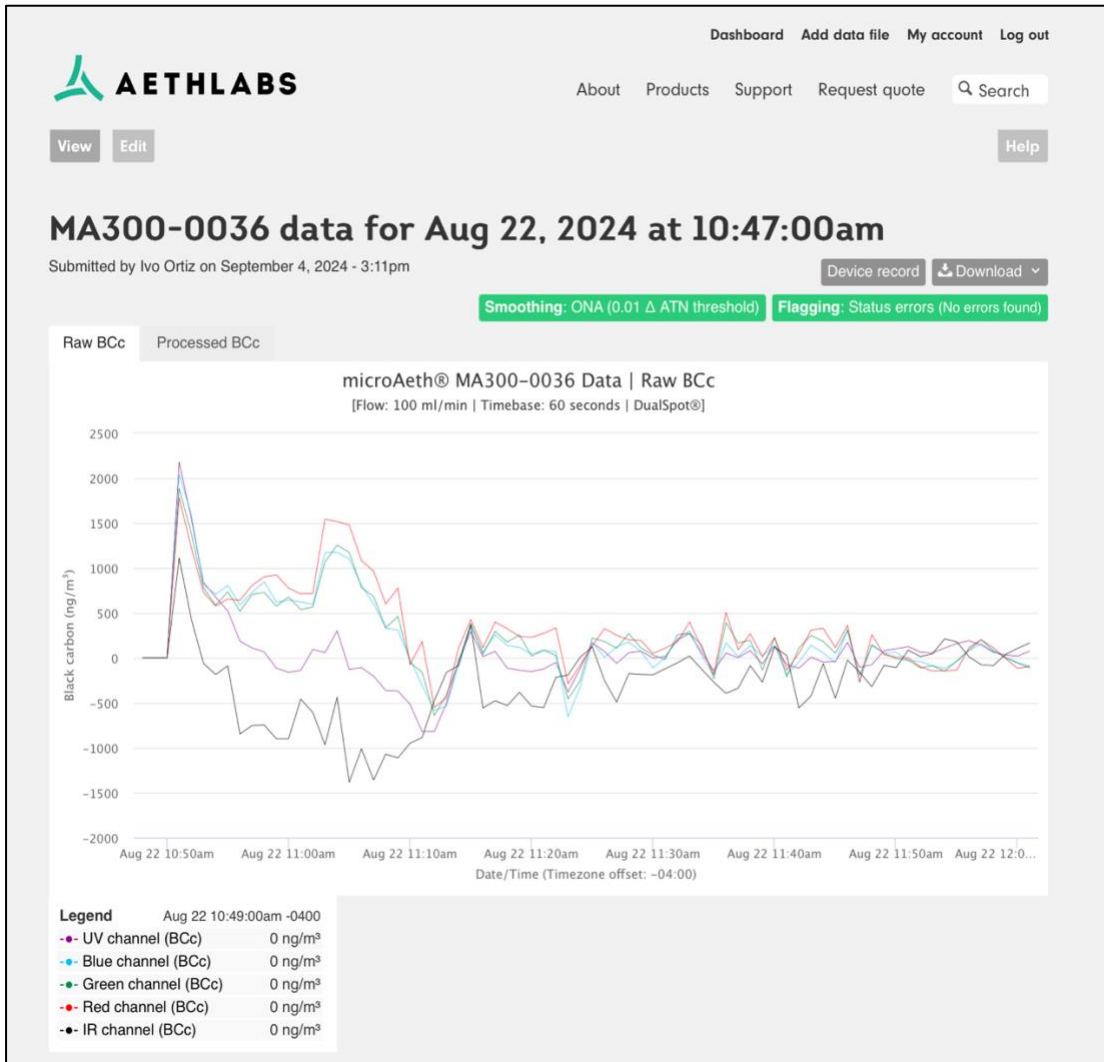


Figura 34: Gráfica entregada por el Dashboard para cada una de las longitudes de onda.

Más abajo en la misma sección, se observan algunos datos importantes de las mediciones como lo es la configuración en que se estableció al equipo para la toma de muestras como también el promedio de concentración de los datos adquiridos, entre otros.

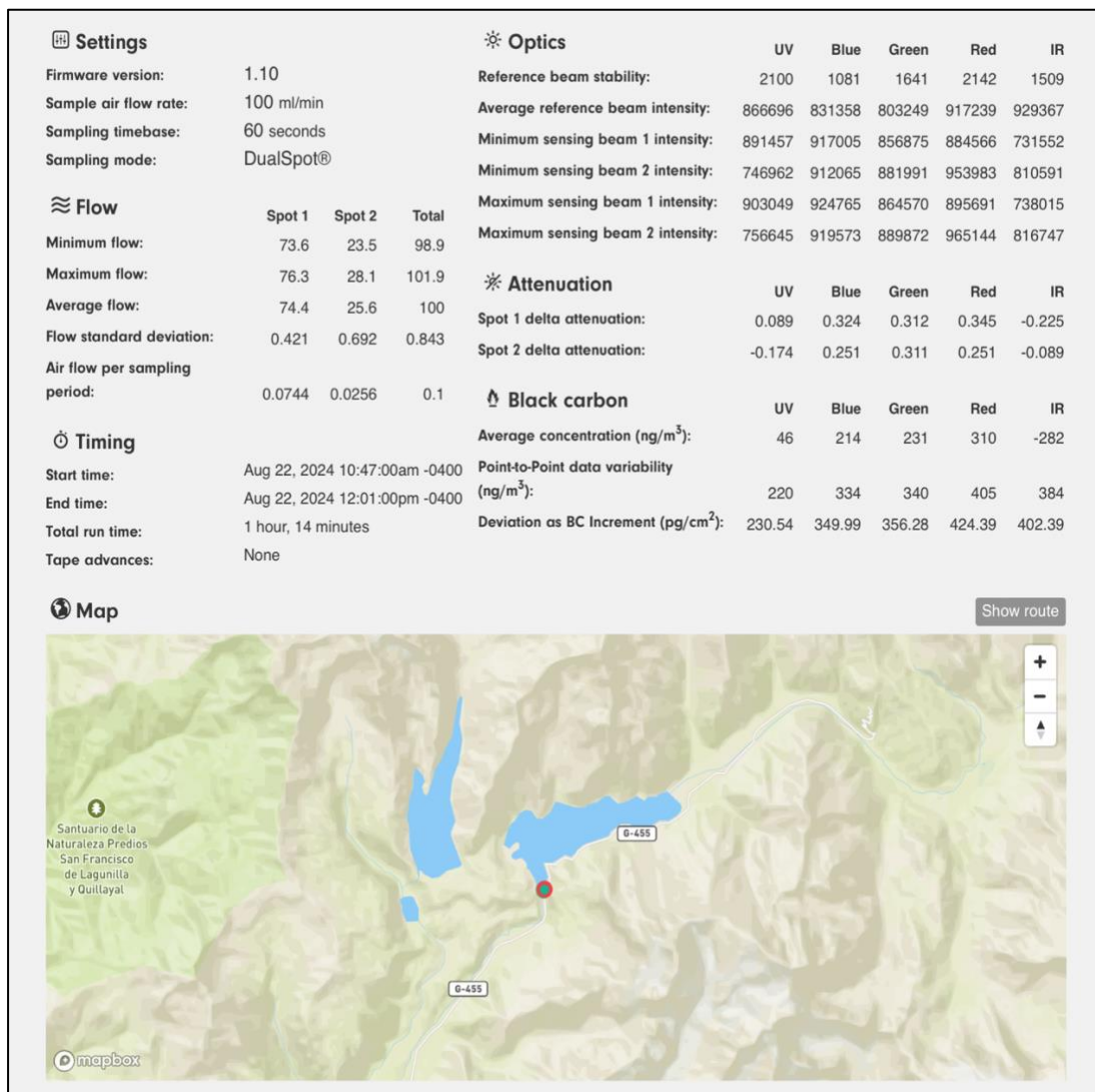


Figura 35: Datos entregados por el Dashboard post procesamiento.

La toma de datos se realizan en 3 distintos lugares geográficos, los cuales son:

- Embalse el Yeso
- Portillo
- Santiago centro

Para estas tres zonas geográficas se realiza la campaña con la misma configuración del equipo de medición lo cual se observa en la tabla 27.

Tabla 26: Configuración utilizada en equipo de medición.

Tipo de configuración	Configuración utilizada
Flujo de aire de la muestra	100 ml/min
Base de tiempo de muestreo	60 segundos
Modo de muestreo	DualSpot

Estas características se seleccionan para obtener datos con menos ruido ambiental, en el caso de la base de tiempo se selecciona 60 y no 300 segundos debido a que algunas mediciones se realizan en movimiento sobre un vehículo por lo cual se tendría mucha distancia entre cada dato de la medición con el tiempo de 300 segundos.

4.1.4. Embalse el Yeso

En este primer lugar se realizan tres mediciones en distintos lugares y situaciones.

El primer punto de medición se realiza en la entrada al embalse a un costado del acceso vehicular. En este punto se ayuda al equipo multidisciplinario a realizar sus tareas de toma de muestras mientras el equipo de medición de carbono negro se encuentra tomando sus datos en el mismo lugar siempre.

En el segundo punto de medición se realiza el mismo procedimiento, solo cambia el punto de instalación del equipo, el cual se encuentra por otra esquina del embalse. Este punto se encuentra más alejado del acceso vehicular respecto del primer punto

Por último, se toma la decisión de realizar toma de datos con el equipo dentro del vehículo de acercamiento. El equipo se instala a tomar datos desde la salida del embalse el yeso hasta el pueblo de San José de Maipo. Esta medición comienza en un lugar donde prácticamente no hay ningún auto, lo cual va cambiando a medida que se acerca al pueblo y en cada momento la presencia vehicular aumenta.

4.1.5. Portillo

En este segundo lugar de trabajo se realizan tres mediciones distintas

El primer punto se realiza desde un centro de servicio que se encuentra antes de empezar el “caracol” para llegar a portillo hasta el centro de ski Portillo. Esta subida se realiza a baja velocidad ya que en gran parte del recorrido se avanza detrás de un camión.

En segundo lugar se realiza una toma de datos a un costado del centro de ski. Esta medición se realiza de forma estática, es decir, el equipo se instala y no se mueve hasta finalizar la estadía en este lugar. A diferencia del embalse el Yeso, este punto se encuentra a un costado de la ruta los libertadores, en donde circula una gran cantidad de camiones y otro tipo de vehículos.

Por último se realiza una medición desde el centro de ski hasta el mismo punto de la estación de servicios, la diferencia con el primer punto de medición es que al estar en bajada, esta se realiza más rápido que la subida.

4.1.6. Santiago Centro

En este lugar se participa en el día nacional sin autos, por lo que se utiliza esta actividad para obtener 2 puntos de medición

La primera medición se realiza antes de la actividad del día nacional sin autos, esta se realiza en la intersección de las calles Bandera con Agustinas. El estado de la intersección en este día es con un alto flujo de vehículos como es cotidianamente en estas calles.

Por otra parte, la segunda medición se realiza el día nacional sin autos, que en su particularidad no hay flujo vehicular en la calle agustinas y en todas sus intersecciones. Ambas mediciones se realizan en un lugar estático.

4.2. Resultados

Los resultados representan las concentraciones de carbono negro en distintos ambientes. El primero (Embalse el Yeso) sin fuentes cercanas de emisión de carbono negro, el segundo (Portillo) donde la principal fuente de emisión de carbono negro son los vehículos que circulan por el paso los libertadores, siendo en su mayoría camiones y por último (Santiago) en donde las fuentes no son solo vehículos, sino que también industrias, tabaco, entre otras. Estos resultados son presentados gráficamente para una mejor visualización y con una tabla complementaria con mayor información para cada uno de ellos.

4.2.1. Embalse el Yeso

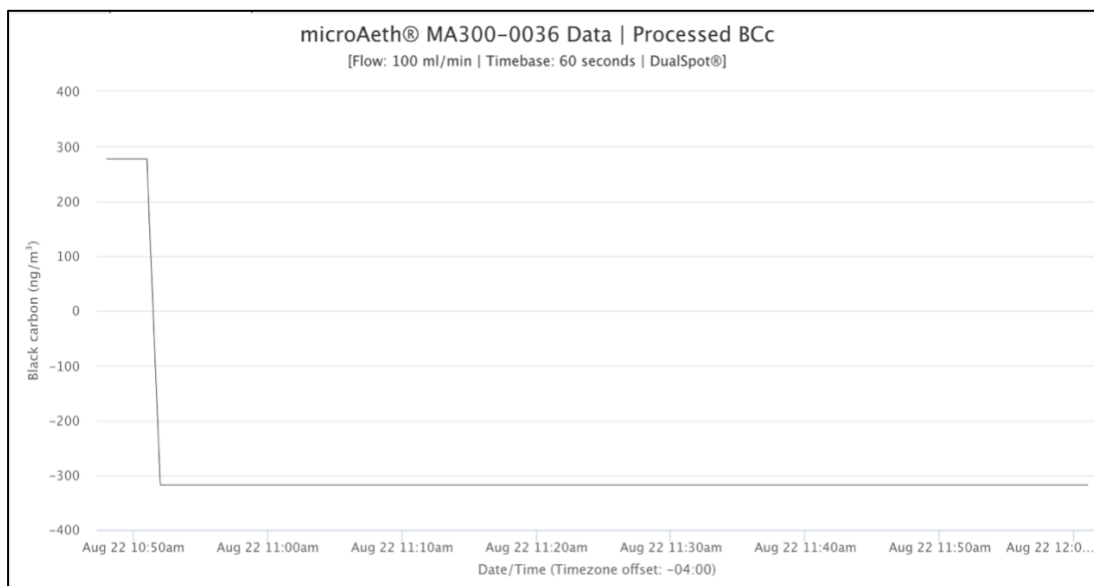


Figura 36: Concentración de BC primer punto de medición en el Embalse el Yeso.

Tabla 27: Datos críticos de medición punto 1.

Concentración más alta	<i>277 ng/m³</i>
Concentración más baja	<i>-318 ng/m³</i>

Promedio de datos	-282 ng/m^3
--------------------------	---------------------------------

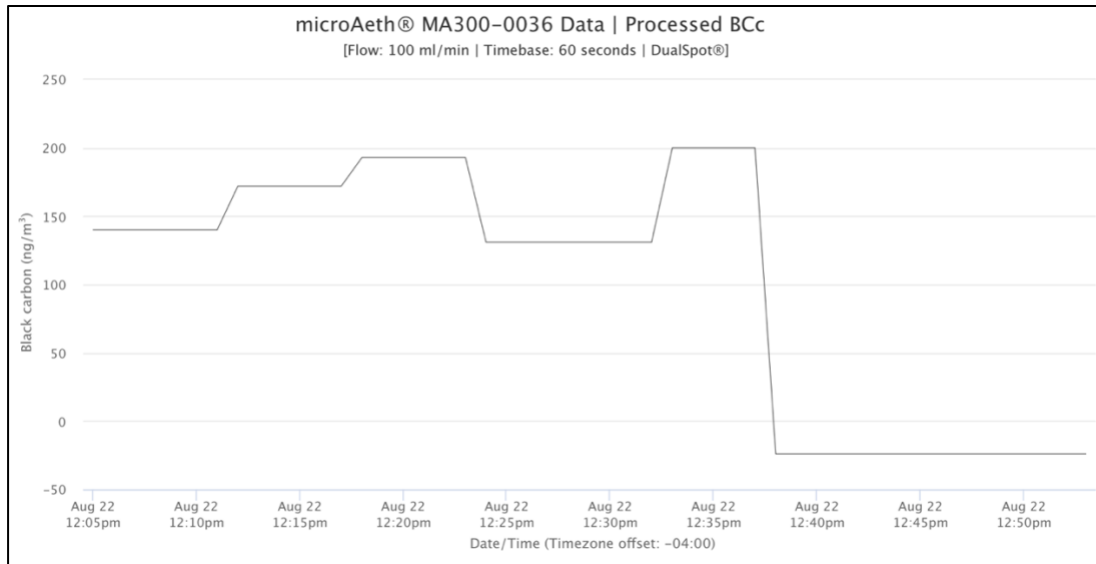


Figura 37: Concentración de BC segundo punto de medición en el Embalse el Yeso.

Tabla 28: Datos críticos de medición punto 2.

Concentración más alta	200 ng/m^3
Concentración más baja	-24 ng/m^3
Promedio de datos	99 ng/m^3

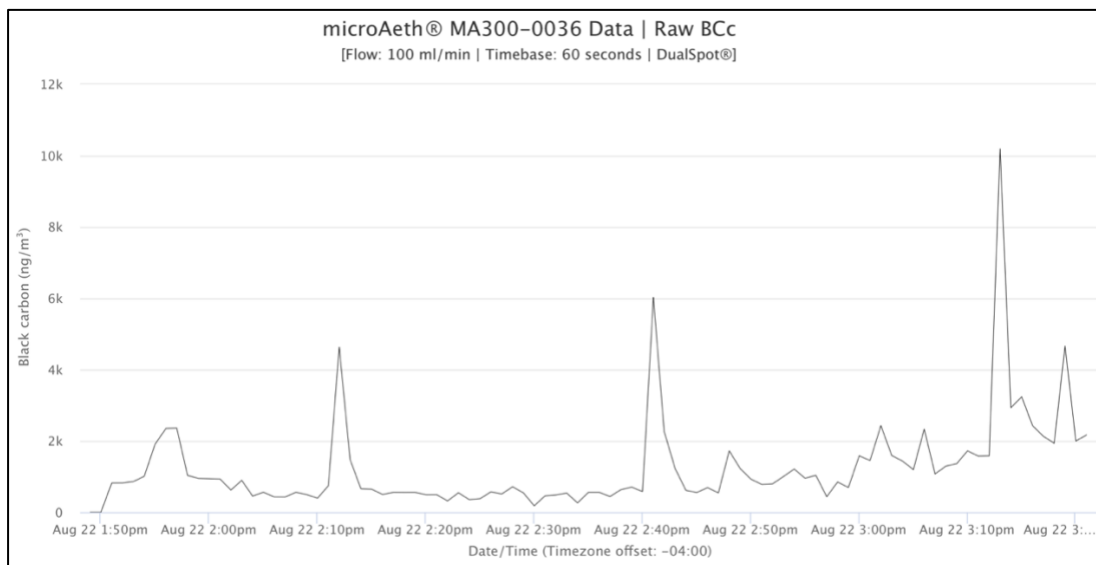


Figura 38: Concentración de BC inicio en Embalse el Yeso termino en pueblo San José de Maipo.

Tabla 29: Puntos críticos de medición trayecto El Yeso-San José de Maipo.

Concentración más alta	10191 ng/m^3
Concentración más baja	179 ng/m^3
Promedio de datos	1225 ng/m^3

En el primer punto de medición se obtienen altos datos al comienzo de la medición, lo cual se atribuye a que es el momento más próximo al movimiento de la camioneta tanto del equipo de trabajo como de los trabajadores del embalse. Luego cae bajo cero, lo que físicamente no es posible, esto puede tener sus causas en el lugar y las condiciones ambientales en las que se realiza esta campaña de medición, ya que se realiza a 2500 metros sobre el nivel del mar y a una temperatura que por momentos fue $-7^{\circ}[C]$.

Lo mismo acontece con el punto 2 que también tiene muchos valores bajo el cero, a diferencia del primero es que toma mediciones más altas ya sea por la proximidad de la toma de datos al funcionamiento de la camioneta y al alza del viento en ese momento que permite viajar a las partículas de carbono negro de los automóviles de los turistas que al pasar las horas incrementaron.

En el punto 3 de medición se observa que la concentración aumenta con creces respecto a los dos anteriores, esto se debe a que se comenzó a tomar datos desde el embalse el Yeso hasta el pueblo de San José de Maipo, en donde al salir del embalse y avanzar por el primer camino ya se comenzó a interactuar con vehículos y por ende fuentes de emisión de carbono negro. En la figura 35 se observa que hay un incremento de concentración del contaminante a medida que se acerca al pueblo y tiene picos asociados a que se avanzó por algunos minutos tras camiones que transportaban alguna carga.

El equipo en el punto 3 al encontrarse con fuentes de emisión de carbono negro y cada vez a una condición ambiental que está dentro del parámetro de funcionamiento tiene una mayor captación de material particulado.

4.2.2. Portillo

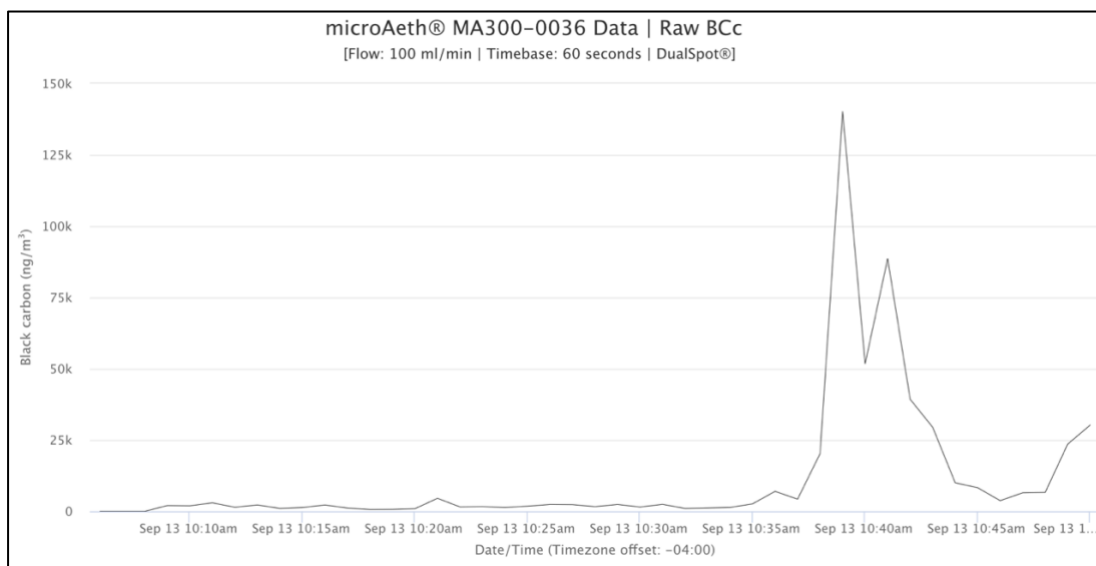


Figura 39: Concentración de BC desde estación de servicio hasta centro de ski Portillo.

Tabla 30: Puntos críticos de medición trayecto estación de servicio-Portillo.

Concentración más alta	140201 ng/m^3
Concentración más baja	638 ng/m^3
Promedio de datos	11224 ng/m^3

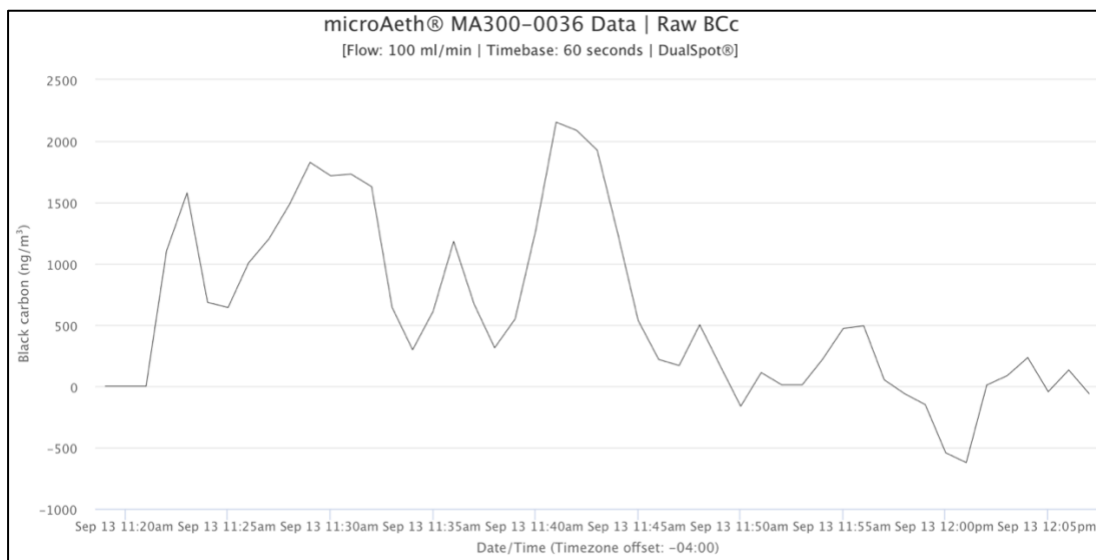


Figura 40: Concentración de BC en Portillo.

Tabla 31: Puntos críticos de medición en Portillo.

Concentración más alta	2154 ng/m^3
Concentración más baja	-623 ng/m^3
Promedio de datos	586 ng/m^3

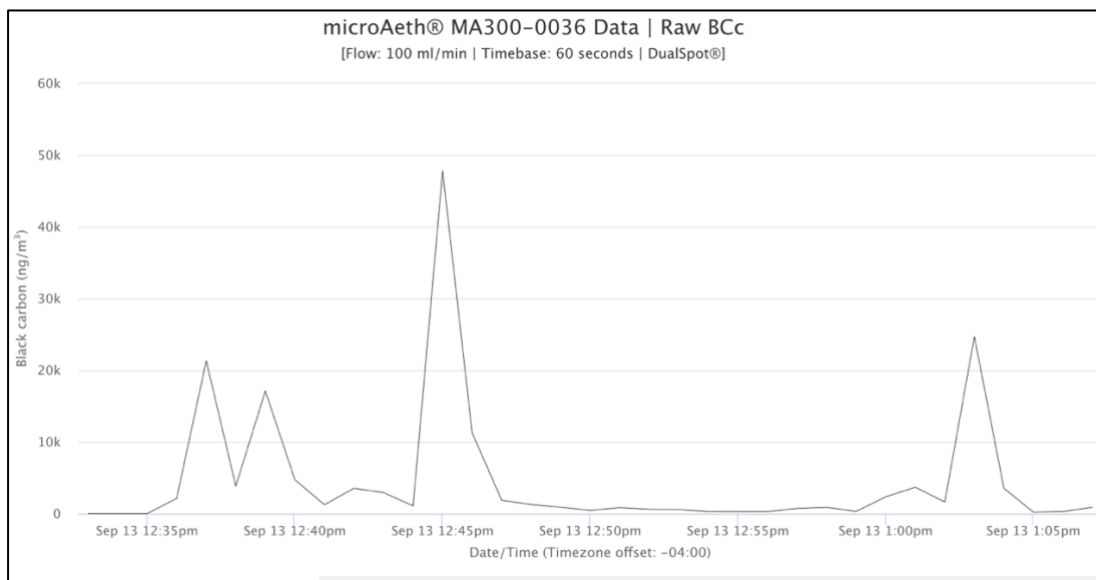


Figura 41: Concentración de BC desde centro de ski Portillo hasta estación de servicios.

Tabla 32: Puntos críticos de medición Portillo-estación de servicio.

Concentración más alta	47783 ng/m^3
Concentración más baja	203 ng/m^3
Promedio de datos	1225 ng/m^3

En el punto de medición desde la estación de servicios hasta el centro de ski Portillo, se puede observar en la figura 36 que las concentraciones de carbono negro varían frecuentemente destacando su valor más bajo que es de 638 ng/m^3 lo cual es casi tres veces más que los valores máximos obtenidos alrededor del embalse el Yeso. Otro punto a destacar es que durante el trayecto hacía el centro de ski avanzando por el caracol previo a este se encuentran los puntos más altos de concentración de carbono negro, lo cual se atribuye directamente a que se avanzaba lentamente detrás de camiones con carga durante mucho tiempo. El promedio de datos de esta medición también tiene una gran elevación respecto a los promedios de las otras campañas de medición.

En la medición realizada en el centro de ski Portillo, se observa en la figura 37 que la concentración de carbono negro es muy variado en el tiempo. Esta medición se realizó al costado de la ruta por lo que no se estaba directamente cerca de las fuentes de emisión. Junto a lo anterior es importante considerar que se realizó la medición a una altura cercana a los 3000 metros sobre el nivel del mar y a una temperatura bajo cero por lo que las mediciones en este lugar tal como en el embalse el Yeso pueden tener variaciones por esta causa.

Finalmente en la medición realizada desde el centro de ski hasta la estación de servicios, se observa que a pesar de ser el mismo trayecto recorrido las concentraciones resultan ser mucho menores a los valores de subida, esto se asocia principalmente que en bajada los camiones tienen menor esfuerzo y por ende menor consumo de combustible como también que en los momentos en que la chofer se encontraba tras un camión rápidamente se adelantaba por lo que no se estuvo mucho tiempo detrás de una fuente directa de carbono negro. Respecto al promedio de datos de esta medición es casi 10 veces menor que la medición hacia el centro de ski.

4.2.3. Santiago centro

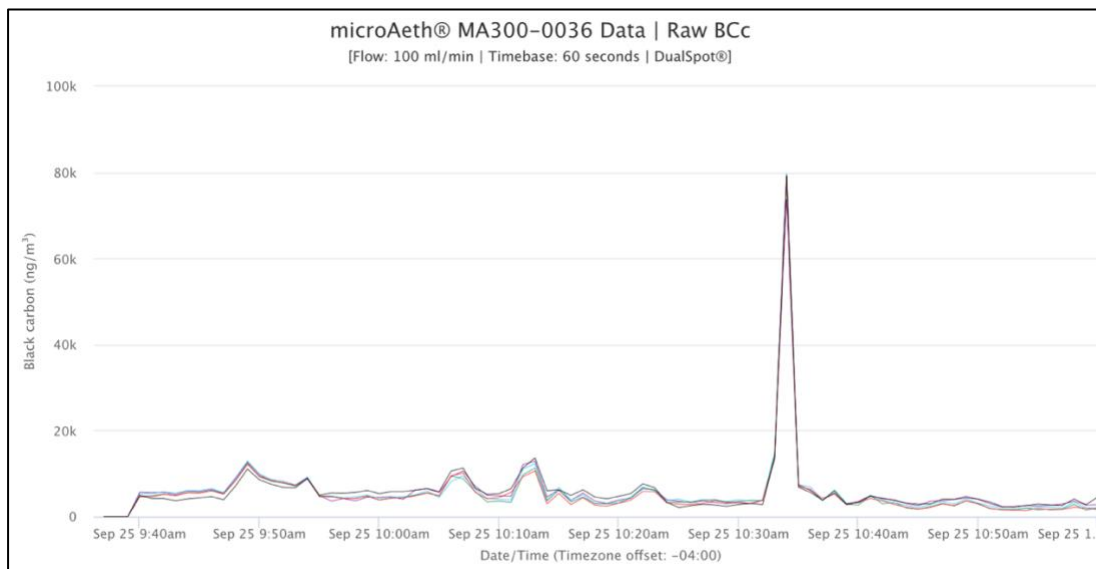


Figura 42: Concentración de BC en Agustinas con Bandera previo al día nacional sin autos.

Tabla 33: Puntos críticos de medición previo al día nacional sin autos.

Concentración más alta	79219 ng/m^3
Concentración más baja	2132 ng/m^3
Promedio de datos	5828 ng/m^3

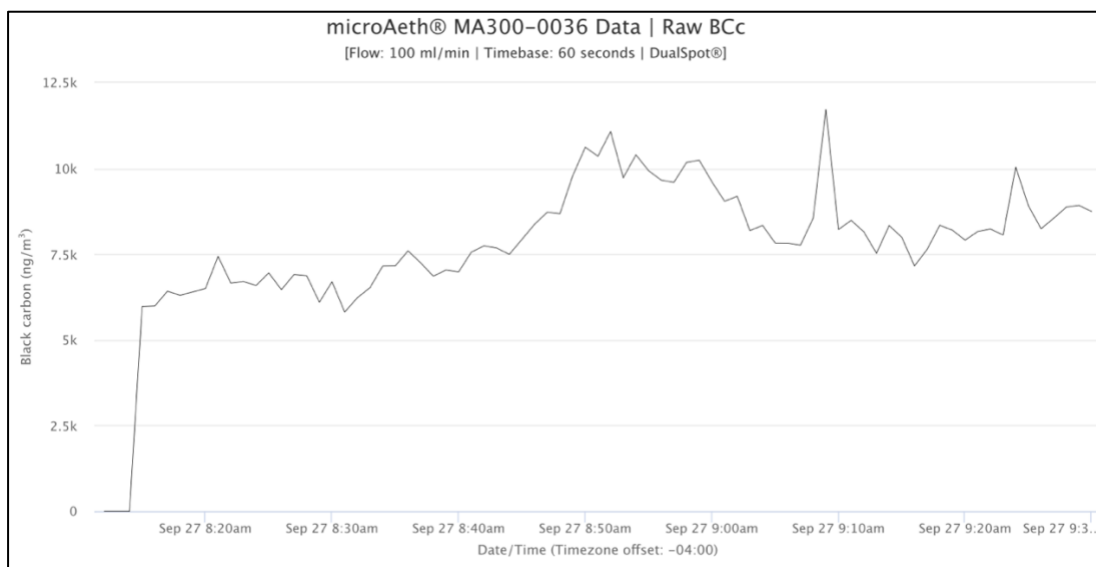


Figura 43: Concentración de BC durante el día nacional sin autos, en la intersección de Agustinas con Bandera.

Tabla 34: Puntos críticos de medición día nacional sin autos.

Concentración más alta	11718 ng/m^3
Concentración más baja	5810 ng/m^3
Promedio de datos	7649 ng/m^3

Para el caso de Santiago se realiza la medición en el mismo lugar con dos contextos distintos. En la primera medición se tiene una medición con datos que fluctúan en el tiempo resaltando la máxima concentración obtenida que es de 79219 ng/m^3 , en este caso se relaciona este valor a la estadia por un tiempo de un vehículo liviano comercial frente al equipo de medición.

En la segunda medición realizada, se observa una toma de datos que si bien fluctúa en el tiempo, no tiene picos tan elevados como lo fueron las anteriores mediciones, esto se debe a que el equipo no se encontraba cercano a una fuente de emisión de carbono negro.

Comparando ambas mediciones se observa un alza en el promedio de los datos del segundo punto respecto del primero. Si bien en el segundo día de mediciones no se encuentran vehículos cerca del equipo de medición, al estar en ciudad no solo se tiene a los vehículos como fuente de emisión de carbono negro sino que hay diversas fuentes. También se considera que el carbono negro se emite y se mantiene en la atmósfera un período de tiempo mayor a un día y que a pesar que estuviera cerrada la cuadra, los vehículos si circulaban en las calles aledañas a esta, por lo que no necesariamente en estas condiciones la concentración debiera ser menor.

Capítulo 5

5. Conclusiones

Se logró evaluar los distintos métodos de medición de carbono negro a través de una revisión bibliográfica, en donde destaca la utilización del método óptico y se estima el carbono negro generado por vehículos motorizados en territorio nacional para el año 2023.

Se determinan los factores de emisión de carbono negro para las distintas categorías vehiculares bajo distintos contextos de manejo, como lo es el urbano y el interurbano, dentro de estos factores de emisión destacan los vehículos livianos diésel comercial con EURO 0 de 0.167 [g/km], EURO I 0.108 [g/km], EURO II 0.124 [g/km], EURO III 0.075 [g/km], EURO IV 0.037 [g/km], EURO V y EURO VI de 0.00003 [g/km] en el ámbito urbano, para el caso interurbano destacan los camiones pesados con factores de emisión de 0.400 [g/km], 0.417 [g/km], 0.198 [g/km], 0,206 [g/km], 0,049 [g/km], 0,132 [g/km] y 0.003 [g/km] para cada EURO respectivamente.

Se actualizó el inventario nacional de emisiones de carbono negro para el territorio nacional dando como resultado 1387 toneladas en el año 2023, lo cual representa un aumento del 19% respecto al 1990 pero una disminución a la mitad respecto al año 2007 lo que sugiere una disminución significativa cada vez que las normas vehiculares son más estrictas. Además la desagregación espacial permite observar que en las autopistas y sus alrededores es donde hay mayor concentración de carbono negro debido a la cantidad de vehículos diésel que transitan por estas vías.

Se realiza una campaña de medición en el centro de Santiago, centro de ski Portillo y embalse el Yeso, en donde Santiago tiene como fuente de emisión de carbono negro a vehículos motorizados, industrias, entre otras. Portillo con fuente de emisión a los vehículos motorizados y el Yeso sin estas fuentes cercanas. Santiago obtuvo un promedio de concentraciones de 7649 [ng/m^3], Portillo de 586 [ng/m^3] y el Yeso de 99 [ng/m^3].

Recomendaciones

En este estudio no se consideran los vehículos motorizados utilizados en la agricultura, si bien no son una gran cantidad de vehículos en comparación a otras categorías vehiculares, la mayoría es a combustible diésel, por lo que debe tener un impacto medio en las emisiones de carbono negro en las regiones que se caracterizan en tener una gran actividad agrícola.

Cada vez que se actualizan las normas vehiculares en el país, la flota vehicular se va actualizando históricamente, lo cual permite que las emisiones del carbono negro cada año tienda a la baja lo cual es muy positivo. Sin embargo, dentro de la cultura de los dueños de vehículos particulares existe una práctica perjudicial para las emisiones de carbono negro que es la extracción del DPF una vez que este se encuentra saturado. Lo anterior le quita uno de los requisitos al vehículo para cumplir con las normas medioambientales vigentes, por lo que se recomienda que en cada planta de revisión técnica se utilice algún equipo que permita contar el número de partículas emanadas por el tubo de escape y así verificar si el vehículo contiene el filtro mencionado anteriormente, lo que obligaría al conductor a instalarlo y no volver a removerlo para lograr su permiso de circulación. Otro punto importante, es entregar la información de las consecuencias ambientales que tiene no cumplir con las normas vehiculares vigentes.

Se recomienda utilizar el transporte público con especial foco en los puntos donde se observa mayor concentración de carbono negro en la desagregación espacial y así no incrementar el flujo vehicular en estas zonas permitiendo que las concentraciones bajen cada año.

Las autoridades con la desagregación espacial pueden tomar decisiones para disminuir las concentraciones, ya sea con la implementación de nuevas líneas de buses en estas zonas para el traslado de pasajeros, nuevas líneas de metro, construcción de ciclovías, cambio de tecnología en el transporte público aumentando la flota eléctrica y utilizando las nuevas tecnologías disponibles.

Con respecto a los programas utilizados para los FE, actividad vehicular, cálculo de emisiones y desagregación es fundamental mantener actualizado los documentos que este procesa, entre los que destaca la actualización de los shapefiles de ruta urbana entregando una nueva definición a cada comuna del país dependiendo su cantidad de habitantes, lo cual se realizó con las estadísticas del censo 2017, es importante realizar esta actualización cuando los datos del censo 2023 se encuentren disponibles.

Se recomienda estudiar cómo se comportan las partículas de carbono negro emitidas por vehículos motorizados, considerando la reacción que estas tienen con otros elementos que se encuentran en el ambiente y como se alteran sus propiedades tanto físicas como químicas que permitan a los usuarios de equipos de medición poder seleccionar el método que mejor se adapte para las campañas que se realizarán

Finalmente, se recomienda darle la importancia necesaria a las emisiones de carbono negro, ya sea incluyendo valores en los reportes de calidad de aire de las ciudades, informando a las personas sobre este contaminante y su impacto climático.

6. Bibliografía

- [1] Ministerio del Medio Ambiente, “Informe del Inventario Nacional de Chile 2022: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2020,” Santiago, 2023.
- [2] A. Borsese and S. Esteban, “Química, educación ambiental y vida cotidiana: el ozono troposférico,” *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas*, vol. 23, no. 2, pp. 251–262, Jan. 2005, doi: 10.5565/REV/ENSCIENCIAS.3846.
- [3] T. C. Z. A. B. K. P. A. R. A. Q. V. N. T. G. M. N. A. Ortúzar F, “Contaminantes Climáticos de Vida Corta: Situación actual y oportunidades para su disminución y control en Brasil, Chile y México.,” Mar. 2016.
- [4] I. Karakurt, G. Aydin, and K. Aydiner, “Sources and mitigation of methane emissions by sectors: A critical review,” *Renew Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 40–48, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.RENENE.2011.09.006.
- [5] L. , B. K. , T. S. , O. M. , H. N. , B. S. , B. J. , O. G. Gallardo, “Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile: Resumen para tomadores de decisión.,” Santiago, Jan. 2020.
- [6] S. Talukdar, M. Venkat Ratnam, V. Ravikiran, and R. Chakraborty, “Influence of Black Carbon Aerosol on the Atmospheric Instability,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 124, no. 10, pp. 5539–5554, May 2019, doi: 10.1029/2018JD029611.
- [7] “Inventario Nacional de Carbono Negro – SNI Chile.” Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://snichile.mma.gob.cl/inventario-nacional-de-carbono-negro/>
- [8] Ministerio del medio ambiente, “Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile: Actualización 2020.,” 2020.
- [9] M. Osses *et al.*, “High-resolution spatial-distribution maps of road transport exhaust emissions in Chile, 1990-2020,” *Earth Syst Sci Data*, vol. 14, no. 3, pp. 1359–1376, Mar. 2022, doi: 10.5194/essd-14-1359-2022.
- [10] G. Chen *et al.*, “An Aerosol Optical Module With Observation-Constrained Black Carbon Properties for Global Climate Models,” *J Adv Model Earth Syst*, vol. 15, no. 10, Oct. 2023, doi: 10.1029/2022MS003501.
- [11] T. C. Bond *et al.*, “Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, no. 11, pp. 5380–5552, Jun. 2013, doi: 10.1002/JGRD.50171.
- [12] D. Liu *et al.*, “Size distribution, mixing state and source apportionment of black carbon aerosol in London during winter time,” *Atmos Chem Phys*, vol. 14, no. 18, pp. 10061–10084, Sep. 2014, doi: 10.5194/ACP-14-10061-2014.

- [13] J. Li, M. Pósfai, P. V. Hobbs, and P. R. Buseck, “Individual aerosol particles from biomass burning in southern Africa: 2, Compositions and aging of inorganic particles,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 108, no. D13, p. 8484, Jul. 2003, doi: 10.1029/2002JD002310.
- [14] Z. Zhang, Y. Cheng, L. Liang, and J. Liu, “The Measurement of Atmospheric Black Carbon: A Review,” Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/toxics11120975.
- [15] P. Quincey, D. Butterfield, D. Green, M. Coyle, and J. N. Cape, “An evaluation of measurement methods for organic, elemental and black carbon in ambient air monitoring sites,” *Atmos Environ*, vol. 43, no. 32, pp. 5085–5091, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.06.041.
- [16] A. L. Holder, G. S. W. Hagler, T. L. B. Yelverton, and M. D. Hays, “On-road black carbon instrument intercomparison and aerosol characteristics by driving environment,” *Atmos Environ*, vol. 88, pp. 183–191, May 2014, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.01.021.
- [17] J. F. Lamarque *et al.*, “Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application,” *Atmos Chem Phys*, vol. 10, no. 15, pp. 7017–7039, 2010, doi: 10.5194/ACP-10-7017-2010.
- [18] A. T. Lambe *et al.*, “Apportioning black carbon to sources using highly time-resolved ambient measurements of organic molecular markers in Pittsburgh,” *Atmos Environ*, vol. 43, no. 25, pp. 3941–3950, Aug. 2009, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2009.04.057.
- [19] E. Weingartner, H. Saathoff, M. Schnaiter, N. Streit, B. Bitnar, and U. Baltensperger, “Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers,” *J Aerosol Sci*, vol. 34, no. 10, pp. 1445–1463, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0021-8502(03)00359-8.
- [20] H. Li *et al.*, “Inter-comparison of black carbon measurement methods for simulated open biomass burning emissions,” *Atmos Environ*, vol. 206, pp. 156–169, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.03.010.
- [21] A. Petzold *et al.*, “Recommendations for reporting black carbon measurements,” *Atmos Chem Phys*, vol. 13, no. 16, pp. 8365–8379, 2013, doi: 10.5194/ACP-13-8365-2013.
- [22] D. A. Lack, H. Moosmüller, G. R. McMeeking, R. K. Chakrabarty, and D. Baumgardner, “Characterizing elemental, equivalent black, and refractory black carbon aerosol particles: A review of techniques, their limitations and uncertainties,” *Anal Bioanal Chem*, vol. 406, no. 1, pp. 99–122, Jan. 2014, doi: 10.1007/S00216-013-7402-3/TABLES/9.
- [23] T. C. Bond and R. W. Bergstrom, “Light Absorption by Carbonaceous Particles: An Investigative Review,” *Aerosol Science and Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 27–67, Jan. 2006, doi: 10.1080/02786820500421521.

- [24] K. A. Fuller, W. C. Malm, and S. M. Kreidenweis, “Effects of mixing on extinction by carbonaceous particles,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 104, no. D13, pp. 15941–15954, Jul. 1999, doi: 10.1029/1998JD100069.
- [25] M. Z. Jacobson, “A physically-based treatment of elemental carbon optics: Implications for global direct forcing of aerosols,” *Geophys Res Lett*, vol. 27, no. 2, pp. 217–220, Jan. 2000, doi: 10.1029/1999GL010968.
- [26] J. P. Schwarz *et al.*, “Single-particle measurements of midlatitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 111, no. D16, p. 16207, Aug. 2006, doi: 10.1029/2006JD007076.
- [27] B. Khan, M. D. Hays, C. Geron, and J. Jetter, “Differences in the OC/EC Ratios that Characterize Ambient and Source Aerosols due to Thermal-Optical Analysis,” *Aerosol Science and Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 127–137, Feb. 2012, doi: 10.1080/02786826.2011.609194.
- [28] T. C. Bond, T. L. Anderson, and D. Campbell, “Calibration and Intercomparison of Filter-Based Measurements of Visible Light Absorption by Aerosols,” *Aerosol Science & Technology*, vol. 30, no. 6, pp. 582–600, Jun. 1999, doi: 10.1080/027868299304435.
- [29] D. A. Lack *et al.*, “Bias in Filter-Based Aerosol Light Absorption Measurements Due to Organic Aerosol Loading: Evidence from Ambient Measurements,” *Aerosol Science and Technology*, vol. 42, no. 12, pp. 1033–1041, Oct. 2008, doi: 10.1080/02786820802389277.
- [30] C. Liousse, H. Cachier, and S. G. Jennings, “Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments: Variation of the specific attenuation cross-section, σ ,” *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, vol. 27, no. 8, pp. 1203–1211, Jun. 1993, doi: 10.1016/0960-1686(93)90246-U.
- [31] T. Müller *et al.*, “Characterization and intercomparison of aerosol absorption photometers: Result of two intercomparison workshops,” *Atmos Meas Tech*, vol. 4, no. 2, pp. 245–268, 2011, doi: 10.5194/AMT-4-245-2011.
- [32] D. M. Murphy, “The Effect of Water Evaporation on Photoacoustic Signals in Transition and Molecular Flow,” *Aerosol Science and Technology*, vol. 43, no. 4, pp. 356–363, Mar. 2009, doi: 10.1080/02786820802657392.
- [33] T. Ajtai *et al.*, “Inter-comparison of optical absorption coefficients of atmospheric aerosols determined by a multi-wavelength photoacoustic spectrometer and an Aethalometer under sub-urban wintry conditions,” *J Aerosol Sci*, vol. 42, no. 12, pp. 859–866, Dec. 2011, doi: 10.1016/J.JAEROSCI.2011.07.008.
- [34] C. H. Jeong, P. K. Hopke, E. Kim, and D. W. Lee, “The comparison between thermal-optical transmittance elemental carbon and Aethalometer black carbon measured at multiple monitoring sites,” *Atmos Environ*, vol. 38, no. 31, pp. 5193–5204, Oct. 2004, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2004.02.065.

- [35] R. Hitzenberger *et al.*, “Intercomparison of thermal and optical measurement methods for elemental carbon and black carbon at an urban location,” *Environ Sci Technol*, vol. 40, no. 20, pp. 6377–6383, Oct. 2006, doi: 10.1021/ES051228V/SUPPL_FILE/ES051228VSI20060614_083111.PDF.
- [36] W. P. Arnott, H. Moosmüller, C. F. Rogers, T. Jin, and R. Bruch, “Photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosol: instrument description,” *Atmos Environ*, vol. 33, no. 17, pp. 2845–2852, Aug. 1999, doi: 10.1016/S1352-2310(98)00361-6.
- [37] T. Nakayama, H. Suzuki, S. Kagamitani, Y. Ikeda, A. Uchiyama, and Y. Matsumi, “Characterization of a three wavelength photoacoustic soot spectrometer (Pass-3) and a photoacoustic extinctions meter (pax),” *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol. 93, no. 2, pp. 285–308, 2015, doi: 10.2151/jmsj.2015-016.
- [38] J. A. Ogren, J. Wendell, E. Andrews, and P. J. Sheridan, “Continuous light absorption photometer for long-Term studies,” *Atmos Meas Tech*, vol. 10, no. 12, pp. 4805–4818, Dec. 2017, doi: 10.5194/AMT-10-4805-2017.
- [39] “COPERT Methodology | COPERT.” Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://copert.emisia.com/copert/methodology/>
- [40] L. Ntziachristos, Z. Ning, M. D. Geller, R. J. Sheesley, J. J. Schauer, and C. Sioutas, “Fine, ultrafine and nanoparticle trace element compositions near a major freeway with a high heavy-duty diesel fraction,” *Atmos Environ*, vol. 41, no. 27, pp. 5684–5696, Sep. 2007, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2007.02.043.
- [41] Victor Valdebenito, “DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO A PARTIR DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO FINO EN VEHÍCULOS DIÉSEL,” Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, 2017.
- [42] Mauricio Jiménez, “MODELO DE CÁLCULO DE EMISIONES VEHICULARES CON DESAGREGACIÓN ESPACIAL PARA CHILE EN EL PERIODO 1990-2020,” Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, 2024.
- [43] T. C. Bond, D. G. Streets, K. F. Yarber, S. M. Nelson, J. H. Woo, and Z. Klimont, “A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 109, no. D14, p. 14203, Jul. 2004, doi: 10.1029/2003JD003697.
- [44] J. C. Chow, J. G. Watson, D. H. Lowenthal, L. W. A. Chen, and N. Motallebi, “Black and organic carbon emission inventories: Review and application to California,” *J Air Waste Manage Assoc*, vol. 60, no. 4, pp. 497–507, 2010, doi: 10.3155/1047-3289.60.4.497.
- [45] L. , M. G. , F. G. , & G. S. Ntziachristos, “Updates of the Guidebook Chapter on Road Transport,” 2007.
- [46] Z. S. Leonidas Ntziachristos, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – Update 2024,” *EEA (European Environment Agency)*, Jun. 2024.

- [47] “Permiso de circulación.” Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>
- [48] Aethlabs, “microAeth ® MA Series MA200, MA300, MA350 Operating Manual,” 2023. Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://aethlabs.com>